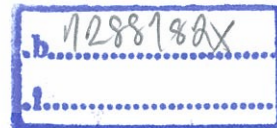


การสร้างชุดทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์  
FARADAY'S LAW OF INDUCTION EXPERIMENT SET



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การสร้างชุดทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์  
FARADAY'S LAW OF INDUCTION EXPERIMENT SET



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 149454  
วันเดือนปี ๒ 8 อ.ค. 2561

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2559 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# FARADAY'S LAW OF INDUCTION EXPERIMENT SET



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ACADEMIC YEAR 2016  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การสร้างชุดทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์  
Faraday's Law of Induction Experiment Set

ชื่อนักศึกษา นายพศวีร์ รุ่งฟ้า รหัสนักศึกษา 56051176

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

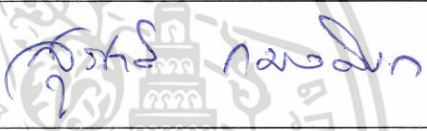


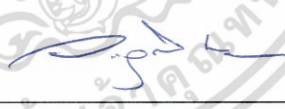

ภาควิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.) อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.สุรชาติ กมลดีลก ประธานกรรมการ	
ดร.พิศาล สุขวิสูตร กรรมการ	
ดร.ภาณุพล โขลกกระทอก กรรมการ	
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การสร้างชุดทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์
ชื่อนักศึกษา	นายพศวีร์ รุ่งฟ้า รหัสนักศึกษา 56051176
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง(สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.วราวุฒิ เถลัดดา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างชุดทดลองฟิสิกส์เรื่องกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์ การทดลองนี้เป็นการศึกษาปรากฏการณ์เหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าระหว่างวงจรมแม่เหล็กสองวงจรถึงเป็นขดลวดที่มีจำนวนรอบแตกต่างกัน ขนาด 200 รอบ, 400 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบและ 3,200 รอบ วงจรถึงสองเชื่อมโยงกันทางแม่เหล็กผ่านตัวกลางที่แตกต่างกัน ได้แก่ อากาศ แกนเหล็กอ่อนตรง แกนเหล็กอ่อนรูปตัวยูและแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี สำหรับแกนเหล็กรูปตัวยูและอีเมื่อมีแกนเหล็กอ่อนรูปตัวไอปิดจะมีโครงสร้างเป็นหม้อแปลงไฟฟ้า จากการทดลองพบว่า เมื่อป้อนแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 2 - 10 โวลต์ ให้แก่ขดลวดขดหนึ่ง โครงสร้างแกนที่ลักษณะเป็นวงปิดจะมีการสูญเสียของฟลักซ์แม่เหล็กน้อยกว่าโครงสร้างแบบเปิดทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดที่ สองสูงกว่าและโครงสร้างแกนแบบอี-ไอจะมีการเหนี่ยวนำสูงสุด

**คำสำคัญ :** สนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า ฟลักซ์แม่เหล็ก หม้อแปลง

Title	Faraday's Law of Induction Experiment-Set
Student	Mr. Phodsawee Rungfar Student ID 56051176
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang(KMITL)
Academic	2016
Adviser	Associate Professor Dr. Warawoot Thowladda
Co-adviser	Dr. S. Tipawan Khlayboonme

## Abstract

This special project is a development of faraday's law of induction experiment set. This experiment is a study of a electromagnetic induction between two magnetic circuits. The magnetic circuits consist of the coils with different turns: 200, 400, 800, 1600 and 3200 turns. Electromagnetic linkage between two circuits occurs in different media: air core, linear soft iron core, U-shape soft iron core and E-shape soft iron core. Core structures of U-shape and E-shape with end caps of soft iron are form the structures of a transformer. As an ac voltage source between 2 and 10 V are applied to a coil. The core structures of closed loop have a loss of magnetic flux lower than open loop. Induced emf in a second coil for the close loop core structure is higher than for the open loop structure and maximum induced emf occurs in E-I core structure.

**Keyword :** Electromagnetic field, Electromagnetic induction, Magnetic flux, Transformer.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความเมตตากรุณาเป็นอย่างยิ่งจาก รศ.ดร.วราวุฒิ เถาลัดดา อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ซึ่งให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางในการดำเนินการวิจัย รวมทั้งการที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เรียนรู้และได้รับประสบการณ์ในการทำงานเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการดำเนินชีวิตได้ในอนาคต ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับทุกๆ อย่างที่ได้เรียนรู้จากอาจารย์

ขอขอบคุณ ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี ผู้ช่วยแนะนำและคอยสนับสนุนให้ข้าพเจ้าได้ฝึกหัดทำงานวิจัยตั้งแต่เริ่มดำเนินงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่อัพ รวมทั้งเพื่อนๆ ในห้องวิจัย และผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยที่ไม่ได้เอ่ยชื่อทุกท่าน

สุดท้ายข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ของผู้ศึกษาวิจัยที่คอยให้ทุนทรัพย์ในการใช้จ่ายต่างๆ และยังคงคอยเป็นแรงผลักดันให้ผู้ศึกษาวิจัยมีกำลังใจในการทำโครงการพิเศษซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการศึกษาและทำโครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ไม่มากนักน้อย ข้าพเจ้าขออุทิศแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

พศวีร์ รุ่งฟ้า

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ช
คำย่อ/สัญลักษณ์	ซ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>2</b>
2.1 กฎบีโอดี-ซาวาร์ต (Biot-Savart Law)	2
2.2 กฎของฟาราเดย์และการเหนี่ยวนำ (Faraday's Law and Inductance)	7
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>20</b>
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย	23
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>25</b>
4.1 ทำการทดลองตอนที่ 1	25
4.2 ทำการทดลองตอนที่ 2	37
4.3 ทำการทดลองตอนที่ 3	41
4.4 ทำการทดลองตอนที่ 4	53
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>65</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>67</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>68</b>

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวนรอบเท่ากัน โดยที่วางขดลวดทั้งสองชิดกันในแกนอากาศ	26
4.2 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนตรง	27
4.3 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 10 mm.	28
4.4 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 20 mm.	29
4.5 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 30 mm.	31
4.6 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 40 mm.	32
4.7 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 50 mm.	33
4.8 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	37
4.9 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	39
4.10 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	39
4.11 วัดค่า $V_{out}$ ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	40
4.12 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	41
4.13 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบนแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	42

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.14 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	43
4.15 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	44
4.16 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	45
4.17 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	46
4.18 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	47
4.19 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	48
4.20 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	49
4.21 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	50
4.22 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	51
4.23 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	52
4.24 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	53

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	54
4.26 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	55
4.27 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	56
4.28 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	57
4.29 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	58
4.30 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	59
4.31 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	60
4.32 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)	61
4.33 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	62
4.34 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	63
4.35 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)	64

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 สนามแม่เหล็ก dB ที่มีกระแสไหลผ่านตามกฎบีโอดซ์ซาวารด์	3
2.2 ทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบๆเส้นลวดตรงที่มีกระแสไหลผ่านตามกฎมือขวา	5
2.3 ตัวนำรูปร่างแหวน สำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กที่จุด P ที่อยู่บนแนวแกนของวงแหวนปิดนำกระแส ตามลักษณะสมมาตรสนามแม่เหล็กรวมมีทิศทางในแนวแกนนี้	6
2.4 ตัวอย่างเส้นสนามแม่เหล็ก	
a) เส้นสนามแม่เหล็กรอบๆโลหะเป็นวงที่มีกระแสไหล	
b) การจัดเรียงตัวของผงตะไบเหล็กรอบแม่เหล็กที่มีกระแสไหล	
c) เส้นสนามแม่เหล็กโดยรอบแม่เหล็ก ซึ่งมีลักษณะเหมือน 4a)	7
2.5 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	
a) เมื่อแม่เหล็กเข้าหาขดลวดวงปิดที่ต่ออยู่กับ Galvanometer พบว่าเข็มของ Galvanometer เบนดังรูปแสดงให้เห็นว่าเกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นภายในเส้นลวด	
b) เมื่อแม่เหล็กหยุดนิ่งอยู่กับที่ พบว่าไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นภายในเส้นลวดวงปิด ถึงแม้ว่าแท่งเหล็กจะอยู่ภายในเส้นลวดวงปิดก็ตาม	
c) เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกห่างจากเส้นลวดวงปิด พบว่าเข็มของ Galvanometer เบนไปในทิศตรงข้ามกับตอนแรก แสดงให้เห็นว่าการเหนี่ยวนำในขดลวดวงปิดมีทิศการไหลตรงข้ามกับ รูปที่ a)	8
2.6 การทดลองของฟาราเดย์ เมื่อสวิตช์ในวงจรปฐมภูมิถูกปิด เข็มของ Galvanometer ในวงจรทุติยภูมิเกิดการเบี่ยงเบนชั่วขณะ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรทุติยภูมิเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กผ่านขดลวดทุติยภูมิ	9
2.7 ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กซึ่งผ่านส่วนย่อยของพื้นผิว $dA'$ ใดๆนั้นหาได้จาก $B \times dA' = B dA \cos \theta$ โดยที่ $dA'$ มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น	9
2.8 เส้นลวดตัวนำวงปิดใดๆซึ่งมีพื้นที่ A และวางตัวอยู่ใน สนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ B มุมระหว่างสนามแม่เหล็ก B กับเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับระนาบของวงปิดมีค่าเท่ากับ $\theta$	11
2.9 สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ	11
2.10 ขดลวด $L_1$ และ $L_2$ พันอยู่รอบแกนเหล็กอ่อน	14
2.11 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว	15
2.12 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า (a) และสัญลักษณ์ (b)	16
3.1 ภาพของขดลวดที่พันกับแกนแล้ว	21
3.2 แกนเหล็กอ่อนตรง	22
3.3 แกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู	22
3.4 แกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี	22
3.5 แกนเหล็กอ่อนรูปตัวไอ	22
3.6 วงจรหาค่า $V_{out}$	23
3.7 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ขัดกันในแกนอากาศ	23
3.8 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวตรง	24

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย	24
3.10 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี	24
3.11 วงจรหา % ประสิทธิภาพ	25
4.1 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ชิดกันในแกนอากาศ	26
4.2 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรง	27
4.3 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 10 mm.	28
4.4 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 20 mm.	29
4.5 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 30 mm.	30
4.6 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 40 mm.	32
4.7 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 50 mm.	33
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง V out กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ $V_{in} = 2 V$	34
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง V out กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ $V_{in} = 4 V$	34
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง V out กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ $V_{in} = 6 V$	35
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง V out กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ $V_{in} = 8 V$	35
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง V out กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่ $V_{in} = 10 V$	36
4.13 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย (เปิด)	37
4.14 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย	38
4.15 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)	39
4.16 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)	40
4.17 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย (เปิด)	41
4.18 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย (ปิด)	44
4.19 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)	47
4.20 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)	50
4.21 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย (เปิด)	53
4.22 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววาย (ปิด)	56
4.23 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)	59
4.24 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)	62

## คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ / สัญลักษณ์	คำอธิบาย
$r$	ระยะทางจากส่วนเล็กๆของเส้นไปยังจุด P
$\theta$	มุม
$\mu_0$	สภาพให้ซึมผ่านได้ของสุญญากาศ
$B$	สนามแม่เหล็ก
$\mu$	ขนาดโมเมนต์ของแม่เหล็ก
$\Phi_B$	ฟลักซ์แม่เหล็กร่วม
$\mathcal{E}$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
$L$	ความเหนี่ยวนำ
$H$	หน่วยของความเหนี่ยวนำ เรียกว่า เฮนรี
$N$	จำนวนรอบต่อหน่วยความยาว
$V$	ปริมาตรของโซเลนอยด์
$M$	ความเหนี่ยวนำร่วม
$K$	สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ
$V_p$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของปฐมภูมิ
$V_s$	แรงเคลื่อนไฟฟ้าของทุติยภูมิ
$\eta$	ประสิทธิภาพของหม้อแปลง
$A$	พื้นที่หน้าตัดของแกนแม่เหล็ก
$V_T$	จำนวนรอบต่อโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการนำหลักการของการเหนี่ยวนำไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้กับสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ในชีวิตประจำวันของมนุษย์เรามากมาย ซึ่งสิ่งประดิษฐ์เหล่านั้นถูกสร้างขึ้นมาจากหลักการพื้นฐานของขดลวดตัวนำเป็นส่วนใหญ่ และตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นมาปรับปรุงและพัฒนาให้เกิดประโยชน์สูงสุด

การทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการนำขดลวดมา 2 ขด โดยที่ขดลวดที่ 1 จะต่อเข้ากับตัวกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนขดที่ 2 จะต่อกับ Galvanometer เพื่อใช้วัดกระแสที่จะเกิดจากขดลวดที่ 2 จากนั้นเมื่อปล่อยไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปในขดลวดที่ 1 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่ขดลวดที่ 1 จากนั้นก็นำขดลวดที่ 1 และขดลวดที่ 2 มาเข้าใกล้กันสนามแม่เหล็กจะขดลวดที่ 1 จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดที่ 2 เป็นผลให้เกิดกระแสไหลในขดลวดที่ 2 และทำให้เข็มของ Galvanometer เกิดการเบี่ยงเบนชั่วขณะ การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดตัวนำโดยวิธีนี้ เรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าการเหนี่ยวนำ (induced emf) ซึ่งจะเกิดขึ้นเสมอในตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

โครงการพิเศษนี้เป็นการสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาการเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าตามกฎของฟาราเดย์ โดยให้ขดลวดทั้งสองมีจำนวนรอบที่แตกต่างกันและศึกษาการเชื่อมต่อกันทางสนามแม่เหล็กผ่านตัวกลางที่แตกต่างกันได้แก่ อากาศ เหล็กอ่อนที่โครงสร้างแตกต่างกัน เช่น เป็นแท่งยาว เป็นรูปตัวยู เป็นรูปตัววี รวมถึงโครงสร้างรูปตัวยูและอี่ที่มีแท่งเหล็กปิดให้เป็นวงปิด

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. สร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านตัวกลางที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. สร้างชุดขดลวดที่มีจำนวนขดลวดแตกต่างกัน
2. สร้างแกนโลหะตัวกลางที่มีรูปร่างแตกต่างกัน
3. ทดสอบการใช้งานของชุดทดลองที่สร้างขึ้น
4. เขียนคู่มือและทฤษฎีการทดลอง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดทดลองฟิสิกส์เรื่องกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์
2. นักศึกษาได้เรียนรู้และมีความเข้าใจเรื่องกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 กฎบีโตร์-ซาวาร์ต (Biot-Savart Law)

เนื่องด้วยแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุที่กำลังเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กและเส้นลวดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเมื่ออยู่ในสนามแม่เหล็กถูกกระทำโดยแรงแม่เหล็กกระทำต่อเส้นลวดเช่นกัน รวมทั้งการเกิดทอร์กกับวงจรมอเตอร์กระแสที่อยู่ภายใต้สนามแม่เหล็ก[1]



รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็ก dB ที่จุด P เกิดจากกระแส I ไหลผ่านส่วนย่อยของเส้นลวด ซึ่งเป็นไปตามกฎบีโตร์ซาวาร์ต โดยสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุด P จะพุ่งออกจากกระดาษในขณะที่สนามแม่เหล็กที่จุด P' จะพุ่งเข้า

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเกิดสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไฟฟ้าในเส้นลวด ในปี ค.ศ. 1819 Oersted ค้นพบว่า กระแสไฟฟ้าในเส้นลวดทำให้เข็มทิศที่อยู่ใกล้ๆ เบี่ยงเบนได้ นั่นคือกระแสไฟฟ้าทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก โดยการศึกษาแรงแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าในเส้นลวดที่กระทำต่อแม่เหล็กที่นำมาวางใกล้ๆ ในช่วงต้นของศตวรรษที่ 19, Jean-Baptiste Biot และ Felix Savart สามารถแสดงปริมาณของสนามแม่เหล็กที่จุดใดๆ ในเทอมของกระแสไฟฟ้าที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กนั้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้าไม่สามารถพิจารณาว่าเป็นจุดเหมือนจุดประจุได้ (เนื่องจากการไหลของประจุครบวงจรเท่านั้นจึงจะมีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้) จึงต้องพิจารณาสถาปัตยกรรมแม่เหล็กเล็กๆ ที่เกิดจากส่วนย่อยของกระแสในเส้นลวดทั้งหมด สมมติว่ากระแสในเส้นลวดมีค่าคงที่  $I$  ดังรูปที่ 2.1 กฎบีโตร์-ซาวาร์ตกล่าวว่า ส่วนของสนามแม่เหล็ก dB ที่จุด P เกิดจากกระแสในส่วนย่อยของเส้นลวดที่ยาว ds มีคุณสมบัติดังนี้

- เวกเตอร์ dB มีทิศทางตั้งฉากกับทั้ง ds (ซึ่งเป็นทิศทางของกระแส) และเวกเตอร์หนึ่งหน่วย r ซึ่งมีทิศทางจากส่วนเล็กๆ ของเส้นลวดไปยังจุด P
- ขนาดของ dB เป็นสัดส่วนผกผันกับ  $r^2$  เมื่อ r คือระยะทางจากส่วนเล็กๆ ของเส้นลวดไปยังจุด P
- ขนาดของ dB เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแส I และความยาว ds ของส่วนย่อยของเส้นลวด
- ขนาดของ dB เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $\sin \theta$  เมื่อ  $\theta$  คือมุมระหว่าง ds กับ r

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถเขียนเป็นกฎบิโอต์-ซาวาร์ตได้ในรูป

$$dB = k_m \frac{Ids \times r}{r^2} \quad (1)$$

เมื่อ  $k_m$  เป็นค่าคงที่ ในหน่วย SI จะมีค่าเป็น  $\frac{10^{-7}T \times m}{A}$  ค่าคงที่  $k_m$  นิยมเขียนในรูป  $\frac{\mu_0}{4\pi}$  เมื่อ  $\mu_0$  เป็นค่าคงที่เรียกว่า สภาพให้ซึมผ่านได้ของสุญญากาศ (permeability of space) [4]

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = k_m = \frac{10^{-7}T \times m}{A} \quad (2)$$

$$\mu_0 = 4\pi k_m = \frac{4\pi \times 10^{-7}T \times m}{A} \quad (3)$$

ดังนั้น กฎบิโอต์-ซาวาร์ต ในสมการ [1] สามารถเขียนได้ดังนี้

$$dB = \frac{\mu_0 Ids \times r}{4\pi r^2} \quad (4)$$

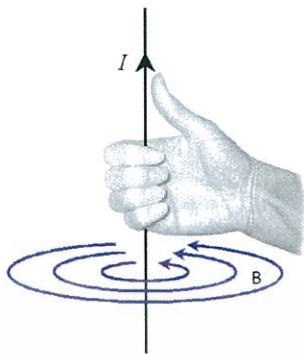
ในส่วนของสนามแม่เหล็กที่จุดซึ่งได้จากกฎบิโอต์-ซาวาร์ตข้างต้นนี้เกิดจาตส่วนเล็กๆของเส้นลวดที่มีกระแสกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน โดยมีผลคูณ  $Ids$  เป็น ส่วนย่อยของกระแส (current element) สนามแม่เหล็กรวมทั้งหมดที่จุดซึ่งเกิดจากกระแสในเส้นลวดทั้งเส้นหาได้จากการรวมสนามแม่เหล็กจากส่วนย่อยของกระแสทุกส่วนที่ประกอบเป็นเส้นลวดเข้าด้วยกัน นั่นคือการอินทิเกรตสมการ (4) ตลอดช่วงความยาวของเส้นลวดตัวนำ[2][3]

การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยกฎบิโอต์-ซาวาร์ตมีความคล้ายคลึงกับการคำนวณสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุที่กระจายตัวกัน โดยมีความแตกต่างกันอยู่ 2 ประการคือ สนามแม่เหล็กเกิดจากส่วนย่อยของกระแส  $Ids$  ในขณะที่สนามไฟฟ้าเกิดจากส่วนย่อยของประจุ  $dq$  โดยขนาดของสนามทั้ง 2 แปรผกผันกับกำลัง 2 ของระยะทางจากส่วนย่อยของกระแสหรือส่วนย่อยของประจุเหมือนกัน นอกเหนือจากนี้ ทิศทางของสนามทั้ง 2 มีความแตกต่างกันโดย สนามไฟฟ้าที่เกิดจากส่วนย่อยของประจุจะมีทิศทางในแนวรัศมี เช่น กรณีของจุดประจุบวกสนามไฟฟ้า  $E$  จะมีทิศทางพุ่งออกจากประจุ ในขณะที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากส่วนย่อยของกระแสจะตั้งฉากกับทั้งส่วนย่อยของกระแสและเวกเตอร์  $r$  ด้วยเหตุผลนี้ ถ้าเส้นลวดวางในระนาบของกระดาษดังรูปที่ 1 dB ที่จุด P จะมีทิศพุ่งออกจากกระดาษและที่จุด P' จะมีทิศพุ่งเข้า ความแตกต่างที่ 2 คือสนามไฟฟ้าอาจเกิดได้ทั้งจากประจุเดี่ยวหรือกลุ่มของประจุที่กระจายตัวอยู่ แต่สนามแม่เหล็กจากเส้นลวดเกิดขึ้นได้เมื่อมีกระแสในเส้นลวดเท่านั้น

จากรูปที่ 2.2 จะแสดงกฎมือขวาที่ใช้หาทิศทางของสนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสไฟฟ้า สังเกตว่าสนามแม่เหล็กเป็นวงปิดรอบเส้นลวดที่นำกระแส ในกรณีที่กระแสไหลในเส้นลวดที่ตรงและยาวเส้นสนามแม่เหล็กจะเป็นวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่เส้นลวดและอยู่ในระนาบที่ตั้งฉากกับเส้นลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ห้ามมิให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าเส้นลวดถูกกำด้วยมือขวาโดยมีนิ้วหัวแม่มือชี้ไปตามกระแส ทิศทางการวนของนิ้วทั้งสี่จะเป็น ทิศทางของสนามแม่เหล็ก B



รูปที่ 2.2 ทิศทางของสนามแม่เหล็กรอบๆเส้นลวดตรงที่มีกระแสไหลผ่านนั้นเป็นไปตามกฎมือขวา  
เส้นแรงของสนามแม่เหล็กมีลักษณะเป็นวงกลมล้อมรอบด้วยเส้นลวดตรงและ ขนาดของ  
สนามแม่เหล็กที่ระยะห่างจากเส้นลวด  $r$  มีค่าเป็นไปตามสมการ(5)

ถึงแม้ว่าสนามแม่เหล็กเนื่องจากเส้นลวดนำกระแสที่มีความยาวเป็นอนันต์จะคำนวณได้โดยกฎบี  
โอต์-ซาวาร์ต ในหัวข้อต่อไปจะแสดงให้เห็นว่ายังมีวิธีอื่นที่ใช้หาขนาดของสนามแม่เหล็กที่ระยะทาง  $r$   
จากเส้นลวด คือ

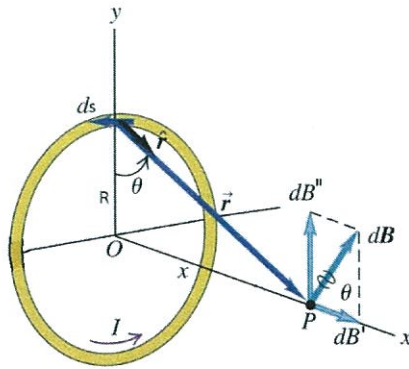
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (5)$$

หากให้ลองพิจารณาเส้นลวดวงกลมปิดรัศมี  $R$  ซึ่งวางในระนาบ  $yz$  มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน  $I$  ดัง  
รูปที่ 2.3 จะสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กที่จุดบนแนวแกนของวงกลม  $P$  ที่ระยะ  $x$  จากจุดศูนย์กลาง  
ของวงกลม เริ่มที่สังเกตทุกๆส่วนย่อยของเส้นลวด  $ds$  มีทิศตั้งฉากกับ  $r$  นอกจากนี้ ทุกๆส่วนย่อยของ  
วงกลมยังอยู่ห่าง  $r$  จากจุด  $P$  เท่ากันทั้งหมด เมื่อ  $r^2 = x^2 + R^2$  ด้วยเหตุนี้ ขนาดของ  $dB$  เนื่องจาก  
ส่วนย่อย  $ds$  คือ

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{|ds \times r|}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{ds}{(x^2 + R^2)} \quad (6)$$

สนามแม่เหล็ก  $dB$  เนื่องจากส่วนย่อย  $ds$  มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบที่ประกอบด้วย  $r$  และ  $ds$   
ดังรูปที่ 2.3 เวกเตอร์  $dB$  สามารถถูกแยกเป็นองค์ประกอบ  $dB'$ ตามแนวแกน  $x$  และองค์ประกอบ  
 $dB''$ ซึ่งตั้งฉากกับแกน  $x$  เมื่อรวมองค์ประกอบ  $dB''$  จากทุกส่วนย่อยรอบวงปิดเข้าด้วยกันจะได้  
ผลลัพธ์เป็นศูนย์เนื่องจากความสมมาตรขององค์ประกอบ  $dB''$  องค์ประกอบของสนามที่อยู่ตรงข้าม  
กันจะหักล้างกันหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ตัวนำรูปร่างวงแหวน สำหรับการคำนวณสนามแม่เหล็กที่จุด P ที่อยู่บนแนวแกนของวงแหวน ปิดนำกระแส ตามลักษณะสมมาตรสนามแม่เหล็กรวมมีทิศทางในแนวแกนนี้

ด้วยเหตุนี้ สนามแม่เหล็กรวมที่จุด P จึงมีทิศทางตามแนวแกน x มีขนาดที่หาได้โดยการอินทิเกรต  $dB'$  รอบวงปิด เมื่อ  $dB' = dB \cos \theta$  จะได้ว่า

$$B' = \int dB \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{ds \cos \theta}{x^2 + R^2}$$

เนื่องจาก  $\theta$ ,  $x$  และ  $R$  มีค่าเท่ากันสำหรับทุกๆ ส่วนย่อยของเส้นลวดและเนื่องจาก  $\cos \theta = \frac{R}{(x^2 + R^2)^{1/2}}$  จะได้ว่า

$$B' = \frac{\mu_0 I R}{4\pi (x^2 + R^2)^{3/2}} \int ds = \frac{\mu_0 I R^2}{2 (x^2 + R^2)^{3/2}} \quad (7)$$

เมื่อ  $\int ds = 2\pi R$  (เนื่องจากเป็นวงกลมปิด)

สนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของวงกลมปิดหาได้จากการแทนค่า  $x = 0$  ลงในสมการ(7)จะได้ว่า

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (\text{at } x = 0) \quad (8)$$

สำหรับสนามแม่เหล็กที่จุดบนแนวแกนที่ระยะไกลมากจากเส้นลวด สามารถหาได้โดยการแทนค่า  $x$  ที่มีค่ามากกว่า  $R$  มากๆจนไม่ต้องพิจารณาค่าของ  $R^2$  ในสมการ(7)จะได้ว่า

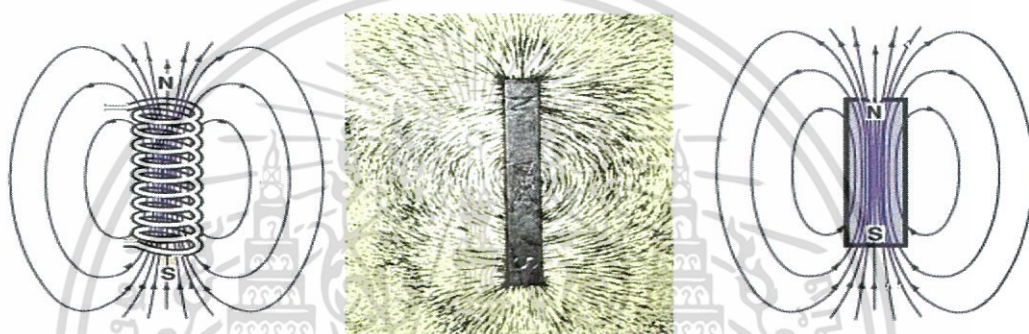
$$B \gg \frac{\mu_0 I R^2}{2x^3} \quad (\text{for } x \gg R) \quad (9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขนาดของโมเมนต์แม่เหล็ก  $\mu$  ของวงปิด นิยามว่าเป็นผลคูณของกระแสกับพื้นที่ของวงปิด (จากสมการ  $\mu = IA$ ) นั่นคือ  $\mu = I(\pi R^2)$  จึงสามารถเขียนสมการ(9)ได้ดังนี้

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi x^3} \quad (10)$$

รูปแบบของเส้นสนามแม่เหล็กสำหรับเส้นลวดวงกลมปิดแสดงดังรูปที่ 2.4a เพื่อความชัดเจนเส้นสนามแม่เหล็กถูกแสดงเพียงระนาบที่ผ่านแนวแกนของโลหะที่เป็นวง จะเห็นว่า รูปแบบของเส้นสนามมีความสมมาตรตามแนวแกนและดูคล้ายกับรูปแบบของสนามแม่เหล็กจากแท่งแม่เหล็กดังรูปที่ 2.4c ส่วนรูปที่ 2.4b จะเป็นการแสดงเส้นแรงแม่เหล็กโดยใช้ผงตะไบเหล็ก



รูปที่ 2.4a

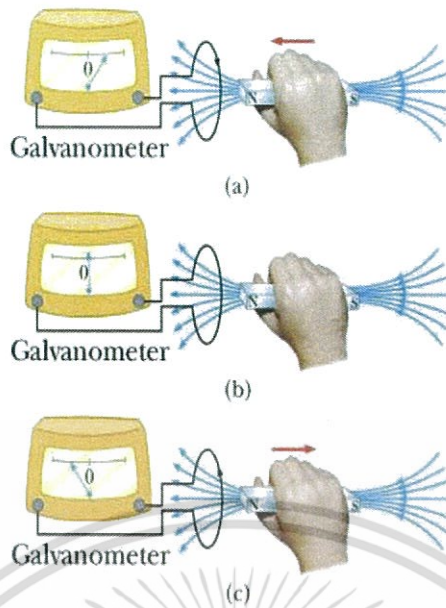
รูปที่ 2.4b

รูปที่ 2.4c

- รูปที่ 2.4 a) เส้นสนามแม่เหล็กรอบๆโลหะเป็นวงที่มีกระแสไหล  
 b) การจัดเรียงตัวของผงตะไบเหล็กรอบแม่เหล็กที่มีกระแสไหล  
 c) เส้นสนามแม่เหล็กโดยรอบแม่เหล็ก ซึ่งมีลักษณะเหมือน 4a)

## 2.2 กฎของฟาราเดย์และการเหนี่ยวนำ (Faraday's Law and Inductance)

เส้นลวดที่ขดเป็นวงและต่ออยู่กับ Galvanometer ซึ่งนำมาวัดกระแส ดังรูปที่ 5 ถ้าแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าหาขดลวด เข็มของ Galvanometer จะเบนไปด้านหนึ่ง ดังรูปที่ 2.5a เมื่อแม่เหล็กหยุดเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.5b เข็มของ Galvanometer จะหยุดเบน เมื่อเคลื่อนที่แม่เหล็กออกจากขดลวด ดังรูปที่ 2.5c เข็มของ Galvanometer จะเบนไปในทิศทางตรงข้ามเมื่อเทียบกับตอนที่เคลื่อนแม่เหล็กเข้าหาขดลวด จะสังเกตได้ว่า กระแสไฟฟ้าถูกทำให้เกิดขึ้นในขดลวดเมื่อมีการเคลื่อนที่สัมพันธ์ระหว่างแท่งแม่เหล็กกับขดลวด[5]



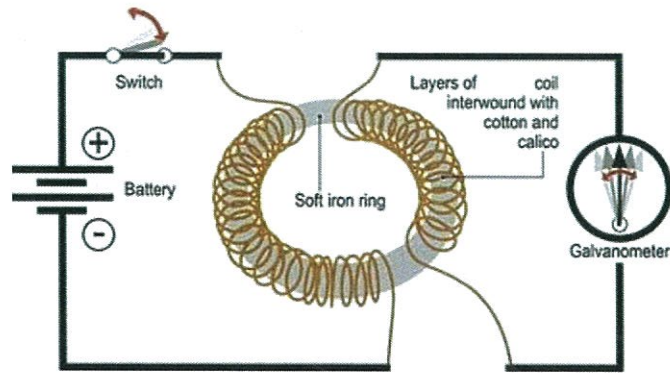
- รูปที่ 2.5 a) เมื่อแม่เหล็กเข้าหาขดลวดวงปิดที่ต่ออยู่กับ Galvanometer พบว่าเข็มของ Galvanometer เบนดังรูปแสดงให้เห็นว่าเกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นภายในเส้นลวด
- b) เมื่อแม่เหล็กหยุดนิ่งอยู่กับที่ พบว่าไม่เกิดกระแสเหนี่ยวนำขึ้นภายในเส้นลวดวงปิด ถึงแม้ว่าแท่งเหล็กจะอยู่ภายในเส้นลวดวงปิดก็ตาม
- c) เมื่อแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกจากเส้นลวดวงปิด พบว่าเข็มของ Galvanometer เบนไปในทิศตรงข้ามกับตอนแรก แสดงให้เห็นว่าการเหนี่ยวนำในขดลวดวงปิดมีทิศทางไหลตรงข้ามกับ รูปที่ a)

ผลการทดลองนี้ พบว่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในเส้นลวดได้ ถึงแม้ว่าเส้นลวดไม่ได้ต่ออยู่กับแบตเตอรี่ เราเรียกกระแสไฟฟ้าในกรณีนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced current) และถูกทำให้เกิดขึ้นโดย แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced emf)

มีการทดลองหนึ่งที่ทำครั้งแรกโดยฟาราเดย์ จัดอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 2.6 อุปกรณ์จะประกอบด้วย ขดลวดที่สร้างจากเส้นลวดหุ้มฉนวน ซึ่งจะต่ออยู่กับสวิตช์และแบตเตอรี่ เรียกขดลวดนี้ว่า ขดลวดปฐมภูมิ (primary coil) และให้เป็นวงจรปฐมภูมิ ขดลวดนี้จะพันอยู่รอบวงแหวนเหล็ก ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ขดลวดที่ 2 สร้างจากเส้นลวดหุ้มฉนวนที่พันรอบวงแหวนเหล็กนี้เช่นกันและต่ออยู่กับ Galvanometer เรียกขดลวดนี้ว่า ขดลวดทุติยภูมิ (secondary coil) และให้เป็นวงจรทุติยภูมิ วงจรส่วนนี้ไม่ได้ต่อกับไฟฟ้าและไม่ได้ต่อกับแบตเตอรี่ จุดประสงค์ของเครื่องมือนี้คือการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นในวงจรทุติยภูมิโดยการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยวงจรปฐมภูมิ

ตอนแรกเราอาจจะคิดว่าไม่น่ามีกระแสไฟฟ้าในวงจรทุติยภูมิ แต่ก็พบว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีการเปิดหรือปิดสวิตช์ในวงจรปฐมภูมิ ในขณะที่โยกสวิตช์ปิดวงจรเข็มของ Galvanometer จะเบนไปด้านหนึ่งแล้วจะกลับไปชี้ที่ศูนย์ดั้งเดิม จากนั้นก็โยกสวิตช์เพื่อเปิดวงจร พบว่าเข็มของ Galvanometer จะเบนไปทิศตรงข้ามแล้วจะกลับไปชี้ที่ศูนย์ดั้งเดิม นั่นคือเข็มของ Galvanometer จะกลับมายังที่ศูนย์เมื่อกระแสในวงจรปฐมภูมิมีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



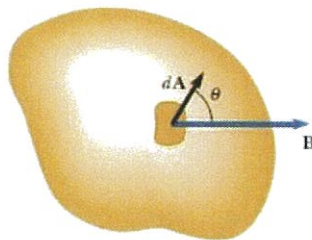
รูปที่ 2.6 การทดลองของฟาราเดย์ เมื่อสวิตช์ในวงจรปฐมภูมิถูกปิดเข็มของ Galvanometer ในวงจรทุติยภูมิเกิดการเบี่ยงเบนชั่วขณะ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในวงจรทุติยภูมิเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กผ่านขดลวดทุติยภูมิ

จากการทดลองนี้ ฟาราเดย์สรุปว่า กระแสไฟฟ้าถูกทำให้เกิดขึ้นได้โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลา กระแสไม่สามารถถูกทำให้เกิดได้โดยสนามแม่เหล็กที่มีค่าคงที่ จากการทดลองรูปที่ 5 ทำให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ระหว่างแม่เหล็กกับขดลวด トラบใดที่มีการเคลื่อนที่ที่กระแสไฟฟ้าก็จะยังคงเกิดขึ้นในวงจรต่อไปได้ จากการทดลองในรูปที่ 2.6 กระแสถูกทำให้เกิดในวงจรทุติยภูมิทันทีหลังจากที่สวิตช์ถูกปิดซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กที่กระทำต่อวงจรทุติยภูมิมีค่าเพิ่มขึ้นจากศูนย์จนมีค่าสูงสุด ผลที่เกิดขึ้นกับวงจรทุติยภูมิคือแรงเคลื่อนไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำให้เกิดในวงจรทุติยภูมิโดยการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าซึ่งเกิดจากกระแสในวงจรปฐมภูมิ

เพื่อกล่าวถึงผลการสังเกตในเชิงปริมาณ เรานิยมสิ่งที่เรียกว่า ฟลักซ์แม่เหล็ก(magnetic flux) โดยฟลักซ์แม่เหล็กเป็นสัดส่วนกับเส้นสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ พิจารณาพื้นที่เล็กๆ  $dA'$  ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพื้นผิว ดังรูปที่ 2.7 ถ้าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งของพื้นที่เล็กๆ  $dA'$  นี้คือ  $B$  ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่เล็กๆนี้คือ  $B \times dA'$  เมื่อ  $dA'$  คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $dA$  ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กรวม  $\phi_B$  ที่ผ่านพื้นผิวคือ[6]

$$\phi_B = \int B \times dA' \quad (11)$$

ในหน่วย SI มีหน่วยเป็น  $T \times m^2$  ซึ่งเรียกว่า weber (Wb),  $1Wb = 1 T \times m^2$



รูปที่ 2.7 ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กซึ่งผ่านส่วนย่อยของพื้นผิว  $dA'$  ใดๆนั้นหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดย  $B \times dA' = B dA \cos \theta$  โดยที่  $dA'$  มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิวนั้นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในรูปที่ 2.5 กับ 2.6 มีสิ่งหนึ่งที่เหมือนกันคือ ทั้งสองกรณี แรงเคลื่อนไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำให้เกิดในวงจรมื่อฟลักซ์แม่เหล็กผ่านพื้นที่ลุ่มรอบด้วยวงจรมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือกล่าวโดยทั่วไปว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำให้เกิดในวงจรมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจรม

คำกล่าวนี้รู้จักกันในชื่อว่ากฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction) และสามารถเขียนได้ว่า

$$\varepsilon = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (12)$$

เมื่อ  $\phi_B$  คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่ลุ่มรอบด้วยวงจรม ซึ่งมีค่าดังสมการ(11) ถ้าววงจรมประกอบด้วยขดลวดจำนวน  $N$  รอบ ที่เหมือนกันและพันอยู่บนแกนเดียวกันและถ้าเส้นสนามแม่เหล็กผ่านขดลวดทุกขด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi_B}{dt} \quad (13)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบเนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำรวมเกิดจากผลบวกของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละรอบเพราะว่าขดลวดเกิดจากเส้นลวดแต่ละรอบที่ต่อกันอย่างอนุกรม

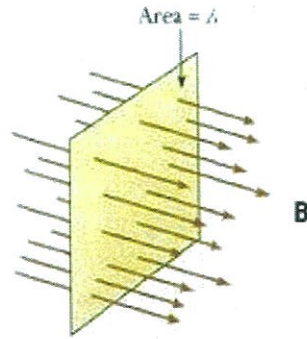
สมมุติว่าสนามแม่เหล็กมีความสม่ำเสมอทั่วพื้นที่  $A$  ที่ลุ่มรอบด้วยวงจรมปิดในระนาบดังรูปที่ 2.8 ในกรณีนี้ ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านวงจรมปิดนี้คือ

$$\phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}' = \int B dA \cos\theta = B \cos\theta \int dA = BA \cos\theta$$

ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ คือ

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA \cos\theta) \quad (14)$$

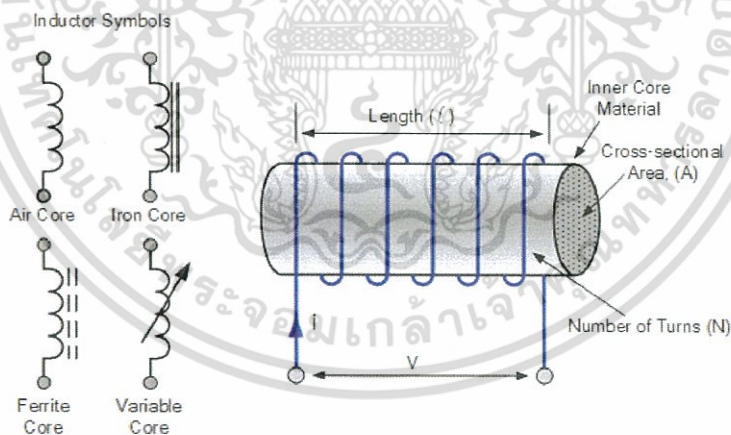
สมการนี้แสดงให้เห็นว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าสามารถถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในวงจรมปิดโดยการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กได้ด้วยวิธีการต่างๆได้แก่ 1) ขนาดของ  $B$  เปลี่ยนแปลงตามเวลา 2) พื้นที่ของวงจรมปิดเปลี่ยนแปลงตามเวลา 3) มุม  $\theta$  ระหว่าง  $B$  กับเส้นตั้งฉากกับระนาบของวงจรมปิดเปลี่ยนแปลงตามเวลา และ 4) มีการเปลี่ยนแปลงของ 1) ถึง 3) ร่วมกัน



รูปที่ 2.8 เส้นลวดตัวนำวงปิดใดๆซึ่งมีพื้นที่  $A$  และวางตัวอยู่ในสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอ  $B$  มุมระหว่างสนามแม่เหล็ก  $B$  กับเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับระนาบของวงปิดมีค่าเท่ากับ  $\theta$

### ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โช๊ค (Chock) หรือขดลวดโซเลนอยด์ เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท passive เช่นเดียวกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ สร้างขึ้นโดยการพันเส้นลวดตัวนำรอบแกนโลหะหรืออากาศก็ได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวด ซึ่งแกนของขดลวดอาจเป็นทรงกระบอกตรงหรือวงแหวนก็ได้ ตัวเหนี่ยวนำจะถูกแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ตามชนิดของแกนนี้ เช่น แกนอากาศ แกนเหล็ก ดังรูปที่ 2.9[7]



รูปที่ 2.9 สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ

### ความเหนี่ยวนำ (Inductance)

เมื่อกระแสไฟฟ้า  $I$  ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสนี้และทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เรียกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัวเอง แรงเคลื่อนไฟฟ้านี้เป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ คือมีค่าเท่ากับค่าลบของอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก โดยฟลักซ์แม่เหล็กเป็นสัดส่วนโดยตรงกับสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสไฟฟ้าในวงจร ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเองจึงเป็นส่วนโดยตรงกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจร สำหรับขดลวดจำนวน  $N$  รอบ ที่พันอยู่ชิดกัน (ตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดทอรอยด์หรือโซเลนอยด์ในอุดมคติ) จะได้ว่า

$$\varepsilon_L = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (15)$$

เมื่อ  $L$  เป็นค่าคงตัวของวงจรแปรผัน เรียกว่า ความเหนี่ยวนำ (inductance) หรือความเหนี่ยวนำตัวเอง (self-inductance) ของขดลวด เป็นค่าที่ขึ้นกับรูปทรงเชิงเรขาคณิตของขดลวดและลักษณะทางกายภาพอื่น ๆ จากสมการ (15) จะเห็นว่า ความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ประกอบด้วยลวด  $N$  รอบ คือ

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} \quad (16)$$

เมื่อสมมุติว่าฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวดแต่ละขดเท่ากัน

จากสมการ (15) สามารถเขียนได้ว่า

$$L = -\frac{\varepsilon_L}{dI/dt} \quad (17)$$

จะเห็นว่า ความเหนี่ยวนำแปรผกผันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส เมื่อเปรียบเทียบความเหนี่ยวนำกับความต้านทาน  $R = \varepsilon/I$  จะเห็นว่า ความต้านทานแปรผกผันกับกระแส ในหน่วย SI ความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น เฮนรี (henry, H) โดย

$$1\text{H} = 1\text{V}\cdot\text{s}/\text{A}$$

ถ้าขดลวดของตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดโซเลนอยด์มีความยาว  $\ell$  ซึ่งมีค่าความยาวมากเมื่อเทียบกับรัศมี  $r$  สามารถประมาณได้ว่า สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นอยู่ภายในโซเลนอยด์ดังกล่าวจะมีความสม่ำเสมอมีค่า

$$B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{N}{\ell} I \quad (18)$$

เมื่อ  $n = N/\ell$  คือ จำนวนรอบต่อหน่วยความยาว

สำหรับ ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่ผ่านขดลวด  $N$  รอบ มีค่าเป็น

$$\Phi_B = BA = \mu_0 \frac{NA}{\ell} I \quad (19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของโซเลนอยด์ จากสมการที่ (16) จะได้ว่า

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{\mu_0 N^2 A}{\ell} \quad (20)$$

สมการนี้แสดงให้เห็นว่า  $L$  มีค่าขึ้นกับรูปทรงเชิงเรขาคณิตของโซเลนอยด์ และมีค่าแปรผันตรงกับจำนวนรอบยกกำลังสอง และ เนื่องจาก  $N = n\ell$  สามารถเขียนได้ว่า

$$L = \mu_0 \frac{(n\ell)^2}{\ell} A = \mu_0 n^2 A \ell = \mu_0 n^2 V \quad (21)$$

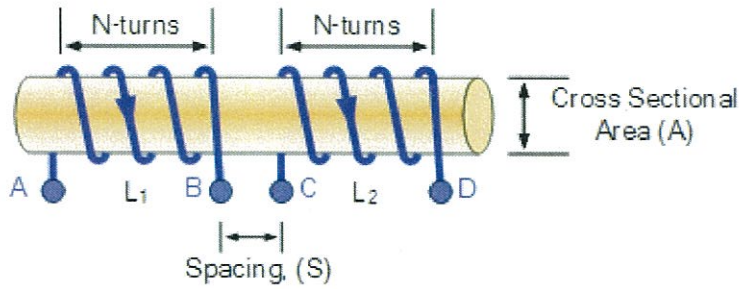
เมื่อ  $V = A\ell$  ซึ่งเป็นปริมาตรของโซเลนอยด์

### ความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance)

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่า เมื่อมีการไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดโซเลนอยด์ จะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นผลเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กรอบๆ ขดลวดของตัวเหนี่ยวนำเอง ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสในตัวขดลวดเอง จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเหนี่ยวนำตัวเอง (self-induction) อย่างไรก็ตาม ถ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นเนื่องจากสนามแม่เหล็กที่เกิดจากตัวเหนี่ยวนำหรือขดลวดโซเลนอยด์ที่อยู่ใกล้ ๆ จะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเหนี่ยวนำร่วม (mutual-induction) ดังนั้น เมื่อมีขดลวด 2 ขด หรือมากกว่า เชื่อมต่อกันทางแม่เหล็กจากฟลักซ์แม่เหล็กเดียวกัน กล่าวว่ขดลวดเหล่านี้มีสมบัติของ ความเหนี่ยวนำร่วม (mutual inductance) อาจกล่าวได้ว่า ความเหนี่ยวนำร่วมคือการที่กระแสไฟฟ้าที่ไหลในขดลวดหนึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าในขดลวดอื่นที่วางอยู่ใกล้ๆ

ความเหนี่ยวนำร่วมนี้เป็นหลักการทำงานพื้นฐานของ หม้อแปลงไฟฟ้า (transformer) มอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายที่ทำงานโดยอาศัยสนามแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดอื่น ความเหนี่ยวนำร่วมอาจทำให้เกิดสิ่งที่ไม่พึงประสงค์ได้ ในกรณีที่เกิดการรั่วไหลของความเหนี่ยวนำ (stray or leakage inductance) จากขดลวด สนามแม่เหล็กที่รั่วไหลนี้สามารถทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในอุปกรณ์ไฟฟ้าข้างเคียงโดยกระบวนการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) ซึ่งการป้องกันต้องทำโดยการครอบอุปกรณ์เหล่านี้ด้วยกล่องโลหะ (electrical screening) ที่ต่อลงกราวด์

ปริมาณของความเหนี่ยวนำร่วมที่เชื่อมต่อขดลวดหนึ่งกับขดลวดอื่น ขึ้นกับระยะห่างระหว่างขดลวดทั้งสอง ถ้าอยู่ชิดกันมากฟลักซ์แม่เหล็กเกือบทั้งหมดที่เกิดจากขดลวดขดแรกจะส่งไปยังขดลวดที่สองจึงสามารถเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าปริมาณสูงในขดลวดที่สอง กล่าวว่ มีความเหนี่ยวนำร่วมมาก



รูปที่ 2.10 ขดลวด  $L_1$  และ  $L_2$  พันอยู่รอบแกนเหล็กอ่อน

ในกรณีที่ขดลวดทั้งสองพันอยู่รอบแกนเหล็กอ่อน (soft iron) เดียวกันและอยู่ใกล้กัน ดังรูปที่ 2.10 เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด  $L_1$  ฟลักซ์แม่เหล็กเกือบทั้งหมดที่เกิดขึ้นจะตัดผ่านขดลวด  $L_2$  การสูญเสียเนื่องจากการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กจะต่ำมาก ประมาณได้ว่าการเชื่อมต่อของฟลักซ์แม่เหล็กเป็นไปอย่างสมบูรณ์ระหว่างขดลวดทั้งสอง ทำให้เกิดความเหนี่ยวนำร่วม  $M$

ถ้าขดลวด  $L_1$  มีจำนวน  $N_1$  รอบและขดลวด  $L_2$  มีจำนวน  $N_2$  รอบ เมื่อกระแส  $I_1$  ไหลผ่านขดลวด  $L_1$  ความเหนี่ยวนำร่วม  $M_{12}$  ของขดลวด  $L_2$  เนื่องจากกระแสในขดลวด  $L_1$  มีค่า

$$M_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1} \quad (22)$$

เมื่อสนามแม่เหล็กตัดผ่าน  $L_2$  จะทำให้เกิดกระแสไหลใน  $L_2$  ขนาดเท่ากับกระแสใน  $L_1$  (กรณีไม่มีการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก) และกระแสใน  $L_2$  จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไปตัดผ่านขดลวด  $L_1$  ดังนั้น ความเหนี่ยวนำร่วม  $M_{21}$  ของขดลวด  $L_1$  เนื่องจากกระแสในขดลวด  $L_2$  โดย  $M_{12} = M_{21} = M$

จากที่กล่าวมาข้างต้น การเหนี่ยวนำตัวเองเป็นสมบัติของขดลวดเดี่ยว ในขณะที่ความเหนี่ยวนำร่วมเป็นสมบัติของการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กของขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำสองตัวที่วางอยู่ใกล้กันการเหนี่ยวนำตัวเองของขดลวดที่พันบนแกนของขดลวดแต่ละขดคือ

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_r N_1^2 A}{\ell} \quad \text{และ} \quad L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r N_2^2 A}{\ell} \quad (23)$$

ความเหนี่ยวนำร่วม  $M$  มีค่า

$$M^2 = L_1 L_2 \quad \text{หรือ} \quad M = \sqrt{L_1 L_2} \quad H \quad (24)$$

### สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (Coupling Coefficient)

ความสัมพันธ์ข้างต้น เป็นกรณีที่คิดว่าการสูญเสียฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์หรือมีการเชื่อมต่อของสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดทั้งสอง 100% ในความเป็นจริงแล้วย่อมมีการสูญเสียฟลักซ์แม่เหล็กเกิดขึ้นและการเชื่อมต่อของสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดทั้งสองย่อมน้อยกว่า 100% เอกสารบอกรถึงปริมาณของการเชื่อมต่อของ ฟลักซ์แม่เหล็กจะบอกในรูปของสัดส่วนเมื่อเทียบกับค่าสูงสุดที่ ารค่า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

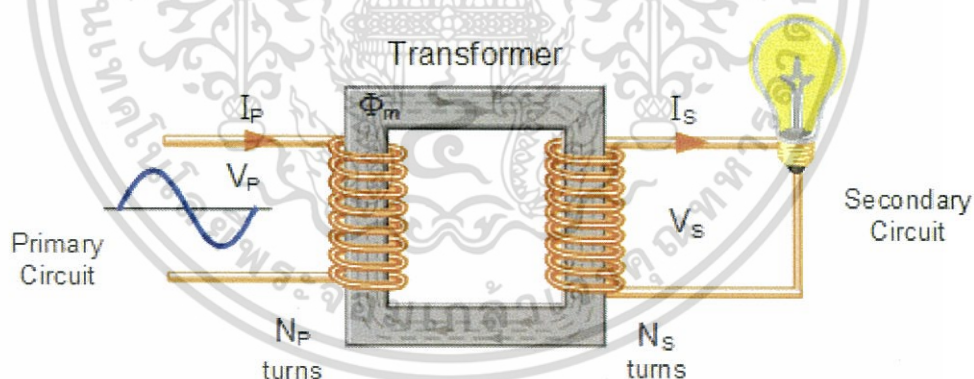
เป็นไปได้ สัดส่วนนี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (coefficient of coupling) ใช้สัญลักษณ์  $k$  ซึ่งมีค่าระหว่าง  $0 - 1$   $k = 0$  หมายถึงไม่มีการเชื่อมต่อเลย ส่วน  $k = 1$  หมายถึงมีการเชื่อมต่อสูงสุด ถ้า  $k > 0.5$  ถือว่ามีการเชื่อมต่อที่ดี ถ้า  $k < 0.5$  จะถือว่ามีการสูญเสียการเชื่อมต่อ จากสมการข้างต้นที่คิดว่ามีการเชื่อมต่อของฟลักซ์แม่เหล็กอย่างสมบูรณ์นั้นจึงได้ใหม่ดังนี้

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \text{หรือ} \quad M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad (25)$$

### หลักการการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า

หม้อแปลงไฟฟ้ามีหลักการการทำงานเป็นไปตามกฎการเหนี่ยวนของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction) โดยการเชื่อมกันทางแม่เหล็กของวงจรรไฟฟ้าสองวงจรมากกว่าเข้าด้วยกันด้วยฟลักซ์แม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่กำเนิดในตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเอง โดยใช้หลักการเหนี่ยวนแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic induction) ในรูปของการเหนี่ยวนร่วม (mutual inductance)

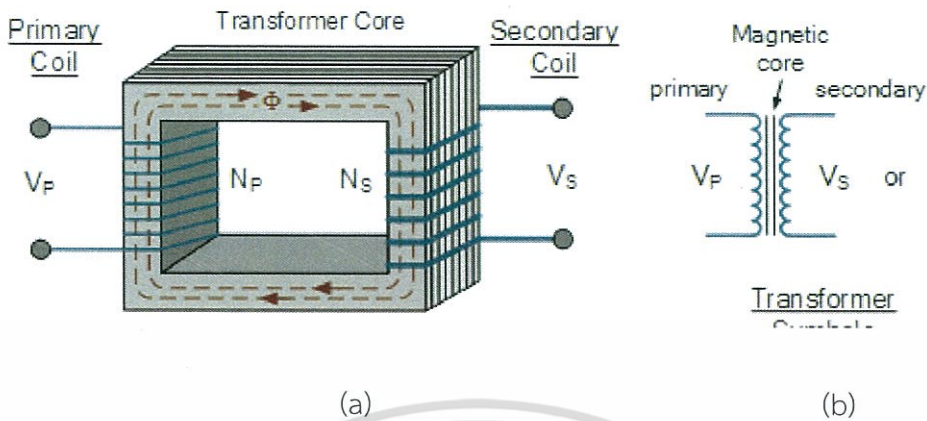
หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียวประกอบด้วยขดลวด 2 ขด ขดหนึ่งเรียกว่า ขดปฐมภูมิ (primary) อีกขดหนึ่งเรียกว่า ขดทุติยภูมิ (secondary) ดังรูปที่ 2.11 ขดปฐมภูมิทำหน้าที่รับพลังงาน ในขณะที่ขดทุติยภูมิทำหน้าที่ปล่อยพลังงาน ขดลวดทั้งสองไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า แต่ขดลวดทั้งสองพันอยู่บนแกนเหล็กร่วมกัน โดยแกนเหล็กนี้ทำหน้าที่ทางเป็นวงจรแม่เหล็กแบบปิด (closed magnetic circuit) เรียกว่า แกน (core) แกนนี้สร้างจากเหล็กอ่อนโดยทั่วไปจะไม่ใช้เหล็กตันแต่จะใช้เหล็กแผ่นบาง ๆ วางซ้อนกันหลายชั้น เพื่อลดการสูญเสียกำลังงานในแกน[8]



รูปที่ 2.11 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว

ถึงแม้ขดลวดทั้งสองจะไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้าแต่มีการเชื่อมต่อกันทางแม่เหล็กผ่านทางแกนนี้ ทำให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิได้ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในขดปฐมภูมิจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิได้

## โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของหม้อแปลงไฟฟ้า (a) และสัญลักษณ์ (b)  
หม้อแปลงไฟฟ้ามีโครงสร้างดังรูป 2.12 เมื่อ

$V_p$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดปฐมภูมิ

$V_s$  คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดทุติยภูมิ

$N_p$  คือ จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิ

$N_s$  คือ จำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิ

$\phi$  คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก

ความแตกต่างระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าของขดปฐมภูมิ  $V_p$  กับขดทุติยภูมิ  $V_s$  ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่าง  $N_p$  กับ  $N_s$  จากกฎของฟาราเดย์

$$V_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{และ} \quad V_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (26)$$

ถ้าไม่มีการสูญเสียของฟลักซ์แม่เหล็ก จะได้ว่า

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (27)$$

ถ้าคิดว่าไม่มีการสูญเสียใด ๆ เลย กำลังไฟฟ้าทางขดปฐมภูมิต้องเท่ากับกำลังไฟฟ้าของขดทุติยภูมิ นั่นคือ

$$I_p V_p = I_s V_s \quad \text{หรือ} \quad \frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p} \quad (28)$$

หม้อแปลงไฟฟ้าในความเป็นจริงจะมีการสูญเสียของฟลักซ์แม่เหล็กเสมอ (เช่น การสูญเสียฟลักซ์แม่เหล็กจากการรั่วไหลออกนอกแกนเหล็กของหม้อแปลงและการเกิด eddy current ในแกนเหล็ก เป็นต้น) ถ้าขดปฐมภูมิและทุติยภูมิมีค่า self-inductance  $L_1$  และ  $L_2$  ตามลำดับ และมี mutual inductance  $M$  เป็นเอกลักษณ์ที่สัมพันธ์กันไว้สำหรับวงจรงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อเข้าสู่เนื้อหาไปจะวิเคราะห์ขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

inductance  $M = k\sqrt{L_1L_2}$  ถ้ากระแสในขดปฐมภูมิคือ  $i_1$  โวลเตจที่ถูกเหนี่ยวนำในขดทุติยภูมิโดยขดปฐมภูมิมิค่า  $M \frac{di_1}{dt}$  ในทำนองเดียวกันโวลเตจในขดปฐมภูมิโดยขดทุติยภูมิมิค่า  $M \frac{di_2}{dt}$  เมื่อ  $i_2$  คือกระแสในขดทุติยภูมิ ดังนั้น โวลเตจที่เกิดจาก self-inductance และ mutual inductance ในขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ คือ

$$\begin{aligned} V_p &= L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ V_s &= L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \tag{29}$$

### ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Transformer Efficiency)

กรณีอุดมคติ กำลังงานไฟฟ้าของขดปฐมภูมิจะเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าของขดทุติยภูมิ แต่หม้อแปลงไฟฟ้าในความเป็นจริงมีการสูญเสียเกิดขึ้นในรูปของความร้อน ดังนั้น กำลังงานไฟฟ้าของขดทุติยภูมิจะเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าของขดปฐมภูมิเสมอ หมายความว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 100 % โดยประสิทธิภาพ (efficiency) ของหม้อแปลงไฟฟ้านิยามดังนี้

$$\text{Efficiency, } \eta = \frac{\text{Output Power}}{\text{Input Power}} \times 100\% \tag{30}$$

### การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้า

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ามีสิ่งที่จะต้องพิจารณาดังต่อไปนี้

1. กำลังไฟฟ้าของหม้อแปลง (power rating)
2. ระดับของแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งทางขดปฐมภูมิและขดทุติยภูมิ
3. กระแสไฟฟ้าของทั้งสองขด
4. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเส้นลวดที่ต้องใช้ของทั้งสองขด
5. พื้นที่ของแกนเหล็ก
6. จำนวนรอบของเส้นลวดทั้งสองขด

### การคำนวณแกนเหล็ก

การคำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กจะทำให้ทราบค่าจำนวนรอบของขดลวดที่ต้องพันซึ่งคำนวณได้จากกฎของฟาราเดย์ จาก

$$V_{\max} = N \frac{d\Phi}{dt} \tag{31}$$

เมื่อ  $V_{\max}$  คือค่าโวลต์สูงสุดหรือ peak value ซึ่งสัมพันธ์กับค่า rms โดยการคูณด้วย  $\sqrt{2}$  หรือ  $V_{\max} = \sqrt{2}V$  เมื่อ  $V$  คือค่า rms ของแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะได้ว่า

$$V = \frac{N}{\sqrt{2}} \frac{d\Phi}{dt} \tag{32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าฟลักซ์แม่เหล็กที่มีค่าเปลี่ยนแปลงตามเวลาซึ่งเกิดไฟฟ้ากระแสสลับความถี่  $\omega$  มีค่า  $\Phi(t) = AB\sin(\omega t)$  เมื่อ  $A$  คือพื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็กและ  $B$  คือสนามแม่เหล็ก จะได้ว่า

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega AB \cos(\omega t) \quad (33)$$

สำหรับการเชื่อมต่อของฟลักซ์แม่เหล็กเมื่อมีค่าสูงสุด จะได้ว่า

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = 2\pi f AB \quad (34)$$

จะได้ว่า

$$V = N \frac{2\pi f AB}{\sqrt{2}} \quad (35)$$

ดังนั้น ค่าโวลต์ต่อรอบของขดลวด ( $V/N$ ) คือ  $V_T = 4.44fAB$  หรือจำนวนรอบต่อโวลต์,  $T_E$  คือ

$$T_E = \frac{1}{4.44fAB} \quad (36)$$

จะได้ว่า พื้นที่หน้าตัดของแกนเหล็ก ( $A$ ) คือ

$$A = \frac{1}{4.44fBT_E} \quad (37)$$

#### ข้อสมมุติฐาน

- สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าขนาดเล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าโดยเฉลี่ยระหว่าง 1 ถึง 1.2 wb/m<sup>2</sup>
- เส้นลวดทองแดงสามารถรองรับกระแสด้วยความหนาแน่น 2.2 ถึง 2.4 A/mm<sup>2</sup>

#### ตัวอย่างการออกแบบ

การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้ากำลัง 50 VA (50 W) เพื่อแปลงไฟบ้าน 220 V, 50 Hz เป็น 12

V

#### ขั้นตอนการออกแบบ

คำนวณค่าจำนวนรอบต่อโวลต์ ( $T_E$ ) ของขดลวด โดยการเลือกขนาดของแกนเหล็ก เช่น แกนที่สามารถหาได้ในท้องตลาด ได้แก่ ขนาด 1" x 1", 1.25" x 1.5", 1.5" x 1.5" เป็นต้น ในตัวอย่างนี้ เลือกแกนขนาด 1.5" x 1.5" หรือ  $1.45 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup> โดยการแทนค่า  $f = 50$  Hz  $B = 1.2$  wb/m<sup>2</sup> และ  $A = 1.45 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup> จะได้ว่า จำนวนรอบต่อโวลต์มีค่า 2.6 รอบต่อโวลต์

#### การคำนวณขดปฐมภูมิ

กระแสในขดปฐมภูมิ  $I_p = VA/V_p = 50/220 = 0.23$  A

ถ้าคิดว่าหม้อแปลงนี้มีประสิทธิภาพ 95% ดังนั้น  $I_p = VA/(0.95 \times 220) = 0.24$  A

จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ  $N_p = 2.6 \times 220 = 572$  รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของเส้นลวด จากความหนาแน่นกระแส =  $I_p/A$  ดังนั้น พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดคือ  $0.23/2.3 = 0.1 \text{ mm}^2$  ซึ่งคือลวดเบอร์ 27 AWG (American Wire Gauge)

#### การคำนวณขดทุติยภูมิ

เนื่องจากกำลังไฟฟ้าของขดปฐมภูมิเท่ากับขดทุติยภูมิคือ 50 VA ดังนั้น  $I_s = 50/12 = 4.2 \text{ A}$  พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวดคือ  $4.2/2.3 = 1.83 \text{ mm}^2$  ซึ่งคือลวดเบอร์ 15 AWG

จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ  $N_s = 2.6 \times 12 = 32$  รอบ

#### สรุป

หม้อแปลงไฟฟ้า แปลงไฟ 220 V เป็น 12 V ขนาด 50 W ต้องใช้แกนเหล็กอ่อนขนาด 1.5" x 1.5" มีขดปฐมภูมิ 570 รอบ ขดทุติยภูมิ 32 รอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงานวิจัย

ชุดทดลองชุดนี้ทำขึ้นเพื่อใช้ศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดโดยอ้างอิงกับกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ โดยขดลวดจะมีจำนวนรอบที่แตกต่างกัน จะส่งผลให้มีการเหนี่ยวนำที่ต่างกันหรือไม่และยังมีแกนโลหะที่ใช้เป็นสื่อกลางการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของขดลวดซึ่งจะมีรูปร่างที่ต่างกันไป เพื่อให้ทราบว่า การที่สื่อกลางการเหนี่ยวนำมีรูปร่างต่างกันจะมีผลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวดหรือไม่ โดยที่ขดลวดมีขนาดเท่ากัน และสามารถศึกษาพื้นฐานของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยที่ป้อนกระแสสลับเข้าไปในขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งหาได้จาก

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

โดยที่  $B$  = ขนาดสนามแม่เหล็ก (T)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (A)

$r$  = ระยะของรัศมีที่ห่างจากขดลวด (m)

$\mu_0$  = สภาพซึมได้ทางแม่เหล็กในสุญญากาศ =  $4\pi \times 10^{-7} \text{T} \cdot \text{m/A}$

ตัวอย่าง จงคำนวณขนาดของสนามแม่เหล็กที่ระยะห่าง 4 cm. จากเส้นลวดที่มีความยาวเป็นอนันต์ซึ่งมีกระแสไหลผ่าน 5 A

จาก

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 5}{2\pi \times 4 \times 10^{-2}}$$

$$B = 2.5 \times 10^{-5} \text{T}$$

ดังนั้น ขนาดของสนามแม่เหล็กที่มีระยะห่าง 4 cm. จากเส้นลวดที่มีกระแสไหลผ่าน 5 A คือ  $2.5 \times 10^{-5} \text{T}$

ในกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์กล่าวว่า “ในวงจรรปิดใดๆ ที่สร้างขึ้นด้วยตัวนำ จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจรรปิดนั้นๆ” และสามารถเขียนสมการได้ว่า  $\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  ;  $\varepsilon$  = แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตามจำนวนรอบของขดลวดด้วย คือ ฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะถูกเหนี่ยวนำในทุกๆขดลวด ดังนั้น แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ รวมในขดลวดจะเขียนได้ว่า  $\varepsilon = -N\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$  ;  $N$  = จำนวนรอบของขดลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง มีขดลวดจำนวน 200 รอบ มีความต้านทานรวม 2 โอห์ม ขดลวดแต่ละรอบมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมยาวด้านละ 18 cm. และมีสนามแม่เหล็กสม่ำเสมอมีทิศตั้งฉากกับระนาบของขดลวด ถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนจาก 0 เป็น 0.5 T ในช่วงเวลา 0.8 s ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดขณะที่สนามมีการเปลี่ยนแปลงค่าเท่าไร

$$\text{จาก } |\varepsilon| = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} ; \phi = BA = (0.5)(0.18)^2 = 0.0162 \text{ T}\cdot\text{m}^2$$

$$|\varepsilon| = \frac{200(0.0162-0)}{0.8} = 4\text{V}$$

จากตัวอย่างข้างต้นจงหากระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นเท่าไรขณะที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยน

จาก

$$V = IR$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{4}{2} = 2\text{A}$$

### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.1.1 ขดลวด

ขดลวดที่ใช้สำหรับชุดทดลองนี้มีด้วยกันหลายขนาด 200 รอบ 1 ชุด, 400 รอบ 1 ชุด, 800 รอบ 1 ชุด, 1,600 รอบ 1 ชุด, 3,200 รอบ 1 ชุด ลักษณะของขดลวดจะเป็นขดลวดที่พันกับแกนแล้ว



รูปที่ 3.1 ภาพของขดลวดที่พันกับแกนแล้ว

โดยจะแบ่งจำนวนขดลวดตามสีดังนี้

- สีฟ้า 200 รอบ ใช้ขดลวดเบอร์ 19 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 mm.
- สีแดง 400 รอบ ใช้ขดลวดเบอร์ 23 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 mm.
- สีม่วง 800 รอบ ใช้ขดลวดเบอร์ 26 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.45 mm.
- สีเขียว 1,600 รอบ ใช้ขดลวดเบอร์ 29 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.34 mm.

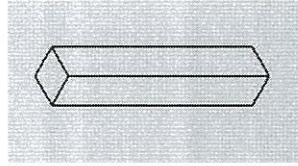
-สีเหลือง 3,200 รอบ ใช้ขดลวดเบอร์ 35 ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.21 mm. นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอกสารในเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 แกนโลหะ

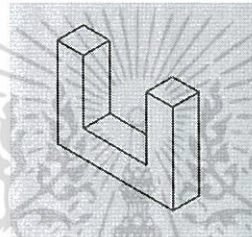
แกนโลหะที่ใช้เป็นสื่อการเหนี่ยวนำไฟฟ้าจะมีรูปร่างต่างๆดังนี้

-แกนโลหะตรง



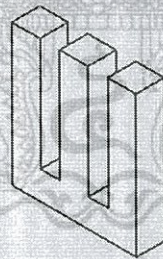
รูปที่ 3.2 แกนเหล็กอ่อนตรง

-แกนโลหะรูปตัว U



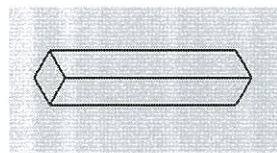
รูปที่ 3.3 แกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู

-แกนโลหะรูปตัว E



รูปที่ 3.4 แกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี

-แกนโลหะปิด จะมีลักษณะเป็นแกนโลหะตรง แต่จะสั้นกว่า



รูปที่ 3.5 แกนเหล็กอ่อนรูปตัวไอ

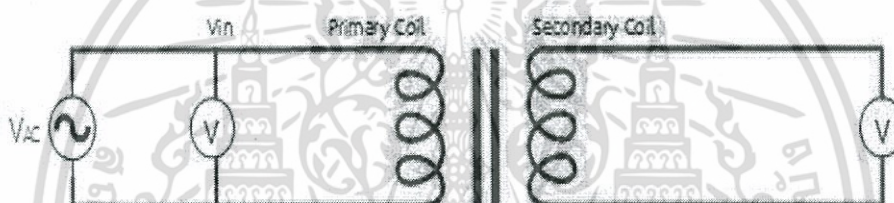
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย

#### อุปกรณ์

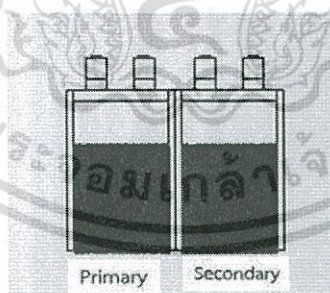
1. ขดลวดทั้ง 5 ชุด (200 รอบ, 400 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบ, 3,200 รอบ)
2. แกนโลหะตรง
3. แกนโลหะรูปตัว U
4. แกนโลหะรูปตัว E
5. แกนโลหะปิด
6. ตัวต้านทาน ขนาด 100, 500 และ 1000 Ohm
7. AC power supply
8. AC voltmeter
9. AC Ammeter
10. สายไฟ

#### ตอนที่ 1



รูปที่ 3.6 วงจรหาค่า V out

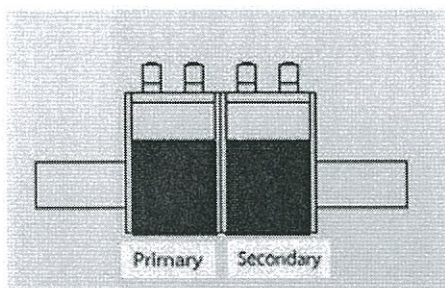
ต่อวงจรดังรูปที่ 3.6 จัดเรียงขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ชิดกันในแกนอากาศ

1. กำหนดให้ขดลวด Primary มีจำนวนรอบ 400 รอบเท่านั้นแต่จะเพิ่ม  $V_{in}$  ที่แตกต่างกันเข้าไปในขดลวด Primary ส่วนขดลวด Secondary จะมีการเปลี่ยนขดลวด 200 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบ และ 3,200 รอบ ตามลำดับ
2. จัดเรียงขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามรูปที่ 3.8 และค่อยๆ ชยับขดลวดทั้ง 2 ห่างออกจากกัน 0 mm., 10 mm., 20 mm., 30 mm., 40 mm. และ 50 mm. ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

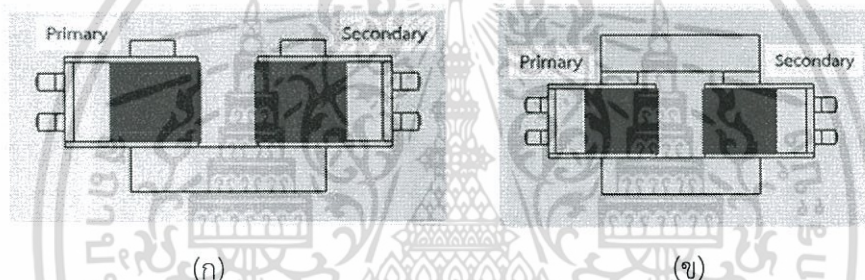


รูปที่ 3.8 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรง

## ตอนที่ 2

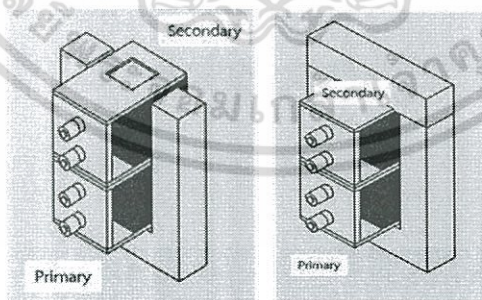
จัดเรียงขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามรูปที่ 3.9 กำหนดให้ขดลวด Primary มีจำนวนรอบ 400 รอบเท่านั้นแต่จะเพิ่ม  $V_{in}$  ที่แตกต่างกันเข้าไปในขดลวด Primary ส่วนขดลวด Secondary จะมีการเปลี่ยนขดลวด 200 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบ และ 3,200 รอบ ตามลำดับ

1. ทำการทดลองแบบตอนที่ 1 โดยใช้แกนโลหะรูปตัว U ทำตามรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู

2. จากข้อที่ 1 ให้ใช้แกนโลหะรูปตัว E ดังภาพรูปที่ 3.10 บันทึกผลการทดลอง

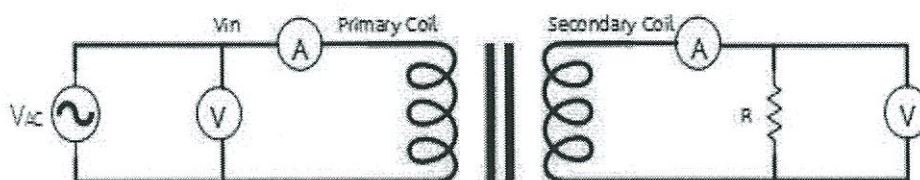


รูปที่ 3.10 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี

## ตอนที่ 3

ทำเหมือนตอนที่ 2 แต่เปลี่ยนไปใช้วงจรดังรูปที่ 3.11 ทำการทำการทดลองและทำการเปลี่ยนตัวต้านทานเข้าไปในวงจร 100 Ohm, 500 Ohm และ 1,000 Ohm ตามลำดับ บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 วงจรหา % ประสิทธิภาพ

## ตอนที่ 4

นำค่าของของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่มาจากในการทดลองตอนที่ 3 แล้วนำมาหาค่าความเหนี่ยวนำร่วม (Mutual Inductance,  $M$ ) ใช้สัญลักษณ์  $M$  ซึ่งหาได้จากสูตร

$$V_{\text{out}} = I_2 L_2 \omega - M I_1 \omega$$

$$M = \frac{I_2 L_2 \omega - V_{\text{out}}}{I_1 \omega}$$

โดยค่า  $L$  สามารถหาได้จากสูตร

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_r N_1^2 A}{l} \quad \text{และ} \quad L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r N_2^2 A}{l}$$

$$\text{และค่า } \mu_r = \frac{\mu_x}{\mu_0} = \frac{8 \times 10^{-2}}{4\pi \times 10^{-7}} = 6.4 \times 10^4 ; \mu_x \text{ คือค่า } \mu \text{ ของเหล็กอ่อน [10]}$$

จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (coefficient of coupling,  $k$ ) ใช้สัญลักษณ์  $k$  โดยถ้าค่า  $k = 1$  หมายถึงมีการเชื่อมต่อสูงสุด และ  $k > 0.5$  ถือว่ามีการเชื่อมต่อที่ดี ถ้า  $k < 0.5$  จะถือว่าการสูญเสียการเชื่อมต่อ หาได้จากสูตร

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \text{หรือ} \quad M = k \sqrt{L_1 L_2}$$

ค่าการเหนี่ยวนำของขดลวดแต่ละขดที่วัดได้ในแกนเหล็กอ่อน

Coil	Inductance (H)
200	28.88
400	115.52
800	462.08
1,600	1,848.32
3,200	7,393.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

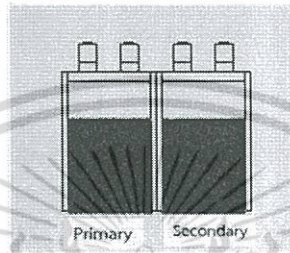
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการสร้างชุดทดลองกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ โดยการใช้ขดลวดที่จำนวนขดลวดต่างกันมาจับคู่กัน จากนั้นนำไปประกอบเข้ากันแกนรูปทรงต่างๆที่เตรียมไว้เพื่อวัดค่าโวลต์ที่ใส่เข้าไปในขดลวด Primary และออกมาทางขดลวด Secondary ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไรบ้าง

ผลการทดลอง

ตอนที่ 1



รูปที่ 4.1 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ชิดกันในแกนอากาศ

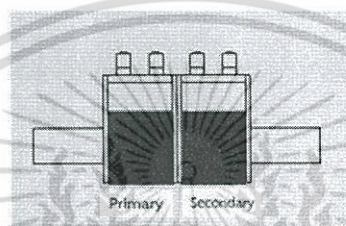
ตารางที่ 4.1 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวนรอบเท่ากัน โดยที่วางขดลวดทั้งสองชิดกันในแกนอากาศ

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.04
		4.1	0.07
		6	0.1
		7.9	0.13
		9.7	0.15
	800	2	0.13
		4.1	0.27
		6	0.4
		7.9	0.51
		9.7	0.64
	1,600	2.1	0.27
		4.1	0.54
		6	0.78
		7.9	1
		9.7	1.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวนรอบเท่ากัน โดยที่วางขดลวดทั้งสองชิดกันในแกนอากาศ(ต่อ)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	3,200	2	0.5
		4.1	1
		6	1.46
		7.9	1.9
		9.7	2.36



รูปที่ 4.2 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรง

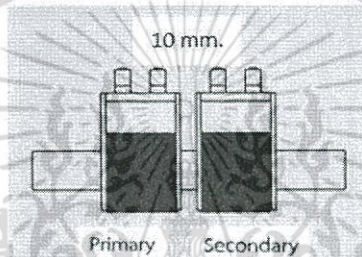
ตารางที่ 4.2 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนตรง

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.58
		4.3	1.2
		6.4	1.8
		8.5	2.4
		10.6	3
	800	2.1	2.34
		4.3	4.86
		6.3	7.3
		8.5	9.7
		10.6	12.1
	1,600	2.1	4.68
		4.3	9.73
		6.4	14.74
		8.5	19.63
		10.6	24.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน  
Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนตรง(ต่อ)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	3,200	2.1	9.2
		4.3	19.14
		6.3	28.87
		8.5	38.5
		10.6	47.9



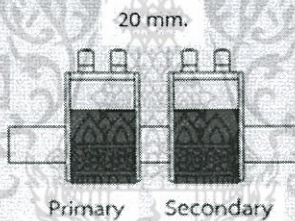
รูปที่ 4.3 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2  
ห่างกัน 10 mm.

ตารางที่ 4.3 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน  
Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงและให้  
ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 10 mm.

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.5
		4.3	1.08
		6.4	1.63
		8.5	2.18
		10.6	2.7
	800	2.1	2.06
		4.3	4.3
		6.3	6.5
		8.5	8.7
		10.6	10.8

ตารางที่ 4.3 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอแบนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 10 mm.(ต่อ)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	1,600	2.1	4.14
		4.3	8.7
		6.4	13.2
		8.5	17.6
		10.6	21.8
	3,200	2.1	8.17
		4.3	17
		6.3	25.84
		8.5	34.55
		10.6	42.9



รูปที่ 4.4 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอแบนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 20 mm.

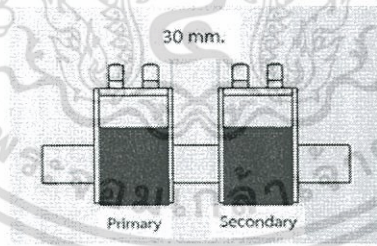
ตารางที่ 4.4 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอแบนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 20 mm.

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.45
		4.3	.95
		6.3	1.45
		8.5	1.94
		10.6	2.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 20 mm. (ต่อ)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	800	2.1	1.8
		4.3	3.8
		6.3	5.8
		8.5	7.7
		10.6	9.6
	1,600	2.1	3.64
		4.3	7.67
		6.4	11.7
		8.5	15.6
		10.6	19.4
	3,200	2.1	7.3
		4.3	15.3
		6.4	23.3
		8.5	31.2
		10.6	38.73



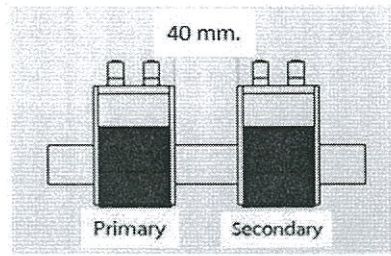
รูปที่ 4.5 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 30 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกบแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 30 mm.

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.4
		4.3	0.84
		6.4	1.3
		8.5	1.73
		10.6	2.16
	800	2.1	1.5
		4.3	3.3
		6.4	5
		8.5	6.79
		10.6	8.4
	1,600	2.1	3.18
		4.3	6.7
		6.4	10.3
		8.5	13.8
		10.6	17.17
	3,200	2.1	6.32
		4.3	13.4
		6.4	20.5
		8.5	27.6
		10.6	34.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

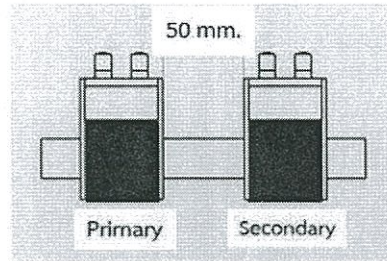


รูปที่ 4.6 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 40 mm.

ตารางที่ 4.6 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 40 mm.

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.34
		4.3	0.74
		6.3	1.13
		8.5	1.52
		10.5	1.9
	800	2.1	1.35
		4.3	2.9
		6.3	4.42
		8.5	5.9
		10.5	7.4
	1,600	2.1	2.8
		4.3	6
		6.4	9.2
		8.5	12.36
		10.6	15.38
3,200	2.1	5.6	
	4.3	12	
	6.3	18.38	
	8.5	24.7	
	10.5	30.75	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



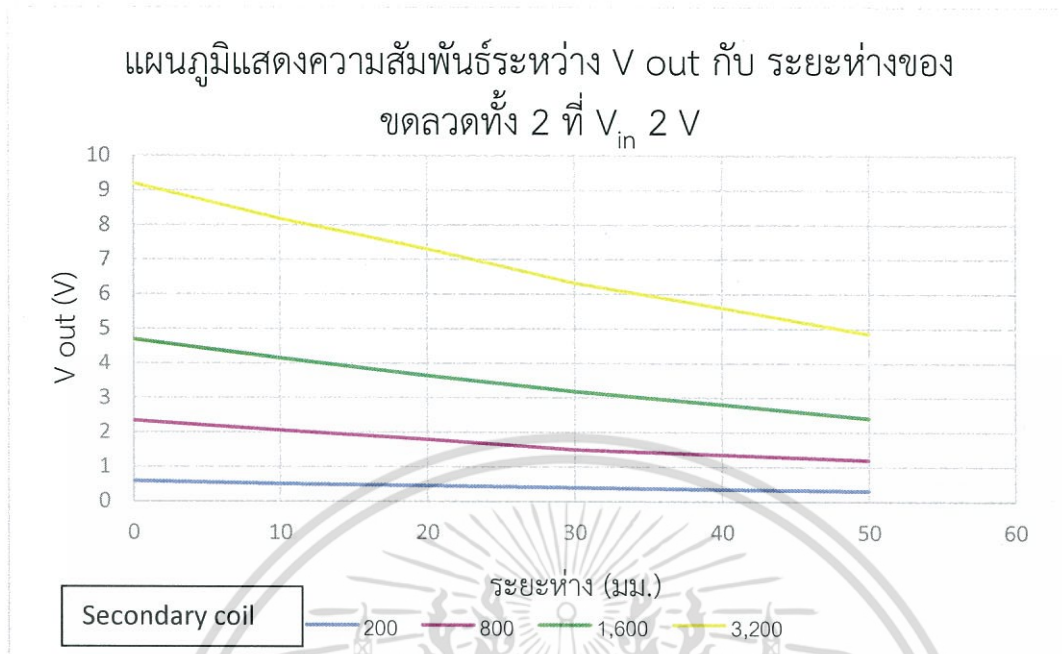
รูปที่ 4.7 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 50 mm.

ตารางที่ 4.7 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนตรงและให้ขดลวดทั้ง 2 ห่างกัน 50 mm.

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.3
		4.3	0.64
		6.4	0.99
		8.5	1.34
		10.5	1.67
	800	2.1	1.2
		4.3	2.58
		6.4	3.95
		8.5	5.34
		10.5	6.6
	1,600	2.1	2.4
		4.2	5.2
		6.4	8
		8.5	10.8
		10.5	13.5
3,200	2.1	4.85	
	4.3	10.5	
	6.4	16.2	
	8.5	21.8	
	10.5	27.14	

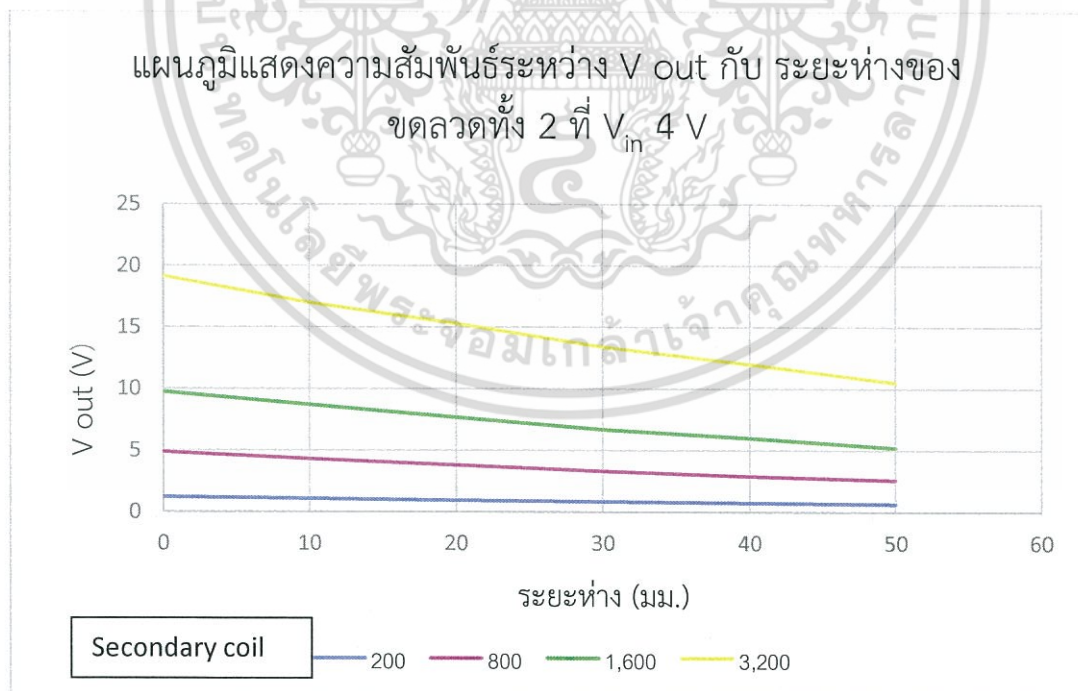
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Primary coil = 400



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{out}$  กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่  $V_{in} = 2\text{ V}$

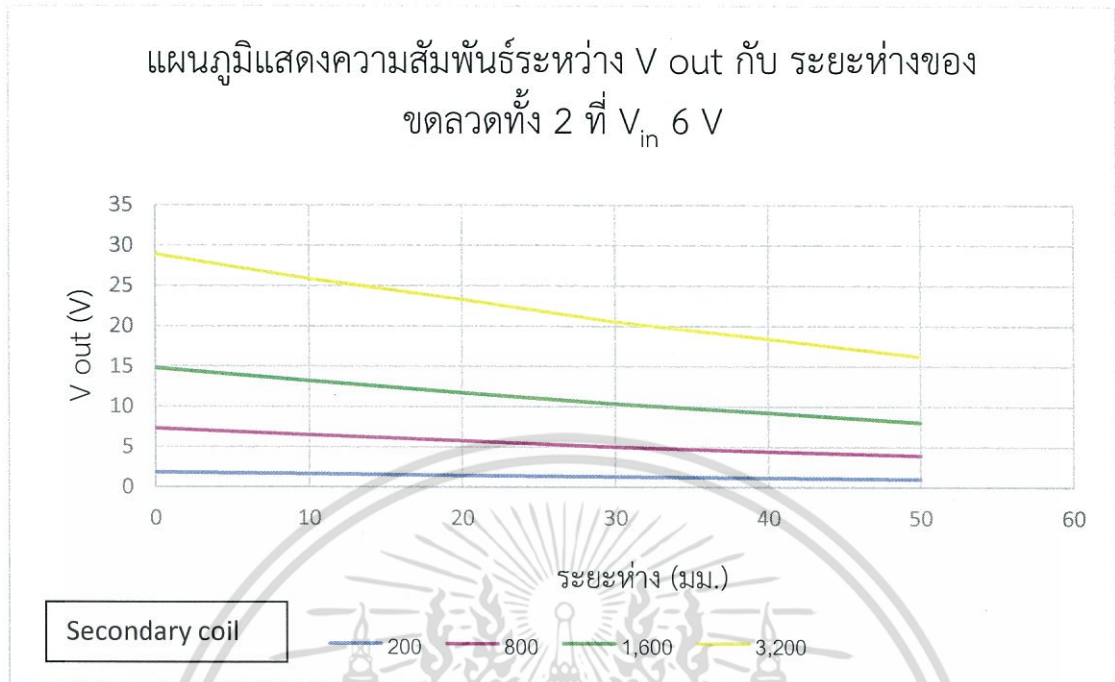
Primary coil = 400



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{out}$  กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่  $V_{in} = 4\text{ V}$

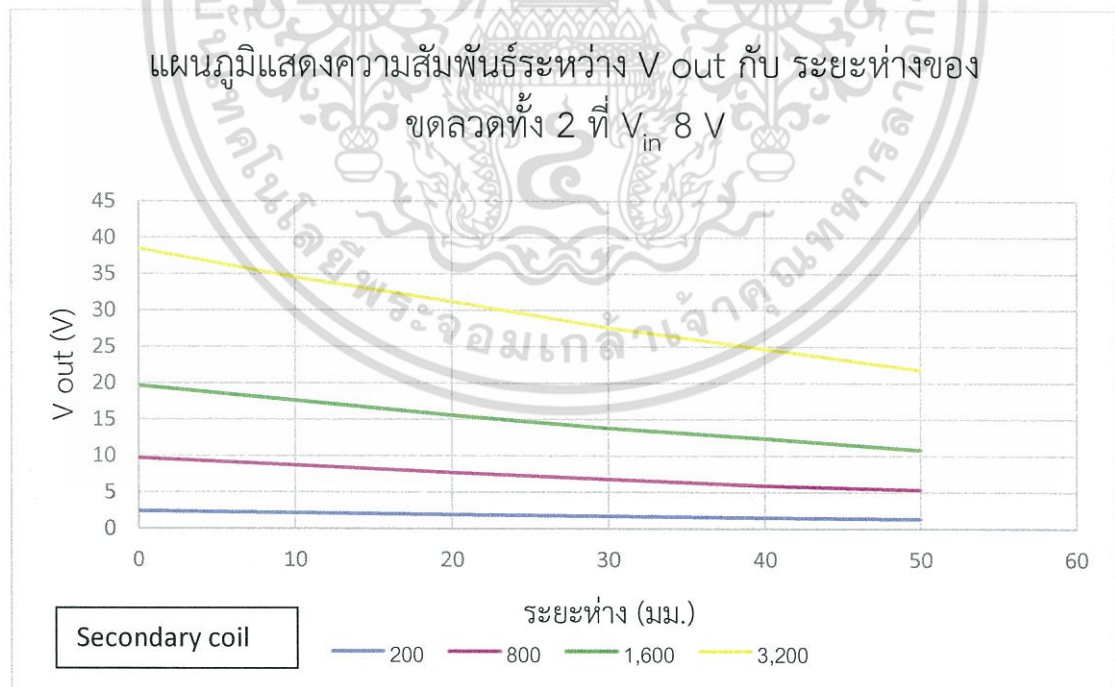
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Primary coil = 400



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{out}$  กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่  $V_{in}$  6 V

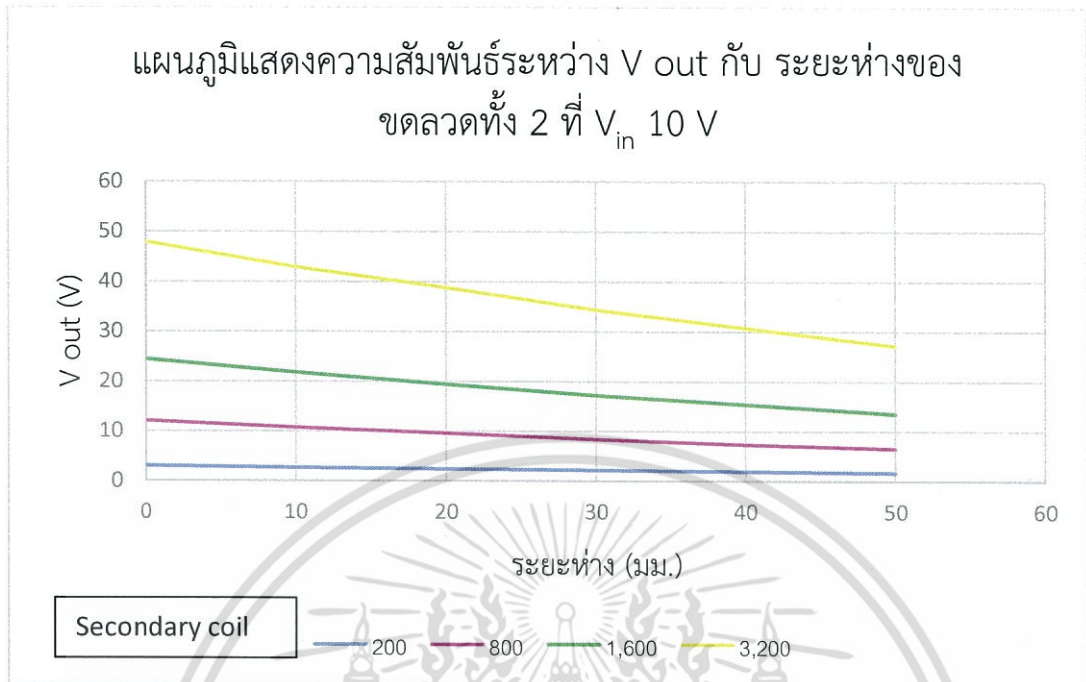
Primary coil = 400



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{out}$  กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่  $V_{in}$  8 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

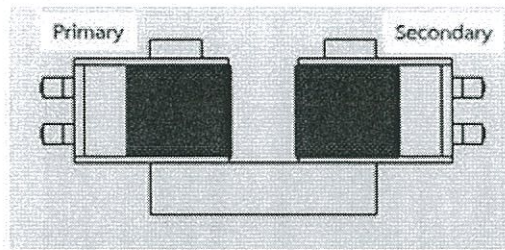
Primary coil = 400



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V_{out}$  กับ ระยะห่างของขดลวดทั้ง 2 ที่  $V_{in}$  10 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 2

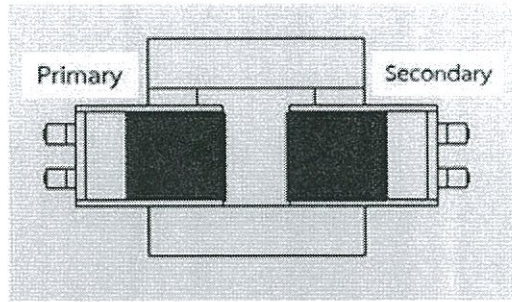


รูปที่ 4.13 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

ตารางที่ 4.8 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.24
		4.2	0.54
		6.3	0.83
		8.4	1.13
		10.5	1.41
	800	2.1	0.99
		4.2	2.16
		6.3	3.34
		8.4	4.5
		10.5	5.6
	1,600	2.1	1.96
		4.2	4.26
		6.3	6.6
		8.4	8.9
		10.5	11.1
	3,200	2.1	3.9
		4.2	8.5
		6.3	13.2
		8.4	17.8
		10.5	22.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

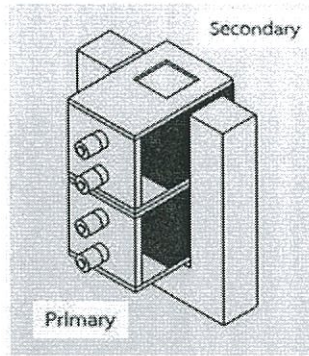


รูปที่ 4.14 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

ตารางที่ 4.9 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.5
		4.2	1.2
		6.3	1.9
		8.4	2.5
		10.5	3.1
	800	2.1	2
		4.2	4.8
		6.3	7.5
		8.4	10
		10.5	12.3
	1,600	2.1	4.1
		4.2	9.6
		6.3	14.9
		8.4	20
		10.5	24.6
3,200	2.1	8.3	
	4.2	19.1	
	6.3	29.8	
	8.4	39.8	
	10.5	49.2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

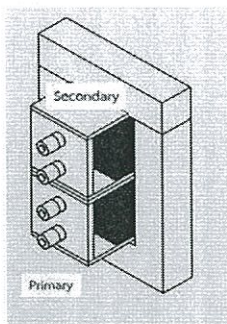


รูปที่ 4.15 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

ตารางที่ 4.10 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.4
		4.2	0.9
		6.3	1.36
		8.5	1.8
		10.6	2.24
	800	2.1	1.8
		4.3	3.6
		6.4	5.4
		8.5	7.2
		10.6	9
	1,600	2.1	3.5
		4.3	7.2
		6.4	10.8
		8.5	14.3
		10.6	17.7
	3,200	2.1	6.9
		4.2	14.2
		6.4	21.3
		8.5	28.3
		10.6	35.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



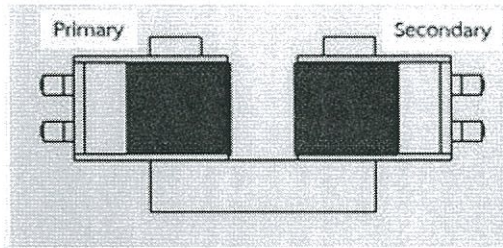
รูปที่ 4.16 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

ตารางที่ 4.11 วัดค่า  $V_{out}$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil ที่มีจำนวน Primary coil = 400 รอบ โดยที่วางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

Primary coil	Secondary coil	Volt(V)	
		input	output
400	200	2.1	0.7
		4.2	1.47
		6.3	2.25
		8.5	3
		10.6	3.7
	800	2.1	2.8
		4.3	6
		6.4	9
		8.5	11.9
		10.6	14.7
	1,600	2.1	5.6
		4.3	11.8
		6.4	18
		8.5	23.8
		10.6	29.5
	3,200	2.1	11.1
		4.2	23.5
		6.4	35.8
		8.5	47.6
		10.6	58.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 3



รูปที่ 4.17 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

ตารางที่ 4.12 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	100	2.1	0.24	0.24	0.006	0.50	0.0014	0.286
	100	4.2	0.47	0.51	0.005	1.97	0.0026	0.129
	100	6.2	0.69	0.78	0.008	4.28	0.0062	0.146
	100	8.3	0.91	1.06	0.01	7.55	0.0106	0.141
	100	10.4	1.15	1.33	0.013	12	0.0173	0.144
800	100	2.1	0.25	0.8	0.008	0.525	0.0064	1.219
	100	4.3	0.48	1.73	0.017	2.064	0.02941	1.425
	100	6.3	0.7	2.7	0.027	4.41	0.0729	1.653
	100	8.5	0.93	3.65	0.036	7.905	0.1314	1.662
	100	10.5	1.16	4.56	0.046	12.18	0.20976	1.722
1,600	100	2.1	0.25	0.96	0.01	0.525	0.0096	1.829
	100	4.2	0.49	2.07	0.02	2.058	0.0414	2.011
	100	6.3	0.72	3.2	0.032	4.536	0.1024	2.258
	100	8.4	0.95	4.3	0.043	7.98	0.1849	2.317
	100	10.5	1.2	5.4	0.054	12.6	0.2916	2.314
3,200	100	2.1	0.26	0.67	0.0066	0.546	0.0044	0.81
	100	4.2	0.5	1.4	0.014	2.1	0.0196	0.933
	100	6.3	0.74	2.16	0.022	4.662	0.0475	1.019
	100	8.4	0.98	2.9	0.029	8.232	0.0841	1.022
	100	10.5	1.22	3.6	0.036	12.81	0.1296	1.011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

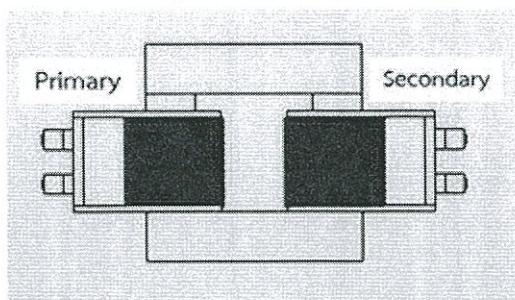
Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	500	2.1	0.24	0.23	0.00002	0.5	5E-06	0.001
	500	4.2	0.47	0.5	0.00006	1.97	0.00003	0.002
	500	6.3	0.69	0.8	0.0002	4.35	0.00016	0.004
	500	8.4	0.92	1.08	0.00048	7.73	0.00052	0.007
	500	10.5	1.15	1.35	0.001	12.1	0.00135	0.011
800	500	2.1	0.25	0.92	0.0003	0.53	0.00028	0.053
	500	4.3	0.48	2	0.003	2.06	0.006	0.29
	500	6.3	0.7	3.13	0.006	4.41	0.0188	0.426
	500	8.5	0.92	4.23	0.008	7.82	0.0338	0.433
	500	10.5	1.15	5.28	0.01	12.1	0.0528	0.437
1,600	500	2.1	0.25	1.64	0.002	0.53	0.0033	0.625
	500	4.2	0.47	3.58	0.007	1.97	0.025	1.269
	500	6.3	0.7	5.5	0.01	4.41	0.055	1.247
	500	8.4	0.92	7.46	0.015	7.73	0.1119	1.448
	500	10.4	1.15	9.3	0.02	12	0.186	1.555
3,200	500	2.1	0.25	2.13	0.004	0.53	0.0085	1.623
	500	4.3	0.48	4.6	0.009	2.06	0.0414	2.006
	500	6.3	0.7	7.1	0.014	4.41	0.0994	2.254
	500	8.5	0.95	9.6	0.02	8.07	0.192	2.378
	500	10.5	1.18	12	0.024	12.4	0.288	2.324

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบ แกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	1000	2.1	0.25	0.23	0.00001	0.53	2E-06	0.0004
	1000	4.2	0.47	0.52	0.00002	1.97	1E-05	0.0005
	1000	6.3	0.69	0.81	0.00004	4.35	3E-05	0.0007
	1000	8.4	0.92	1.09	0.00008	7.73	8.7E-05	0.0011
	1000	10.5	1.15	1.36	0.00014	12.1	0.00019	0.0016
800	1000	2.1	0.24	0.92	0.00006	0.5	5.5E-05	0.011
	1000	4.3	0.47	2	0.00043	2.02	0.00086	0.0426
	1000	6.3	0.69	3.19	0.0017	4.35	0.00542	0.1248
	1000	8.5	0.92	4.3	0.004	7.82	0.0172	0.22
	1000	10.5	1.15	5.36	0.005	12.1	0.0268	0.222
1,600	1000	2.1	0.24	1.75	0.0003	0.5	0.0005	0.104
	1000	4.2	0.47	3.8	0.003	1.97	0.0114	0.578
	1000	6.3	0.69	5.97	0.0059	4.35	0.0352	0.81
	1000	8.4	0.92	8	0.008	7.73	0.064	0.828
	1000	10.5	1.15	10	0.01	12.1	0.1	0.828
3,200	1000	2.1	0.25	2.8	0.0012	0.53	0.0034	0.64
	1000	4.3	0.48	6.1	0.006	2.06	0.0366	1.773
	1000	6.3	0.7	9.4	0.009	4.41	0.0846	1.918
	1000	8.5	0.94	12.72	0.013	7.99	0.1654	2.067
	1000	10.6	1.17	16	0.016	12.4	0.256	2.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

ตารางที่ 4.15 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	100	2.1	0.16	0.48	0.0045	0.34	0.00216	0.643
	100	4.3	0.28	1.15	0.0116	1.2	0.01334	1.108
	100	6.4	0.39	1.8	0.018	2.5	0.0324	1.298
	100	8.5	0.53	2.4	0.024	4.5	0.0576	1.279
	100	10.6	0.67	2.97	0.03	7.1	0.0891	1.255
800	100	2.1	0.17	1.5	0.015	0.36	0.0225	6.303
	100	4.2	0.31	3.45	0.034	1.3	0.1173	9
	100	6.3	0.45	5.4	0.054	2.84	0.2916	10.286
	100	8.4	0.6	7.3	0.073	5.04	0.5329	10.573
	100	10.5	0.75	9	0.09	7.88	0.81	10.286
1,600	100	2.1	0.19	1.6	0.016	0.4	0.0256	6.416
	100	4.2	0.35	3.55	0.036	1.47	0.1278	8.694
	100	6.3	0.51	5.56	0.056	3.21	0.3114	9.69
	100	8.4	0.68	7.5	0.076	5.71	0.57	9.979
	100	10.5	0.85	9.46	0.094	8.93	0.89	9.963
3,200	100	2.1	0.2	1.03	0.01	0.42	0.0103	2.452
	100	4.3	0.36	2.23	0.023	1.55	0.0513	3.313
	100	6.3	0.53	3.44	0.035	3.34	0.1204	3.606
	100	8.5	0.7	4.68	0.047	5.95	0.22	3.697
	100	10.6	0.88	5.85	0.059	9.33	0.345	3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 ทาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

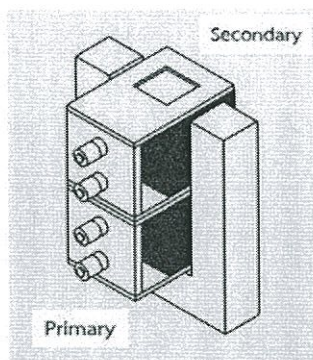
Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	500	2.1	0.16	0.49	0.00005	0.34	2.5E-05	0.0073
	500	4.3	0.27	1.17	0.0006	1.16	0.0007	0.06
	500	6.3	0.39	1.83	0.0025	2.46	0.0046	0.186
	500	8.5	0.52	2.45	0.0046	4.42	0.0113	0.255
	500	10.6	0.66	3	0.006	7	0.018	0.257
800	500	2.1	0.16	1.84	0.0025	0.34	0.0046	1.37
	500	4.2	0.28	4.4	0.008	1.18	0.0352	3
	500	6.3	0.4	6.9	0.014	2.52	0.0966	3.83
	500	8.4	0.54	9.2	0.018	4.54	0.1656	3.65
	500	10.5	0.68	11.37	0.023	7.14	0.2615	3.66
1,600	500	2.1	0.17	3.23	0.006	0.36	0.0194	5.43
	500	4.2	0.3	7.45	0.015	1.26	0.1118	8.87
	500	6.3	0.44	11.6	0.023	2.77	0.2668	9.625
	500	8.5	0.59	15.7	0.03	5	0.471	9.392
	500	10.5	0.74	19.44	0.038	7.77	0.7387	9.507
3,200	500	2.1	0.18	3.63	0.007	0.38	0.0254	6.7
	500	4.3	0.34	8.1	0.017	1.46	0.1377	9.42
	500	6.4	0.5	12.7	0.026	3.2	0.3302	10.32
	500	8.5	0.66	17.2	0.034	5.61	0.5848	10.42
	500	10.6	0.83	21.6	0.043	8.8	0.9288	10.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	1000	2.1	0.15	0.5	0.00002	0.32	0.00001	0.0032
	1000	4.2	0.27	1.17	0.00008	1.13	9.4E-05	0.0083
	1000	6.3	0.39	1.83	0.0003	2.46	0.00055	0.0223
	1000	8.5	0.52	2.45	0.0007	4.42	0.0017	0.0388
	1000	10.5	0.66	3	0.0014	6.93	0.0042	0.0606
800	1000	2.1	0.16	1.89	0.0003	0.34	0.0006	0.1687
	1000	4.2	0.28	4.5	0.0043	1.18	0.0194	1.6454
	1000	6.3	0.4	7.1	0.007	2.52	0.0497	1.9722
	1000	8.5	0.53	9.5	0.009	4.5	0.0855	1.8979
	1000	10.5	0.67	11.72	0.012	7.03	0.1406	1.9991
1,600	1000	2.1	0.16	3.54	0.0025	0.34	0.0088	2.6339
	1000	4.2	0.3	8.35	0.008	1.26	0.0668	5.3016
	1000	6.3	0.42	13.1	0.013	2.65	0.1703	6.4361
	1000	8.5	0.56	17.6	0.018	4.76	0.3168	6.6555
	1000	10.5	0.7	21.76	0.022	7.35	0.4787	6.5132
3,200	1000	2.1	0.18	5.12	0.005	0.38	0.0256	6.7725
	1000	4.3	0.33	11.7	0.012	1.42	0.1404	9.8943
	1000	6.4	0.47	18.3	0.019	3	0.3477	11.559
	1000	8.5	0.63	24.8	0.025	5.4	0.62	11.578
	1000	10.6	0.79	30.8	0.03	8.37	0.924	11.034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

ตารางที่ 4.18 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	100	2.1	0.12	0.43	0.0043	0.26	0.00185	0.734
	100	4.3	0.23	0.9	0.009	0.99	0.0081	0.82
	100	6.4	0.34	1.33	0.014	2.18	0.0186	0.856
	100	8.6	0.46	1.77	0.018	3.96	0.032	0.805
	100	10.6	0.59	2.2	0.022	6.25	0.0484	0.774
800	100	2.1	0.13	1.5	0.015	0.27	0.0225	8.242
	100	4.3	0.24	3.08	0.03	1.03	0.0924	8.953
	100	6.3	0.36	4.6	0.046	2.27	0.2116	9.33
	100	8.5	0.48	6.2	0.062	4.08	0.3844	9.42
	100	10.6	0.6	7.6	0.077	6.36	0.5852	9.2
1,600	100	2.1	0.15	2	0.02	0.32	0.04	12.7
	100	4.3	0.28	4.1	0.041	1.2	0.1681	13.96
	100	6.4	0.42	6.15	0.062	2.69	0.3813	14.185
	100	8.5	0.56	8.2	0.082	4.76	0.6724	14.126
	100	10.6	0.7	10.2	0.1	7.42	1.02	13.747
3,200	100	2.1	0.17	1.48	0.015	0.36	0.0222	6.218
	100	4.3	0.32	3	0.03	1.38	0.09	6.54
	100	6.4	0.48	4.5	0.045	3.07	0.2025	6.6
	100	8.5	0.64	6	0.06	5.44	0.36	6.62
	100	10.6	0.8	7.5	0.075	8.48	0.5625	6.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

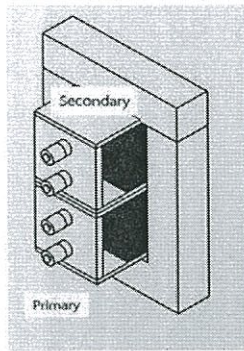
Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	500	2.1	0.12	0.44	0.0001	0.25	0.00004	0.0175
	500	4.3	0.23	0.9	0.0004	0.99	0.00036	0.0364
	500	6.4	0.34	1.36	0.001	2.18	0.00136	0.0625
	500	8.6	0.46	1.8	0.0027	3.96	0.00486	0.123
	500	10.7	0.59	2.24	0.0044	6.31	0.00986	0.156
800	500	2.1	0.13	1.7	0.0022	0.27	0.00374	1.37
	500	4.2	0.23	3.45	0.007	0.97	0.02415	2.5
	500	6.3	0.34	5.2	0.01	2.14	0.052	2.428
	500	8.5	0.46	6.9	0.014	3.91	0.0966	2.47
	500	10.6	0.6	8.6	0.017	6.36	0.1462	2.298
1,600	500	2.1	0.13	3.1	0.006	0.27	0.0186	6.813
	500	4.3	0.24	6.3	0.013	1.03	0.0819	7.936
	500	6.4	0.36	9.5	0.02	2.3	0.19	8.247
	500	8.5	0.48	12.6	0.025	4.08	0.315	7.72
	500	10.6	0.61	15.7	0.03	6.47	0.471	7.284
3,200	500	2.1	0.144	4.2	0.008	3.02	0.0336	1.111
	500	4.3	0.27	8.7	0.018	1.16	0.1566	13.5
	500	6.4	0.4	13	0.026	2.56	0.338	13.2
	500	8.5	0.54	17.4	0.035	4.59	0.609	13.27
	500	10.6	0.68	21.6	0.043	7.2	0.9288	12.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอปกแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	1000	2.1	0.12	0.44	0.00006	0.25	2.6E-05	0.01
	1000	4.3	0.23	0.9	0.0001	0.99	0.00009	0.009
	1000	6.4	0.34	1.35	0.0002	2.18	0.00027	0.012
	1000	8.6	0.46	1.8	0.0004	3.96	0.00072	0.018
	1000	10.7	0.59	2.23	0.0007	6.31	0.00156	0.025
800	1000	2.1	0.13	1.7	0.00037	0.27	0.0006	0.23
	1000	4.3	0.23	3.55	0.0026	0.99	0.0092	0.93
	1000	6.4	0.34	5.3	0.005	2.18	0.0265	1.22
	1000	8.5	0.46	7	0.007	3.91	0.049	1.25
	1000	10.6	0.59	8.8	0.009	6.25	0.08	1.27
1,600	1000	2.1	0.13	3.26	0.002	0.27	0.0065	2.4
	1000	4.3	0.24	6.7	0.0067	1.03	0.045	4.35
	1000	6.4	0.35	10	0.01	2.24	0.1	4.46
	1000	8.5	0.47	13.36	0.014	4	0.187	4.68
	1000	10.6	0.6	16.6	0.017	6.36	0.2822	4.44
3,200	1000	2.1	0.14	5.34	0.005	0.29	0.0267	9.08
	1000	4.3	0.25	11	0.011	1.07	0.121	11.26
	1000	6.4	0.38	16.5	0.017	2.43	0.2805	11.53
	1000	8.6	0.5	22	0.022	4.3	0.484	11.26
	1000	10.7	0.64	27.2	0.027	6.85	0.7344	10.72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

ตารางที่ 4.21 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	100	2.1	0.1	0.66	0.0066	0.21	0.0044	2.07
	100	4.3	0.2	1.4	0.015	0.86	0.021	2.44
	100	6.4	0.27	2.2	0.022	1.73	0.0484	2.8
	100	8.6	0.37	2.9	0.029	3.18	0.0841	2.64
	100	10.7	0.48	3.6	0.036	5.14	0.1296	2.52
800	100	2.1	0.13	2.1	0.021	0.27	0.0441	16.15
	100	4.3	0.24	4.46	0.045	1.03	0.2	19.45
	100	6.3	0.36	6.8	0.068	2.27	0.4624	20.39
	100	8.5	0.48	9	0.09	4.08	0.81	19.85
	100	10.6	0.6	11.2	0.112	6.36	1.2544	19.72
1,600	100	2.1	0.16	2.3	0.023	0.34	0.0529	15.74
	100	4.2	0.3	4.76	0.048	1.26	0.2285	18.13
	100	6.3	0.46	7.2	0.07	2.9	0.504	17.39
	100	8.5	0.62	9.6	0.096	5.27	0.9216	17.49
	100	10.5	0.78	12	0.12	8.19	1.44	17.58
3,200	100	2.1	0.18	1.48	0.015	0.38	0.0222	5.87
	100	4.3	0.34	3	0.03	1.46	0.09	6.16
	100	6.4	0.5	4.6	0.046	3.2	0.2116	6.61
	100	8.5	0.68	6.1	0.06	5.78	0.366	6.33
	100	10.6	0.86	7.6	0.076	9.12	0.5776	6.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	500	2.2	0.1	0.68	0.0002	0.22	0.00014	0.06
	500	4.3	0.2	1.47	0.0015	0.86	0.0022	0.26
	500	6.4	0.27	2.24	0.0044	1.73	0.0099	0.57
	500	8.6	0.36	2.98	0.006	3.1	0.0179	0.58
	500	10.7	0.47	3.68	0.007	5.03	0.0258	0.51
800	500	2.1	0.1	2.6	0.005	0.21	0.013	6.2
	500	4.3	0.2	5.6	0.011	0.86	0.0616	7.16
	500	6.3	0.28	8.4	0.017	1.76	0.1428	8.09
	500	8.5	0.39	11.27	0.023	3.32	0.2592	7.82
	500	10.6	0.5	13.9	0.028	5.3	0.3892	7.34
1,600	500	2.1	0.12	4.45	0.009	0.25	0.04	15.89
	500	4.3	0.23	9.46	0.02	0.99	0.1892	19.13
	500	6.4	0.34	14.3	0.03	2.18	0.429	19.72
	500	8.5	0.46	19.1	0.04	3.91	0.764	19.54
	500	10.6	0.6	23.7	0.047	6.36	1.1139	17.51
3,200	500	2.1	0.15	5.1	0.01	0.32	0.051	16.19
	500	4.3	0.3	10.7	0.02	1.29	0.214	16.59
	500	6.4	0.44	16.25	0.03	2.82	0.4875	17.31
	500	8.5	0.6	21.6	0.043	5.1	0.9288	18.21
	500	10.5	0.75	27	0.05	7.88	1.35	17.14

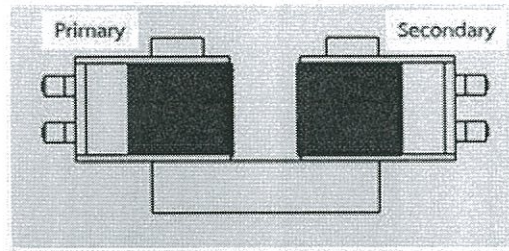
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 หาค่า %ประสิทธิภาพของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	P in (W)	P out (W)	%
200	1000	2.2	0.1	0.7	0.00008	0.22	0.00005	0.026
	1000	4.3	0.2	1.5	0.0003	0.86	0.0005	0.05
	1000	6.5	0.27	2.26	0.0007	1.76	0.0016	0.09
	1000	8.7	0.37	3	0.0016	3.22	0.0048	0.15
	1000	10.7	0.47	3.7	0.003	5	0.0111	0.22
800	1000	2.1	0.1	2.67	0.001	0.21	0.0027	1.27
	1000	4.3	0.19	5.7	0.0057	0.82	0.0325	3.97
	1000	6.4	0.28	8.7	0.0088	1.8	0.0766	4.27
	1000	8.6	0.38	11.6	0.012	3.26	0.1392	4.26
	1000	10.6	0.48	14.3	0.015	5.09	0.2145	4.22
1,600	1000	2.1	0.11	4.9	0.0048	0.23	0.0235	10.18
	1000	4.3	0.2	10.5	0.01	0.86	0.105	12.2
	1000	6.4	0.3	16	0.016	1.92	0.256	13.33
	1000	8.6	0.42	21.35	0.022	3.61	0.4697	13
	1000	10.6	0.53	26.3	0.027	5.62	0.7101	12.64
3,200	1000	2.1	0.14	7.1	0.007	0.3	0.0497	16.9
	1000	4.3	0.26	15	0.015	1.11	0.225	20.13
	1000	6.3	0.39	22.8	0.023	2.45	0.5244	21.34
	1000	8.6	0.53	30.6	0.03	4.56	0.918	20.14
	1000	10.6	0.67	37.9	0.04	7.1	1.516	21.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 4



รูปที่ 4.21 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

ตารางที่ 4.24 หาค่า  $M$  และ  $k$  ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	100	2.1	0.24	0.24	0.006	0.718815	0.0124449
	100	4.2	0.47	0.51	0.005	0.303778	0.0052593
	100	6.2	0.69	0.78	0.008	0.33124	0.0057348
	100	8.3	0.91	1.06	0.01	0.313653	0.0054303
	100	10.4	1.15	1.33	0.013	0.322786	0.0055884
800	100	2.1	0.25	0.8	0.008	14.77637	0.0639559
	100	4.3	0.48	1.73	0.017	16.35386	0.0707837
	100	6.3	0.7	2.7	0.027	17.8108	0.0770897
	100	8.5	0.93	3.65	0.036	17.87447	0.0773653
	100	10.5	1.16	4.56	0.046	18.31134	0.0792562
1,600	100	2.1	0.25	0.96	0.01	73.92057	0.1599735
	100	4.2	0.49	2.07	0.02	75.42818	0.1632362
	100	6.3	0.72	3.2	0.032	82.1334	0.1777471
	100	8.4	0.95	4.3	0.043	83.64638	0.1810214
	100	10.5	1.2	5.4	0.054	83.16007	0.179969
3,200	100	2.1	0.26	0.67	0.0066	187.6674	0.203068
	100	4.2	0.5	1.4	0.014	207.0029	0.2239904
	100	6.3	0.74	2.16	0.022	219.7909	0.2378278
	100	8.4	0.98	2.9	0.029	218.7713	0.2367245
	100	10.5	1.22	3.6	0.036	218.153	0.2360554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

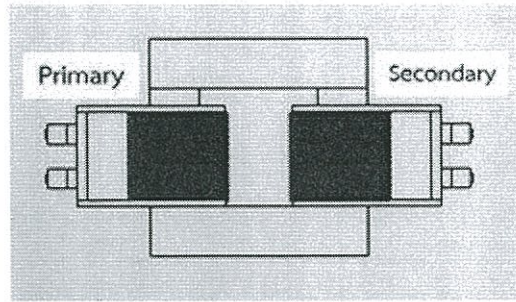
Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	500	2.1	0.24	0.23	0.00002	0.000645	0.00001
	500	4.2	0.47	0.5	0.00006	0.000299	0.000005
	500	6.3	0.69	0.8	0.0002	0.004679	0.00008
	500	8.4	0.92	1.08	0.00048	0.011329	0.0001961
	500	10.5	1.15	1.35	0.001	0.021374	0.0003701
800	500	2.1	0.25	0.92	0.0003	0.542776	0.0023493
	500	4.3	0.48	2	0.003	2.87473	0.0124426
	500	6.3	0.7	3.13	0.006	3.946445	0.0170812
	500	8.5	0.92	4.23	0.008	4.003444	0.0173279
	500	10.5	1.15	5.28	0.01	4.003465	0.017328
1,600	500	2.1	0.25	1.64	0.002	14.76567	0.0319548
	500	4.2	0.47	3.58	0.007	27.50391	0.059522
	500	6.3	0.7	5.5	0.01	26.37955	0.0570887
	500	8.4	0.92	7.46	0.015	30.10983	0.0651615
	500	10.4	1.15	9.3	0.02	32.11894	0.0695095
3,200	500	2.1	0.25	2.13	0.004	118.2653	0.1279706
	500	4.3	0.48	4.6	0.009	138.5935	0.149967
	500	6.3	0.7	7.1	0.014	147.8333	0.159965
	500	8.5	0.95	9.6	0.02	155.6158	0.1683862
	500	10.5	1.18	12	0.024	150.3394	0.1626768

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.26 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	1,000	2.1	0.25	0.23	0.00001	0.001775	0.00003
	1,000	4.2	0.47	0.52	0.00002	0.002295	0.00004
	1,000	6.3	0.69	0.81	0.00004	0.002064	0.000035
	1,000	8.4	0.92	1.09	0.00008	0.001262	0.00002
	1,000	10.5	1.15	1.36	0.00014	0.00025	0.000004
800	1,000	2.1	0.24	0.92	0.00006	0.103312	0.0004472
	1,000	4.3	0.47	2	0.00043	0.409202	0.0017711
	1,000	6.3	0.69	3.19	0.0017	1.123734	0.0048638
	1,000	8.5	0.92	4.3	0.004	1.994158	0.0086312
	1,000	10.5	1.15	5.36	0.005	1.9942	0.0086314
1,600	1,000	2.1	0.24	1.75	0.0003	2.287178	0.0049497
	1,000	4.2	0.47	3.8	0.003	11.77204	0.0254762
	1,000	6.3	0.69	5.97	0.0059	15.77692	0.0341433
	1,000	8.4	0.92	8	0.008	16.04465	0.0347227
	1,000	10.5	1.15	10	0.01	16.04465	0.0347227
3,200	1,000	2.1	0.25	2.8	0.0012	35.45208	0.0383614
	1,000	4.3	0.48	6.1	0.006	92.37553	0.0999562
	1,000	6.3	0.7	9.4	0.009	95.01369	0.1028109
	1,000	8.5	0.94	12.72	0.013	102.2044	0.1105917
	1,000	10.6	1.17	16	0.016	101.0611	0.1093546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

ตารางที่ 4.27 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	100	2.1	0.16	0.48	0.0045	0.802696	0.0138971
	100	4.3	0.28	1.15	0.0116	1.183377	0.0204878
	100	6.4	0.39	1.8	0.018	1.318224	0.0228224
	100	8.5	0.53	2.4	0.024	1.293352	0.0223918
	100	10.6	0.67	2.97	0.03	1.279017	0.0221436
800	100	2.1	0.17	1.5	0.015	40.74366	0.176349
	100	4.2	0.31	3.45	0.034	50.6443	0.2192014
	100	6.3	0.45	5.4	0.054	55.41138	0.2398346
	100	8.4	0.6	7.3	0.073	56.18099	0.2431656
	100	10.5	0.75	9	0.09	55.41138	0.2398346
1,600	100	2.1	0.19	1.6	0.016	155.6212	0.3367841
	100	4.2	0.35	3.55	0.036	190.0806	0.4113587
	100	6.3	0.51	5.56	0.056	202.9181	0.4391405
	100	8.4	0.68	7.5	0.076	206.5418	0.4469828
	100	10.5	0.85	9.46	0.094	204.367	0.4422762
3,200	100	2.1	0.2	1.03	0.01	369.6476	0.3999823
	100	4.3	0.36	2.23	0.023	472.3287	0.5110898
	100	6.3	0.53	3.44	0.035	488.2148	0.5282795
	100	8.5	0.7	4.68	0.047	496.3847	0.5371198
	100	10.6	0.88	5.85	0.059	495.6646	0.5363407

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.28 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

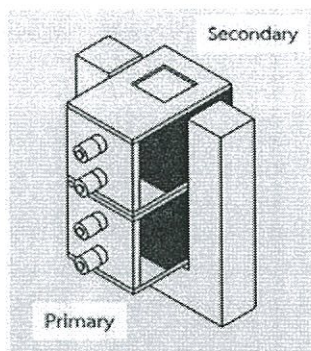
Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	500	2.1	0.16	0.49	0.00005	0.000728	0.000013
	500	4.3	0.27	1.17	0.0006	0.050377	0.0008722
	500	6.3	0.39	1.83	0.0025	0.170185	0.0029464
	500	8.5	0.52	2.45	0.0046	0.240472	0.0041633
	500	10.6	0.66	3	0.006	0.248069	0.0042948
800	500	2.1	0.16	1.84	0.0025	7.183376	0.0310915
	500	4.2	0.28	4.4	0.008	13.15224	0.0569262
	500	6.3	0.4	6.9	0.014	16.11786	0.0697622
	500	8.4	0.54	9.2	0.018	15.34841	0.0664318
	500	10.5	0.68	11.37	0.023	15.57593	0.0674166
1,600	500	2.1	0.17	3.23	0.006	65.17431	0.1410455
	500	4.2	0.3	7.45	0.015	92.33691	0.1998288
	500	6.3	0.44	11.6	0.023	96.53277	0.2089092
	500	8.5	0.59	15.7	0.03	93.89763	0.2032064
	500	10.5	0.74	19.44	0.038	94.83007	0.2052243
3,200	500	2.1	0.18	3.63	0.007	287.4522	0.3110416
	500	4.3	0.34	8.1	0.017	369.5881	0.3999179
	500	6.4	0.5	12.7	0.026	384.3697	0.4159125
	500	8.5	0.66	17.2	0.034	380.7829	0.4120314
	500	10.6	0.83	21.6	0.043	382.9425	0.4143682

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.29 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวยู (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	1,000	2.1	0.15	0.5	0.00002	0.006765	0.0001171
	1,000	4.2	0.27	1.17	0.00008	0.005243	0.0001
	1,000	6.3	0.39	1.83	0.0003	0.007272	0.0001259
	1,000	8.5	0.52	2.45	0.0007	0.023872	0.0004133
	1,000	10.5	0.66	3	0.0014	0.046785	0.00081
800	1,000	2.1	0.16	1.89	0.0003	0.828781	0.0035872
	1,000	4.2	0.28	4.5	0.0043	7.045046	0.0304928
	1,000	6.3	0.4	7.1	0.007	8.029871	0.0347553
	1,000	8.5	0.53	9.5	0.009	7.789557	0.0337152
	1,000	10.5	0.67	11.72	0.012	8.220351	0.0355798
1,600	1,000	2.1	0.16	3.54	0.0025	28.80954	0.0623475
	1,000	4.2	0.3	8.35	0.008	49.19989	0.1064748
	1,000	6.3	0.42	13.1	0.013	57.11057	0.1235946
	1,000	8.5	0.56	17.6	0.018	59.31019	0.1283548
	1,000	10.5	0.7	21.76	0.022	57.99106	0.1255
3,200	1,000	2.1	0.18	5.12	0.005	205.2783	0.2221242
	1,000	4.3	0.33	11.7	0.012	268.7336	0.2907869
	1,000	6.4	0.47	18.3	0.019	298.7533	0.3232701
	1,000	8.5	0.63	24.8	0.025	293.2588	0.3173247
	1,000	10.6	0.79	30.8	0.03	280.6333	0.3036631

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

ตารางที่ 4.30 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	100	2.1	0.12	0.43	0.0043	1.023455	0.0177191
	100	4.3	0.23	0.9	0.009	1.117625	0.0193495
	100	6.4	0.34	1.33	0.014	1.176719	0.0203726
	100	8.6	0.46	1.77	0.018	1.117833	0.0193531
	100	10.6	0.59	2.2	0.022	1.065006	0.0184385
800	100	2.1	0.13	1.5	0.015	53.28018	0.2306102
	100	4.3	0.24	3.08	0.03	57.71913	0.2498231
	100	6.3	0.36	4.6	0.046	59.00286	0.2553794
	100	8.5	0.48	6.2	0.062	59.6442	0.2581553
	100	10.6	0.6	7.6	0.077	59.25993	0.2564921
1,600	100	2.1	0.15	2	0.02	246.4002	0.5332414
	100	4.3	0.28	4.1	0.041	270.6002	0.5856134
	100	6.4	0.42	6.15	0.062	272.8006	0.5903753
	100	8.5	0.56	8.2	0.082	270.6002	0.5856134
	100	10.6	0.7	10.2	0.1	263.9993	0.5713281
3,200	100	2.1	0.17	1.48	0.015	652.3205	0.7058524
	100	4.3	0.32	3	0.03	693.0901	0.7499677
	100	6.4	0.48	4.5	0.045	693.0901	0.7499677
	100	8.5	0.64	6	0.06	693.0901	0.7499677
	100	10.6	0.8	7.5	0.075	693.0901	0.7499677

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.31 ทาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

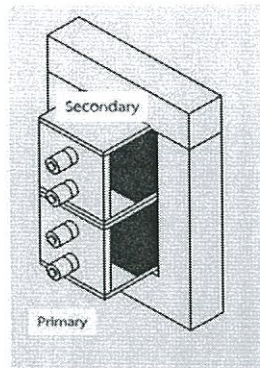
Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	500	2.1	0.12	0.44	0.0001	0.012389	0.0002145
	500	4.3	0.23	0.9	0.0004	0.037764	0.0006538
	500	6.4	0.34	1.36	0.001	0.072202	0.00125
	500	8.6	0.46	1.8	0.0027	0.157051	0.002719
	500	10.7	0.59	2.24	0.0044	0.203285	0.0035195
800	500	2.1	0.13	1.7	0.0022	7.778169	0.0336659
	500	4.2	0.23	3.45	0.007	14.01553	0.0606628
	500	6.3	0.34	5.2	0.01	13.54188	0.0586127
	500	8.5	0.46	6.9	0.014	14.01553	0.0606628
	500	10.6	0.6	8.6	0.017	13.04662	0.0564691
1,600	500	2.1	0.13	3.1	0.006	85.23113	0.184451
	500	4.3	0.24	6.3	0.013	100.0337	0.2164857
	500	6.4	0.36	9.5	0.02	102.6004	0.2220403
	500	8.5	0.48	12.6	0.025	96.18307	0.2081524
	500	10.6	0.61	15.7	0.03	90.81902	0.1965439
3,200	500	2.1	1.44	4.2	0.008	41.06449	0.0444344
	500	4.3	0.27	8.7	0.018	492.7827	0.5332223
	500	6.4	0.4	13	0.026	480.4597	0.519888
	500	8.5	0.54	17.4	0.035	479.0915	0.5184075
	500	10.6	0.68	21.6	0.043	467.4151	0.5057729

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.32 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (เปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	1,000	2.1	0.12	0.44	0.00006	0.002763	0.000048
	1,000	4.3	0.23	0.9	0.0001	0.0001	0.000002
	1,000	6.4	0.34	1.35	0.0002	0.004343	0.000075
	1,000	8.6	0.46	1.8	0.0004	0.012651	0.000219
	1,000	10.7	0.59	2.23	0.0007	0.022227	0.0003848
800	1,000	2.1	0.13	1.7	0.00037	1.273505	0.0055121
	1,000	4.3	0.23	3.55	0.0026	5.174358	0.0223959
	1,000	6.4	0.34	5.3	0.005	6.74565	0.0291969
	1,000	8.5	0.46	7	0.007	6.983189	0.030225
	1,000	10.6	0.59	8.8	0.009	7.001177	0.0303029
1,600	1,000	2.1	0.13	3.26	0.002	28.35583	0.0613656
	1,000	4.3	0.24	6.7	0.0067	51.51003	0.1114743
	1,000	6.4	0.35	10	0.01	52.71815	0.1140888
	1,000	8.5	0.47	13.36	0.014	54.96581	0.118953
	1,000	10.6	0.6	16.6	0.017	52.28096	0.1131427
3,200	1,000	2.1	0.14	5.34	0.005	263.9242	0.2855828
	1,000	4.3	0.25	11	0.011	325.1642	0.3518484
	1,000	6.4	0.38	16.5	0.017	330.6137	0.3577451
	1,000	8.6	0.5	22	0.022	325.1642	0.3518484
	1,000	10.7	0.64	27.2	0.027	311.7686	0.3373535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

ตารางที่ 4.33 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 100 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	100	2.1	0.1	0.66	0.0066	1.885061	0.0326361
	100	4.3	0.2	1.4	0.015	2.143707	0.037114
	100	6.4	0.27	2.2	0.022	2.327236	0.0402915
	100	8.6	0.37	2.9	0.029	2.238606	0.038757
	100	10.7	0.48	3.6	0.036	2.142115	0.0370865
800	100	2.1	0.13	2.1	0.021	74.59225	0.3228543
	100	4.3	0.24	4.46	0.045	86.58082	0.3747438
	100	6.3	0.36	6.8	0.068	87.22162	0.3775174
	100	8.5	0.48	9	0.09	86.58029	0.3747415
	100	10.6	0.6	11.2	0.112	86.19549	0.373076
1,600	100	2.1	0.16	2.3	0.023	265.6502	0.5749009
	100	4.2	0.3	4.76	0.048	295.6807	0.6398906
	100	6.3	0.46	7.2	0.07	281.2162	0.6085878
	100	8.5	0.62	9.6	0.096	286.1422	0.6192481
	100	10.5	0.78	12	0.12	284.3079	0.6152786
3,200	100	2.1	0.18	1.48	0.015	616.0805	0.6666383
	100	4.3	0.34	3	0.03	652.3201	0.7058519
	100	6.4	0.5	4.6	0.046	680.1525	0.7359683
	100	8.5	0.68	6.1	0.06	652.3197	0.7058514
	100	10.6	0.86	7.6	0.076	653.3315	0.7069463

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกันใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 500 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัวอี (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	500	2.2	0.1	0.68	0.0002	0.036104	0.0006251
	500	4.3	0.2	1.47	0.0015	0.193192	0.0033447
	500	6.4	0.27	2.24	0.0044	0.444216	0.0076907
	500	8.6	0.36	2.98	0.006	0.454971	0.0078769
	500	10.7	0.47	3.68	0.007	0.405192	0.0070151
800	500	2.1	0.1	2.6	0.005	23.0212	0.0996416
	500	4.3	0.2	5.6	0.011	25.32523	0.109614
	500	6.3	0.28	8.4	0.017	27.95932	0.121015
	500	8.5	0.39	11.27	0.023	27.15884	0.1175504
	500	10.6	0.5	13.9	0.028	25.78794	0.1116168
1,600	500	2.1	0.12	4.45	0.009	138.5059	0.2997444
	500	4.3	0.23	9.46	0.02	160.5925	0.3475426
	500	6.4	0.34	14.3	0.03	162.9531	0.3526513
	500	8.5	0.46	19.1	0.04	160.5912	0.3475399
	500	10.6	0.6	23.7	0.047	144.6593	0.3130611
3,200	500	2.1	0.15	5.1	0.01	492.7771	0.5332162
	500	4.3	0.3	10.7	0.02	492.7717	0.5332104
	500	6.4	0.44	16.25	0.03	503.9697	0.5453273
	500	8.5	0.6	21.6	0.043	529.7371	0.5732093
	500	10.5	0.75	27	0.05	492.7707	0.5332093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.35 หาค่า M และ k ของ Secondary coil ที่มีจำนวนรอบต่างกัน ใน Primary coil = 400 รอบ โดยมีตัวต้านทานเท่ากับ 1,000 โอห์ม และวางขดลวดทั้งสองประกอบแกนเหล็กอ่อนรูปตัววี (ปิด)

Secondary coil	Load R	V in (V)	I in (A)	V out (V)	I out (A)	M	k
200	1,000	2.2	0.1	0.7	0.00008	0.000811	0.000014
	1,000	4.3	0.2	1.5	0.0003	0.019435	0.0003365
	1,000	6.5	0.27	2.26	0.0007	0.048217	0.0008348
	1,000	8.7	0.37	3	0.0016	0.099064	0.0017151
	1,000	10.7	0.47	3.7	0.003	0.159269	0.0027574
800	1,000	2.1	0.1	2.67	0.001	4.535768	0.019632
	1,000	4.3	0.19	5.7	0.0057	13.76686	0.0595865
	1,000	6.4	0.28	8.7	0.0088	14.42356	0.0624288
	1,000	8.6	0.38	11.6	0.012	14.49478	0.0627371
	1,000	10.6	0.48	14.3	0.015	14.34512	0.0620893
1,600	1,000	2.1	0.11	4.9	0.0048	80.5121	0.1742384
	1,000	4.3	0.2	10.5	0.01	92.2488	0.1996382
	1,000	6.4	0.3	16	0.016	98.40722	0.2129658
	1,000	8.6	0.42	21.35	0.022	96.65487	0.2091735
	1,000	10.6	0.53	26.3	0.027	94.00166	0.2034316
3,200	1,000	2.1	0.14	7.1	0.007	369.5025	0.3998252
	1,000	4.3	0.26	15	0.015	426.3517	0.4613397
	1,000	6.3	0.39	22.8	0.023	435.8278	0.4715934
	1,000	8.6	0.53	30.6	0.03	418.3037	0.4526312
	1,000	10.6	0.67	37.9	0.04	441.2097	0.477417

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดเทียบกับรูปร่างของแกนโลหะ

จากการศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวดโดยอ้างอิงกับกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์โดยจะใช้ขดลวด Primary ที่มีจำนวนรอบแตกต่างกันกับขดลวด Secondary ทั้งมากกว่าและน้อยกว่า ผลปรากฏว่า

จากการทดลองตอนที่ 1 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary นำมาวางชิดกัน ค่า  $V_{out}$  นั้นออกมาน้อยมาก ๆ คือเกิดการเหนี่ยวนำขึ้นน้อยมาก แต่พอประกอบแกนโลหะตรงเข้าไป ก็มีค่า  $V_{out}$  เพิ่มขึ้นมากคือเกิดการเหนี่ยวนำมากขึ้น จากนั้นก็จับขดลวด Primary และขดลวด Secondary จากที่ชิดกันค่อยๆห่างออก 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm และ 50 mm ผลก็คือยิ่งระยะห่างระหว่างขดลวด Primary และขดลวด Secondary มีมากขึ้น ค่า  $V_{out}$  จะค่อยๆลดลง นั่นคือยิ่งขดลวดทั้ง 2 ห่างกันมาก การเหนี่ยวนำก็จะเกิดน้อยลง

จากการทดลองตอนที่ 2 นำขดลวด Primary และขดลวด Secondary มาประกอบกับแกนโลหะรูปตัว U และ แกนโลหะรูปตัว E โดยทำการทั้งที่ไม่ประกอบกับแกนโลหะปิดและไม่ประกอบแกนโลหะปิด ผลที่ได้คือ ขดลวดที่ประกอบกับแกนโลหะปิดจะเกิดการเหนี่ยวนำมากกว่าขดลวดที่ไม่ประกอบแกนโลหะปิด โดยแกนโลหะรูปตัว E ที่ประกอบกับแกนโลหะปิดจะเกิดการเหนี่ยวนำได้ดีที่สุด

จากนั้นนำตัวต้านทาน 100 Ohm, 500 Ohm และ 1,000 Ohm เข้ามาเพิ่มในวงจรเพื่อหาค่า % ประสิทธิภาพ จากการทดลองก็พบว่าขดลวดที่ประกอบกับแกนโลหะปิดจะมี % ประสิทธิภาพมากกว่าขดลวดที่ไม่ประกอบแกนโลหะปิด โดยแกนโลหะรูปตัว E ที่ประกอบกับแกนโลหะปิดจะมี % ประสิทธิภาพมากที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาเกี่ยวกับการเหนี่ยวนำไฟฟ้าในขดลวด ถึงการเพิ่ม  $V_{in}$  จะทำให้ % ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ก็ควรใช้ค่า  $V_{in}$  ให้เหมาะสมกับแกนที่ใช้ในการทดลองหากใช้มากไปอาจทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหายหรือเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงขึ้นได้

หม้อแปลงเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานด้วยสนามแม่เหล็ก ในขณะที่ใช้งานจึงควรระวังไม่นำไปใกล้อุปกรณ์ที่มีผลต่อสนามแม่เหล็ก เช่น แผ่นดิสก์ เทปเสียง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] 2559. กฎของบีโอด์ - ซาวารต์. [Online]. Available:  
[https://th.wikipedia.org/wiki/กฎของบีโอด์\\_-\\_ซาวารต์](https://th.wikipedia.org/wiki/กฎของบีโอด์_-_ซาวารต์)
- [2] 2559. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. [Online]. Available:  
<https://th.wikipedia.org/wiki/สนามแม่เหล็กไฟฟ้า>
- [3] 2559. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. [Online]. Available:  
[http://www.cr-engineer.com/images/pulldown\\_1304840984/Electromagnetic%20Field%20EMF.pdf](http://www.cr-engineer.com/images/pulldown_1304840984/Electromagnetic%20Field%20EMF.pdf)
- [4] 2559. Permeability (electromagnetism). [Online]. Available:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_\(electromagnetism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_(electromagnetism))
- [5] 2559. กฎของฟาราเดย์และการเหนี่ยวนำ. [Online]. Available:  
<http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/vichaipage/chap4.pdf>
- [6] 2559. ฟลักซ์แม่เหล็ก. [Online]. Available:  
<https://physicskruadd.wordpress.com/2012/03/13/ฟลักซ์แม่เหล็ก>
- [7] 2559. ตัวเหนี่ยวนำ. [Online]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ตัวเหนี่ยวนำ>
- [8] 2560. หม้อแปลงไฟฟ้า [Online]. Available:  
<http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-08.html>
- [9] 2559. แม่เหล็กไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก. [Online]. Available:  
<http://montri.rmutl.ac.th/assets/dc01.pdf>
- [10] 2560. Electromagnet Example No1. [Online]. Available:  
<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/electromagnets.html>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลอง  
การเหนี่ยวนำของฟาราเดย์  
(FARADAY'S LAW OF INDUCTION)

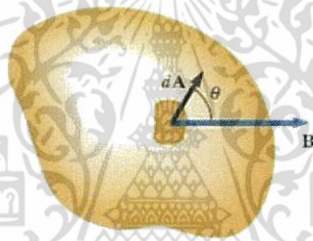
วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ศึกษาแกนโลหะที่ใช้รูปร่างใดที่จะมีผลต่อการเหนี่ยวนำของขดลวด

ทฤษฎี

-กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction)

ฟลักซ์แม่เหล็ก(magnetic flux) เป็นสัดส่วนกับเส้นสนามแม่เหล็กที่พุ่งผ่านพื้นที่ พิจารณาพื้นที่เล็กๆ  $dA'$  ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของพื้นผิว ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก

ถ้าสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งของพื้นที่เล็กๆ  $dA'$  นี้คือ  $B$  ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นที่เล็กๆนี้คือ  $B \times dA'$  เมื่อ  $dA'$  คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวซึ่งมีขนาดเท่ากับ  $dA$  ดังนั้นฟลักซ์แม่เหล็กรวม  $\phi_B$  ที่ผ่านพื้นผิวคือ

$$\phi_B = \int B \times dA' \quad [1]$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำให้เกิดในวงจรเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กผ่านพื้นผิวที่ล้อมรอบด้วยวงจร(ขดลวด)มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือกล่าวโดยทั่วไปว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าถูกเหนี่ยวนำให้เกิดในวงจรมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงจร

คำกล่าวนี้รู้จักกันในชื่อว่า กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's law of induction) และสามารถเขียนได้ว่า

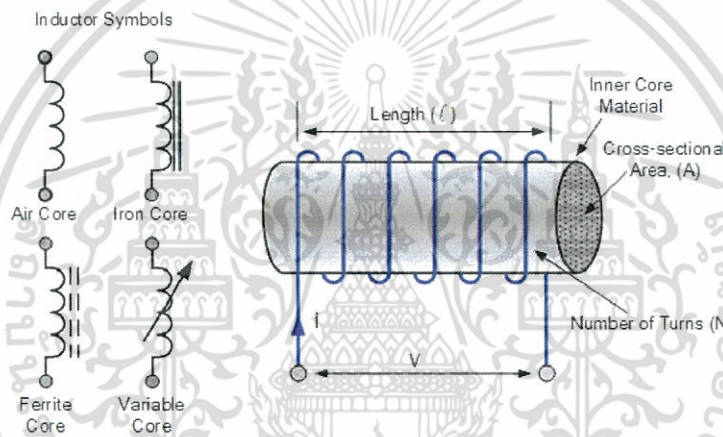
$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad [2]$$

เมื่อ  $\phi_B$  คือฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านพื้นผิวที่ล้อมรอบด้วยวงจร ซึ่งมีค่าคงสมการ[2] ถ้าวงจรประกอบด้วยขดลวดจำนวน  $N$  รอบ ที่เหมือนกันและพันอยู่บนแกนเดียวกันและถ้าเส้นสนามแม่เหล็กผ่านขดลวดทุกขด แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคือ

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt} \quad [3]$$

## ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

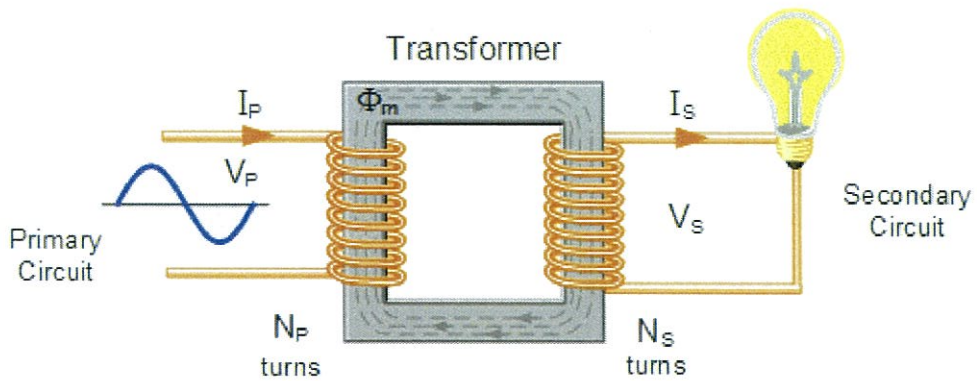
ตัวเหนี่ยวนำมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โซ้ค (Chock) หรือขดลวดโซเลนอยด์ เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท passive เช่นเดียวกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุ สร้างขึ้นโดยการพันเส้นลวดตัวนำรอบแกนโลหะหรืออากาศก็ได้ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวแกนของขดลวด ซึ่งแกนของขดลวดอาจเป็นทรงกระบอกตรงหรือวงแหวนก็ได้ ตัวเหนี่ยวนำจะถูกแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ตามชนิดของแกนนี้ เช่น แกนอากาศ แกนเหล็ก ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 สัญลักษณ์ของตัวเหนี่ยวนำ

## หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียวประกอบด้วยขดลวด 2 ขด ขดหนึ่งเรียกว่า ขดปฐมภูมิ (primary) อีกขดหนึ่งเรียกว่า ขดทุติยภูมิ (secondary) ดังรูปที่ 3 ขดปฐมภูมิทำหน้าที่รับพลังงานในขณะที่ขดทุติยภูมิทำหน้าที่ปล่อยพลังงาน ขดลวดทั้งสองไม่มีการเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า แต่ขดลวดทั้งสองพันอยู่บนแกนแกนเหล็กร่วมกัน โดยแกนเหล็กนี้ทำหน้าที่ทางเป็นวงจรแม่เหล็กแบบปิด (closed magnetic circuit) เรียกว่า แกน (core) แกนนี้สร้างจากเหล็กอ่อนโดยทั่วไปจะไม่ใช้เหล็กตันแต่จะใช้เหล็กแผ่นบาง ๆ วางซ้อนกันหลายชั้น เพื่อลดการสูญเสียกำลังงานในแกน



รูปที่ 3 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเฟสเดียว

ถึงแม้ขดลวดทั้งสองจะไม่มี การเชื่อมต่อกันทางไฟฟ้า แต่มีการเชื่อมต่อกันทางแม่เหล็กผ่านทางแกนนี้ ทำให้สามารถส่งผ่านกำลังไฟฟ้าจากขดปฐมภูมิไปยังขดทุติยภูมิได้ เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลในขดปฐมภูมิ จะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิได้

**ประสิทธิภาพของหม้อแปลง (Transformer Efficiency)**

กรณีอุดมคติ กำลังงานไฟฟ้าของขดปฐมภูมิจะเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าของขดทุติยภูมิ แต่หม้อแปลงไฟฟ้าในความเป็นจริงมีการสูญเสียเกิดขึ้นในรูปของความร้อน ดังนั้น กำลังงานไฟฟ้าของขดทุติยภูมิจะเท่ากับกำลังงานไฟฟ้าของขดปฐมภูมิเสมอ หมายความว่าหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 100 % โดยประสิทธิภาพ (efficiency) ของหม้อแปลงไฟฟ้านิยามดังนี้

$$\text{Efficiency, } \eta = \frac{\text{Output Power}}{\text{Input Power}} \times 100\% \quad [4]$$

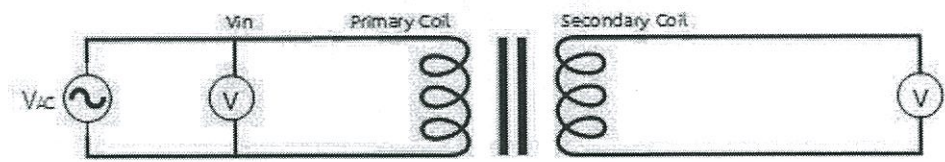
**อุปกรณ์**

- |   |   |         |
|---|---|---------|
| 1. ขดลวดทั้ง 5 ขด (200 รอบ, 400 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบ, 3,200 รอบ) | 1 | ชุด     |
| 2. แกนโลหะตรง   | 1 | อัน     |
| 3. แกนโลหะรูปตัว U  | 1 | อัน     |
| 4. แกนโลหะรูปตัว E  | 1 | อัน     |
| 5. แกนโลหะปิด   | 2 | อัน     |
| 6. AC power supply  | 1 | เครื่อง |
| 7. AC volt meter  | 1 | เครื่อง |
| 8. AC Amp meter   | 1 | เครื่อง |
| 9. ตัวหนีบสายไฟ   | 4 | เส้น    |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# วิธีการทดลอง

## ตอนที่ 1



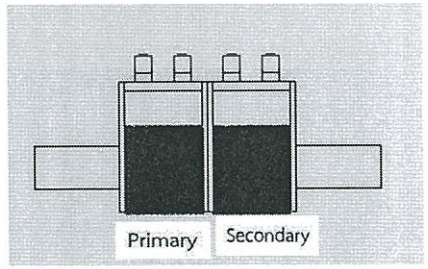
รูปที่ 4 วงจรหาค่า V out

ต่อวงจรดังรูปที่ 4 จัดเรียงขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ซิดกัน

1. กำหนดให้ขดลวด Primary มีจำนวนรอบ 400 รอบเท่านั้นแต่จะเพิ่ม  $V_{in}$  ที่แตกต่างกันเข้าไปในขดลวด Primary ส่วนขดลวด Secondary จะมีการเปลี่ยนขดลวด 200 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบ และ 3,200 รอบ ตามลำดับ
2. จัดเรียงขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามรูปที่ 6 และค่อยๆ ชยับขดลวดทั้ง 2 ห่างออกจากกัน 0 mm, 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm และ 50 mm ตามลำดับ



รูปที่ 6 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบแกนโลหะตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ที่ 0 mm.

$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
2						
4						
6						
8						
10						

ที่ 10 mm.

$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
2						
4						
6						
8						
10						

ที่ 20 mm.

$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
2						
4						
6						
8						
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 30 mm.

$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
2						
4						
6						
8						
10						

ที่ 40 mm.

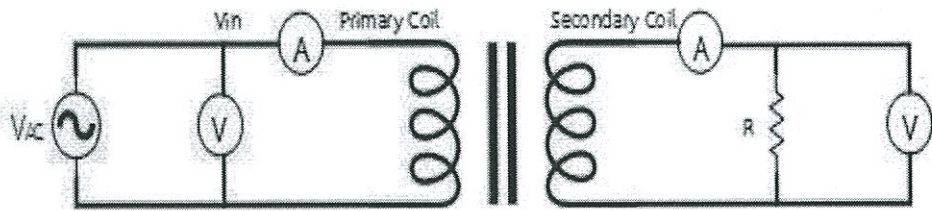
$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
2						
4						
6						
8						
10						

ที่ 50 mm.

$V_{in}(V)$	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
2						
4						
6						
8						
10						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

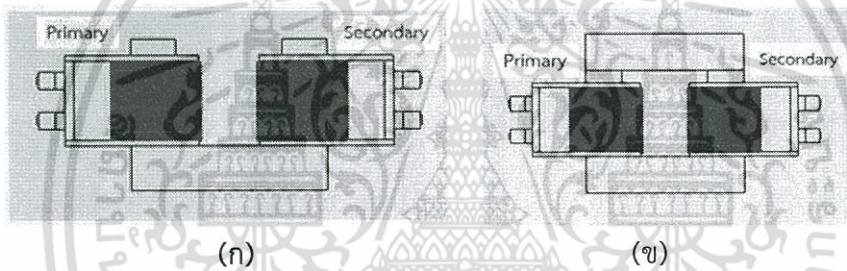
ตอนที่ 2



รูปที่ 7 วงจรหาค่า % ประสิทธิภาพ

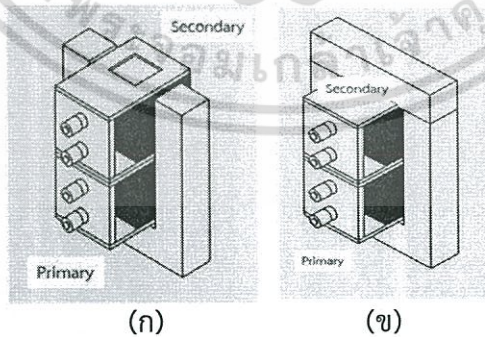
ต้องจรรยาตามรูปที่ 4 จัดเรียงขดลวด Primary และขดลวด Secondary ตามรูปที่ 7 กำหนดให้ขดลวด Primary มีจำนวนรอบ 400 รอบเท่านั้นแต่จะเพิ่ม  $V_{in}$  ที่แตกต่างกันเข้าไปในขดลวด Primary ส่วนขดลวด Secondary จะมีการเปลี่ยนขดลวด 200 รอบ, 800 รอบ, 1,600 รอบ และ 3,200 รอบตามลำดับ

1. ทำการทดลองแบบตอนที่ 1 โดยใช้แกนโลหะรูปตัว U ทำตามรูปที่ 4



รูปที่ 8 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบกับแกนโลหะตัว U

2. จากข้อที่ 1 ให้ใช้แกนโลหะรูปตัว E ดังภาพรูปที่ 8 บันทึกผลการทดลอง

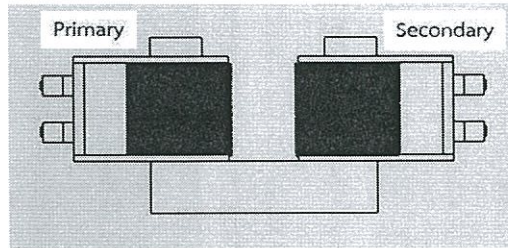


รูปที่ 9 ขดลวด Primary และขดลวด Secondary ประกอบกับแกนโลหะตัว E

3. หา % ประสิทธิภาพของแต่ละแกนที่ได้จากตารางการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางบันทึกผลการทดลอง



ที่  $V_{in} = 2\text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 4\text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 6\text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

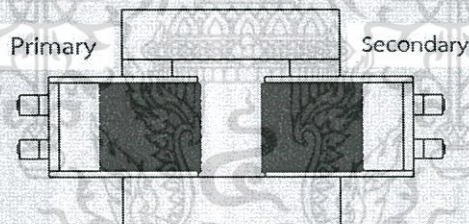
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $V_{in} = 8 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 10 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						



ที่  $V_{in} = 2 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $V_{in} = 4 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 6 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

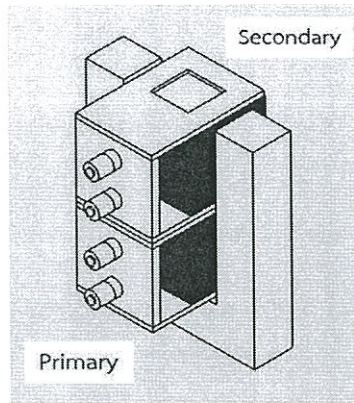
ที่  $V_{in} = 8 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 10 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ที่  $V_{in} = 2\text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 4\text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 6\text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

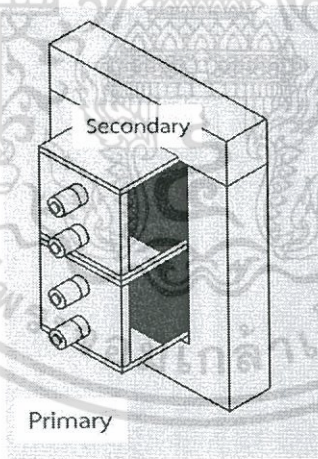
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $V_{in} = 8 \text{ V}$

secondary	$V_{Out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 10 \text{ V}$

secondary	$V_{Out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						



ที่  $V_{in} = 2 \text{ V}$

secondary	$V_{Out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $V_{in} = 4 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 6 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 8 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

ที่  $V_{in} = 10 \text{ V}$

secondary	$V_{out}(V)$	$I_{in}(A)$	$I_{out}(A)$	$P_{in}(W)$	$P_{out}(W)$	% ประสิทธิภาพ
200						
800						
1,600						
3,200						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

149454

