

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสนามของคลื่นโดยทฤษฎีการเหนี่ยวนำ  
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING FROM  
A ROTATING WHEEL.



นพคุณ ทองมี  
บรรณรักษ์ ทัตติยวงศ์  
บัณฑิต พรวิบูลย์กิจ

ปริญญาบัตรฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมแม่เหล็กและเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการหมุนของล้อโดยหลักการเหนี่ยวนำ  
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING FROM  
A ROTATING WHEEL



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงนี้ปีการศึกษา 2556 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING FROM  
A ROTATING WHEEL



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารฉบับนี้ **ACADEMIC YEAR 2013** ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการหมุนของล้อโดยหลักการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING FROM A ROTATING WHEEL

ผู้จัดทำ

นายนพดล ทงมี 53010795

นายวรายุทธ พิทักษ์วงศ์ 53011420

นายวศิน หริมรุ่งเรือง 53011442



(ดร.ดอน อิศรากร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา



(อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการหมุนของล้อโดยหลักการเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

โดย

นายนพดล	ทองมี	53010795
นายวรายุทธ	พิทักษ์วงศ์	53011420
นายวศิน	หริ่มรุ่งเรือง	53011442

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.ดอน อิศรากร  
อาจารย์สองเมือง นันทขว้าง

ปีการศึกษา 2556

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ นำเสนอเกี่ยวกับการทดลอง และการออกแบบเพื่อพัฒนาล้อรถเข็นให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเข็นของมนุษย์ โดยนำพลังงานที่ได้ไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ เพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ โดยที่ตัวล้อจะเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ที่เกิดจากการเข็นแล้วทำการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้หลักการของฟาราเดย์ โดยตัวล้อจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ชุดแม่เหล็ก และชุดขดลวดทองแดง โดยชุดแม่เหล็กจะติดที่ฝาของล้อทั้งซ้ายและขวา และชุดขดลวดทองแดงจะถูกหล่อเรซินติดกับเพลายู่ตรงกลาง เมื่อล้อหมุนจะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้า โดยในการทดสอบนำล้อต้นแบบไปทดสอบกับอุปกรณ์ทดลอง โดยให้ความเร็วที่เท่ากับคนเข็น ที่ความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แล้วนำพลังงานที่ได้มาเก็บไว้ยังแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTING FROM A ROTATING WHEEL

By

Mr. Nopadon Thongmee 53010795

Mr. Warayut Pitakwong 53011420

Mr. Wasin Rimrungruang 53011442

Advisors

Dr. Don Isarakorn

Mr. Songmoung Nundrakwang

Academic Year 2013

## ABSTRACT

The Thesis demonstrates the experiment and design of energy harvesting. It is developed to harvest the energy from pushing cart wheels. That energy will be collected in the battery in order to use for control electronic devices. The wheels will generate a energy source from pushing its and also transferring to electromagnetic energy, according to Faraday's Law. Two wheels is composed of magnetic set and copper set. The magnetic set will adhere both left and right of the rotor. The copper set will be casted by resin which adheres to the stator. When the wheels rotates, it brings about electricity. With testing the prototypical wheels, it is found that it give the 2.22 km/hr of velocity. Therefore, I also collect this energy to the battery.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับการช่วยเหลือ จาก ดร.ดอน อิศรากร และอาจารย์สองเมือง นันทขว้าง ที่ช่วยเหลือคอยแนะนำ เอื้อเฟื้ออุปการณ และให้ความรู้ ผู้จัดทำขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่คอยชี้แนะให้ความรู้ ช่วยเหลือทางด้านการใช้อุปกรณ์ ตลอดจนเอื้อเฟื้ออุปการณที่ขาด

และสุดท้ายผู้จัดทำขอขอบคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด ราชวิศวะกรรมจักรกล ที่ช่วยเหลือด้าน โครงสร้างของโครงการ และบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือด้านเงินทุนที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็น กำลังใจให้โครงการสำเร็จได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ ที่นี้ ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	IX
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ	4
2.1.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.1.2 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์	6
2.1.3 กฎของเลนซ์	7
2.1.4 ขดลวดโซลินอยด์	8
2.1.4.1 หลักการทำงานของขดลวดโซลินอยด์	8
2.1.5 ตัวเหนี่ยวนำ	10
2.1.5.1 ตัวเหนี่ยวนำอากาศ	11
2.1.5.2 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็ก	11
2.1.5.3 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์	12
2.1.5.4 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์	12
2.1.5.5 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก	12
2.1.6 ประเภทของตัวเหนี่ยวนำ	12
2.1.6.1 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่	12
2.1.6.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่า	13
2.1.7 ปังจยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า	13
2.1.8 ขดลวดตัวนำ (Coil) และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ	15

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.9 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก	17
2.1.9.1 แม่เหล็ก	17
2.1.9.2 สนามแม่เหล็ก	18
2.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง	18
2.2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	18
2.3 แบตเตอรี่	20
2.3.1 ประเภทของแบตเตอรี่	20
2.3.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	21
2.3.2.1 การชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	21
2.3.2.2 วงจรป้องกันของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	24
<b>บทที่ 3 หลักการออกแบบ</b>	26
3.1 โครงสร้างทางกายภาพของล้อกำเนิดพลังงาน	27
3.1.1 แม่เหล็ก	27
3.1.2 ขดลวดตัวนำ	27
3.2 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 1	28
3.2.1 แม่เหล็ก	28
3.2.2 ขดลวดตัวนำ	28
3.3 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 2	29
3.3.1 แม่เหล็ก	29
3.3.2 ขดลวดตัวนำ	29
3.4 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 3	30
3.4.1 แม่เหล็ก	30
3.4.2 ขดลวดตัวนำ	31
3.5 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 4	32
3.5.1 แม่เหล็ก	32
3.5.2 ขดลวดตัวนำ	32
3.6 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 5	32
3.6.1 แม่เหล็ก	34
3.6.2 ขดลวดตัวนำ	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.2 การทดลองหาพลังงานของลวดต้านแบบที่ 1 เข้าตัวเก็บประจุ	57
4.1.2.1 การทดลองลวดต้านแบบที่ 1 จำนวน 1 ล้อ เปรียบเทียบกับ ลวดต้านแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บ ประจุ	57
4.2 การทดลองลวดต้านแบบที่ 2	59
4.3 การทดลองลวดต้านแบบที่ 3	62
4.4 การทดลองลวดต้านแบบที่ 4	65
4.4.1 การทดลองหาพลังงานของลวดต้านแบบที่ 4 เข้าตัวเก็บประจุ	68
4.4.1.1 การทดลองลวดต้านแบบที่ 4 จำนวน 1 ล้อ ผ่าน วงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	69
4.5 การทดลองลวดต้านแบบที่ 5	69
4.6 การทดลองลวดต้านแบบที่ 6	72
4.6.1 การทดลองหาพลังงานของลวดต้านแบบที่ 6 เข้าตัวเก็บประจุ	75
4.6.1.1 การทดลองลวดต้านแบบที่ 6 จำนวน 1 ล้อ ผ่าน วงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	76
4.7 การเปรียบเทียบพลังงานของลวดต้านแบบรถเข็น	76
4.7.1 การเปรียบเทียบพลังงานของลวดต้านแบบที่ 1 (แกนอากาศ) กับลวดต้านแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ)	76
4.7.2 การเปรียบเทียบพลังงานของลวดต้านแบบที่ 3 ถึงลวดต้านแบบที่ 6	78
4.8 การประจุพลังงานจากลวดต้านแบบลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ผ่านวงจรจัดการพลังงาน	81
4.8.1 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน แบบชาร์จต่อเนื่อง	81
4.8.2 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน ชาร์จแบบช่วงๆ	83
<b>บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป</b>	86
5.1 สรุปผลการทดลอง	86
5.2 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข	86
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	87
5.4 ข้อสรุป	88

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา นั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีเอกสารอ้างอิง ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก	91
ภาคผนวก ข	93
ประวัติผู้จัดทำ	117



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ	4
2.2 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ	5
2.3 ขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก	5
2.4 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด	7
2.5 ถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวด	8
2.6 ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่มีกระแสไหล	8
2.7 การเพิ่มเหล็กอ่อนเข้ามาเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก	9
2.8 การเคลื่อนที่ของแกนกระทั่ง	9
2.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ	10
2.10 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ	11
2.11 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่	13
2.12 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้	13
2.13 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์	18
2.14 ไดโอด $D_1$ และ $D_2$ ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )	19
2.15 ไดโอด $D_3$ และ $D_4$ ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ )	19
2.16 คลื่น $V_{out}$ เปรียบเทียบกับ $V_{in}$ ของวงจรกระแสแบบบริดจ์	19
2.17 ค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด $V_p$ ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น	20
2.18 แรงดันและกระแสของเซลล์ลิเทียมไอออนขณะชาร์จ	21
2.19 ขอบเขตการใช้งานที่ปลอดภัยของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	23
2.20 การสูญเสียความจุการของเซลล์ลิเทียมตามฟังก์ชันของอุณหภูมิและระดับการชาร์จ	23
2.21 วงจรจำกัดแรงดันและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ปลอดภัย	24
3.1 ภาพรวมหลักการทำงานของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อปั้ง	27
3.2 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อต้นแบบที่ 1	28
3.3 ลักษณะการวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 1	28
3.4 ชุดขดลวดตัวนำของล้อต้นแบบที่ 1	29
3.5 ชุดขดลวดตัวนำของล้อต้นแบบที่ 2	30
3.6 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อแบบที่ 3	30
3.7 การวางแม่เหล็กของล้อแบบที่ 3	31
3.8 ชุดขดลวดตัวนำของล้อแบบที่ 3	31
3.9 การวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 4	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กล้อยึดแบบที่ 4 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 20 มม.	33
3.11 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กล้อยึดแบบที่ 5 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 90 มม.	33
3.12 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กล้อยึดแบบที่ 6 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 45 มม.	34
3.13 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อยึดแบบที่ 5	34
3.14 การวางแม่เหล็กของล้อยึดแบบที่ 5	35
3.15 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยึดแบบที่ 5	35
3.16 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยึดแบบที่ 6	36
3.17 ฝาครอบของล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4	37
3.18 เพลาของล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4	38
3.19 ยางหุ้มล้อยึดของล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4	38
3.20 ลูกปืนของล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4	39
3.21 ฝาครอบของล้อยึดแบบที่ 5	40
3.22 เพลาของล้อยึดแบบที่ 5	40
3.23 ลูกปืนของล้อยึดแบบที่ 5	41
3.24 ฝาครอบของล้อยึดแบบที่ 6	42
3.25 เพลาของล้อยึดแบบที่ 6	42
3.26 การเชื่อมต่อขดลวดตัวนำของล้อยึดแบบทั้ง 6 ล้อ	43
3.27 แบบหล่อเรซินของล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4	43
3.28 แบบหล่อเรซินของล้อยึดแบบที่ 5 และล้อยึดแบบที่ 6	44
3.29 การหล่อเรซินของขดลวดล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4	44
3.30 การหล่อเรซินของขดลวดล้อยึดแบบที่ 5 และล้อยึดแบบที่ 6	44
3.31 การติดแม่เหล็กเข้ากับฝาครอบล้อรถเข็นทั้ง 2 ฝา	45
3.32 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ	45
3.33 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ	46
3.34 รถเข็นกำเนิดพลังงาน	46
3.35 การต่อล้อ 2 ล้อ แบบอนุกรม	47
3.36 การต่อล้อ 2 ล้อ แบบขนาน	47
4.1 รวมขั้นตอนการทดสอบล้อรถเข็นต้นแบบ	48
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	50
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	50



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	77
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	77
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	78
4.37 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทานของลวดต้นแบบที่ 3 ถึงลวดต้นแบบที่ 6	79
4.38 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทานของลวดต้นแบบที่ 3 ถึงลวดต้นแบบที่ 6	79
4.39 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทานของลวดต้นแบบที่ 3 ถึงลวดต้นแบบที่ 6	80
4.40 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทานของลวดต้นแบบที่ 3 ถึงลวดต้นแบบที่ 6	80
4.41 วงจรการประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่จากล้อรถเข็นผ่านวงจรจัดการพลังงาน	81
4.42 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง	82
4.43 การทดลองใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อ และการเซ็นรตเซ็นเซอร์ป้องกันการใช้งานจริงประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน	82
4.44 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ	84
ก.1 กราฟแรงดันของลวดต้นแบบที่ 1 ที่โหลด 200 โอห์ม	89
ก.2 กราฟแรงดันของลวดต้นแบบที่ 1 ที่โหลด 200 โอห์ม	89
ก.3 กราฟแรงดันของลวดต้นแบบที่ 4 ขณะประจุลงแบตเตอรี่ ที่ค่าตัวเก็บประจุ 10000 $\mu\text{F}$	90
ก.4 กราฟแรงดันของลวดต้นแบบที่ 4 ขณะประจุลงแบตเตอรี่ ที่ค่าตัวเก็บประจุ 6900 $\mu\text{F}$	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความชื้นซาบทางแม่เหล็กของแกนชนิดต่างๆ	14
2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า	15
4.1 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 1 ผ่านวงจรเรียงกระแส	49
4.2 ผลการทดลองของการต่อล้อยึดแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ แบบอนุกรมผ่านวงจรเรียงกระแส	52
4.3 ผลการทดลองของการต่อล้อยึดแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ แบบขนานผ่านวงจรเรียงกระแส	55
4.4 การทดลองล้อยึดแบบที่ 1 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	58
4.5 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 2 ผ่านวงจรเรียงกระแส	60
4.6 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 3 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	62
4.7 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 4 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	65
4.8 การทดลองล้อยึดแบบที่ 4 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	69
4.9 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 5 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 90 มม.) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	70
4.10 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 5 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 45 มม.) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	73
4.11 การทดลองล้อยึดแบบที่ 6 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	76
4.12 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของการปั่นล้อรถเข็นด้วยมอเตอร์ กับรถเข็นช้อปปีงจากการใช้งานจริง ที่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง	83
4.13 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของการปั่นล้อรถเข็นด้วยมอเตอร์ กับรถเข็นช้อปปีงจากการใช้งานจริง ที่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

ปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นทุกขณะสวนทางกับทรัพยากรของโลกที่มีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จึงมีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่กินพลังงานต่ำลง และหาพลังงานทดแทนหลายๆ ด้านมาใช้ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนใต้พิภพ พลังงานชีวมวล และพลังงานกล ซึ่งอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าตามหลักการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์นั้น เรียกว่า เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยหลักการกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ามี 2 วิธี คือ หลักการขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก โดยให้แม่เหล็กอยู่กับที่และเคลื่อนที่ขดลวดตัดผ่านแม่เหล็ก และหลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด โดยให้ขดลวดอยู่กับที่และเคลื่อนที่สนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด ซึ่งจากวิธีข้างต้น เครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้หลักการขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็กเป็นวิธีที่น่าสนใจที่สุดเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และสะดวกกับการนำพลังงานกลมาช่วยในการขับเคลื่อน

จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนออุปกรณ์กำเนิดพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้จากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน โดยจะเห็นว่ามีการใช้รถเข็นหลากหลายชนิดในการทำกิจกรรมต่างๆ มากมาย เช่น รถเข็นเด็ก รถเข็นขายสินค้า รถเข็นช้อปปิ้ง เป็นต้น และเนื่องจากปัจจุบันจะเห็นว่าผู้คนใช้ระยะเวลาไม่น้อยไปกับการเลือกซื้อสินค้าต่างๆ ภายในห้างสรรพสินค้า โดยใช้สิ่งอำนวยความสะดวกในการขนส่งสินค้าคือรถเข็น ซึ่งจะต้องเข็นไปด้วยทุกครั้งที่เลือกซื้อสินค้า และส่วนประกอบของรถเข็นที่มีพลังงานกลมากพอที่จะนำมาผลิตพลังงานได้ คือส่วนล้อของรถเข็นจึงทำการออกแบบล้อรถเข็นเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและนำพลังงานที่ได้ไปปรับระดับให้อยู่ในระดับที่สามารถใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ต่อไป

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้จากการหมุนของล้อรถเข็นโดยการอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
2. เพื่อนำพลังงานที่ได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป เช่น นำไปชาร์จเข้าแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากล้อรถเข็นนั้นจะประกอบด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนที่เคลื่อนที่ (ฝาครอบล้อ) และส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (เพลลาของล้อ) โดยมีการติดแม่เหล็กไว้กับฝาครอบล้อ และแกนขดลวดที่ติดอยู่กับเพลลาของล้อ เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก หรือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดแล้วจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าขึ้น โดยในขั้นตอนการทำงานแรกจะมีการออกแบบโครงสร้างของล้อรถเข็นในรูปแบบที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะนำมาเป็นต้นแบบล้อรถเข็นที่สามารถให้พลังงานที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบล้อรถเข็นรูปแบบต่างๆ นั้นจะอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ซึ่งมีการเปลี่ยนขนาดรูปทรงของแม่เหล็ก ขนาดของขดลวดทองแดง รูปทรงของขดลวดตัวนำ จำนวนชั้นในการวางแม่เหล็ก และขนาดโครงสร้างของล้อ โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับกรเข็นรถเข็นข้อปึงจำลองสถานการณ์จริง บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองและสรุปผลการทดลองต่อไป

เริ่มต้นด้วยการออกแบบล้อกำเนิดพลังงาน ในเบื้องต้นจะยึดหลักตามโครงสร้างของล้อรถเข็นเดิมที่มีอยู่ทั่วไป จึงได้ออกแบบล้อต้นแบบที่ 1 เป็นล้อต้นแบบเริ่มต้นเพื่อสำหรับการพัฒนาล้อต้นแบบอื่น จากนั้นได้มีการพัฒนาโครงสร้างแบบล้อใหม่โดยมีการคำนวณพื้นที่ที่ใช้จัดวางแม่เหล็ก และขดลวดให้เหมาะสม โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแม่เหล็ก ขนาดล้อ ขนาดเส้นขดลวดทองแดง และจำนวนชั้นของแม่เหล็ก ตามแบบโครงสร้างของล้อต้นแบบที่ 2 ล้อต้นแบบที่ 3 ล้อต้นแบบที่ 4 ล้อต้นแบบที่ 5 และล้อต้นแบบที่ 6

หลังจากออกแบบล้อต้นแบบรถเข็นทั้ง 6 แบบ จะเลือกล้อต้นแบบที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้งาน โดยการนำพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบนี้ผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบต่างๆ ซึ่งสิ้นสุดแล้วจะสามารถนำพลังงานที่ผลิตได้ชาร์จเข้าไปใช้งานกับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานกล ที่เกิดจากการเข็นรถเข็นโดยเปล่าประโยชน์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ
2. พลังงานที่ได้เป็นพลังงานสะอาดและเกิดขึ้นอย่างไม่มีวันสิ้นสุด โดยไม่ต้องอาศัยการประจุไฟฟ้าจากภายนอก
3. เพิ่มมูลค่าให้กับรถเข็นซึ่งสามารถนำไปเปลี่ยนแปลงและประยุกต์เข้ากับรถเข็นแบบต่างๆ ได้
4. เกิดการพัฒนาต่อยอดโครงสร้างของล้อรถเข็นซึ่งสามารถผลิตพลังงานที่ได้มากกว่ารูปแบบเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาโครงการนี้เป็นการศึกษา และค้นคว้าการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ของรถเข็นข้อปิ้ง ซึ่งมีการพัฒนาโครงสร้างของล้อรถเข็นให้เป็นล้อต้นแบบ ที่สามารถกำเนิดพลังงาน ได้จากการเคลื่อนที่ได้ด้วยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวด จากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ซึ่งเป็น การออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยจะกำหนดให้ขดลวดตัวนำอยู่กับที่ และให้ตัดผ่านกับ สนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในขดลวดตัวนำนั้นตามที่ต้องการ โดย ล้อรถเข็นต้นแบบนี้สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ ซึ่งจะนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้นี้ไปใช้ ประโยชน์โดยการประจุพลังงานเข้าไปยังแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยการผ่านวงจรจัด การพลังงานรูปแบบต่างๆ กัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

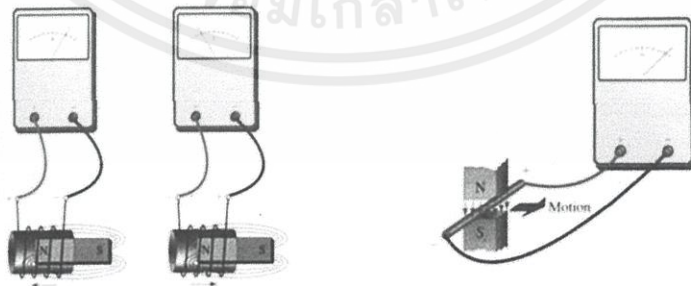
จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 1 แล้วว่า โครงการงานการเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อปั้ง จะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดติดกันกับสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงได้ศึกษาค้นคว้า และหาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้กับการทำโครงการชิ้นนี้เพื่อให้โครงการชิ้นนี้เป็นไปได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงองค์ประกอบต่างๆ เพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งหลักการทฤษฎีต่างๆ ก็จะประกอบไปด้วย หลักการของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ เช่น ทฤษฎีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของฟาราเดย์ กฎของเลนซ์ กฎมือขวาของเฟรมมิง กฎไดนาโม ทฤษฎีแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงรูปแบบของการวางขดลวดและการพันขดลวดรูปแบบต่างๆ เพื่อที่จะผลิตให้ได้กระแสไฟฟ้าในประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการผลิตกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 2.1.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ทั้งที่ใช้ทั่วไปตามบ้านเรือน หรือสถานที่ต่างๆ นั้น แทบทั้งหมดจะถูกผลิตขึ้นจากหลักการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบนี้ เรามักจะคุ้นกับชื่อของ ไดนาโม [1]

จากการทดลองของไมเคิลฟาราเดย์ และเฮนรีเฮวิต เพื่อที่จะต้องการทราบว่า ฟลักซ์แม่เหล็กทำให้มีกระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำได้หรือไม่ สรุปได้ว่าเข็มของแอมมิเตอร์เบนไปจากตำแหน่งเดิม แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวดทองแดง ในทางกลับกันถ้าให้ขดลวดทองแดงอยู่กับที่ แต่เคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กไป-มา ให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดทองแดงเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านแอมมิเตอร์ได้เช่นกัน นั่นคือ มีกระแสไฟฟ้าในขดลวดทองแดง ดังรูปที่ 2.1



สนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวด

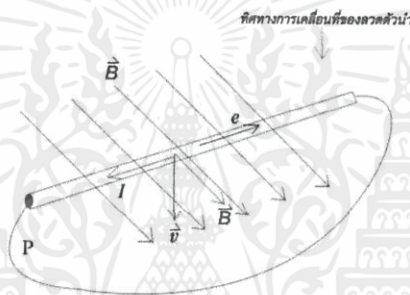
ตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 2.1 หลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ [2]  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

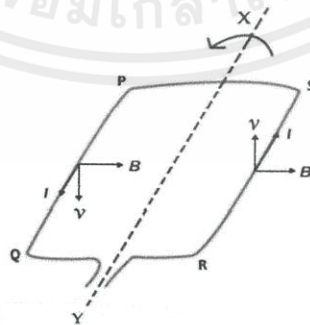
กระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง เรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Current)

เมื่อเคลื่อนเส้นลวดตัวนำในสนามแม่เหล็ก เส้นลวดตัวนำ PQ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  ในทิศตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  ดังนั้นจะมีแรงแม่เหล็กกระทำต่ออิเล็กตรอนอิสระในเส้นลวดตัวนำในทิศตั้งฉากกับระนาบของ  $\vec{v}$  และ  $\vec{B}$  ซึ่งจะอยู่ในแนวเส้นลวด PQ มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างปลาย PQ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า ปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำมีความต่างศักย์  $V_{PQ}$  ดังนั้นถ้าต่อเส้นลวดตัวนำนี้ให้ครบวงจร ก็จะมีกระแสไฟฟ้าในวงจร แสดงว่าปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced Electromotive Force) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ [3]

จากที่กล่าวมาแล้ว เป็นการใช้เส้นลวดตัวนำตรงเคลื่อนที่ตัดฟลักซ์แม่เหล็ก ถ้าให้ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมหมุนจาก หมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดรูปสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 ขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก [3]

ให้ขดลวด PQRS หมุนรอบแกน XY ในทิศทวนเข็มนาฬิกา เมื่อพิจารณาขดลวดตัวนำ ส่วน PQ และ RS จะเห็นว่า ขดลวด PQ และ RS เคลื่อนที่ตัดฟลักซ์แม่เหล็กในทิศลงและขึ้น ดังนั้นจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $I$  โดยกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีทิศจาก P ไป Q และจาก R ไป S พร้อมกัน เมื่อนำขดลวดตัวนำต่อกับแอมมิเตอร์ที่สามารถวัดกระแสไฟฟ้าค่าน้อยๆ ได้ และนำขดลวดนี้เคลื่อนที่เข้าใกล้หรือออกห่างแท่งแม่เหล็ก จะพบว่าขณะที่ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่นั้น จะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากการเบนของเข็มชี้ของแอมมิเตอร์ แต่ขณะที่ขดลวดตัวนำอยู่นิ่งจะไม่มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เนื่องจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นผลที่ได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กผ่านที่ขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลง จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดตัวนำ ซึ่งเป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำนั้น

### 2.1.2 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction)

ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง และสรุปได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวด เป็นสัดส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดนั้น เมื่อเทียบกับเวลา ข้อความนี้เรียกว่ากฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction) เรียกสั้นๆ ว่า กฎของฟาราเดย์ ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานของไฟฟ้าและแม่เหล็ก ดังสมการที่ (2.1)

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.1)$$

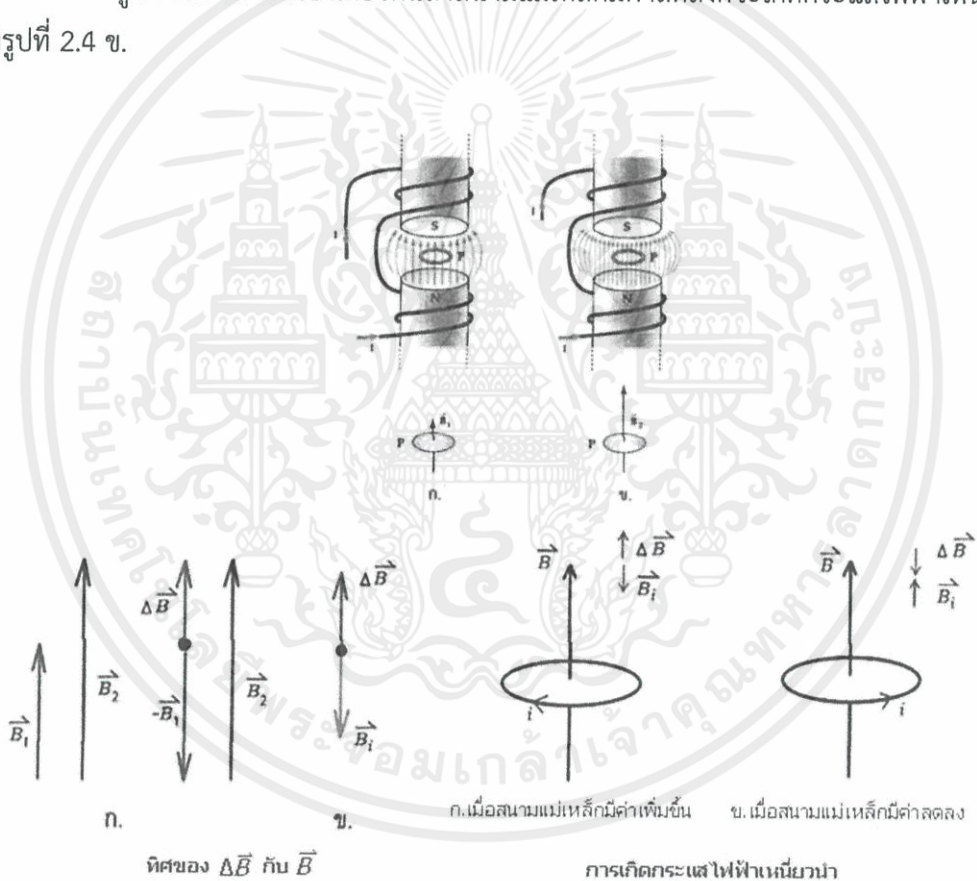
เมื่อ	$\mathcal{E}$	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	หน่วย โวลต์
	$\Phi_B$	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็ก	หน่วย เวเบอร์
	$t$	คือ	เวลา	หน่วย วินาที
	$N$	คือ	จำนวนรอบขดลวด	

พิจารณาระนาบของขดลวดอยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก ในตอนแรกไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวดเมื่อขดลวดหมุนจากตำแหน่งเริ่มต้น รันาบของขดลวดจะทำมุมต่างๆ กับสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และมีค่าสูงสุดเมื่อรันาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สรุปคือ ในช่วงการหมุนของขดลวดที่รันาบขดลวดหมุนกวาดมุมไป 90 องศา จากตำแหน่งเริ่มต้นนี้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขดลวด ต่อไปจะศึกษาว่าถ้าขดลวดอยู่กับที่และฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลง จะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นหรือไม่ และกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับทิศทางการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กอย่างไร

### 2.1.3 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

การหาทิศทางของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ หาได้จากกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ซึ่งมีใจความว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศที่จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดนั้น”

ขดลวดตัวนำ P อยู่ระหว่างขั้วของแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4 ก. ถ้าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดมีค่าสม่ำเสมอเท่ากับ  $\vec{B}_1$  เมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าทำให้สนามแม่เหล็กที่สม่ำเสมอมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $\vec{B}_2$  ดังรูปที่ 2.4 ข. สนามแม่เหล็กที่เพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ  $\Delta\vec{B} = \vec{B}_2 - \vec{B}_1$  ดังรูปที่ 2.4 ก. แสดงว่า ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวด P ก็เปลี่ยนแปลงด้วย ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด P ในทิศที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กซึ่งมีทิศตรงข้ามกับ  $\Delta\vec{B}$  ดังรูปที่ 2.4 ข. ตามกฎของเลนซ์ ทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.4 ก. ทำนองเดียวกันถ้าสนามแม่เหล็กมีค่าลดลงก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 2.4 ข.



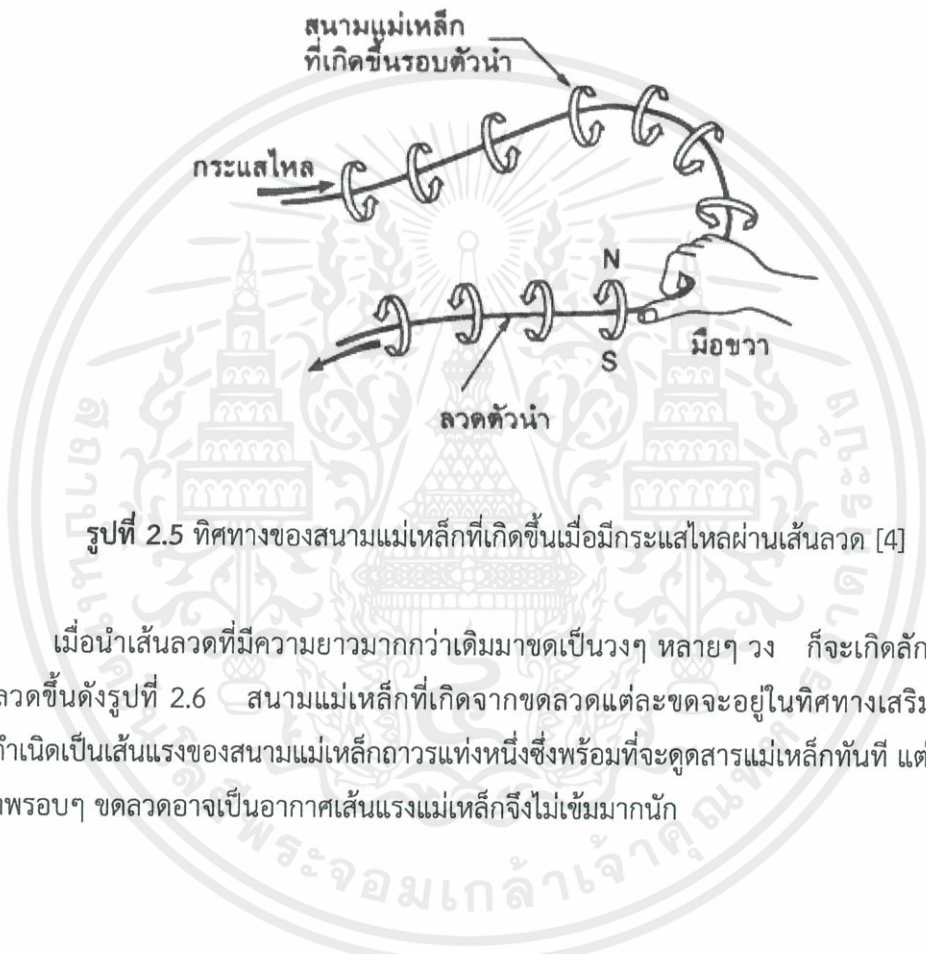
รูปที่ 2.4 การเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.4 ขดลวดโซลินอยด์

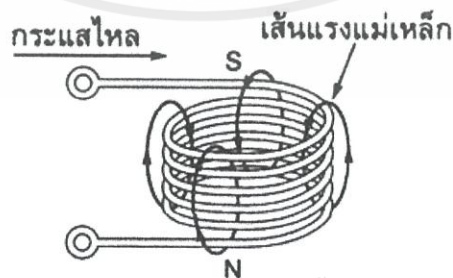
### 2.1.4.1 หลักการทำงานของขดลวดโซลินอยด์

เออร์สเตด เป็นผู้ตั้งกฎ ค้นพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำใดๆ ก็ตามจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้น ดังรูปที่ 2.5 และยังออกกฎมือขวามาให้ดูทิศทางเส้นแรงแม่เหล็ก ด้วยคือ ถ้าเอามือขวากำรอบเส้นลวด โดยนิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางกระแสไหล นิ้วที่เหลือทั้งหมด (ซึ่งมี 4 นิ้ว และจะหันไปทางเดียวกัน) จะแสดงทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วใต้ไปขั้วเหนือ



รูปที่ 2.5 ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวด [4]

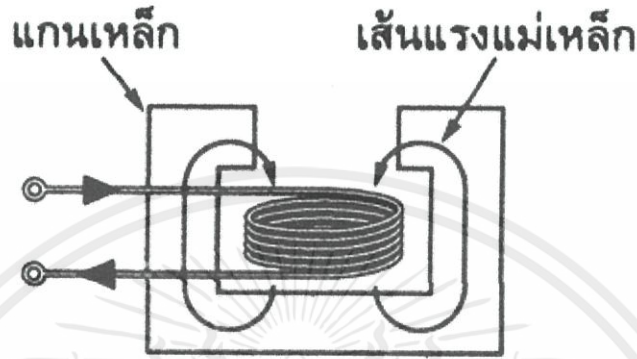
เมื่อนำเส้นลวดที่มีความยาวมากกว่าเดิมมาขดเป็นวงๆ หลายๆ วง ก็จะเกิดลักษณะของขดลวดขึ้นดังรูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแต่ละขดจะอยู่ในทิศทางเสริมกัน และก่อกำเนิดเป็นเส้นแรงแม่เหล็กถาวรแท่งหนึ่งซึ่งพร้อมที่จะดูดสารแม่เหล็กทันที แต่เนื่องจากสภาพรอบๆ ขดลวดอาจเป็นอากาศเส้นแรงแม่เหล็กจึงไม่เข้มมากนัก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6 ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่มีกระแสไหล [4]

เพื่อที่จะไม่ให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกระจัดกระจาย จึงได้มีการใส่แกนเหล็กอ่อนรูปตัว C เข้ามารอบๆ ขดลวด เพื่อให้สนามแม่เหล็กมากขึ้นดังรูปที่ 2.7 ถ้าเอาแกนกระทุ้ง (Plunger) มาใส่เข้าไปตรงกลางขดลวดในตำแหน่งที่ 1 แกนกระทุ้งจะถูกดูดให้ลึกลงมาจนสนิทในตำแหน่งที่ 2 ดังรูปที่ 2.8 ยิ่งระยะทางไกลมากเท่าไร แรงดูดก็จะมากขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 2.7 การเพิ่มเหล็กอ่อนเข้ามาเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก [4]



รูปที่ 2.8 การเคลื่อนที่ของแกนกระทุ้ง [4]

มีข้อแตกต่างอยู่ระหว่างโซลินอยด์ไฟตรง และโซลินอยด์ไฟสลับคือ ในโซลินอยด์ไฟตรง กระแสที่ไหลในขดลวดจะค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ไม่ว่าแกนกระทุ้งจะอยู่ในตำแหน่งใดก็ตาม แต่โซลินอยด์ไฟสลับ กระแสในขณะที่แกนกระทุ้งอยู่นอกขดลวดจะมีค่าสูง และเมื่อแกนกระทุ้งถูกดูดเข้ามาจนสุดขดลวดกระแสจะลดต่ำลง ลักษณะแบบนี้เองที่ทำให้ต้องระวังอย่าให้เกิดการกระทุ้งในโซลินอยด์ไฟสลับ เพราะจะทำให้เกิดกระแสมากๆ ไหลค้างอยู่ ทำให้ขดลวดร้อนขึ้นและอาจจะไหม้เสียหายได้ อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงสร้างของโซลินอยด์แบบไฟสลับนั้น จะต้องพันขดลวด Shaded Coil หรือ แหวน (Ring) ซึ่งเป็นลวดพันรอบแกนเหล็กเพียงรอบเดียว หรือไม่ก็รอบลวดวงจรเอาไว้อยู่ จุดประสงค์ที่พันไว้เพราะในไฟสลับ กระแสจะลดลงมาเป็นศูนย์ทำให้แรงดูดแม่เหล็กลดลง และทำให้เกิดเสียงขึ้น และการดูดก็ไม่แน่นอนแน่แท้ ขดลวดแหวนที่เพิ่มเติมเข้าไปนี้จะทำให้วงจรแม่เหล็กเกิดเป็นสภาพ 2 เฟส คือ แม้ในขณะที่กระแสเป็นศูนย์ก็ตาม ขดลวดแหวนซึ่งมีกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำกับสนามแม่เหล็ก จะยังคงมีแรงแม่เหล็กมาเสริมการดูดในช่วงนี้ได้ แต่ก็จะทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) ของความร้อนในขดลวดบ้างเป็นข้อแลกเปลี่ยน

### 2.1.5 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง โดยมีการใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป มีตั้งแต่ขนาดเล็กมากๆ ประมาณปลายนิ้วมือจนกระทั่งถึงขนาดใหญ่เท่าห้องปฏิบัติการ ลักษณะของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นการนำเอาลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวด อาจมีจำนวนรอบไม่ก็รอบจนกระทั่งถึงพันรอบแล้วแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้งาน การพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำอาจพันบนแกนชนิดต่าง ๆ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.9

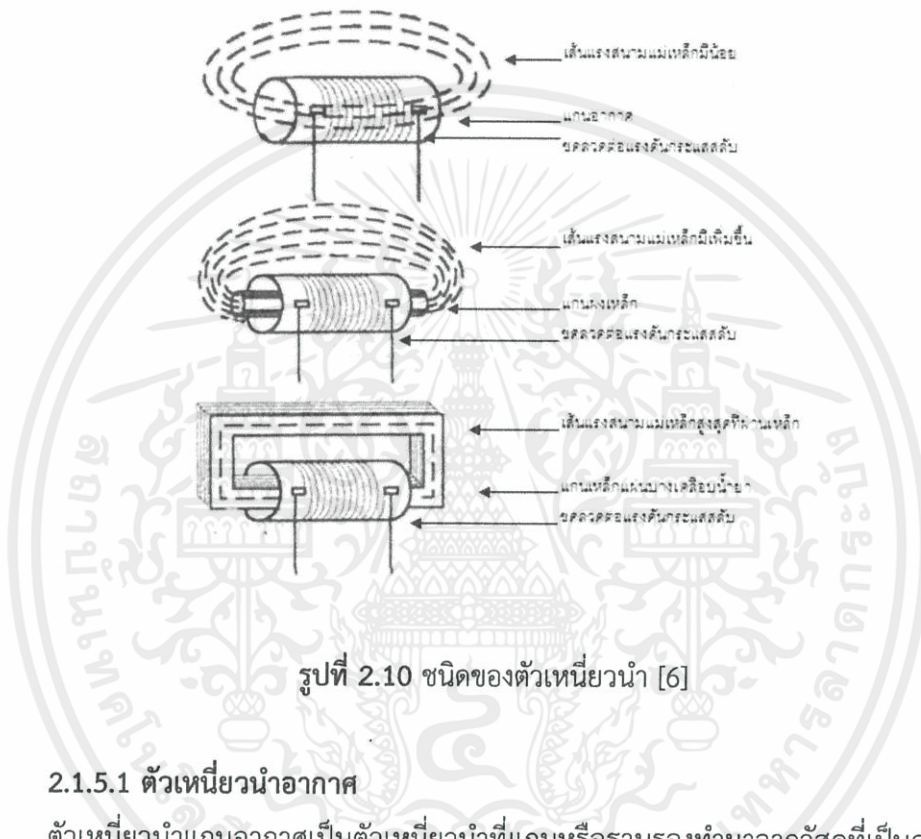


รูปที่ 2.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ [5]

หลักการทำงานของตัวเหนี่ยวนำใช้หลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวด จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวด ซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้น ตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือแบบค่าคงที่และแบบปรับค่าได้ ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อินดักเตอร์ หรือคอยล์ (Coil) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือ เฮนรี่ (Henry)

การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนำจะเรียกตามโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศ แกนเหล็ก หรือแกนเฟอร์ไรท์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้างานที่นำมาใช้ประโยชน์ด้านค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศ (Air Core Inductor)
- ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัด (Powdered - Iron Core Inductor)
- ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์ (Ferrite Core Inductor)
- ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์ (Toroidal Core Inductor)
- ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น (Laminated - Iron Core Inductor)



รูปที่ 2.10 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ [6]

#### 2.1.5.1 ตัวเหนี่ยวนำอากาศ

ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวน เช่น คาร์บอน พลาสติก ไฟเบอร์ และ PVC เป็นต้น หรืออาจพันลอยๆ ไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆ หรือความถี่วิทยุ (RF) จึงมักเรียกตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ว่า RF ไซค์ ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพราะแกนไม่สามารถช่วยเสริมค่าความเหนี่ยวนำได้ การจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นต้องใช้จำนวนรอบในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น

#### 2.1.5.2 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่น โดยนำผงเหล็กผสมกับกาวอัดแน่นเป็นแท่ง ช่วยลดการสูญเสียสัญญาณจากกระแสไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีขนาดเล็กแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหลวน (Eddy Current) ลงได้ สัญญาณส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดได้สูงขึ้น เกิดการสูญเสียสัญญาณภายในตัวเหนี่ยวนำลดลง ใช้งานได้ดีในย่านความถี่สูงๆ มีความเหนี่ยวนำสูงแต่มีขนาดเล็ก

### 2.1.5.3 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรท์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรท์มีความแตกต่างกันหลายอย่าง เช่น แมกนีเซียมกับสังกะสี แมกนีเซียมกับแมงกานีส แมกนีเซียมกับทองแดง นิกเกิลกับสังกะสี และแมงกานีสกับสังกะสี เป็นต้น แต่ละชนิดของเฟอร์ไรท์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ข้อดีของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรท์ คือ สามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำ และความถี่สูง

### 2.1.5.4 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์

ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่นหรือเฟอร์ไรท์ โดยสร้างขึ้นเป็นรูปวงแหวน ขดลวดถูกพันรอบแกนทอรอยด์โดยรอบ ข้อดีของการใช้แกนทอรอยด์คือ เส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอก และสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ไม่เข้ามารบกวน สามารถทำให้ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้มีความเหนี่ยวนำสูงในขนาดที่สร้างได้เล็กลง นิยมนำไปใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงที่ต้องการหาค่าความเหนี่ยวนำสูงและมีสนามแม่เหล็กรบกวนต่ำ

### 2.1.5.5 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่น เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกัน เหล็กแผ่นบางแต่ละแผ่นเคลือบฉนวนไว้ เพื่อช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและช่วยทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น การใช้งานนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำในย่านความถี่เสียง (AF) มักเรียกว่า AF ไช้ค เช่น ใช้เป็นตัวกรองไฟ (Filter) แรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรง เป็นต้น

## 2.1.6 ประเภทของตัวเหนี่ยวนำ

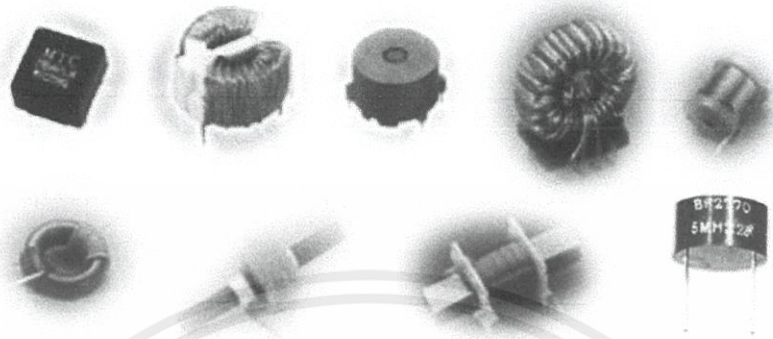
ตัวเหนี่ยวนำที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีหลายแบบหลายขนาด วัสดุที่ใช้ทำแกนที่นิยมก็คือ แกนอากาศ, แกนเหล็ก และแกนเฟอร์ไรท์ เราสามารถแบ่งตัวเหนี่ยวนำได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) และตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors)

เอกสารนี้เป็นเอกสาร 2.1.6.1 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้

โดยปกติตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ ทำมาจากขดลวดทองแดง แกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่น

ออกมาทั้งสองข้าง รูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาวแบบทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.11 มีชื่อเรียกแตกต่างกัน เช่น โซลินอยด์ เซอร์เฟสเมาส์ ไซค์ ทอรอยด์ และแบบแถบสี่ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ [6]

#### 2.1.6.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่า (Variable Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors) ดังรูปที่ 2.12 นิยมใช้ในเครื่องรับวิทยุ ค่าการเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุน ที่สามารถปรับสกรูเลื่อนตำแหน่งของขดลวดให้เข้าหรือออกเพื่อเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำ ถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมาสุดค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมาก จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ในการปรับควรใช้เครื่องมือที่ทำด้วยพลาสติก หรืออุปกรณ์จำพวกที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากวัสดุที่ทำมาจากโลหะจะไปรบกวนการเกิดสนามแม่เหล็ก และมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำได้



รูปที่ 2.12 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ [6]

#### 2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

● **จำนวนรอบของขดลวด** เขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมาก ก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

● **วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu$  วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศ เหล็ก เฟอร์ไรท์ โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ที่เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 ในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมาก ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน

ตารางที่ 2.1 ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนชนิดต่างๆ [7]

Magnetic susceptibility and Permeability data for selected materials		
Materials	Permeability ( $\mu$ )	Relative permeability ( $\mu/\mu_0$ )
Metglas	1.26	1000000
Iron (99.95% pure Fe annealed in H)	0.25	200000
Permalloy	$1.0 \times 10^{-2}$	8000
Iron (99.8% pure)	$6.3 \times 10^{-3}$	5000
Electrical steel	$5.0 \times 10^{-3}$	4000
Ferritic stainless steel (annealed)	$1.26 \times 10^{-3} - 2.26 \times 10^{-3}$	1000-1800
Martensitic stainless steel (annealed)	$9.42 \times 10^{-4} - 1.19 \times 10^{-3}$	750-950
Ferrite (manganese zinc)	$> 8.0 \times 10^{-4}$	640 (or more)
Ferrite (nickel zinc)	$2.0 \times 10^{-5} - 8.0 \times 10^{-4}$	16-640
Carbon Steel	$1.26 \times 10^{-4}$	100
Nickel	$1.26 \times 10^{-4} - 7.54 \times 10^{-4}$	100 - 600
Neodymium magnet	$1.32 \times 10^{-6}$	1.05
Aluminum	$1.256665 \times 10^{-6}$	1.0000022
Wood	$1.25663760 \times 10^{-6}$	1.00000043
Air	$1.25663753 \times 10^{-6}$	1.00000037

ตารางที่ 2.1 ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนชนิดต่างๆ (ต่อ)

Magnetic susceptibility and Permeability data for selected materials		
Materials	Permeability ( $\mu$ )	Relative permeability ( $\mu/\mu_0$ )
Vacuum	$\pi^4 \times 10^{-7} (\mu_0)$	1
Copper	$1.256629 \times 10^{-6}$	0.999994

- พื้นที่หน้าตัดของแกน เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมาก จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน
- ความยาวของแกน เขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมาก จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อย ค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน  
ดังนั้นจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับ ขนาด รูปร่าง และจำนวนรอบของขดลวด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าคงตัวที่เรียกว่า สภาพให้ซึมผ่านได้ทางแม่เหล็กของตัวกลาง (Permeability)

### 2.1.8 ขดลวดตัวนำ (Coil)

#### คุณสมบัติของขดลวดตัวนำ

- ลวดตัวนำที่ทำจากโลหะต่างชนิดกันจะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้ดีไม่เท่ากัน
- ลวดตัวนำชนิดเดียวกัน ขนาดใหญ่เท่ากัน เส้นยาวกว่าจะมีความต้านทานมากกว่า และยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้น้อยกว่าลวดสั้น
- ลวดตัวนำไฟฟ้าชนิดเดียวกัน ยาวเท่ากัน เส้นที่มีขนาดโตกว่าหรือมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่กว่าจะมีความต้านทานน้อยกว่า จะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากกว่าลวดที่มีขนาดเล็กกว่า
- ความต้านทานไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับ ชนิดของตัวนำไฟฟ้า ความยาว และพื้นที่หน้าตัดของขดลวดตัวนำ โดยความต้านทานไฟฟ้าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความยาว และเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า ซึ่งจะเปรียบเทียบขนาดของขดลวดทองแดงขนาดต่างๆ ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า [8]

AWG NO.	Diameter		Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance		Max Current [Amperes]
	[inches]	[mm]		[Ohms / 1000 ft]	[Ohms / km]	
0000	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า (ต่อ)

AWG NO.	Diameter		Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance		Max Current [Amperes]
	[inches]	[mm]		[Ohms / 1000 ft]	[Ohms / km]	
000	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239
00	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190
0	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142
31	0.0089	0.22606	0.0404	130.1	426.728	0.113

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า (ต่อ)

AWG NO.	Diameter		Area [mm <sup>2</sup> ]	Resistance		Max Current [Amperes]
	[inches]	[mm]		[Ohms / 1000 ft]	[Ohms / km]	
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056
35	0.0056	0.14224	0.016	329	1079.12	0.044
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1360	0.035
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137

### 2.1.9 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

#### 2.1.9.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็ก เป็นแร่หรือโลหะที่มีสมบัติดูดเหล็กได้ แม่เหล็กสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้ นั่นคือมันสามารถส่งแรงดูดหรือแรงผลักออกไปรอบๆ ตัวมันได้ แม้ว่าสนามแม่เหล็กจะเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้แต่จะเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติสำคัญของแม่เหล็กโดยตรง ได้แก่ คุณสมบัติการดูดและการผลักกันระหว่างแท่งแม่เหล็ก

#### คุณสมบัติของแม่เหล็ก

- แม่เหล็กมี 2 ขั้วเสมอ ขั้วเหนือและขั้วใต้ ถ้าแขวนแท่งแม่เหล็กให้เคลื่อนที่อย่างอิสระ เมื่อหยุดนิ่งขั้วที่ชี้ไปทางทิศเหนือ เรียกว่า ขั้วเหนือ (N) ขั้วที่ชี้ไปทางทิศใต้ เรียกว่า ขั้วใต้ (S)
- ขั้วแม่เหล็กทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้จะดูดสารแม่เหล็กเสมอ
- เมื่อนำแม่เหล็ก 2 อันมาอยู่ใกล้กัน ขั้วเหมือนกันจะผลักกัน และขั้วต่างกันจะดูดกัน
- แรงดูดจะมีมากที่สุดที่บริเวณขั้วทั้งสองของแม่เหล็กและลดน้อยลงเมื่อถัดเข้ามา
- เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางออกจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ทั้งสามมิติ
- สนามแม่เหล็กหมายถึงบริเวณที่แม่เหล็กส่งแรงไปถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.9.2 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กคือ บริเวณหรือขอบเขตที่แม่เหล็กส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอำนาจการดึงดูดออกไปได้ถึง

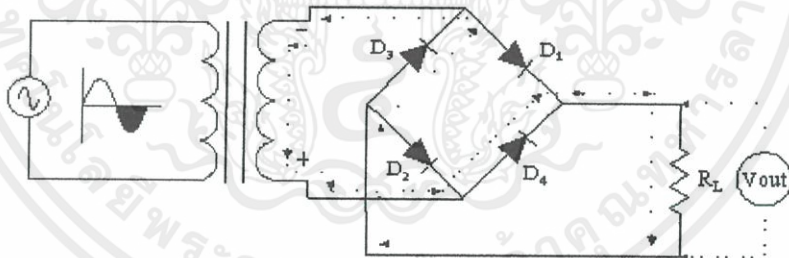
#### คุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็ก

- มีทิศออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ ขั้วแม่เหล็กทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้จะดูดสารแม่เหล็กเสมอ
- ถ้ามีเส้นแรงแม่เหล็กปริมาณมาก เส้นแรงแม่เหล็กจะรวมกัน หรือต้านกันออกไปทำให้เกิดจุดสะเทิน ซึ่งเป็นจุดที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กเป็นศูนย์ ฟลักซ์แม่เหล็กคือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็กใช้สัญลักษณ์  $\Phi$

## 2.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (FULL-WAVE RECTIFICATION)

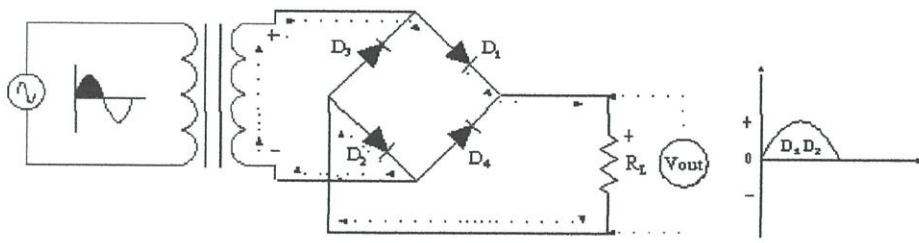
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพราะแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่น ข้อแตกต่างระหว่างการเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นธรรมดา ต่างกันตรงการต่อวงจรไดโอด แบบเต็มคลื่นจะใช้ไดโอด 2 ตัว แต่แบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ก็แตกต่างกัน แบบเต็มคลื่นธรรมดาใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง (Center Tap, CT) มี 3 ขั้ว แบบบริดจ์ใช้หม้อแปลง 2 ขั้วหรือ 3 ขั้วก็ได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ [9]

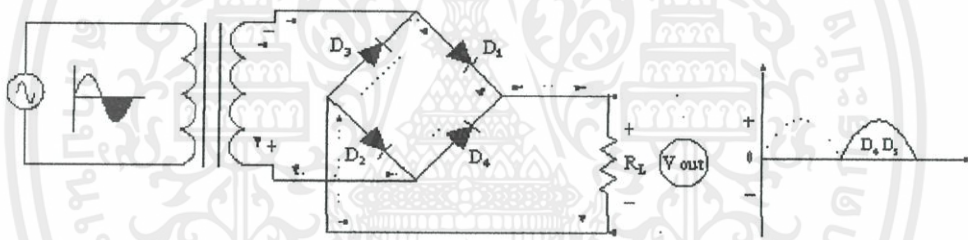
#### การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

การทำงานของวงจรไดโอดจะผลัดกันนำกระแสครึ่งละ 2 ตัว โดยเมื่อไซเคิลบวกของแรงดันไฟสลับ ( $V_{in}$ ) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงและด้านล่างจะเป็นลบ จะทำให้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงจะมีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_1$  ผ่านโหลด  $R_L$  ผ่านไดโอด  $D_2$  ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านล่าง มีแรงดันตกคร่อมโหลด  $R_L$  ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุต ดังรูปที่ 2.14

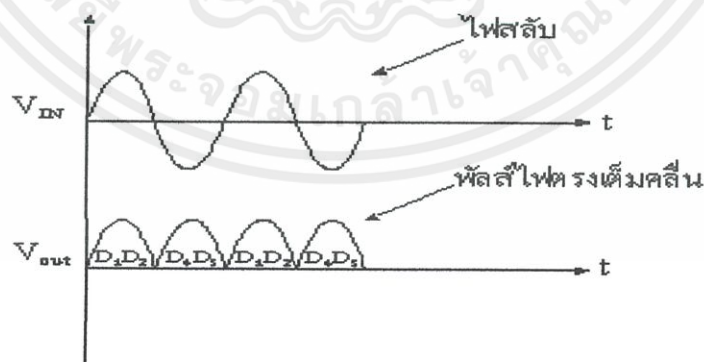


รูปที่ 2.14 ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ ) [9]

ในช่วงเวลาต่อมาไซเคิลลบของแรงดันไฟสลับ ( $V_{in}$ ) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลง และด้านล่างเป็นบวก ดังรูปที่ 2.15 ในช่วงเวลานี้ไดโอด  $D_1$  และ  $D_2$  จะได้รับไบอัสกลับ แต่ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  จะได้รับไบอัสตรง ทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด  $D_4$  ผ่านโหลด  $R_L$  และผ่านไดโอด  $D_3$  ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านบน มีแรงดันตกคร่อมโหลด  $R_L$  ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบ ได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุตทำให้ได้คลื่นไฟตรงรวมกันเต็มคลื่น ดังรูปที่ 2.16



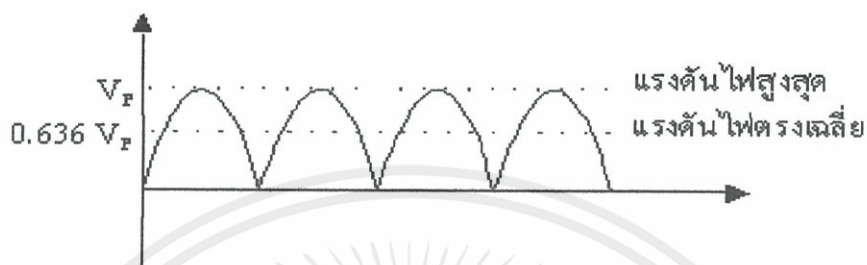
รูปที่ 2.15 ไดโอด  $D_3$  และ  $D_4$  ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด ( $V_{out}$ ) [9]



รูปที่ 2.16 คลื่น  $V_{out}$  เปรียบเทียบกับ  $V_{in}$  ของวงจรกระแสแบบบริดจ์ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่ามีประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทั้งแบบมีแท่งปกกลาง และแบบบริดจ์จะให้แรงดันเอาต์พุตทุกๆ ครึ่งรอบของแรงดันไฟสลับที่เข้ามาทั้งซีกบวกและซีกลบ ค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 0.636 เท่าของแรงดันไฟสูงสุดดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด  $V_p$  ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น [9]

## 2.3 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ หมายถึง อุปกรณ์อย่างหนึ่งที่ใช้เก็บพลังงาน และนำมาใช้ได้ในรูปแบบของไฟฟ้า แบตเตอรี่นั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมี เช่น เซลล์กัลวานิกหรือเซลล์เชื้อเพลิง อย่างน้อยหนึ่งเซลล์ ดังนั้นการเลือกใช้แบตเตอรี่ต้องเลือกให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่จะใช้งาน

### 2.3.1 ประเภทของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท

- **เซลล์ปฐมภูมิ**คือ แบตเตอรี่ใช้แล้วทิ้งเรียกอีกอย่างว่า ใช้ได้ครั้งเดียว เนื่องจากไฟฟ้าที่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมดไฟฟ้างก็จะหมดจากแบตเตอรี่ แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้ สะดวก ใช้ไฟน้อย หรือในที่ที่ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น Zinc-carbon Battery, Alkaline Battery, Silver-oxide Battery, Lithium Battery, Mercury Battery และ Zinc-air Battery เป็นต้น [10]

- **เซลล์ทุติยภูมิ**คือ แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้หลังจากไฟหมด เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้ โดยการประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้อัดไฟนี้เรียกว่า ชาร์จเจอร์ หรือรีชาร์จเจอร์ เช่น Lead-acid Battery, Lithium-ion Battery, Lithium Ion Polymer Battery, NaS Battery, Nickel Metal Hydride Battery, Nickel-cadmium Battery, Sodium-metal Chloride Battery และ Nickel-zinc Battery เป็นต้น [10]

## 2.3.2 แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

### ข้อดีของลิเทียมไอออน

- ความหนาแน่นพลังงานสูง
- ไม่จำเป็นต้องกระตุ้นก่อนใช้หลังจากเก็บเป็นเวลานาน
- มีอัตราการคายประจุตัวเองต่ำ
- ไม่ต้องดูแลรักษา

### ข้อจำกัดของลิเทียมไอออน

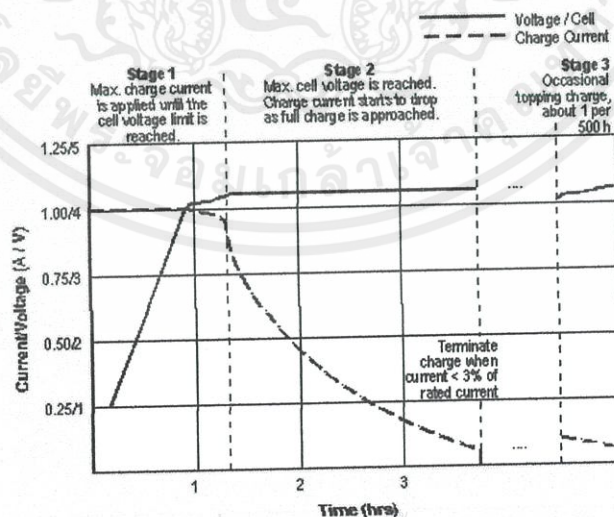
- จำเป็นต้องใช้วงจรป้องกันแรงดันและกระแสให้อยู่ในเขตปลอดภัย
- มีการเสื่อมอายุตามเวลาแม้ว่าจะไม่มีการใช้งาน
- อัตราการจ่ายกระแสไม่สูงมากไม่เหมาะกับงานที่ใช้โหลดหนักๆ

#### 2.3.2.1 การชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

เซลล์ชนิดลิเทียมไอออนไม่จำเป็นต้องกระตุ้นก่อนใช้เหมือนอย่างที่ต้องกระตุ้นเซลล์ตระกูลนิเกิล (นิเกิลแคดเมียม นิเกิลเมทัลไฮไดรต์) แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนไม่มีข้อแตกต่างของความจุที่ได้ ไม่ว่าจะเป็นการชาร์จครั้งที่ 1 หรือครั้งที่ 5 แม้แต่ครั้งที่ 50 ก็ไม่แตกต่าง

เซลล์ส่วนใหญ่ชาร์จเต็มที่ 4.2 โวลต์ โดยมีค่าคลาดเคลื่อน  $\pm 0.05$  โวลต์ต่อเซลล์ การชาร์จด้วยแรงดัน 4.1 โวลต์ จะได้ความจุต่ำกว่าปกติ 10 % แต่ได้อายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าดังรูปที่

2.18



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงที่มาของเอกสารฉบับนี้ที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 แรงดันและกระแสของเซลล์ลิเทียมไอออนขณะชาร์จ [11]

การใช้กระแสที่สูงเพื่อชาร์จไม่ได้ช่วยเร่งความเร็วให้ชาร์จเต็มเร็วขึ้นมากนัก แม้ว่าแรงดันจะขึ้นถึง 4.2 โวลต์เร็วขึ้นก็ตาม แต่ระยะเวลาส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ที่ช่วงที่สองมากกว่า

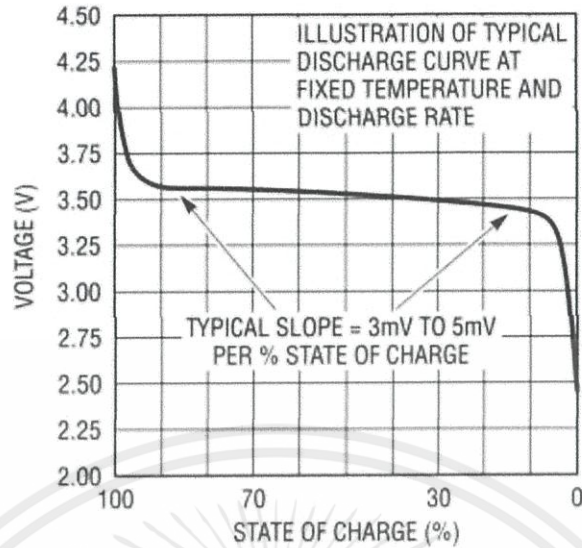
ระยะเวลาที่ใช้ชาร์จจะประมาณ 3 ชั่วโมง แบตเตอรี่เล็กๆ อย่างที่ใช้ในโทรศัพท์มือถือสามารถชาร์จโดยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ 4.2 โวลต์ จำกัดกระแส  $1C^*$  (1 เท่าของความจุเซลล์) ได้ส่วน แบตเตอรี่ใหญ่ๆ อย่างในแล็ปท็อปคอมพิวเตอร์ควรจะชาร์จที่ 0.8 C ค่าพลังงานสูญเสียระหว่างการชาร์จอยู่ที่ 0.1 % ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะไม่เกิดความร้อนเลยขณะชาร์จ การดูว่าเต็มหรือยังจะดูที่แรงดันคร่อมแบตเตอรี่สูงขึ้นจนถึงแรงดันที่จ่ายให้คือ 4.2 โวลต์ และกระแสที่ไหลลดลงเหลือ 3 % ของกระแสที่ตั้งไว้

\* ค่า  $xC$  คือ จำนวนเท่าของความจุ (Capacity\*) ถ้าแบตเตอรี่มีความจุ 650 mAh กระแสชาร์จ 1C คือ กระแส 650 mA กระแสชาร์จ 0.8 C คือ กระแส  $0.8 \times 650 = 520$  mA

\* Capacity คือ ความจุของแบตเตอรี่ (คนละตัวกับความหนาแน่นพลังงาน ซึ่งคิดเป็นกำลังต่อน้ำหนัก หรือวัตต์ต่อกิโลกรัม) ความจุคือ ความสามารถในการจ่ายกระแสในเวลา 1 ชั่วโมง ถ้ามีแบตเตอรี่ 1000 mAh จะสามารถจ่ายโหลดที่ตั้งกระแส 1000 mA ได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือสามารถจ่ายโหลด 500 mA ได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจ่ายโหลดที่ตั้งกระแส 2000 mA ได้เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกออกแบบให้ใช้งานได้อย่างปลอดภัยในช่วงแรงดันทำงานปกติ แต่จะเกิดความไม่มีเสถียรภาพถ้าชาร์จให้แรงดันสูงกว่านั้น เมื่อชาร์จจนแรงดันสูงถึง 4.3 โวลต์ ภายในเซลล์จะเกิดการก่อตัวของโลหะลิเทียมบนขั้วลบ ส่วนที่ขั้วบวกจะเกิดสารออกซิไดส์ สูญเสียความจุ และเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้น การชาร์จเกินทำให้เซลล์ร้อนขึ้น ถ้าทิ้งไว้โดยไม่ได้อุณหภูมิจะแตกและเกิดไฟลุก (โลหะลิเทียมไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาก โดยเฉพาะเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจน) นอกจากแรงดันชาร์จเกินแล้ว ยังต้องระวังการใช้งานจนแรงดันตกต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้ วงจรป้องกันถูกออกแบบให้ตัดวงจรออกเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานจนแรงดันต่ำกว่า 2.5 โวลต์ต่อเซลล์ เมื่อวงจรตัดไปแล้ว แบตเตอรี่ไม่สามารถใช้งานได้อีกดังรูปที่ 2.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ขอบเขตการใช้งานที่ปลอดภัยของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน [11]

การนำไปชาร์จโดยชาร์จเจอร์ตามปกติไม่สามารถทำได้ แต่มีวิธีแก้ไขอยู่ซึ่งจะกล่าวต่อไป ถ้าเซลล์ถูกปล่อยให้แรงดันตกลงมาจนเหลือ 1.5 โวลต์ต่อเซลล์หรือต่ำกว่าเป็นเวลาเพียงสองสามวัน ควรหลีกเลี่ยงการชาร์จเข้าไปอีก เพราะภายในเซลล์จะเกิดการก่อตัวของโลหะทองแดง ซึ่งอาจทำให้เกิดลัดวงจรภายในเซลล์แบตเตอรี่นั้นจะไม่มีเสถียรภาพ อาจเกิดการลัดวงจรในก้อนเซลล์เมื่อไรก็ได้ซึ่งทำให้มีความร้อนสูงขึ้นได้เองและไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน

อายุการเก็บรักษาของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นสิ่งที่มักถูกมองข้าม ขึ้นอยู่กับระดับไฟที่มีและอุณหภูมิการเก็บ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีอายุการเก็บประมาณ 2-3 ปี (นานกว่านี้ถ้าชาร์จไว้บางส่วนและเก็บในที่เย็น) การสูญเสียสภาพเกิดจากการเพิ่มความต้านทานภายในที่เพิ่มขึ้นเองจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งถ้าความต้านทานภายในเพิ่มถึงจุดหนึ่ง เซลล์นั้นก็ไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ได้ แม้ว่าการวัดความจุจะยังวัดได้สูงอยู่ก็ตามดังรูปที่ 2.20

Temperature	40% charge level (recommended storage charge level)	100% charge level (typical user charge level)
0°C	96% after 1 year	94% after 1 year
25°C	96% after 1 year	80% after 1 year
40°C	85% after 1 year	65% after 1 year
60°C	75% after 1 year	60% after 3 months

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด รูปที่ 2.20 แสดงการสูญเสียความจุถาวรของเซลล์ลิเทียมตามฟังก์ชันของอุณหภูมิและระดับการชาร์จ



- แบตเตอรี่ที่มีระบบวัดพลังงาน ควรปรับตั้งให้สเกลตรงโดยการใช้ให้หมดก้อนโดยอุปกรณ์นั้นสัก 1 ครั้ง ทุกๆ การชาร์จ 30 ครั้ง ถ้าไม่ได้ทำ สเกลแบตเตอรี่อาจจะไม่ตรง ในบางกรณี อาจทำให้เตือนแบตเตอรี่หมดก่อนเวลาที่ควรจะเป็น
- เก็บแบตเตอรี่ในที่เย็นหลีกเลี่ยงการทิ้งไว้ในรถ ถ้าจำเป็นต้องเก็บไว้นานๆ ควรชาร์จไว้ 40 % ก่อนเก็บ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### หลักการออกแบบ

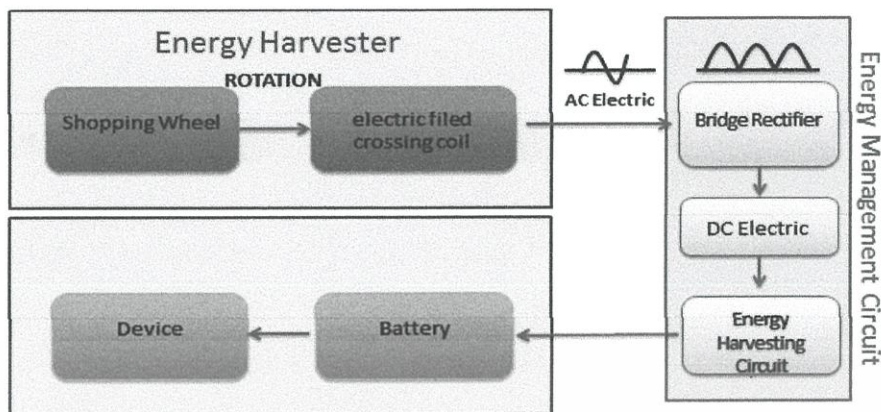
หลักการออกแบบล้อรถเข็นกำเนิดพลังงานนั้น จะอาศัยทฤษฎีหลักการเหนี่ยวนำเข้ามาช่วยในการออกแบบ ซึ่งขั้นต้นจะต้องเข้าใจถึงหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำ จากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ก่อน กล่าวได้คือ ถ้ามีการนำสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวด หรือนำขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ล้วนก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าภายในขดลวดเกิดขึ้น ทั้งนี้ทั้งนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยนั้นก็ขึ้นอยู่กับจำนวนรอบขดลวดที่พัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด ค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก จำนวนชั้นของแม่เหล็ก ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนขดลวด (Permeability) และความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กของล้อ เป็นต้น ดังนั้นสำหรับการออกแบบล้อจึงมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน นั่นคือ

- ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (เพลลาของล้อ)
- ส่วนที่เคลื่อนที่ (ฝาครอบล้อ)

เริ่มต้นด้วยล้อต้นแบบที่ 1 โดยออกแบบโครงสร้างของล้อให้มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับล้อรถเข็นข้อบกพร่องในห้างสรรพสินค้าทั่วไป แต่ภายในล้อจะประกอบด้วยชุดแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ได้ และชุดขดลวดที่ถูกยึดติดอยู่กับเพลลาของล้อที่ใช้ยึดกับขาหนีบ โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) จากนั้นออกแบบล้อต้นแบบที่ 2 โดยการเปลี่ยนแกนกลางของขดลวดตัวนำจากแกนอากาศเป็นแกนเหล็กหล่อเพื่อเพิ่มค่าซึมซาบทางแม่เหล็ก และออกแบบล้อต้นแบบที่ 3 โดยการเปลี่ยนรูปทรงของแม่เหล็กและขดลวดเพื่อเปรียบเทียบกับล้อต้นแบบที่ 2 ว่ารูปทรงแบบใดให้พลังงานงานมากกว่ากัน จากหลักการของล้อต้นแบบที่ 3 ที่มีอยู่แต่จะทำการเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กให้มากขึ้น จึงกลายเป็นล้อต้นแบบที่ 4 ได้มีการนำข้อมูลทั้งหมดมาประยุกต์ทำเป็นล้อต้นแบบที่ 5 โดยใช้แม่เหล็กและขดลวดเป็นรูปวงกลม เพิ่มพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า เพิ่มจำนวนชั้นของขดลวด เพิ่มขนาด และจำนวนชั้นของแม่เหล็ก สุดท้ายได้มีการออกแบบล้อต้นแบบที่ 6 โดยลดความยาวของขดลวดตัวนำจากล้อต้นแบบที่ 5 ที่มีอยู่เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กส่งถึงกันได้มากขึ้น

ภาพรวมหลักการทำงานของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากล้อรถเข็น สามารถแสดงได้ดังแผนผังดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 รวมหลักการทำงานของการเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อปิ้ง

### 3.1 โครงสร้างทางกายภาพของล้อกำเนิดพลังงาน

การออกแบบล้อจะออกแบบโดยยึดโครงสร้างของล้อที่มีอยู่แล้วเป็นหลัก โดยการจัดวางแม่เหล็กและการวางขดลวดลวดนั้นจะคำนึงถึงขนาดของล้อที่มีอยู่ ซึ่งแนวทางในการออกแบบจะกล่าวดังต่อไปนี้

#### 3.1.1 แม่เหล็ก

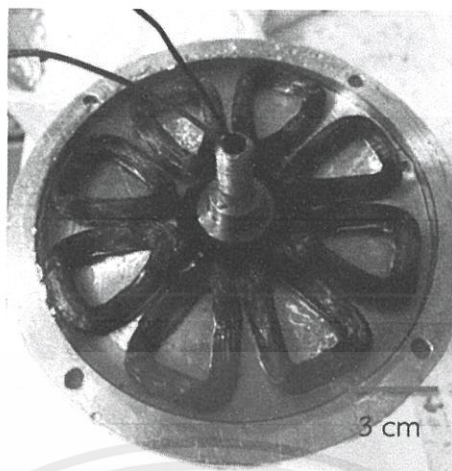
แม่เหล็กเป็นหนึ่งในสองส่วนประกอบที่สำคัญของล้อกำเนิดพลังงาน เนื่องจากแม่เหล็กเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องมีการเลือกขนาดแม่เหล็กให้ใหญ่เหมาะสมกับขนาดของล้อที่ออกแบบ และยังคงคำนึงถึงรูปร่างของแม่เหล็กเพื่อที่จะทำให้เกิดกระบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้ามากที่สุด สำหรับคุณสมบัติแม่เหล็กที่เลือกใช้คือเลือกใช้แม่เหล็กแรงสูงแบบถาวรแม่เหล็กแรงสูงนีโอไดเมียม (NdFeB) มีส่วนผสมของแร่หายากชนิดหนึ่งคือ แร่นีโอไดเมียม ซึ่งมีค่าพลังงานแม่เหล็กถาวรที่มากที่สุดและเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลาย

#### 3.1.2 ขดลวดตัวนำ

ขดลวดตัวนำเป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของล้อต้นแบบ จำนวนรอบที่พันขดลวดและจำนวนขดลวดลวดนั้นมีผลต่อการเหนี่ยวนำทั้งสิ้น กล่าวได้คือ ยิ่งจำนวนรอบที่พันมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ก็จะมากตาม และถ้านำขดลวดหลายๆ ขดมาต่ออนุกรมต่อเนื่องกันมากเท่าไร ก็จะทำให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากตามไปด้วย ดังนั้นการออกแบบล้อจึงต้องคำนึงถึงพื้นที่ที่ใช้ติดตั้งขดลวดและรูปแบบลักษณะการพันขดลวดร่วมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





รูปที่ 3.4 ชุดขดลวดตัวนำของล้อต้นแบบที่ 1

### 3.3 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 2

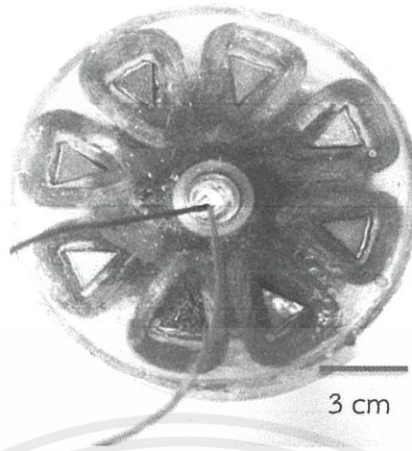
#### 3.3.1 แม่เหล็ก

เลือกใช้แม่เหล็กที่มีรูปทรงและขนาดแบบเดียวกับล้อต้นแบบที่ 1 โดยมีขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งหลักการในการวางแม่เหล็กก็ยังคงวางรูปแบบเดียวกันกับล้อต้นแบบที่ 1 คือ วางแม่เหล็กให้ขั้วเหนือขั้วใต้สลับกันจนครบรอบของฝาทั้งสอง ด้านดังรูปที่ 3.3 เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ ซึ่งจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมากได้

#### 3.3.2 ขดลวดตัวนำ

ออกแบบโดยใช้ขดลวดเบอร์ 36 จำนวน 8 ขด พันขดละ 600 รอบ ซึ่งมีขนาดเหมาะสมกับโครงสร้างของล้อพอดี้ โดยแกนกลางของขดลวดตัวนำจะใส่แกนเหล็กสามเหลี่ยม ฐานขนาด 10 มิลลิเมตร สูง 10 มิลลิเมตร หนา 6 มิลลิเมตร เพื่อที่จะเพิ่มการแรงเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำมากขึ้นดังรูปที่ 3.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยันแบบที่ 2

### 3.4 การออกแบบล้อยันแบบที่ 3

ล้อยันแบบที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงขนาดของแม่เหล็ก และชุดขดลวดตัวนำ โดยจะคำนึงถึงขนาดของล้อยันแบบเดิม ซึ่งการออกแบบล้อยันแบบที่ 3 นี้จะออกแบบให้ชุดลวดทองแดงมีรูปทรงแบบเดียวกันกับรูปทรงของแม่เหล็ก

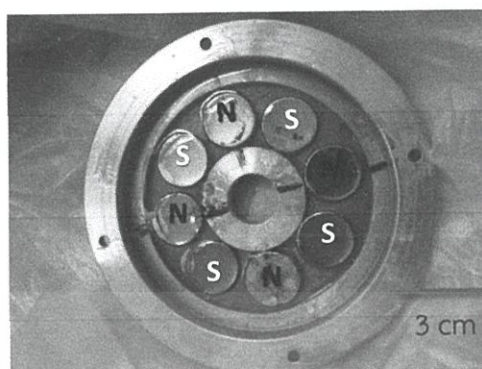
#### 3.4.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อยันแบบที่ 3

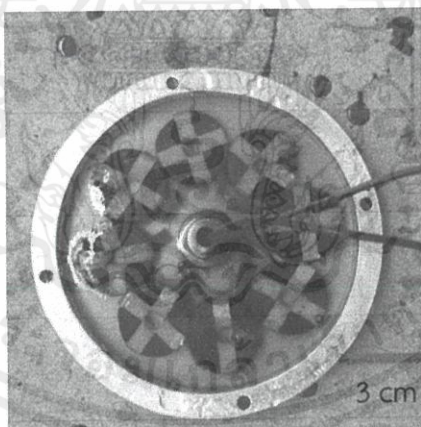
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การเลือกแม่เหล็กต้องเลือกขนาดแม่เหล็กให้มีการวางให้กินพื้นที่ของล้อยันให้มากที่สุด และวางให้แม่เหล็กขั้วเหนือและได้สลับกันจนครบรอบเป็นวงกลมดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การวางแม่เหล็กของล้อยแบบที่ 3

#### 3.4.2 ขดลวดตัวนำ

การออกแบบขดลวดตัวนำล้อยแบบที่ 3 ได้ออกแบบให้ขดลวดมีขนาดและรูปร่างให้ใกล้เคียงกับแม่เหล็กมากที่สุด โดยต้องการให้ความต้านทานของขดลวดรวมมีขนาดรวม 270 โอห์ม เพื่อที่จะได้นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับล้อยแบบที่ 1 ซึ่งจะได้ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบที่เหมือนกัน โดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ 36 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 900 รอบ ดังรูปที่ 3.8



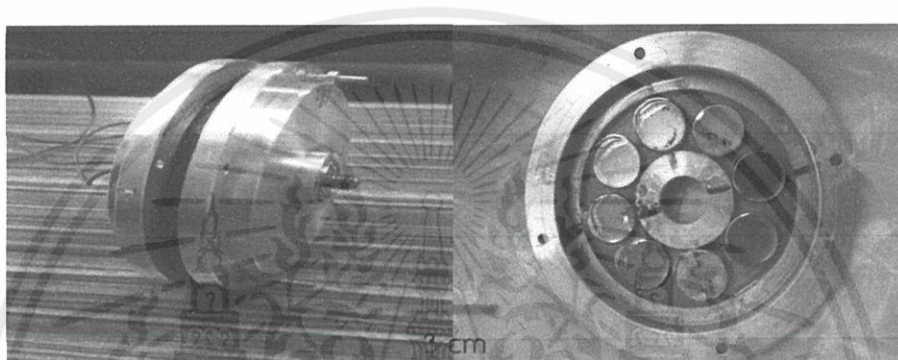
รูปที่ 3.8 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยแบบที่ 3

การออกแบบนี้เพื่อให้ขดลวดนั้นเกิดการเหนี่ยวนำกับแม่เหล็กให้มากที่สุด จึงออกแบบให้รูปร่างของขดลวดและรูปร่างของแม่เหล็กมีรูปร่างที่เหมือนกัน และรูปทรงที่เป็นวงกลมทำให้มีจุดที่เส้นลวดขนานกับสนามแม่เหล็กมีน้อย (ถ้าสนามแม่เหล็กขนานกับขดลวดจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำไม่ว่ากรณีใดกระแสไฟฟ้า) ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 4

#### 3.5.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม มีรูปทรงและขนาดแบบเดียวกับล้อต้นแบบที่ 3 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 แต่สำหรับการวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 4 จะมีการวางจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชั้น เพื่อที่จะเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามมาดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 4

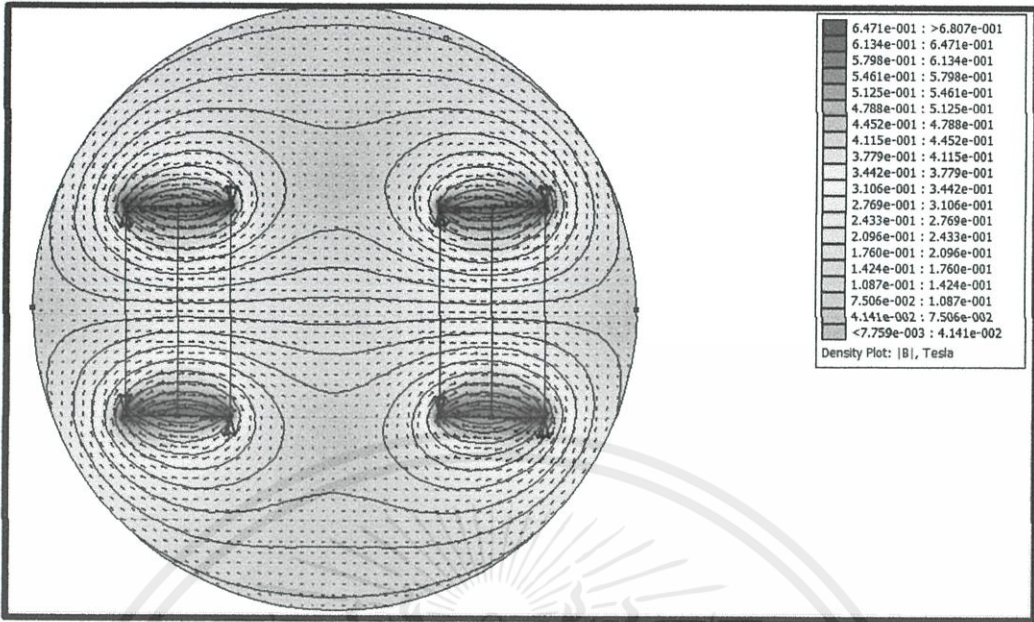
#### 3.5.2 ขดลวดตัวนำ

การออกแบบขดลวดตัวนำของล้อที่แบบที่ 4 จะออกแบบให้ขดลวดตัวนำมีขนาดและรูปร่างให้ใกล้เคียงกับแม่เหล็กมากที่สุด โดยต้องการให้ความต้านทานของขดลวดรวมมีขนาดรวม 270 โอห์ม แบบเช่นเดียวกับล้อต้นแบบที่ 4 ซึ่งจะใช้ลวดทองแดงเบอร์ 36 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 900 รอบดังรูปที่ 3.8

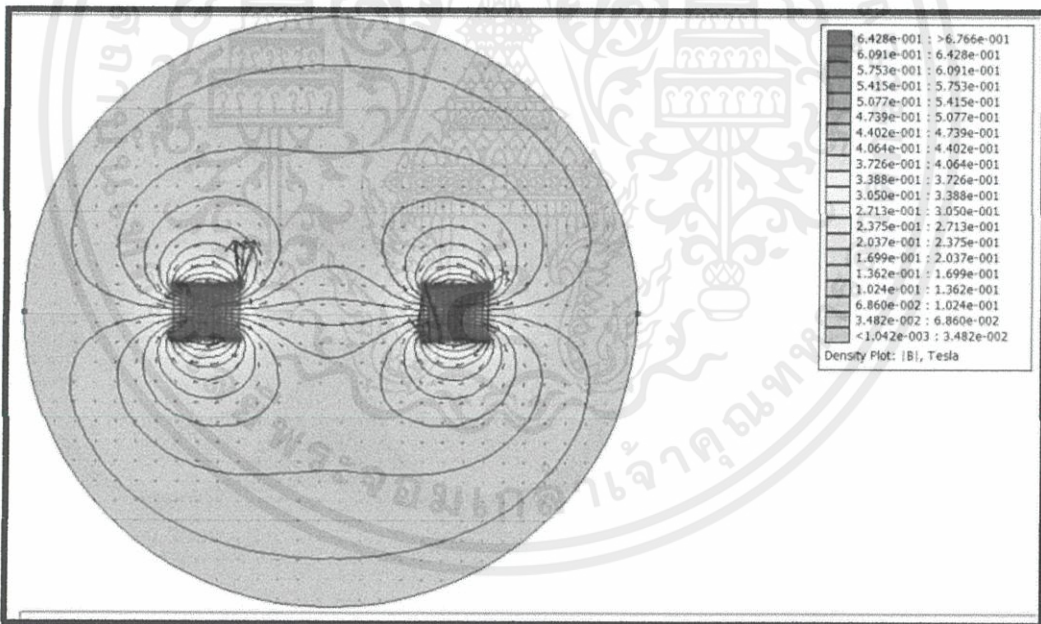
### 3.6 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 5

การออกแบบล้อต้นแบบที่ 5 มีการเพิ่มขนาดความใหญ่ของล้อขึ้นเพื่อที่จะสามารถเพิ่มขึ้นจำนวนของแม่เหล็กได้มากขึ้น และสามารถเพิ่มความยาวของลวดหนึ่งขดได้มาก โดยเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะอาศัยโปรแกรมคำนวณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบจำนวนชั้นของแม่เหล็ก ซึ่งจะมีผลต่อค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 3.10 รูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

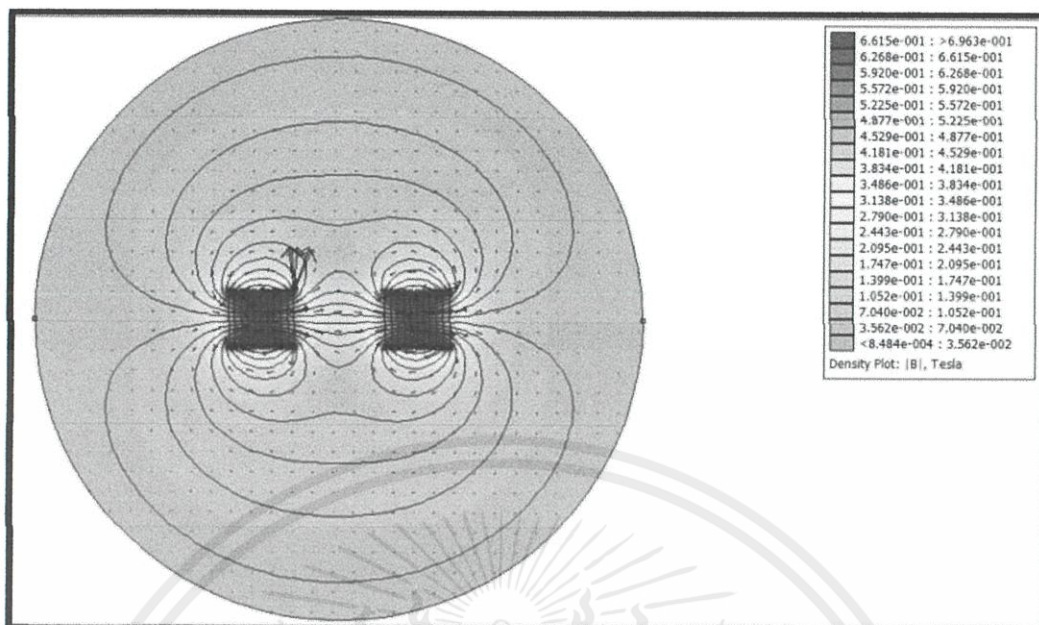


รูปที่ 3.10 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กลัดตันแบบที่ 4 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 20 มม.



รูปที่ 3.11 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กลัดตันแบบที่ 5 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 90 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กลวดต้นแบบที่ 6 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 45 มม.

### 3.6.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร

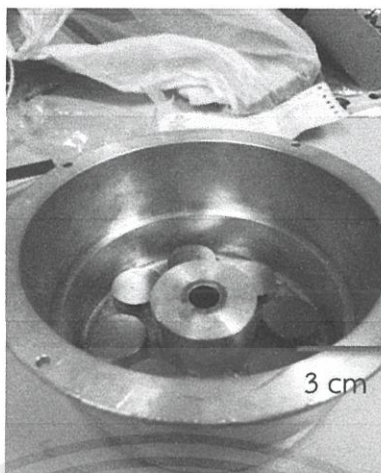
ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของลวดแบบที่ 5

การเลือกแม่เหล็กต้องเลือกขนาดแม่เหล็กให้มีการวางให้กินพื้นที่ของลวดให้มากที่สุด และวางให้แม่เหล็กขั้วเหนือและใต้สลับกันจนครบรอบเป็นวงกลม จำนวน 10 ชั้นดังรูปที่ 3.14

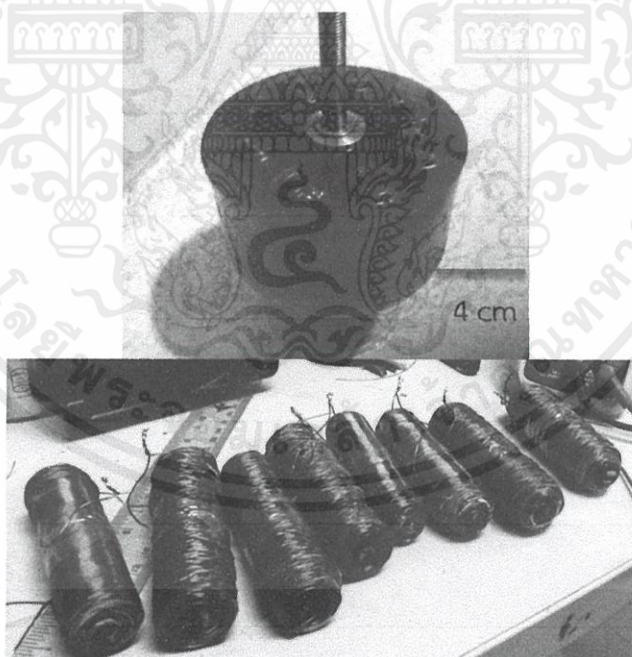
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การวางแม่เหล็กของล้อแบบที่ 5

### 3.6.2 ขดลวดตัวนำ

ออกแบบให้ขดลวดตัวนำมีขนาดและรูปร่างให้ใกล้เคียงกับแม่เหล็กมากที่สุด โดยใช้ ลวดทองแดงเบอร์ 23 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 1600 รอบดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ชุดขดลวดตัวนำของล้อแบบที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น การออกแบบลวดต้นกำเนิดพลังงานแบบที่ 5 เพื่อเพิ่มแรงเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เกิดให้เพิ่มขึ้น  
เนื่องจากการเปลี่ยนขนาดของเบอร์ขดลวดทองแดง และมีการเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่ม

ค่าสนามแม่เหล็กให้มีความมากขึ้น โดยมีการออกแบบให้รูปทรงของขดลวดตัวนำมีรูปทรงแบบเดียวกันกับรูปทรงของแม่เหล็ก

### 3.7 การออกแบบลวดต้นแบบที่ 6

ลวดต้นแบบที่ 6 ออกแบบโดยการลดขนาดของลวดต้นแบบที่ 5 เพื่อที่จะให้สนามแม่เหล็กส่งถึงกันมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าเยอะขึ้น

#### 3.7.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม มีขนาดและรูปทรงเหมือนกันกับลวดต้นแบบที่ 5 โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.13

#### 3.7.2 ขดลวดตัวนำ

ขดลวดตัวนำของลวดต้นแบบที่ 6 มีการลดขนาดจากลวดต้นแบบที่ 5 ที่มีอยู่ โดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ 23 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 800 รอบดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ชุดขดลวดตัวนำของลวดต้นแบบที่ 6

### 3.8 องค์ประกอบของลวดต้นแบบที่ 1 ถึงลวดต้นแบบที่ 4

องค์ประกอบส่วนที่สำคัญ สำหรับลวดต้นแบบที่ 1 ถึงลวดต้นแบบที่ 4 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญ

ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศ จำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นเรขาคณิตที่หล่อเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 94 มิลลิเมตร และหนา 8 มิลลิเมตร ซึ่งภายในประกอบด้วยขดลวดตัวนำ
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็ก จำนวน 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีการวางแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.11 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว  
 ดังนั้นจึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อย ที่จะนำไปติดเป็นล้อยรถเข็น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบด้านซ้าย ส่วนฝาครอบด้านขวาซึ่งไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนของเพลายึดล้อ

### 3.8.1 ฝาครอบ

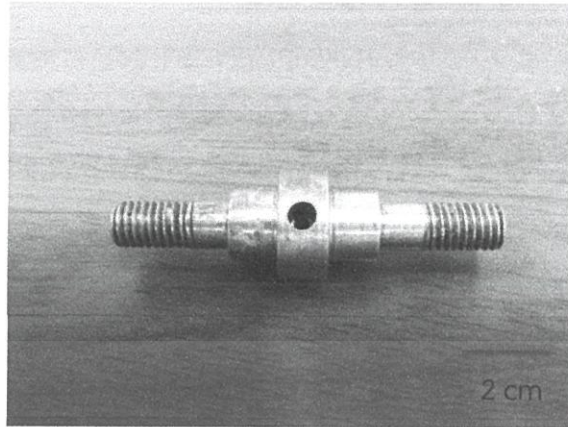
เป็นฝาอลูมิเนียมที่ออกแบบเองจำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 121.5 มิลลิเมตร มีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 18 มิลลิเมตร และมีการเจาะลงเป็นชั้น 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเจาะลึกลงไปจากผิวด้านในเท่ากับ 7 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 96 มิลลิเมตร เพื่อไว้เป็นช่องสำหรับติดตั้งขดลวด และชั้นที่เจาะเป็นร่องเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 82 มิลลิเมตร และ 38 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเจาะลึกลงไปจากผิวด้านใน 12 มิลลิเมตร เพื่อเป็นที่ติดแม่เหล็กดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 ฝาครอบของล้อยต้นแบบที่ 1 ถึงล้อยต้นแบบที่ 4

### 3.8.2 เปลา

เพลาทำจากสแตนเลสมีความยาวเท่ากับ 64 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเพลาลึกเท่ากับ 8 มิลลิเมตร บริเวณที่ประกบกับฝาครอบเท่ากับ 12 มิลลิเมตร และตรงกลางเพลามีบริเวณที่ยึดกับขดลวดมีขนาดเท่ากับ 18 มิลลิเมตร และเจาะรูทะลุผ่านตรงกลางเพลาด้วย เพื่อการก้าว  
 ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตามการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 เพลลาของล้อยันแบบที่ 1 ถึงล้อยันแบบที่ 4

### 3.8.3 ยางหุ้มล้อ

เป็นยางที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 130 มิลลิเมตร ของยางหนาเท่ากับ 28 มิลลิเมตร และมีขนาดหน้ายางเท่ากับ 28 มิลลิเมตรดังรูปที่ 3.19

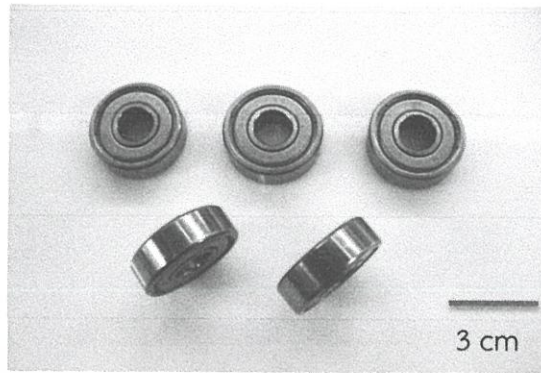


รูปที่ 3.19 ยางหุ้มล้อของล้อยันแบบที่ 1 ถึงล้อยันแบบที่ 4

### 3.8.4 ลูกป็น

ใช้ลูกป็นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร รูปร่างเบอร์เอ็ม 8 ดังรูปที่ 3.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.20 ลูกปืนของล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 4

### 3.9 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 5

องค์ประกอบส่วนที่สำคัญ สำหรับล้อต้นแบบที่ 5 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศจำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นเรซินที่หล่อเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 133 มิลลิเมตร และหนา 90 มิลลิเมตร ซึ่งภายในประกอบด้วยขดลวดตัวนำเบอร์ 23 พันเป็นรูปวงกลมจำนวน 8 ขด ขดละ 1600 รอบ

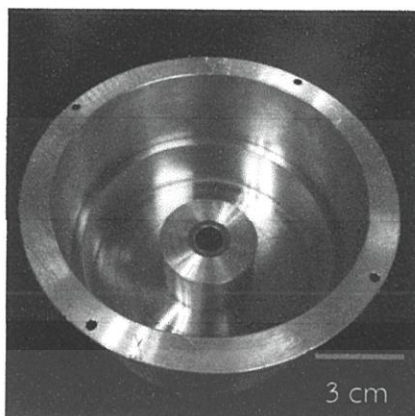
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็กจำนวน 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีการวางแม่เหล็กดังรูปที่ 3.15 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ดังนั้นจึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อ ที่จะนำไปติดเป็นล้อรถเข็น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบซ้ายและขวาไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนเพลายึดล้อ

#### 3.9.1 ฝาครอบ

เป็นฝาอลูมิเนียมที่ออกแบบเองจำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 161 มิลลิเมตร มีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 91 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมีการเจาะลงเป็นชั้น 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเจาะลึกลงไปจากผิวด้านในเท่ากับ 47 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 135 มิลลิเมตร เพื่อไว้เป็นช่องสำหรับติดตั้งขดลวด และชั้นที่เจาะเป็นร่องเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 125 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเจาะลึกลงไปจากผิวด้านใน 34 มิลลิเมตร เพื่อเป็นที่ติดแม่เหล็กดังรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 ฝาครอบของล้อต้นแบบที่ 5

### 3.9.2 เพลลา

เพลลาทำจากสแตนเลสมีความยาวเท่ากับ 274 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเพลลาหลักเท่ากับ 12 มิลลิเมตร บริเวณที่ประกบกับฝาครอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และตรงกลางเพลลาบริเวณที่ยึดกับขดลวดมีขนาดเท่ากับ 32 มิลลิเมตร และเจาะรูทะลุผ่านตรงกลางเพลลาด้วย เพื่อไว้สำหรับร้อยสายไฟออกมาได้ดังรูปที่ 3.22

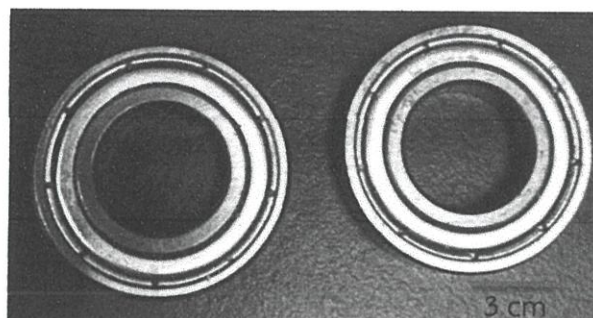


รูปที่ 3.22 เพลลาของล้อต้นแบบที่ 5

### 3.9.3 ลูกปืน

ใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร รุ่นน็อตเบอร์เอ็ม 12 ดังรูปที่ 3.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 ลูกปืนของล้อต้นแบบที่ 5

### 3.10 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 6

องค์ประกอบส่วนที่สำคัญ สำหรับล้อต้นแบบที่ 6 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศจำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นเรซินที่หล่อเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 133 มิลลิเมตร และหนา 45 มิลลิเมตร ซึ่งภายในประกอบด้วยขดลวดตัวนำเบอร์ 28 พันเป็นรูปวงกลมจำนวน 8 ขด ขดละ 1600 รอบ
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็ก จำนวน 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีการวางแม่เหล็กดังรูปที่ 3.15 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ดังนั้นจึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อ ที่จะนำไปติดเป็นล้อรถเข็น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบซ้ายและขวาไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนเพลายึดล้อ

#### 3.10.1 ฝาครอบ

เป็นฝาอลูมิเนียมที่ออกแบบเองจำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 161 มิลลิเมตร มีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 68.5 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมีการเจาะลงเป็นชั้น 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเจาะลึกลงไปจากผิวด้านในเท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 135 มิลลิเมตร เพื่อไว้เป็นช่องสำหรับติดตั้งขดขดลวด และชั้นที่เจาะเป็นร่องเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 125 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเจาะลึกลงไปจากผิวด้านใน 34 มิลลิเมตร เพื่อเป็นที่ติดแม่เหล็กดังรูปที่ 3.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 ฝาครอบของล้อต้นแบบที่ 6

### 3.10.2 เพลลา

เพลลาทำจากสแตนเลสมีความยาวเท่ากับ 143 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนเพลลาหลักเท่ากับ 12 มิลลิเมตร บริเวณที่ประกบกับฝาครอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และตรงกลางเพลลาบริเวณที่ยึดกับขดลวดมีขนาดเท่ากับ 32 มิลลิเมตร และเจาะรูทะลุผ่านตรงกลางเพลลาด้วย เพื่อไว้สำหรับร้อยสายไฟออกมาได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 เพลลาของล้อต้นแบบที่ 6

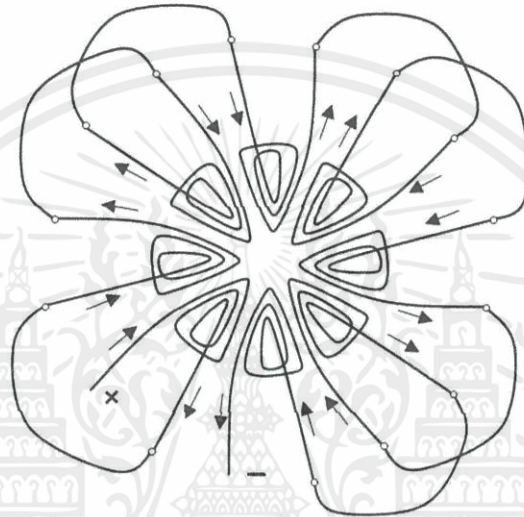
### 3.10.3 ลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร รูปร่างเบอร์เอ็ม 12 ซึ่งมีขนาดเท่ากับล้อ  
ต้นแบบที่ 5 ดังรูปที่ 3.23

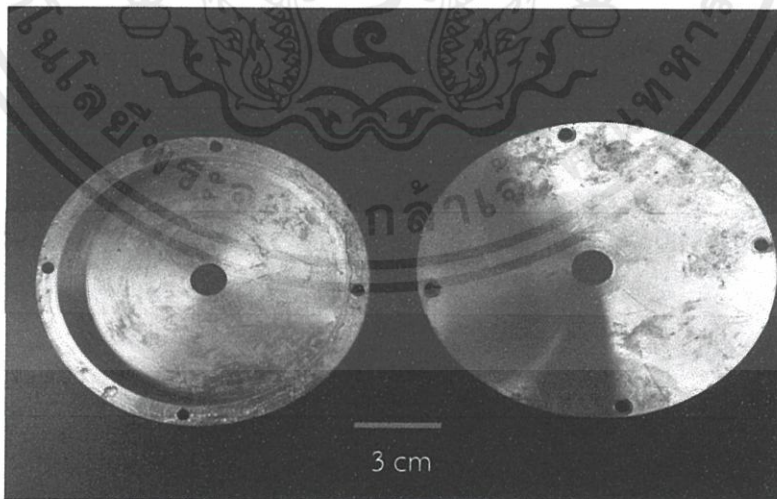
### 3.11 การหล่อเรซินและการประกอบล้อยันแบบทั้งหมด

#### 3.11.1 การหล่อเรซิน

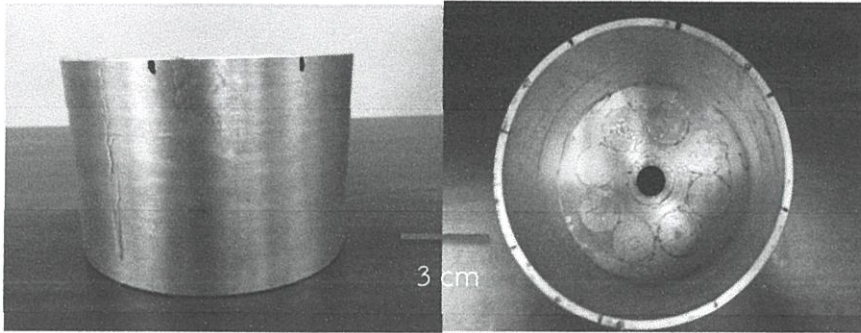
การหล่อเรซินจะใช้แบบหล่อที่ออกแบบดังรูปที่ 3.27 และรูปที่ 3.28 โดยก่อนหล่อนั้นต้องจัดเรียงสายไฟและเชื่อมต่อสายไฟแต่ละขดลวดให้เรียบร้อยดังรูปที่ 3.26 แล้วจัดวางขดลวดลงในแบบหล่อแล้วจึงเทน้ำยาหล่อเรซินลงไปดังรูปที่ 3.29 และรูปที่ 3.30 ทิ้งไว้รอจนน้ำยาแข็งตัวจึงค่อยแกะออกจากแบบหล่อ



รูปที่ 3.26 การเชื่อมต่อขดลวดตัวนำของล้อยันแบบทั้ง 6 ล้อ



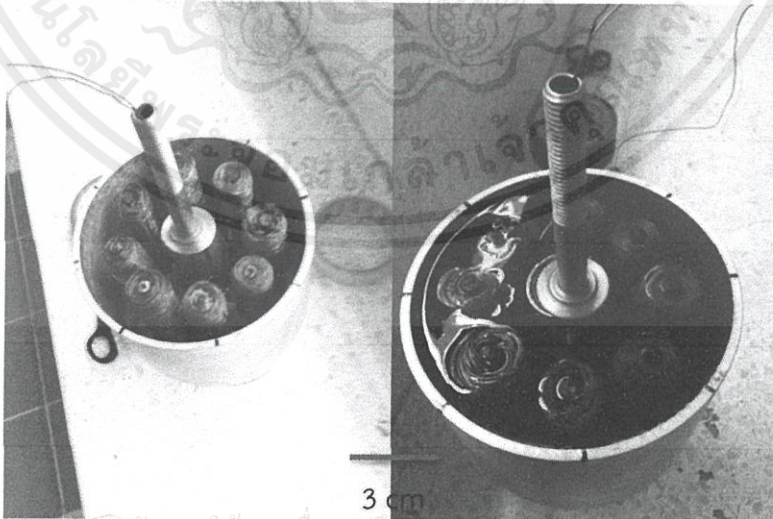
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยรูปที่ 3.27 แบบหล่อเรซินของล้อยันแบบที่ 1 ถึงล้อยันแบบที่ 4 ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 แบบหล่อเรซินของล้อยตันแบบที่ 5 และล้อยตันแบบที่ 6



รูปที่ 3.29 การหล่อเรซินของขดลวดล้อยตันแบบที่ 1 ถึงล้อยตันแบบที่ 4



รูปที่ 3.30 การหล่อเรซินของขดลวดล้อยตันแบบที่ 5 และล้อยตันแบบที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในข้อมูลและรูปภาพที่มีการนำไปใช้

### 3.11.2 การประกอบล้อรถเข็น

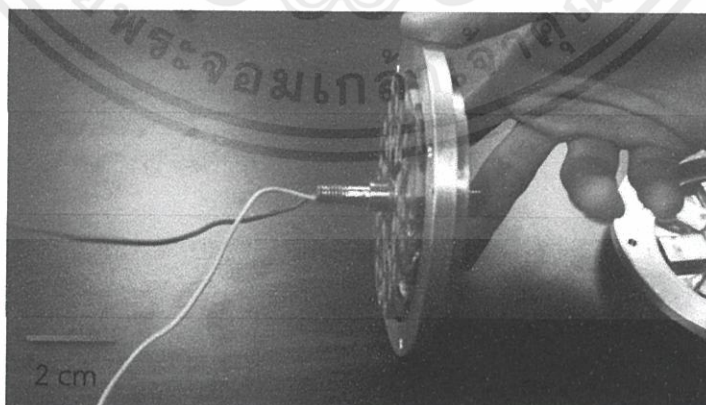
การประกอบล้อรถเข็นของล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 6 เข้ากับตัวโครงสร้างของรถเข็น จะใช้วิธีและหลักการแบบเดียวกัน โดยมีวิธีประกอบล้อรถเข็นเข้ากับตัวโครงสร้างรถเข็น ดังวิธีต่อไปนี้

1. นำลูกปืนมาใส่ที่ด้านนอกของฝาครอบล้อรถเข็นทั้งสองด้านให้เรียบร้อย จากนั้นนำแม่เหล็กมาติดที่ด้านในของฝาครอบล้อทั้งสองด้าน โดยการติดแม่เหล็กแต่ละฝานั้นจะต้องติดแม่เหล็ก ขั้วเหนือสลับกับขั้วใต้ไปจนครบ 8 ตัวดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การติดแม่เหล็กเข้ากับฝาครอบล้อรถเข็นทั้ง 2 ฝา

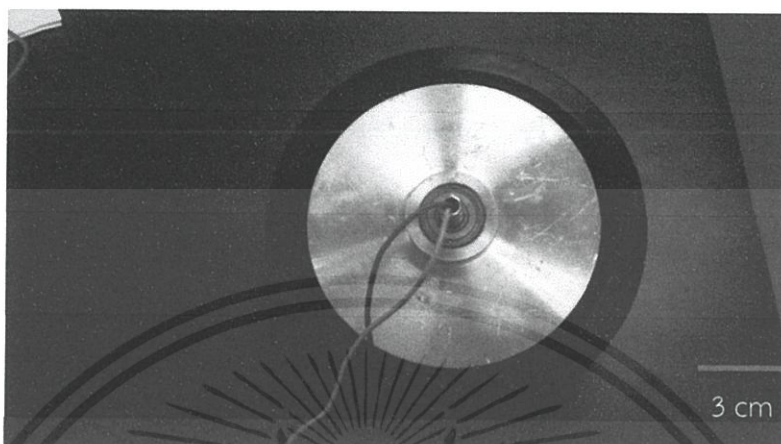
2. นำชุดขดลวดที่หล่อด้วยเรซินแล้วมาใส่เข้ากับฝาครอบด้านใดด้านหนึ่ง แล้วนำฝาครอบทั้งสองฝามาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งในการประกอบฝาครอบนั้นต้องให้แม่เหล็กขั้วเหนือของฝาครอบอันหนึ่งอยู่ตรงข้ามกับขั้วใต้ของฝาครอบอีกฝาคือ เหลือ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านชุดขดลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลางดังรูปที่ 3.32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำไปเผยแพร่ในที่สาธารณะหรือสื่อมวลชนทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.32 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ

3. เมื่อประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดเรียบร้อยแล้ว ให้หุ้มลวดด้วยยางที่เตรียมไว้ให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.33 เพื่อที่จะนำไปประกอบเข้ากับโครงสร้างรถเข็นสำหรับการเข็นทดสอบจริงต่อไป



รูปที่ 3.33 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ

4. นำลวดที่ได้ไปติดตั้งกับรถเข็นให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.34



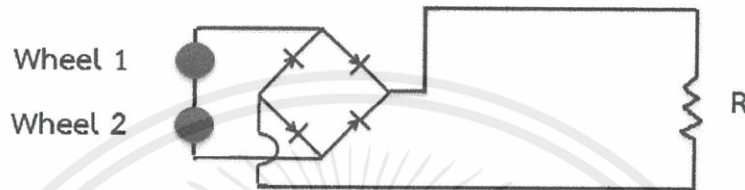
รูปที่ 3.34 รถเข็นกำเนิดพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.12 ชุดออกแบบการทดลองการต่อล๊อแบบอนุกรมและขนาน

#### 3.12.1 การต่อล๊อ 2 ล๊อแบบอนุกรม

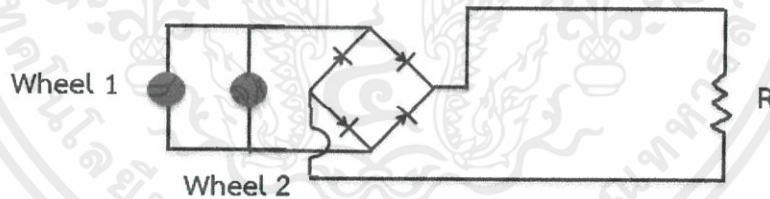
นำล๊อแต่ละล๊อผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วนำมาต่อแบบอนุกรม โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานค่าต่างๆ โดยเซ็นรตเซ็นซ้อปั้งด้วยความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังผลการทดลองในบทที่ 4 ดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 การต่อล๊อ 2 ล๊อแบบอนุกรม

#### 3.12.2 การต่อล๊อ 2 ล๊อแบบขนาน

นำล๊อแต่ละล๊อผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วนำมาต่อแบบขนาน โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานค่าต่างๆ โดยเซ็นรตเซ็นซ้อปั้งด้วยความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังผลการทดลองในบทที่ 4 ดังรูปที่ 3.36



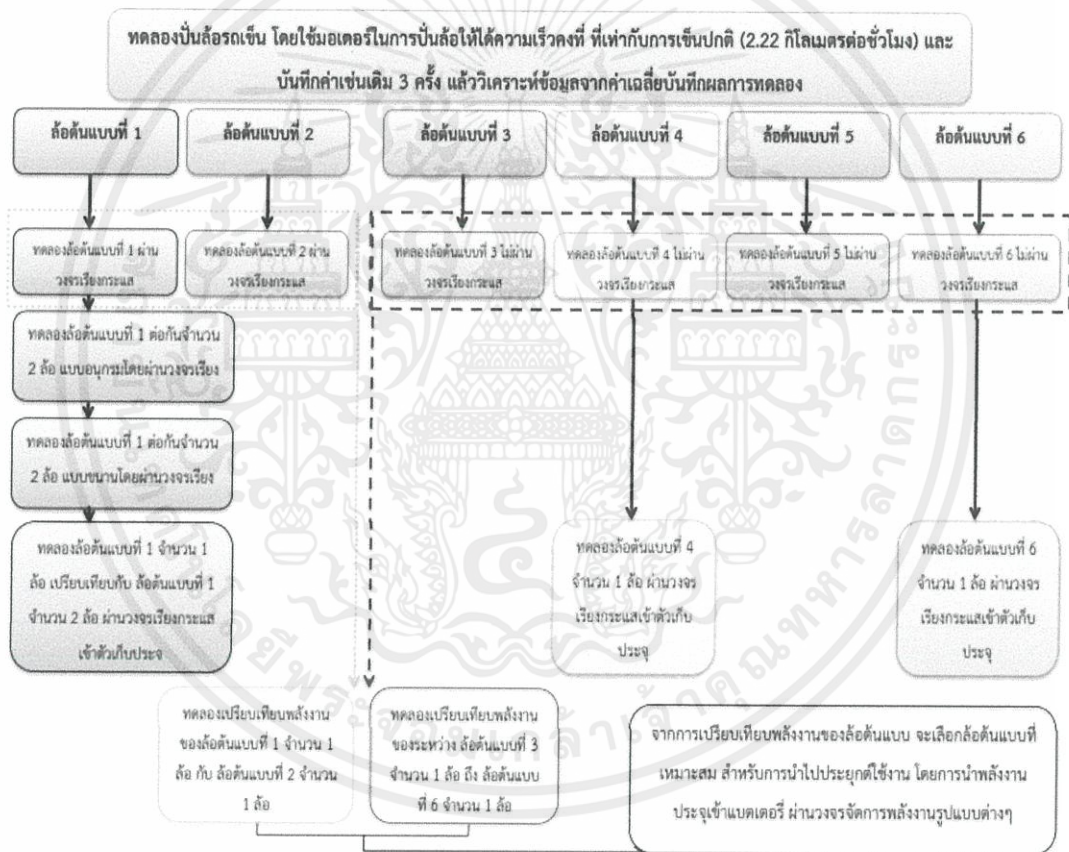
รูปที่ 3.36 การต่อล๊อ 2 ล๊อแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของล้อต้นแบบทั้ง 6 แบบที่ได้ออกแบบไว้ตามหัวข้อของบทที่ 3 ที่ผ่านมา ซึ่งจะเลือกล้อต้นแบบที่เหมาะสมสำหรับการประจุพลังงานจากล้อต้นแบบที่เลือกนั้นลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยการผ่านวงจรจัดการพลังงานรูปแบบต่างๆ และสามารถนำพลังงานที่ประจุลงแบตเตอรี่ไปใช้ประโยชน์อีกต่อไปได้ ซึ่งภาพโดยรวมขั้นตอนการทดสอบล้อรถเข็นต้นแบบแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ขั้นตอนการทดสอบล้อรถเข็นต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

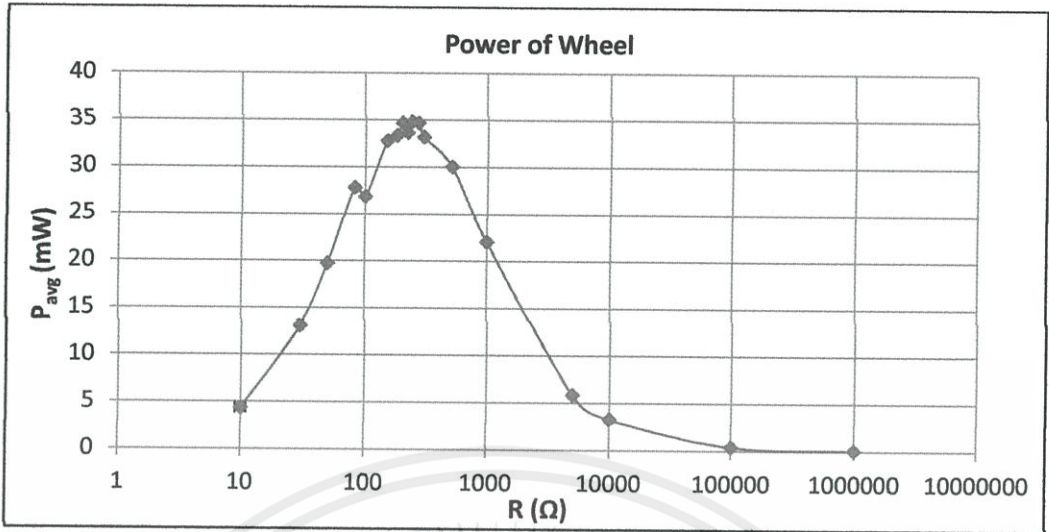
#### 4.1 การทดลองลัดต้นแบบที่ 1

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาส่วนของพลังงานที่ได้จากลัดต้นแบบที่ 1 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นลัดให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเซ็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

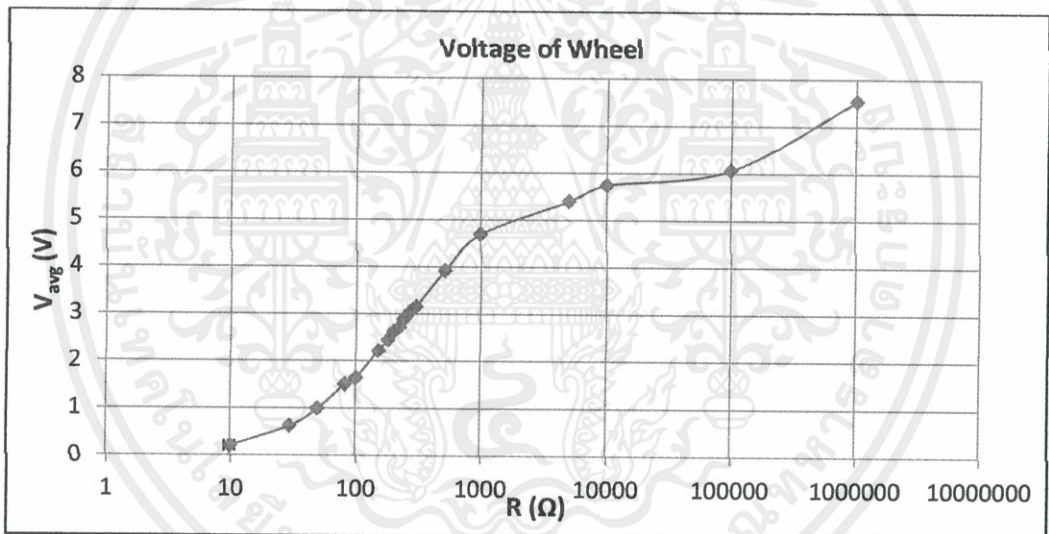
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของลัดต้นแบบที่ 1 ผ่านวงจรเรียงกระแส

R ( $\Omega$ )	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	I <sub>avg</sub> (mA)	V <sub>avg</sub> (V)	
10	20.96	0.2096	4.393216
30	20.89333333	0.6268	13.09594133
50	19.87333333	0.993666667	19.74746889
82	18.41056911	1.509666667	27.79382249
100	16.38666667	1.638666667	26.85228444
150	14.78444444	2.217666667	32.78696963
180	13.61111111	2.45	33.34722222
200	13.165	2.633	34.663445
220	12.36363636	2.72	33.62909091
240	12.04166667	2.89	34.80041667
270	11.32592593	3.058	34.63468148
300	10.51555556	3.154666667	33.17307259
510	7.673856209	3.913666667	30.03291525
1000	4.693333333	4.693333333	22.02737778
5000	1.079066667	5.395333333	5.821924356
10000	0.573633333	5.736333333	3.290552011
100000	0.06066	6.066	0.36796356
No Load	0.007539	7.539	0.056836521

จากผลการทดลองที่ได้ค่าความต้านทานภายในขดลวดเท่ากับ 240 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 34.80 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.2 ค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 2.89 โวลต์ ดังรูปที่ 4.3 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 12.04 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.4

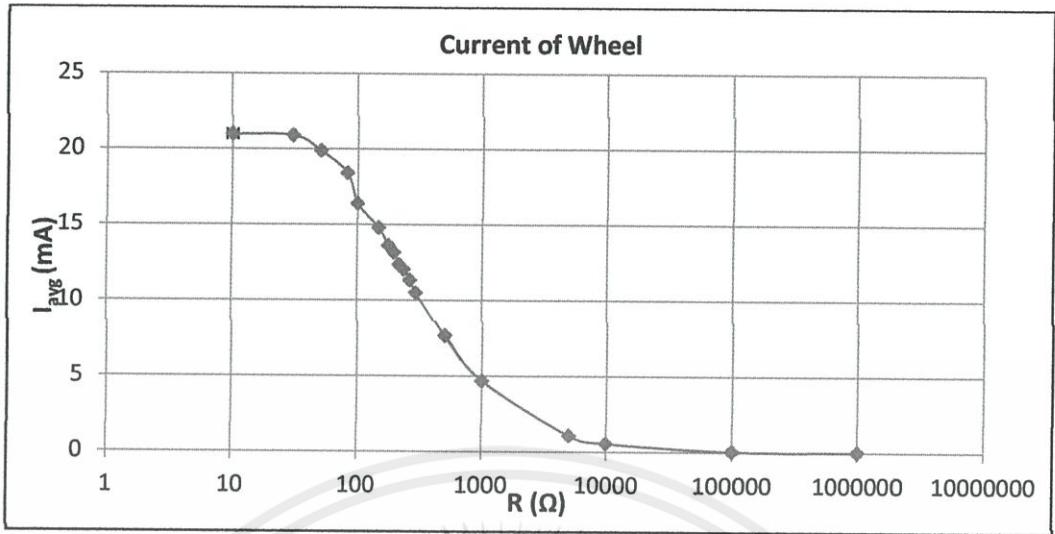


รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



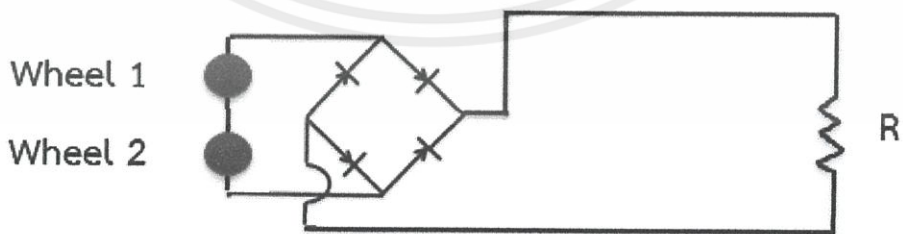
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.1.1 การทดลองล้อต้นแบบที่ 1 ต่อกันจำนวน 2 ล้อ โดยผ่านวงจรเรียงกระแส

การทดลองนี้ จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากการต่อสองล้อเข้าด้วยกัน โดยประกอบล้อเข้ากับรถเข็นซีออปป์ และทดลองเข็นจริงด้วยความเร็วของคนเดินปกติที่ความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 90 รอบต่อนาที และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นจึงทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้ไดโอดเบอร์ BAT46 ที่มีแรงดันตกคร่อมเพียง 450 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีการสูญเสียแรงดันต่ำและมีผลการทดลองดังนี้

4.1.1.1 การทดลองต่อล้อต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ แบบอนุกรมโดยผ่านวงจรเรียง

กระแส



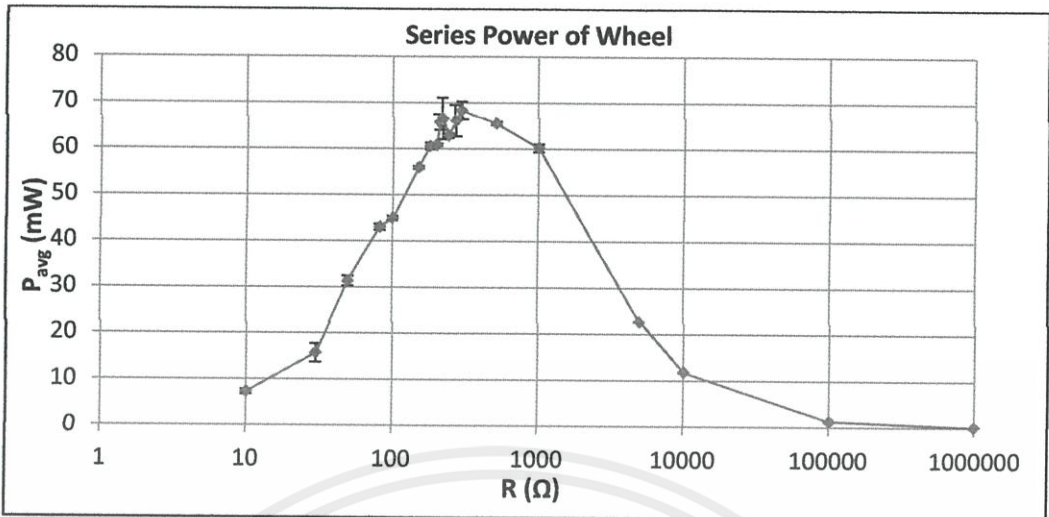
ผลการทดลองนี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ โดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นการเก็บค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการต่อ 2 ล้อแบบอนุกรม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของการต่อลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ แบบอนุกรมผ่านวงจรเรียงกระแส

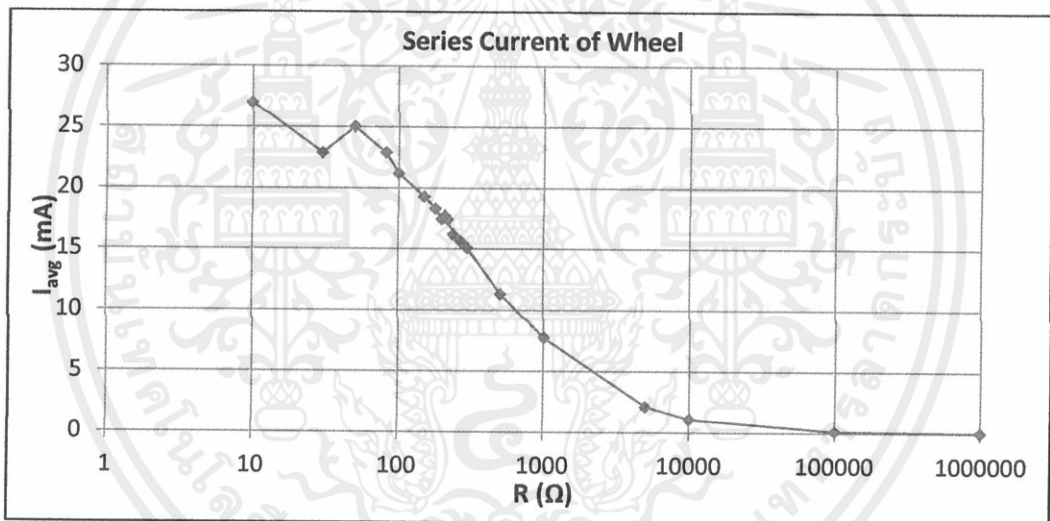
R ( $\Omega$ )	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	$I_{avg}$ (mA)	$V_{avg}$ (V)	
10	26.982	0.26982	7.28028324
30	22.882	0.68646	15.70757772
50	25.032	1.2516	31.3300512
82	22.89512195	1.8774	42.98330195
100	21.194	2.1194	44.9185636
150	19.30933333	2.8964	55.92755307
180	18.34666667	3.3024	60.588032
200	17.442	3.4884	60.8446728
209	17.74066986	3.7078	65.77885569
220	17.39727273	3.8274	66.58632164
240	16.18166667	3.8836	62.84312067
270	15.64666667	4.2246	66.100908
300	15.09	4.527	68.31243
510	11.33490196	5.7808	65.52480125
1000	7.76	7.76	60.2176
5000	2.1296	10.648	22.6759808
10000	1.0878	10.878	11.8330884
100000	0.1171	11.71	1.371241
No Load	0.01363	13.63	0.1857769

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ค่าความต้านทาน 300 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 68.31 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 15.09 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.6 และค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.527 โวลต์ ดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

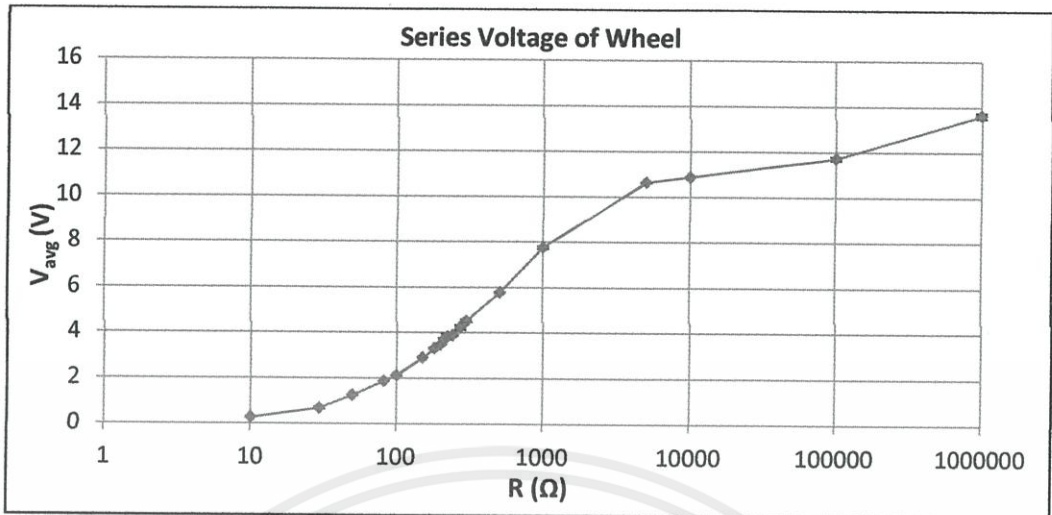


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



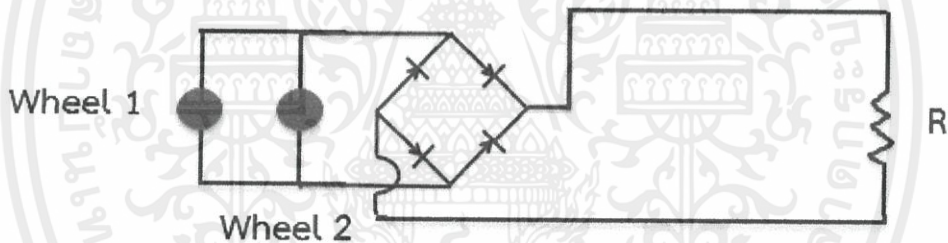
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

#### 4.1.1.2 การทดลองต่อลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ แบบขนานโดยผ่านวงจรเรียงกระแส



ผลการทดลองนี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ โดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นการเก็บค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการต่อ 2 ล้อต่อแบบขนาน ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของการต่อลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบขนานผ่านวงจรเรียงกระแส

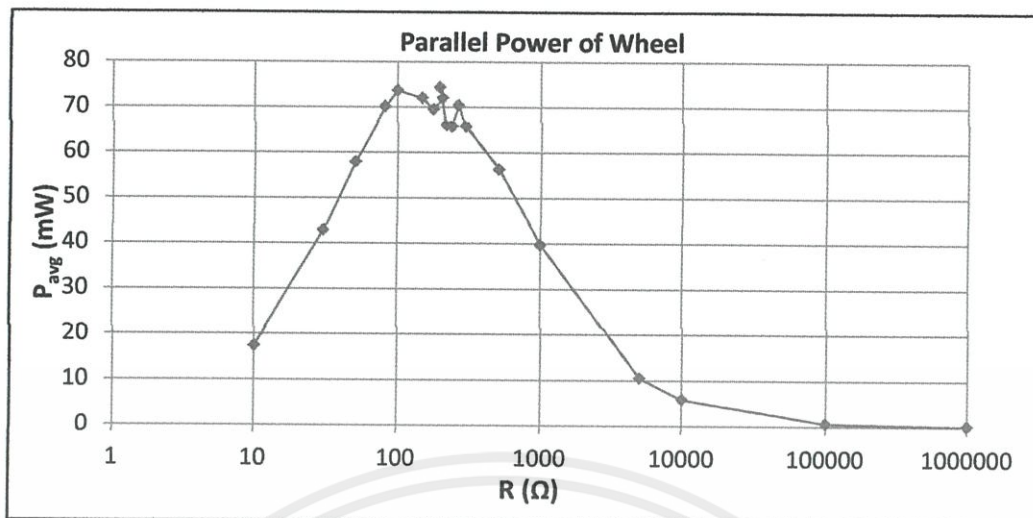
R (Ω)	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	I <sub>avg</sub> (mA)	V <sub>avg</sub> (V)	
10	41.19	0.42236	17.3970084
30	38.398	1.1148	42.8060904
50	34.788	1.6644	57.9011472
82	29.698	2.3622	70.1526156
100	27.518	2.6776	73.6821968

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของการต่อลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบขนานผ่านวงจรเรียงกระแส  
(ต่อ)

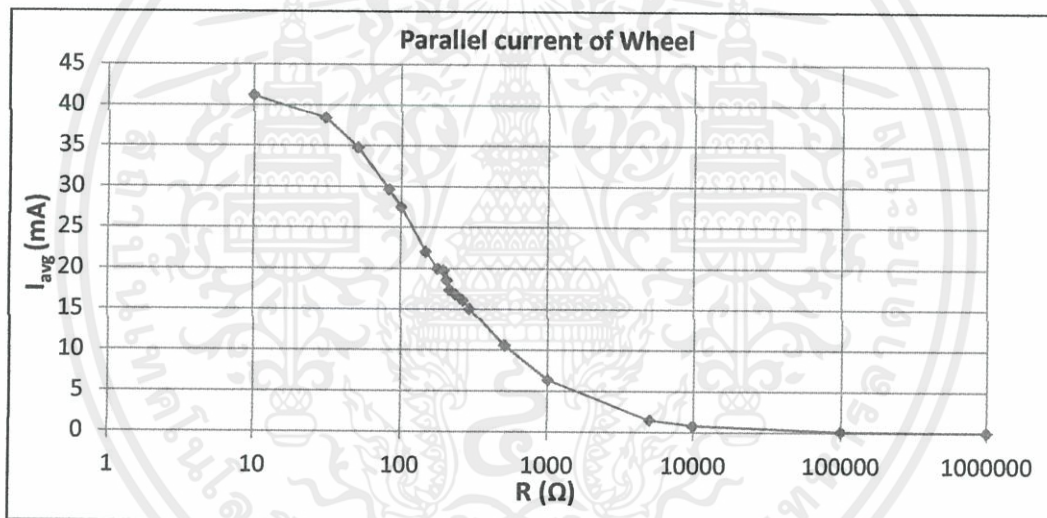
R ( $\Omega$ )	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	I <sub>avg</sub> (mA)	V <sub>avg</sub> (V)	
150	22.02	3.2706	72.018612
180	19.984	3.478	69.504352
209	18.566	3.8804	72.04547445
200	19.722	3.7746	74.4426612
220	17.386	3.7986	66.0424596
240	16.832	3.902	65.678464
270	16.124	4.3682	70.4328568
300	15.068	4.3654	65.7778472
510	10.578	5.3196	56.2707288
1000	6.3914	6.2106	39.69442884
5000	1.478	7.1058	10.5023724
10000	0.784	7.4338	5.8280992
100000	0.084	7.8106	0.6560904
No Load	0.00960462	9.60462	0.092248725

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ค่าความต้านทาน 200 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุดมีค่าประมาณ 74.44 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.8 ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 19.72 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.9 และค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3.77 โวลต์ ดังรูปที่ 4.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

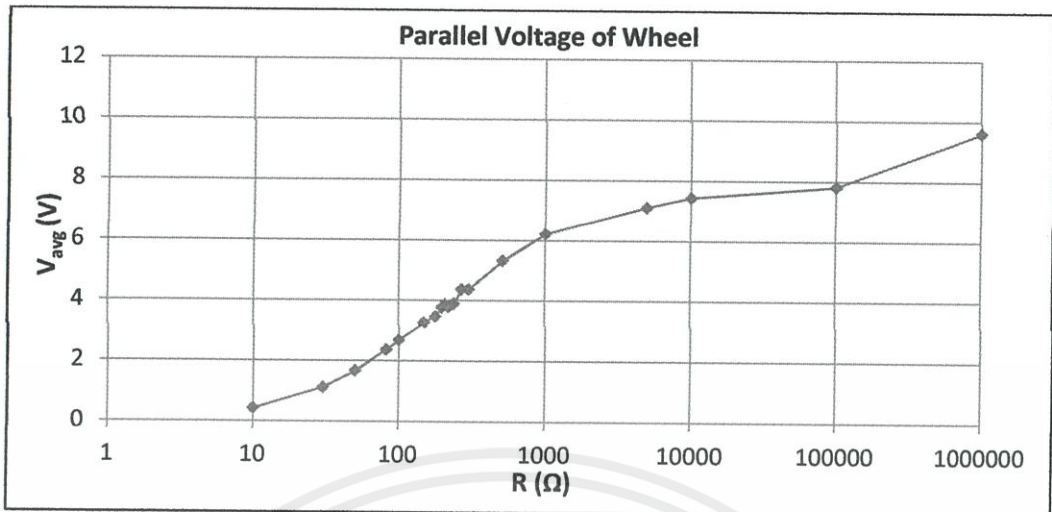


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

จากผลการทดลองที่ได้เราจะเห็นว่าเมื่อเราใช้โหลดที่ต่ำกว่า 300 โอห์ม หรือใช้กระแสที่มากกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ การต่อล้อแบบขนานจะให้พลังงานที่ดีกว่า แต่ถ้าเราใช้กับโหลดที่มากกว่า 300 โอห์ม หรือใช้กระแสที่ต่ำกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ การต่อแบบอนุกรมจะให้พลังงานที่ดีกว่า

#### 4.1.2 การทดลองหาพลังงานของล้อต้นแบบที่ 1 เข้าตัวเก็บประจุ

การทดลองนี้จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากการต่อหนึ่งล้อและสองล้อ โดยวิธีการทดลอง จะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผ่านวงจรรีจิงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ ซึ่งจะทำให้การเข็นจนพลังงานที่ได้เริ่มเข้าช่วงสถานะคงที่ (Steady State) แล้วบันทึกเวลาพลังงานเข้าจุดเสถียรจำนวน 5 ครั้ง แล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปหาพลังงานต่อวินาทีเพื่อที่จะเปรียบเทียบการต่ออนุกรมกับการต่อขนาน

##### 4.1.2.1 การทดลองล้อต้นแบบที่ 1 จำนวน 1 ล้อ เปรียบเทียบกับการต่อล้อต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อ ผ่านวงจรรีจิงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

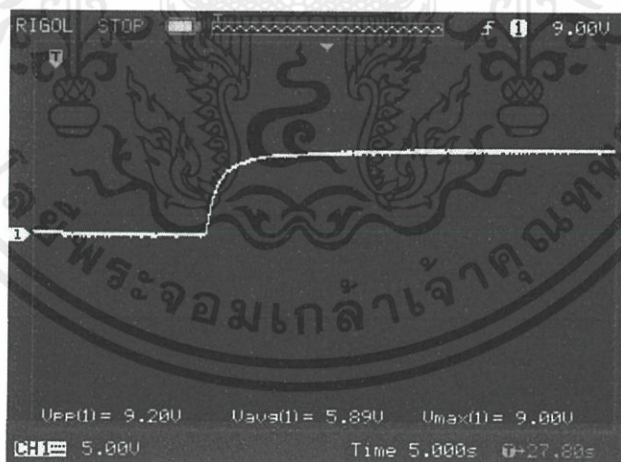
ผลการทดลองนี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ 1 ล้อ เปรียบเทียบกับการเข็นล้อ 2 ล้อ โดยมีการผ่านวงจรรีจิงกระแสและต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 2200 ไมโครฟารัด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### ตารางที่ 4.4 การทดลองลัดต้นแบบที่ 1 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

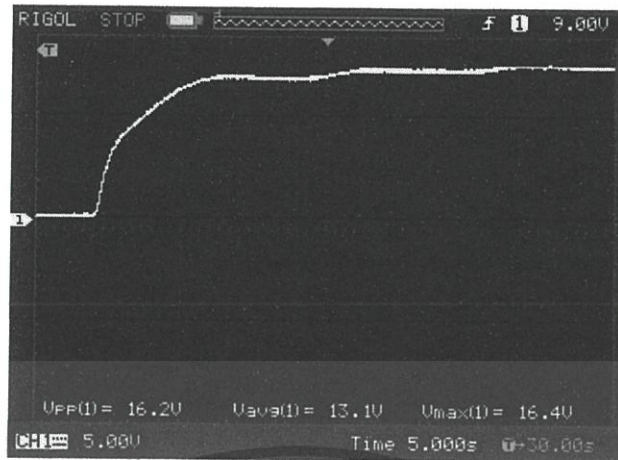
	Volt (v)	Time (s)	Energy (mJ)	Energy (mJ/s)
การทดลองลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 1 ลัด ผ่าน วงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	27.2	9.06	90.42	5.02
การทดลองลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลัด ต่ออนุกรม ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	47.5	15.83	275.76	9.19
การทดลองลัดแบบที่ 1 จำนวน 2 ลัด ต่อขนาน ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	26.6	8.87	86.48	7.86

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 1 ลัด จะให้กระแสที่ 27.2 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 9.06 วินาทีและให้พลังงานต่อวินาทีที่ 5.02 จูลต่อวินาที ดังรูปที่ 4.11 และการเซ็นลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลัด ต่อแบบอนุกรมจะให้กระแสที่ 47.5 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 15.833 วินาที และให้พลังงานต่อวินาทีที่ 9.192 จูลต่อวินาที ดังรูปที่ 4.12 และการเซ็นลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลัดต่อแบบขนานจะให้กระแสที่ 26.6 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 8.86 วินาที และให้พลังงานต่อวินาทีที่ 7.86 จูลต่อวินาที ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลาเมื่อต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 4.13 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลาเมื่อต่อแบบขนาน

จากผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าการต่อแบบขนานจะได้ผลดีเมื่อมีการใช้กระแสที่มากกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ เมื่อดูจากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 เปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าความชันของกราฟอนุกรมตั้งแต่เริ่มจะมีค่าความชันมากกว่า การต่อแบบขนานหมายความว่า กระแสที่ตัวเก็บประจุชาร์จใช้กระแสน้อยกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ จึงทำให้การต่อแบบอนุกรมให้พลังงานต่อวินาทีที่มากกว่าสำหรับล้อยต้นแบบที่ 1

## 4.2 การทดลองล้อยต้นแบบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารการทดลองล้อยต้นแบบที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลกับล้อยต้นแบบที่ 1 เนื่องจากรีเลย์ที่นำมาใช้ไม่ผ่านการทดสอบเนื่องจากล้อยต้นแบบที่ 2 มีการเปลี่ยนแกนกลางของขดลวดตัวนำโดยอ้างอิงจากทฤษฎีค่าความซึมซาบทางสนามแม่เหล็ก โดยที่ชนิดของแกนกลางของขดลวดตัวนำจะมีผลการเหนี่ยวนำต่อการเกิด

กระแสไฟฟ้ามากน้อยเพียงใด โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

#### การทดลองล้อต้นแบบที่ 2

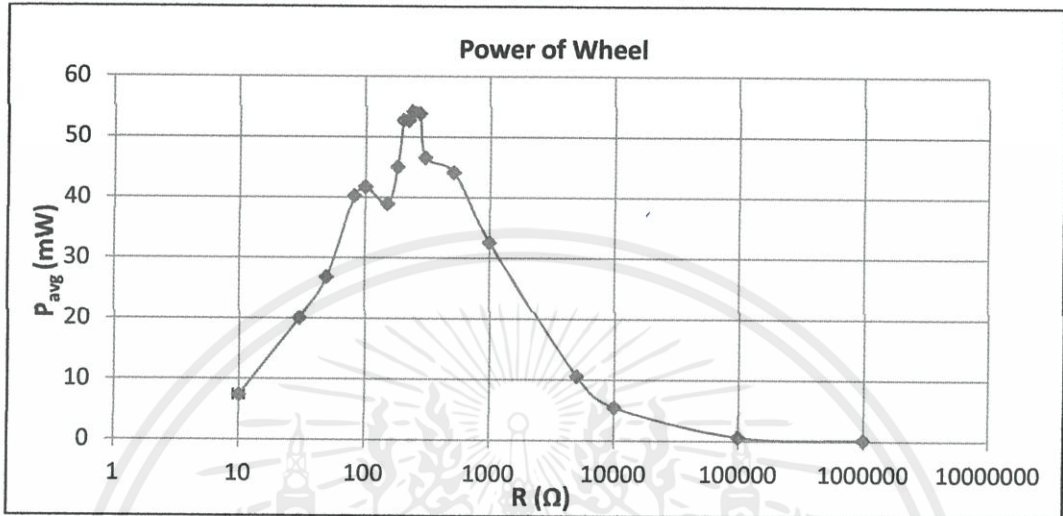
ผลการทดลองในส่วนนี้เพื่อที่จะเปรียบเทียบข้อมูลกับล้อต้นแบบที่ 1 ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของล้อต้นแบบที่ 2 ผ่านวงจรเรียงกระแส

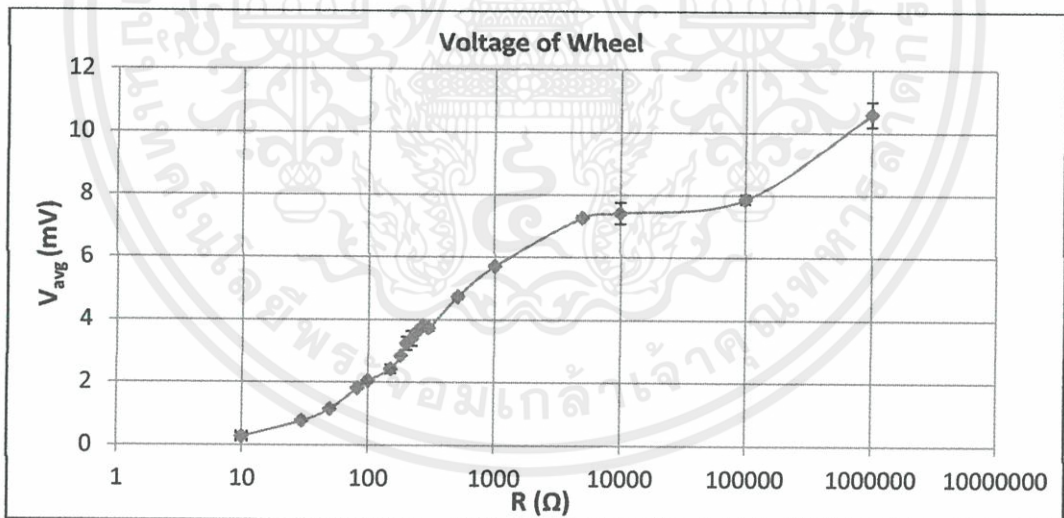
R (Ω)	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	I <sub>avg</sub> (mA)	V <sub>avg</sub> (V)	
10	27.278	0.27278	7.441
30	25.84266667	0.77528	20.035
50	23.16	1.158	26.819
82	22.15853659	1.817	40.262
100	20.434	2.0434	41.755
150	16.11733333	2.4176	38.965
180	15.82	2.8476	45.049
200	16.237	3.2474	52.728
220	15.48	3.4056	52.719
240	15.02833333	3.6068	54.204
270	14.11407407	3.8108	53.786
300	12.46333333	3.739	46.6
510	9.299215686	4.7426	44.102
1000	5.7092	5.7092	32.595
5000	1.4554	7.277	10.591
10000	0.74244	7.4244	5.512
100000	0.078686	7.8686	0.619
No Load	0.0105896	10.5896	0.112

เอกสารนี้เป็นเอกสารสำหรับเพื่อการศึกษา ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ค่าความต้านทาน 240 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 54.204 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.14 ค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3.6068 โวลต์ ดังรูปที่ 4.15 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 15.028 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.16

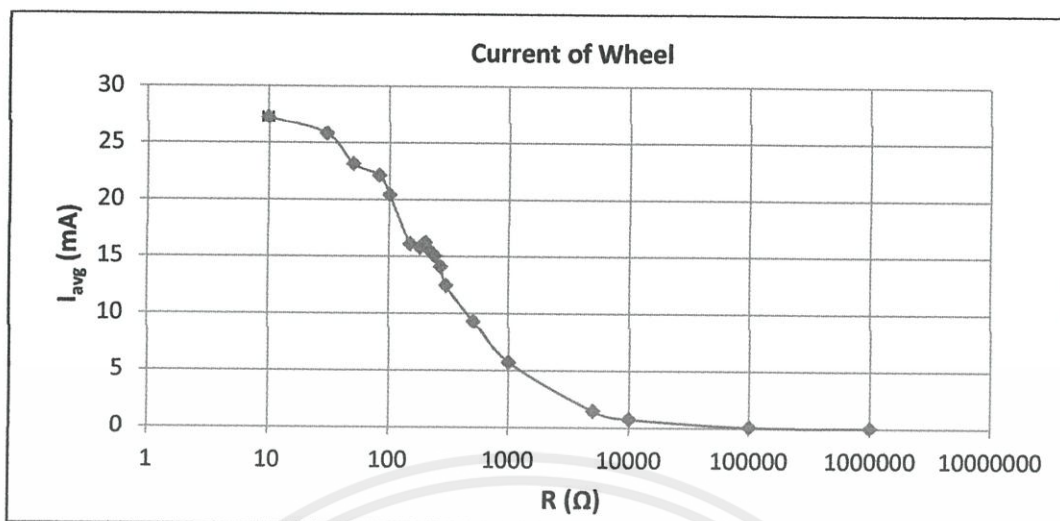


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

### 4.3 การทดลองล้อต้นแบบที่ 3

เนื่องจากล้อต้นแบบที่ 1 และล้อต้นแบบที่ 2 ยังให้พลังงานที่น้อยอยู่ ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการทดลองเปลี่ยนรูปแบบและขนาดรูปทรงของแม่เหล็กให้มีรูปร่างแบบเดียวกับขดลวด เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในการให้พลังงานระหว่างรูปทรงแม่เหล็กที่มีรูปแบบที่ต่างกัน โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

#### การทดลองล้อต้นแบบที่ 3

ผลการทดลองในส่วนนี้จะเปรียบเทียบข้อมูลกับล้อต้นแบบที่ 1 ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด เนื่องจากการเปลี่ยนรูปทรงขนาดแม่เหล็กให้มีรูปร่างเดียวกันกับขดลวด และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของล้อต้นแบบที่ 3 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

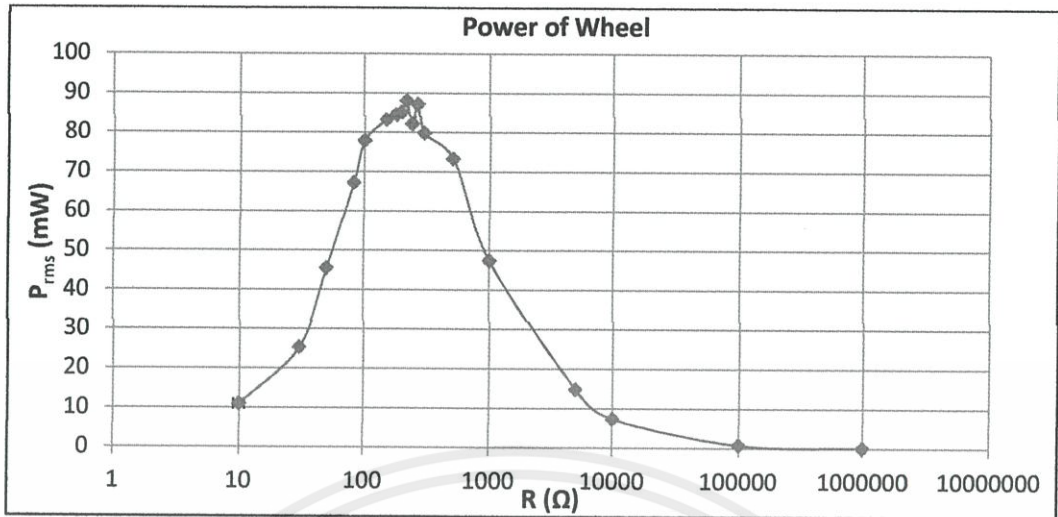
R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		I <sub>rms</sub> (mA)	P = I*V (mW)
	V <sub>p-p</sub> (V)	V <sub>rms</sub> (V)		
10	0.904	0.331333	33.133	10.99666667
30	2.116667	0.872	29.067	25.35628889
50	3.92	1.506667	30.133	45.50933333
82	6.053333	2.346667	28.618	67.15853659

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของลัดต้นแบบที่ 3 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส (ต่อ)

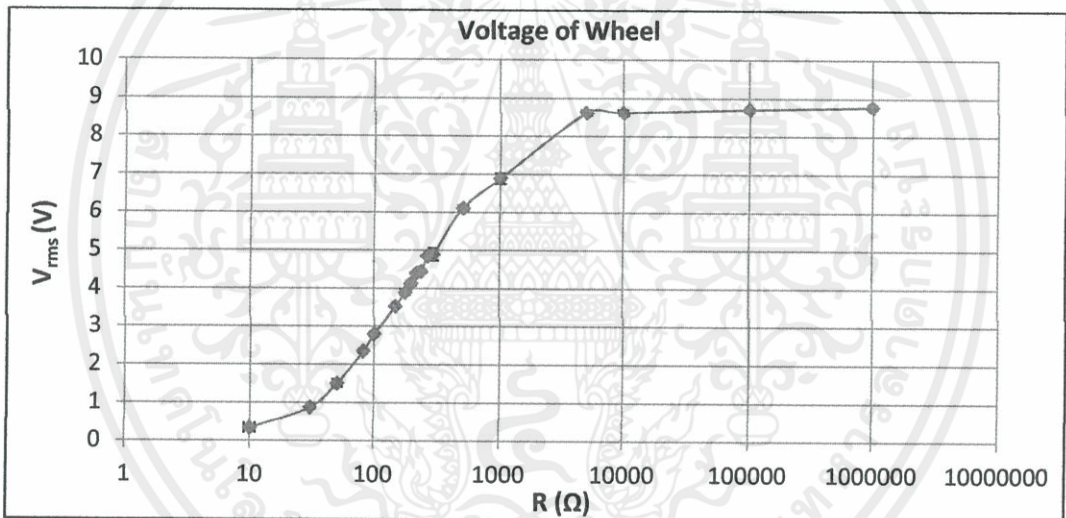
R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}$ (mA)	P = I*V (mW)
	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (V)		
100	7.266667	2.79	27.9	77.84566667
150	8.993333	3.533333	23.556	83.236
180	10.06667	3.9	21.667	84.51444444
200	10.53333	4.126667	20.633	85.15566667
220	11.4	4.403333	20.015	88.13409091
240	11.56667	4.44	18.5	82.14583333
270	12.33333	4.85	17.963	87.12209877
300	12.73333	4.89	16.3	79.75566667
510	15.56667	6.113333	11.987	73.28496732
1000	18	6.89	6.89	47.48196667
5000	22.06667	8.616667	1.723	14.84994
10000	22.2	8.616667	0.862	7.42497
100000	22.36	8.71	8.71E-02	0.758645667
No load	23	8.78	8.78E-03	0.077090067

ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจากลัดต้นแบบที่ 1 โดยที่ค่าความต้านทาน 220 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 88.134 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.17 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 11.4 โวลต์ ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.40 โวลต์ ดังรูปที่ 4.18 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 20.22 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

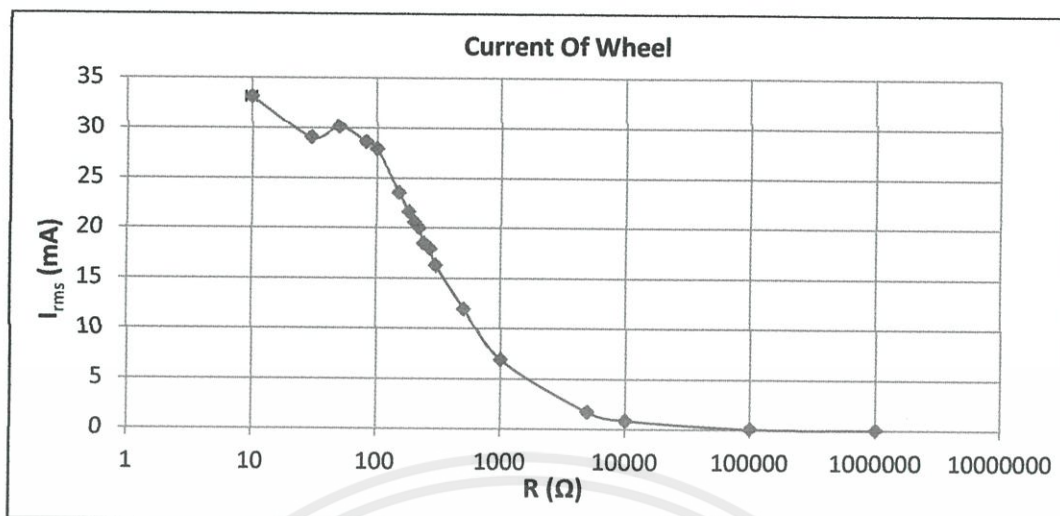


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

#### 4.4 การทดลองล้อต้นแบบที่ 4

เนื่องจากล้อต้นแบบที่ 3 ยังให้พลังงานไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นล้อต้นแบบที่ 4 จะเป็นการทดลองเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กจากล้อต้นแบบที่ 3 เพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีความมากขึ้น โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

##### การทดลองล้อต้นแบบที่ 4 (เพิ่มขึ้นจำนวนแม่เหล็ก)

ผลการทดลองในส่วนนี้เพื่อที่จะเปรียบเทียบล้อที่ต้นแบบที่ 3 ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด เนื่องจากมีการเพิ่มขึ้นจำนวนแม่เหล็กเข้าไปเพื่อเพิ่มค่าความเข้มชั้นของสนามแม่เหล็ก และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของล้อต้นแบบที่ 4 ไม่ผ่านวงจรรีจกกระแส

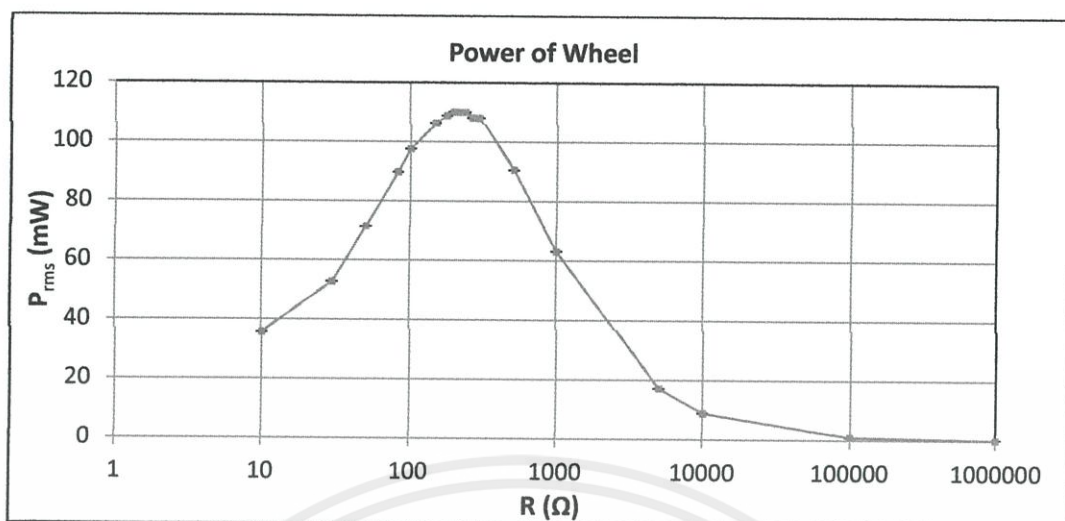
R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		I <sub>rms</sub> (mA)	P = I*V (mW)
	V <sub>p-p</sub> (V)	V <sub>rms</sub> (V)		
10	1.2666	0.5968	59.68	35.62070867
30	3.6033	1.258333	41.94444	52.78027778
50	5.1966	1.889667	37.79333	71.4179
82	7.7333	2.712333	33.07724	89.71695528
100	8.8033	3.124	31.24	97.59474667

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่ 4 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส (ต่อ)

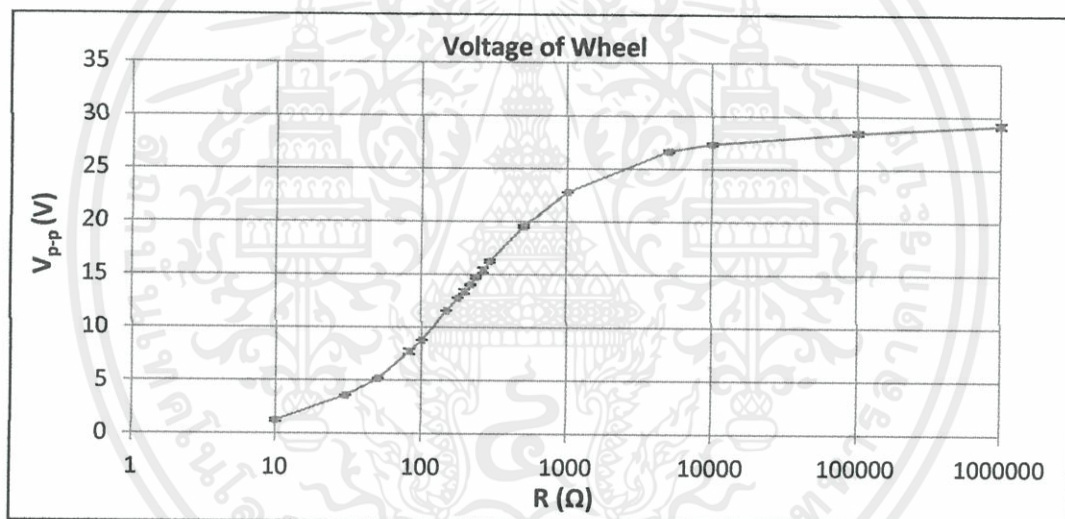
R ( $\Omega$ )	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}$ (mA)	P = I*V (mW)
	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (V)		
150	11.6033	3.995	26.63333	106.4015044
180	12.8033	4.426333	24.59074	108.8468907
200	13.4	4.693333	23.46667	110.1383033
220	14.0333	4.919667	22.36212	110.0153348
240	14.7333	5.138	21.40833	109.9985861
270	15.4	5.403333	20.01235	108.1364025
300	16.2666	5.693667	18.97889	108.06221
510	19.5333	6.796333	13.32614	90.5701732
1000	22.8	7.944	7.944	63.10780067
5000	26.6666	9.251	1.8502	17.11640353
10000	27.3333	9.418	0.9418	8.869891667
100000	28.4	9.632	0.09632	0.927754747
No Load	29.1333	9.718	0.009718	0.094442886

ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีค่าความแตกต่างจากล้อยันแบบที่ 1 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้น โดยที่ค่าความต้านทาน 200 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 110.14 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.20 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 13.4 โวลต์ ดังรูปที่ 4.21 ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.69 โวลต์ ดังรูปที่ 4.22 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 23.4 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

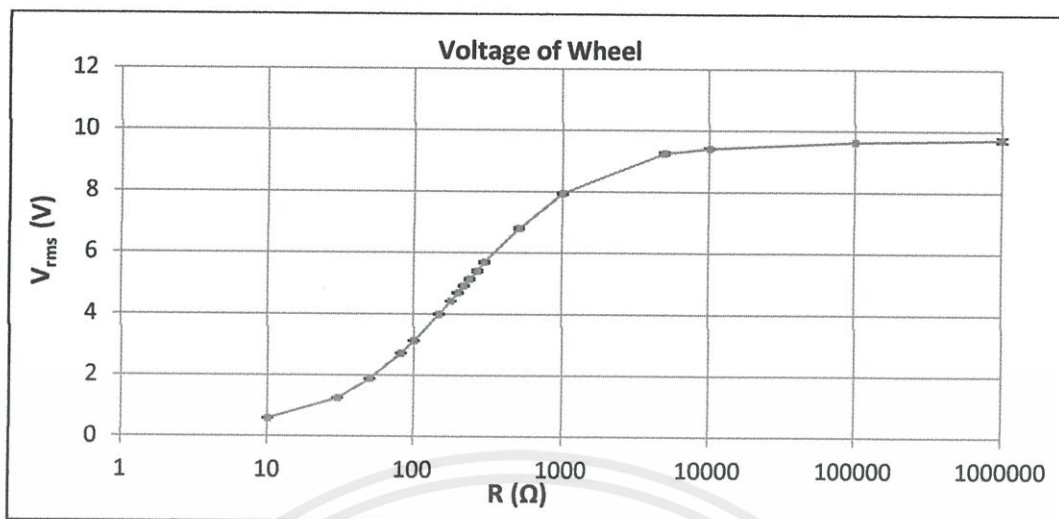


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

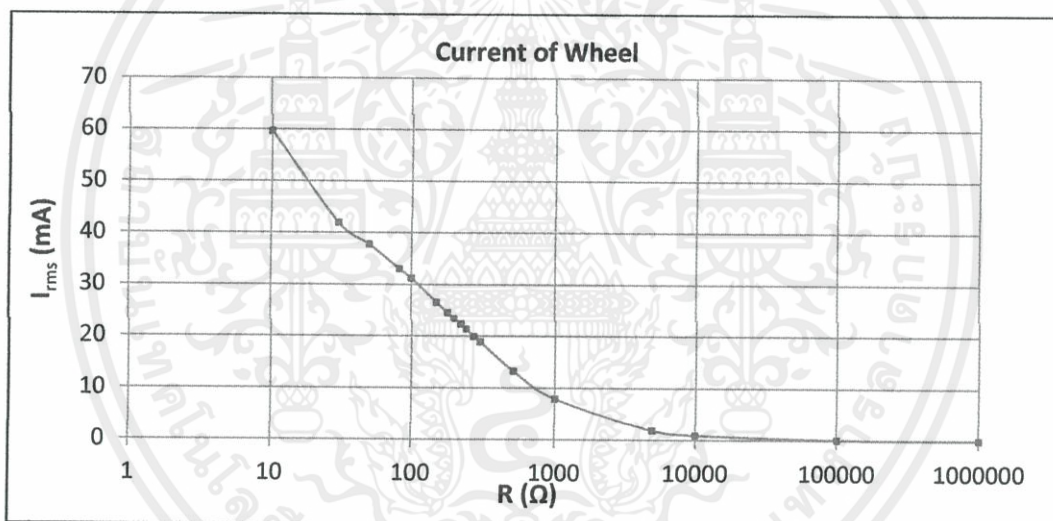


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

#### 4.4.1 การทดลองหาพลังงานของล้อต้นแบบที่ 4 เข้าตัวเก็บประจุ

การทดลองนี้จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบที่ 4 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ แล้วบันทึกเวลาพลังงานเข้าจุดเสถียรจำนวน 5 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปหาพลังงานต่อวินาที

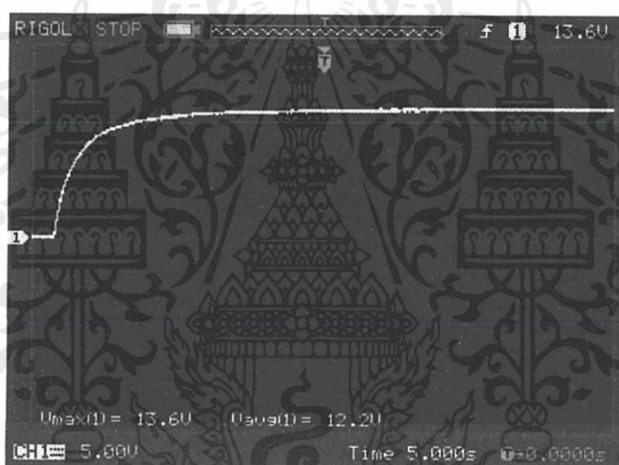
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1.1 การทดลองล้อยันแบบที่ 4 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ ผลการทดลองนี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ 1 ล้อโดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแส และต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 10000 ไมโครฟารัด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การทดลองล้อยันแบบที่ 4 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

Volt (v)	Time (s)	Energy (mJ)	Energy (mJ/s)
13.6	18	924.8	51.37

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ 1 ล้อจะให้กระแสที่ 13.6 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 18 วินาที และให้พลังงานต่อวินาทีที่ 51.37 จูลต่อวินาที ดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา

#### 4.5 การทดลองล้อยันแบบที่ 5

จากแนวคิดล้อยันแบบที่ 2 และล้อยันแบบที่ 4 ทำให้ทราบว่าจำนวนชั้นของแม่เหล็กและขนาดของขดลวดทองแดงมีผลต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบล้อยันกำเนิดพลังงานใหม่โดยเพิ่มขนาดความใหญ่ของล้อยันเพื่อที่จะสามารถเพิ่มชั้นจำนวนของแม่เหล็กได้มากขึ้น และสามารถเพิ่มความยาวของลวดหนึ่งขดได้มาก ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการทดลองล้อยันแบบที่ 5 จากการเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้น และมีการเปลี่ยนขนาดความยาวของขดลวด โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อยันให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

การทดลองล้อต้นแบบที่ 5 (แม่เหล็กจำนวน 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 90 มิลลิเมตร)

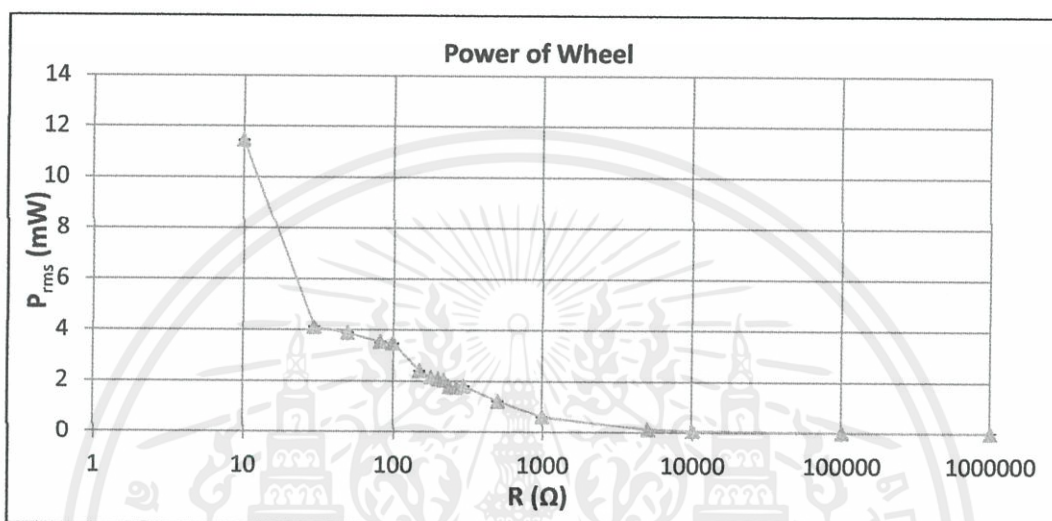
ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองล้อที่ได้มีการออกแบบใหม่ โดยมีการเพิ่มขึ้นจำนวนแม่เหล็กเข้าไปและเปลี่ยนขนาดความยาวของขดลวดตัวนำ และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองของล้อต้นแบบที่ 5 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 90 มิลลิเมตร) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

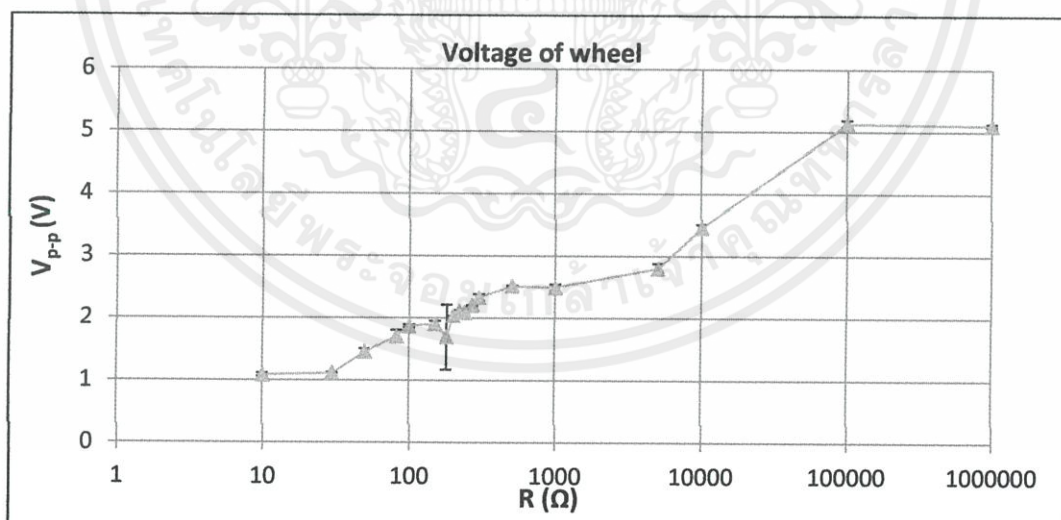
R ( $\Omega$ )	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}$ (mA)	P = I*V (mW)
	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (V)		
10	1.0833	0.3383	33.83333	11.4491
30	1.1166	0.3507	11.69111	4.100467111
50	1.4533	0.4407	8.815333	3.885822733
82	1.7066	0.5380	6.561789	3.534757317
100	1.8666	0.5892	5.892333	3.472043367
150	1.9066	0.5998	3.998689	2.398877605
180	1.6933	0.6243	3.468333	2.165359648
200	2.0366	0.6454	3.227167	2.082946683
220	2.1066	0.6686	3.039091	2.032712636
240	2.0933	0.6541	2.725417	1.783052625
270	2.2033	0.6891	2.552469	1.759079617
300	2.3333	0.7360	2.453556	1.806027356
510	2.51666	0.78996	1.548954	1.223865797
1000	2.49333	0.78923	0.789233	0.623089163
5000	2.8	0.79706	0.159413	0.127064207
10000	3.45333	0.8435	0.084353	0.071155153
100000	5.13333	0.9260	0.009261	0.008646404
No Load	5.10666	0.9276	0.000928	0.000863641

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
จากผลการทดลองที่ได้มีค่าความต่างแตกต่างจากล้อต้นแบบที่ 1 และล้อต้นแบบที่ 2 ซึ่งผลที่ได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คิดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกกรณีการใช้งานไปใช้  
ไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากผลที่ได้มีค่าพลังงานน้อยกว่าล้อต้นแบบเดิม ทั้งนี้ทั้งนั้นก็มีผลมาจาก

ระยะความยาวของขดลวดมีความยาวมากเกินไป ส่งผลให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่ส่งแรงดูดกัน ส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่าประมาณ 11.4 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.25 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 1.11 โวลต์ ดังรูปที่ 4.26 ค่าแรงดันรากลของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.35 โวลต์ ดังรูปที่ 4.27 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 11.6 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.28

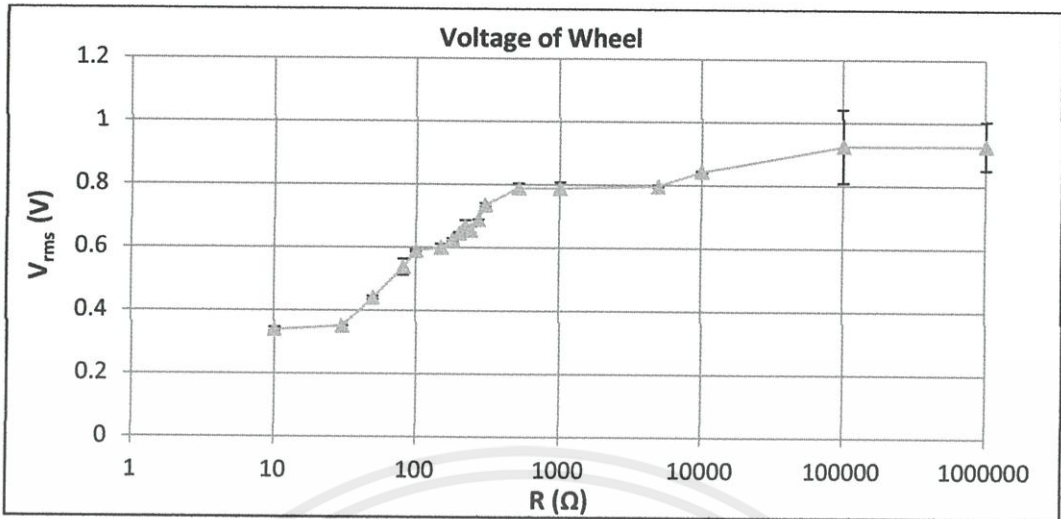


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

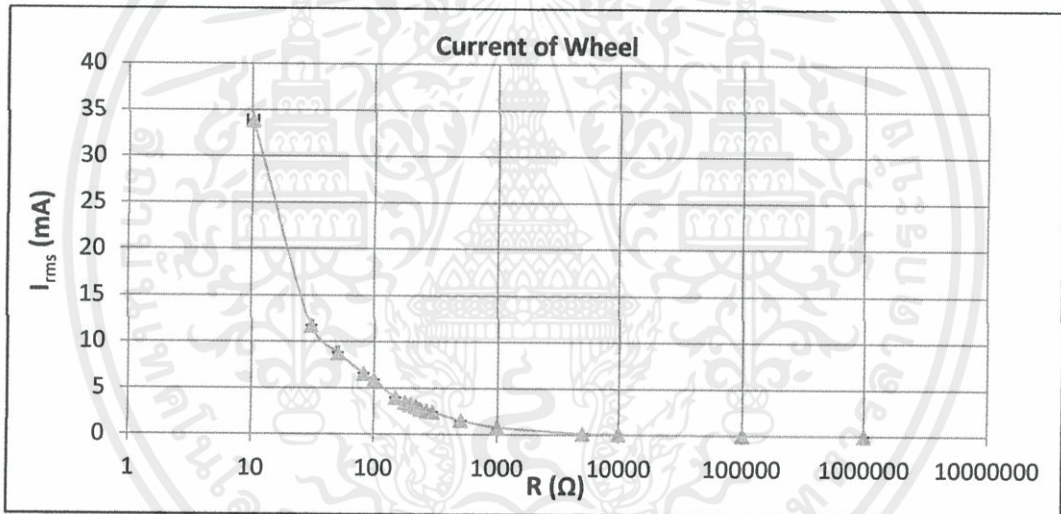


รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

#### 4.6 การทดลองล้อต้นแบบที่ 6

จากผลการทดลองล้อต้นแบบที่ 5 ทำให้ทราบว่า ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กมีมากเกินไปจนทำให้เส้นแรงแม่เหล็กส่งผ่านถึงกันได้น้อยจึงทำให้พลังงานที่ได้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงมีการออกแบบล้อต้นแบบที่ 6 ขึ้นมาโดยการลดความยาวของขดลวดเพื่อที่จะลดระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับความเร็วปกติ (2.22 เอกสารนี้ ก็ิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองลัดต้นแบบที่ 6 (แม่เหล็กจำนวน 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 45 มิลลิเมตร)

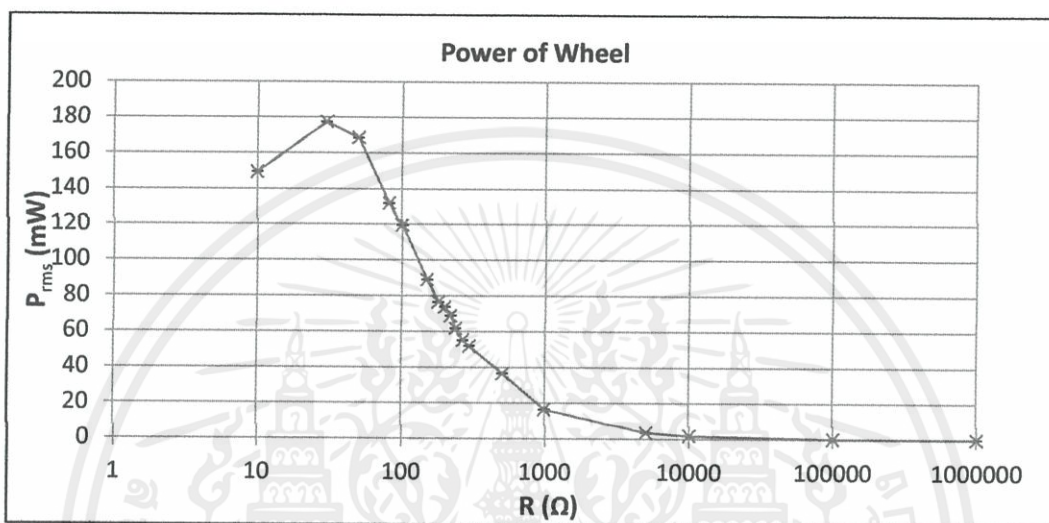
ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองลัดที่ได้มีการออกแบบใหม่ และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองของลัดต้นแบบที่ 5 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 45 มิลลิเมตร) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

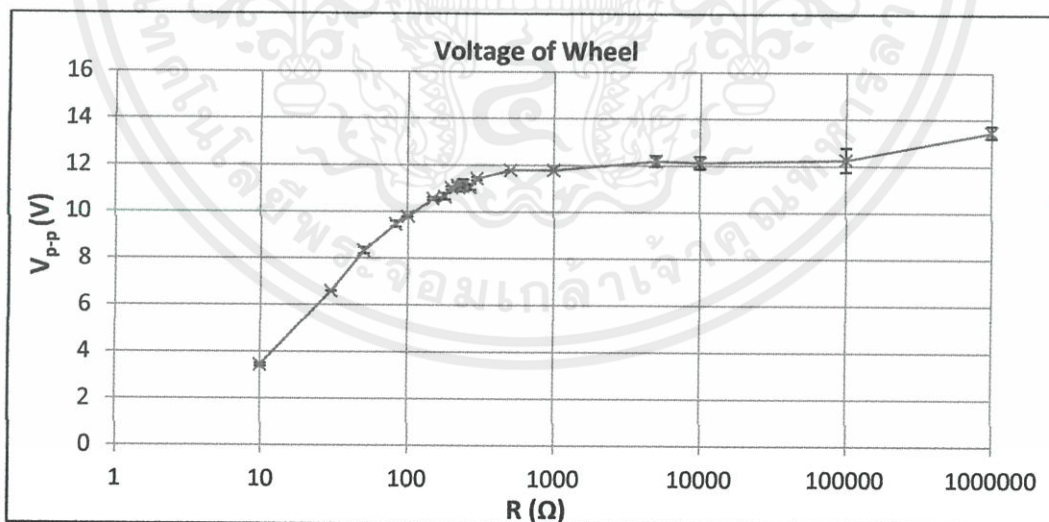
R ( $\Omega$ )	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}$ (mA)	P = I*V (mW)
	$V_{p-p}$ (V)	$V_{rms}$ (V)		
10	3.4333	1.222	122.2	149.329
30	6.6	2.30666	76.88889	177.3846
50	8.3333	2.903	58.06	168.5527533
82	9.4666	3.28833	40.10163	131.924687
100	9.7966	3.45733	34.57333	119.53398
150	10.566	3.654	24.36	89.01291111
180	10.666	3.71266	20.62593	76.58053704
200	11.0333	3.84433	19.22167	73.89450167
220	11.1333	3.89633	17.71061	69.00682879
240	11.1333	3.84666	16.02778	61.654525
270	11.0666	3.857	14.28519	55.1006358
300	11.4333	3.94766	13.15889	51.94849889
510	11.8	4.30666	8.444444	36.6171281
1000	11.8	4.065666	4.065667	16.53126167
5000	12.2	4.199666	0.839933	3.528418333
10000	12.1333	4.266333	0.426633	1.8201603
100000	12.2666	4.30333	0.043033	0.185222167
No Load	13.4666	4.364666	0.004365	0.019050622

จากผลการทดลองที่ได้มีค่าความต่างจากลัดต้นแบบที่ 5 ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎี โดยมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่าประมาณ 177.38 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.29 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 6.6 โวลต์ ดังรูปที่ 4.30 ค่าแรงดันรากของกำลัง

สองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 2.306 โวลต์ ดังรูปที่ 4.31 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 76.88 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.32 ซึ่งการข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ล้อต้นแบบที่ 6 สามารถให้กระแสไฟฟ้าได้สูงเพราะมีการเพิ่มขนาดหน้าตัดของขดลวด แต่เนื่องจากการลดขนาดของความยาวขดลวด เพื่อลดระยะห่างระหว่างแม่เหล็กจึงทำให้จำนวนรอบของขดลวดลดลงตามไปด้วย จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มามีค่าน้อย

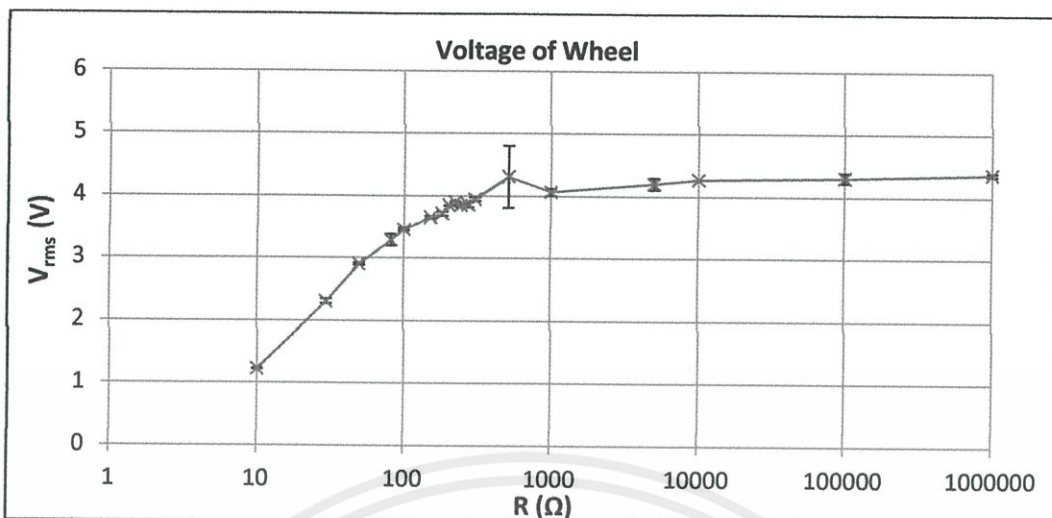


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

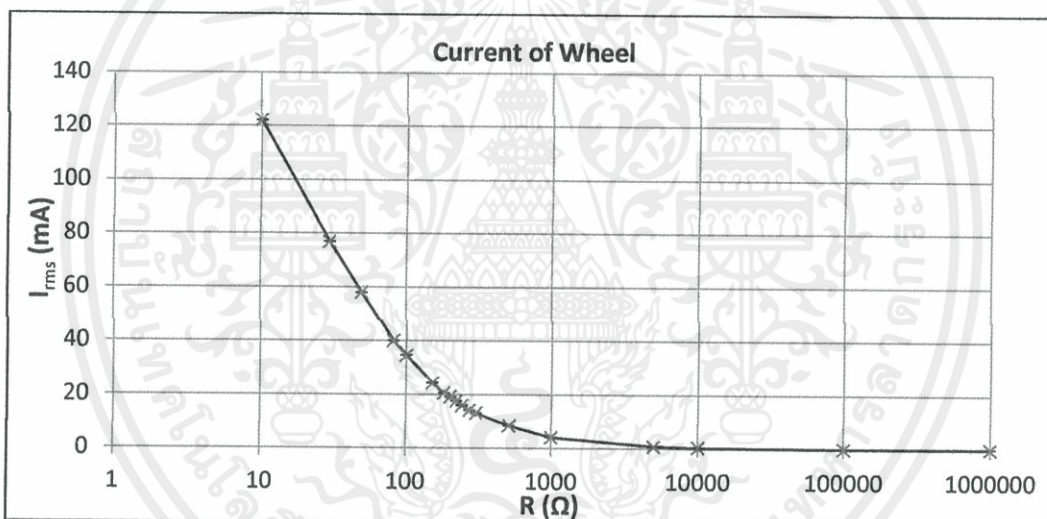


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

#### 4.6.1 การทดลองหาพลังงานของล้อต้นแบบที่ 6 เข้าตัวเก็บประจุ

การทดลองนี้จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบที่ 6 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ แล้วบันทึกเวลาพลังงานเข้าจุดเสถียรจำนวน 5 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปหาพลังงานต่อวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.1.1 การทดลองล้อยึดแบบที่ 6 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ ผลการทดลองนี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ 1 ล้อโดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแส และต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 10000 ไมโครฟารัด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การทดลองล้อยึดแบบที่ 6 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

Volt (v)	Time (s)	Energy (mJ)	Energy (mJ/s)
5.2	9	135.2	15.02

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ 1 ล้อจะให้กระแสที่ 5.2 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 9 วินาที และให้พลังงานต่อวินาทีที่ 15.02 จูลต่อวินาทีดังรูปที่ 4.33

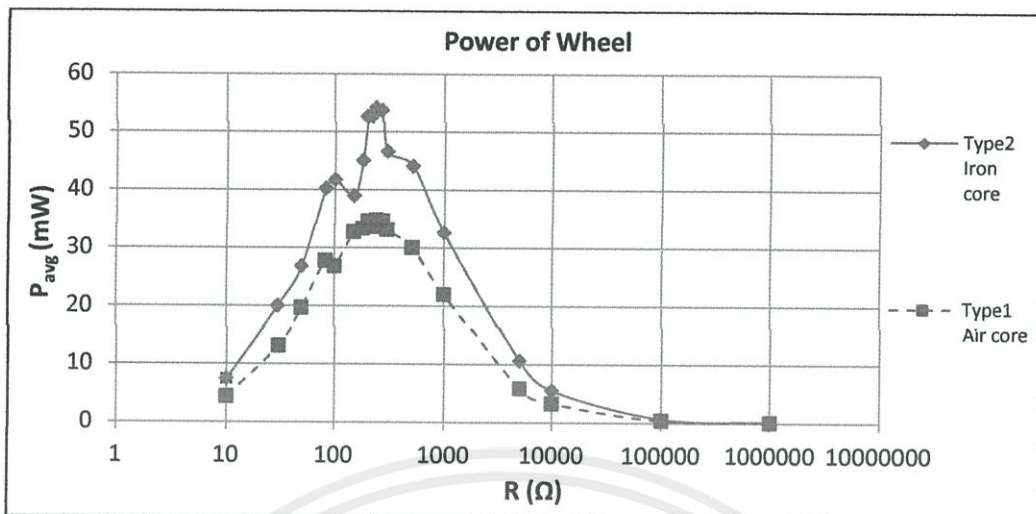


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา

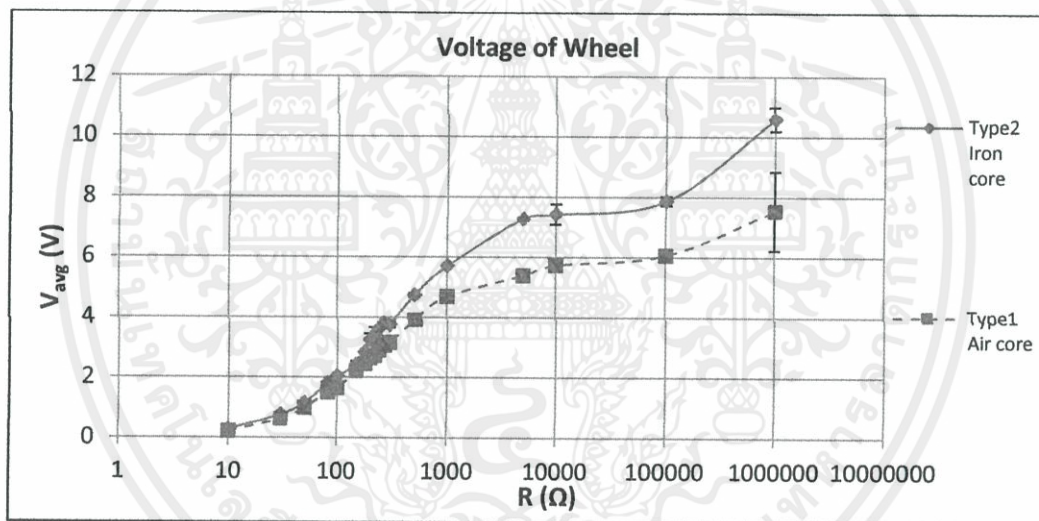
#### 4.7 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อยึดแบบรถเข็น

4.7.1 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อยึดแบบที่ 1 (แกนอากาศ) กับล้อยึดแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ)

เมื่อนำผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 1 (แกนอากาศ) กับล้อยึดแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ) มาเปรียบเทียบพลังงานที่ได้ พบว่าล้อยึดแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ) ได้พลังงานเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเปลี่ยนแกนกลางของขดลวดตัวนำจะเป็นการเพิ่มค่าความซับซ้อนทางแม่เหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดตัวนำได้ดีขึ้น โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าที่เปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.34 ค่าแรงดันเฉลี่ยเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.35 และค่ากระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 4.36

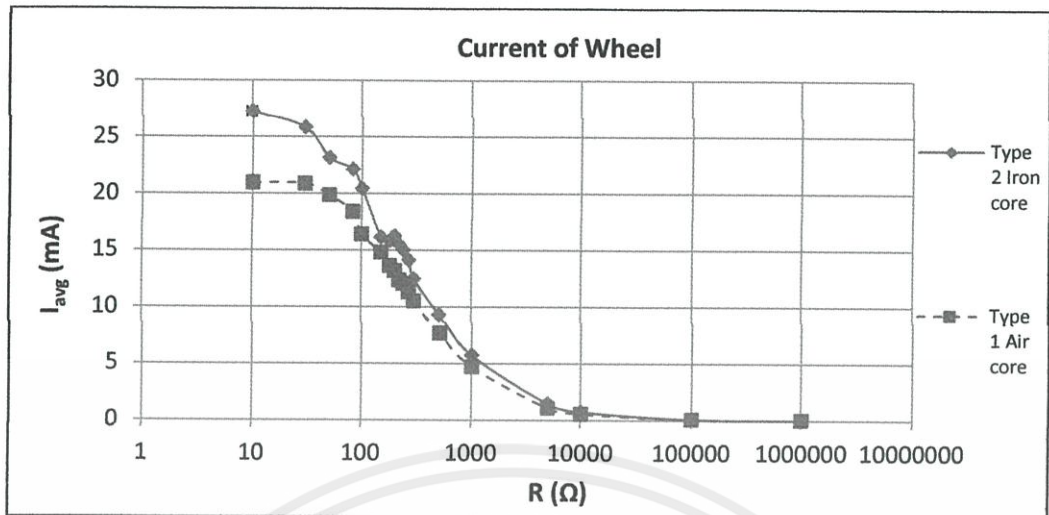


รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



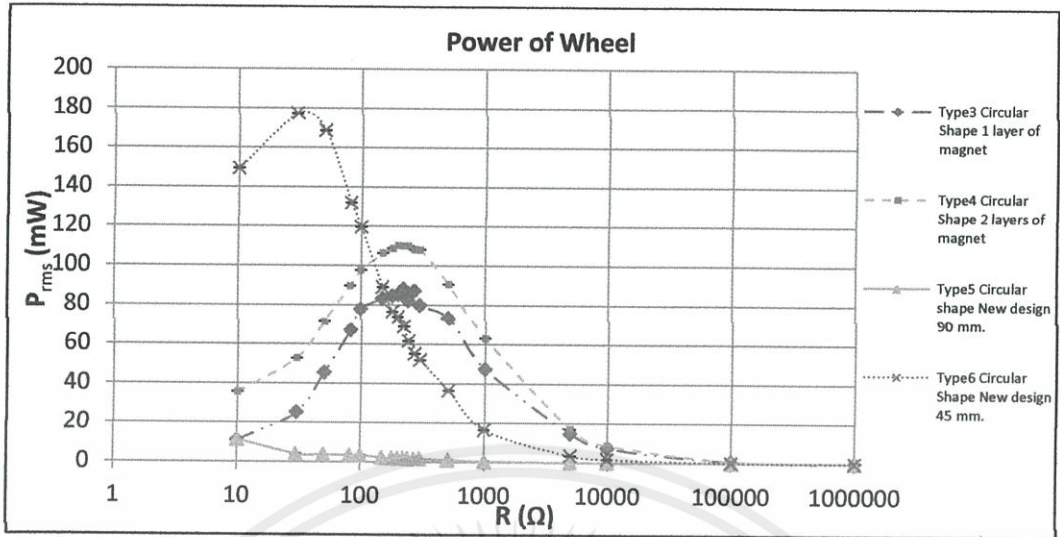
รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากข้อมูลเปรียบเทียบด้านบน รูปที่ 4.34 รูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.36 สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนชนิดของแกนกลางจากแกนอากาศเป็นแกนเหล็กหล่อ ทำให้ล้อสามารถผลิตพลังงานได้เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากต้องใช้แรงในการเข็นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะแกนกลางเหล็กหล่อจะส่งแรงดูดไปยังแม่เหล็กที่อยู่บนฝาครอบทั้งสองด้าน ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

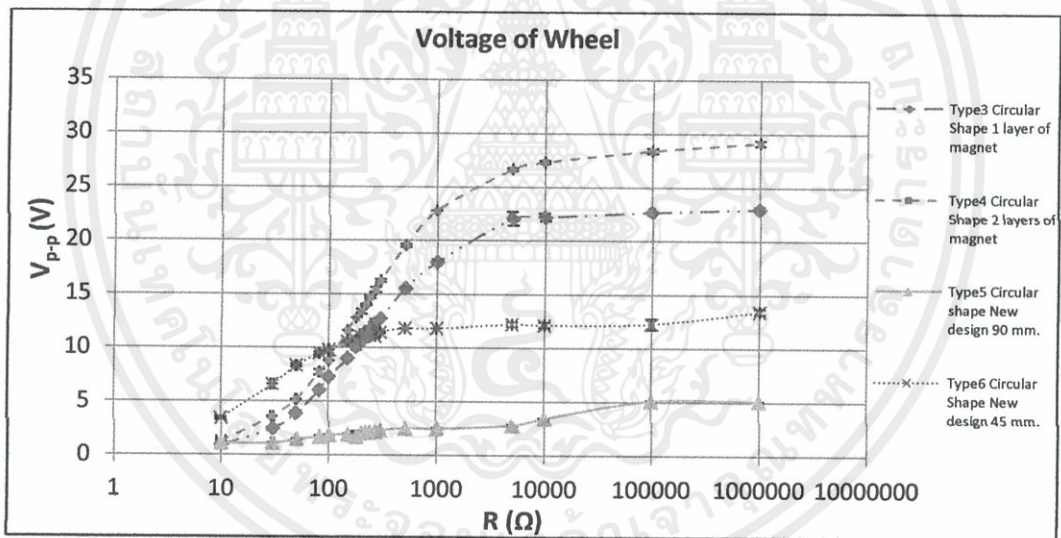
#### 4.7.2 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 6

หลังจากทดสอบล้อกำเนิดพลังงานต้นแบบทั้ง 4 แบบ (ล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 6) แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบข้อมูลกัน เพื่อที่จะตัดสินใจเลือกใช้ล้อในการนำไปประยุกต์ใช้งานในหัวข้อถัดไป โดยกราฟแสดงเปรียบเทียบแสดงค่ากำลังไฟฟ้าของล้อดังรูปที่ 4.37 ค่าเปรียบเทียบแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดของล้อดังรูปที่ 4.38 ค่าเปรียบเทียบแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยของล้อดังรูปที่ 4.39 และค่าเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าของล้อดังรูปที่ 4.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

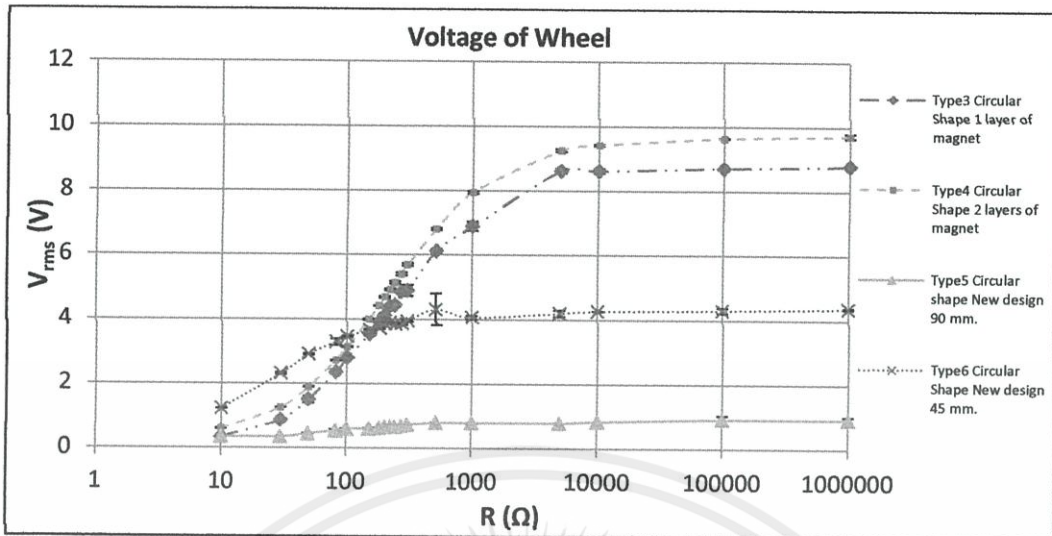


รูปที่ 4.37 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทานของล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 6

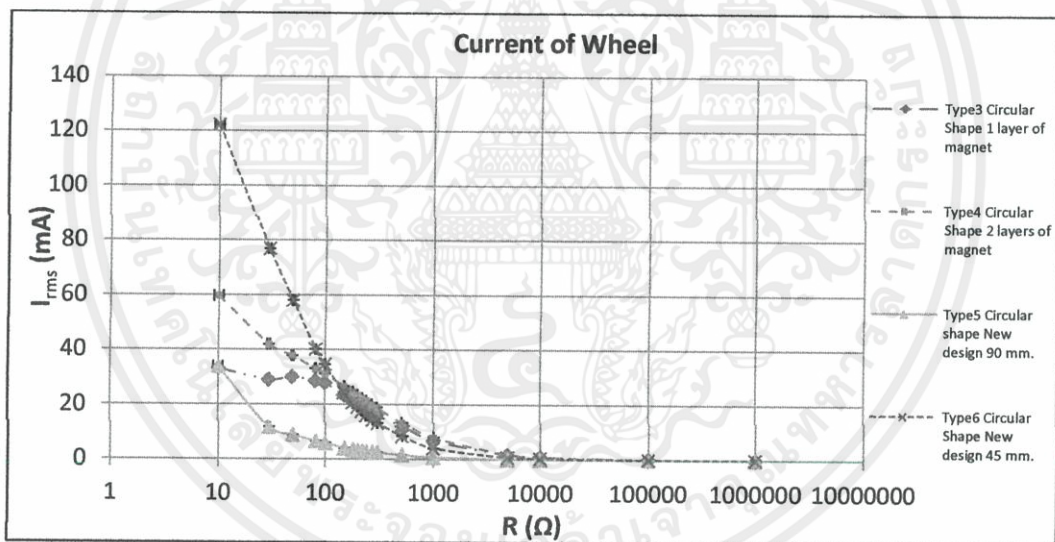


รูปที่ 4.38 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทานของล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทานของล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 6

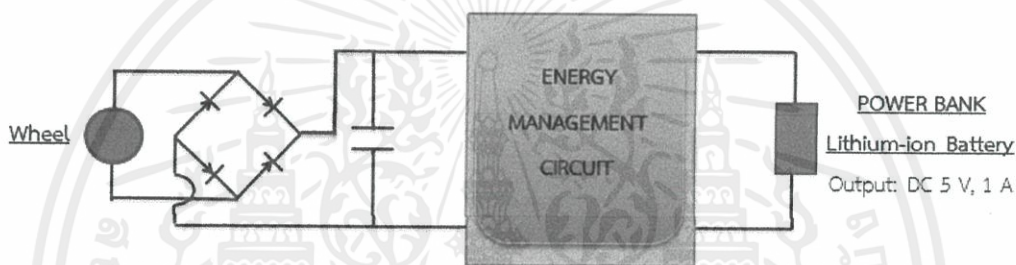


รูปที่ 4.40 กราฟเปรียบเทียบแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทานของล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 6

จากผลการเปรียบเทียบข้อมูลเห็นได้ว่าล้อต้นแบบที่ 6 ให้พลังงานมากที่สุด โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้ามากที่สุด แต่การที่จะเลือกใช้ล้อรูปแบบไหนนั้นก็ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่เราจะนำไปประยุกต์ใช้ โดยจะนำพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบที่เลือกนำเข้าไปใช้กับวงจรจัดการพลังงานแบบต่างๆ เพื่อที่จะนำพลังงานที่ได้นั้นไปประจุใส่ลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเธียมไอออน ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ

## 4.8 การประจุพลังงานจากล้อต้นแบบลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนผ่านวงจรจัดการพลังงาน

การทดลองในหัวข้อนี้ เป็นการนำพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบประจุลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบต่างๆ ดังรูปที่ 4.41 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับ การเข็นรถเข็นข้อปิ้งจำลองสถานการณ์จริง ซึ่งจะเลือกล้อต้นแบบที่มีพลังงานที่เหมาะสมที่สามารถประจุแบตเตอรี่ได้ โดยจากผลการทดลองเห็นว่าล้อต้นแบบที่ 6 ให้พลังงานมากที่สุด แต่เนื่องจากแรงดันที่ได้จากล้อต้นแบบที่ 6 มีค่าน้อยซึ่งไม่สามารถประจุเข้าไปยังแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นจึงเลือกล้อต้นแบบที่ 4 เนื่องจากมีแรงดันเพียงพอสำหรับการประจุเข้าแบตเตอรี่

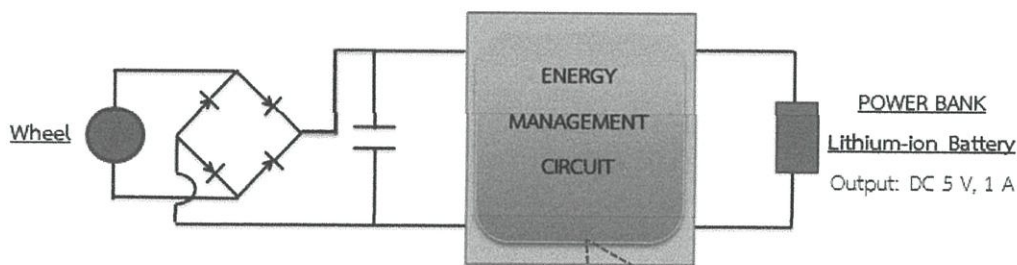


รูปที่ 4.41 วงจรการประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่จากล้อรถเข็นผ่านวงจรจัดการพลังงาน

### 4.8.1 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบชาร์จต่อเนื่อง

แหล่งกำเนิดพลังงานที่ออกจากล้อเป็นกระแสสลับ เมื่อผ่านวงจรบริดจ์แล้วกระแสไฟฟ้าสลับที่ได้จะกลายเป็นกระแสตรงมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุที่มีขนาด 4700  $\mu\text{F}$ , 6900  $\mu\text{F}$ , 10000  $\mu\text{F}$  เพื่อลดสัญญาณรบกวน จากนั้นกระแสที่ผ่านออกมาจากตัวเก็บประจุจะผ่านเข้าไปในส่วนวงจรจัดการพลังงาน ซึ่งวงจรจัดการพลังงานในส่วนนี้จะป้อนเป็นวงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยจะทำการดึงแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุแล้วทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อประจุเข้าแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 4.42 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับ การเข็นรถเข็นข้อปิ้งจำลองสถานการณ์จริงดังรูปที่ 4.43 จากนั้นทำการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ผ่านความต้านทาน 50 โอห์ม เปรียบเทียบผลเวลาที่ได้จากการปั่นล้อจากการใช้มอเตอร์ และการเข็นรถเข็นข้อปิ้งจากสถานการณ์จริงดังตารางที่ 4.12

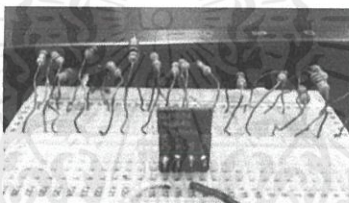
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



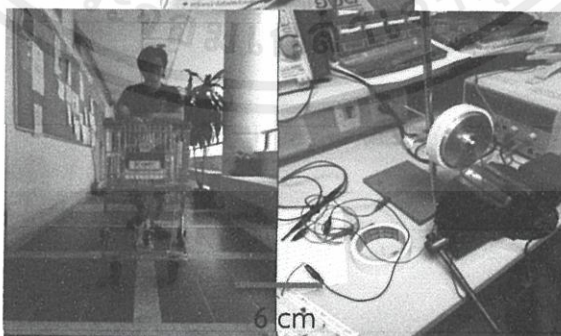
**STEP-DOWN VOLTAGE REGULATOR S7V8F5**

Input voltage: [output voltage + dropout voltage] to 42 V

Output voltage: Fix 5 V



รูปที่ 4.42 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จ  
ต่อเนื่อง



รูปที่ 4.43 การทดลองใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อ และการเข็นรถเข็นข้อบ่งชี้จากการใช้งานจริง ประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับเอาไว้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่เอามาเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาแต่อย่างใดถึงแม้ว่าเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของ การป้อนลอร์ดเซ็นด้วยมอเตอร์ กับ การเซ็นรถเซ็นข้อปึงจากการใช้งานจริง ที่ผ่าน วงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง

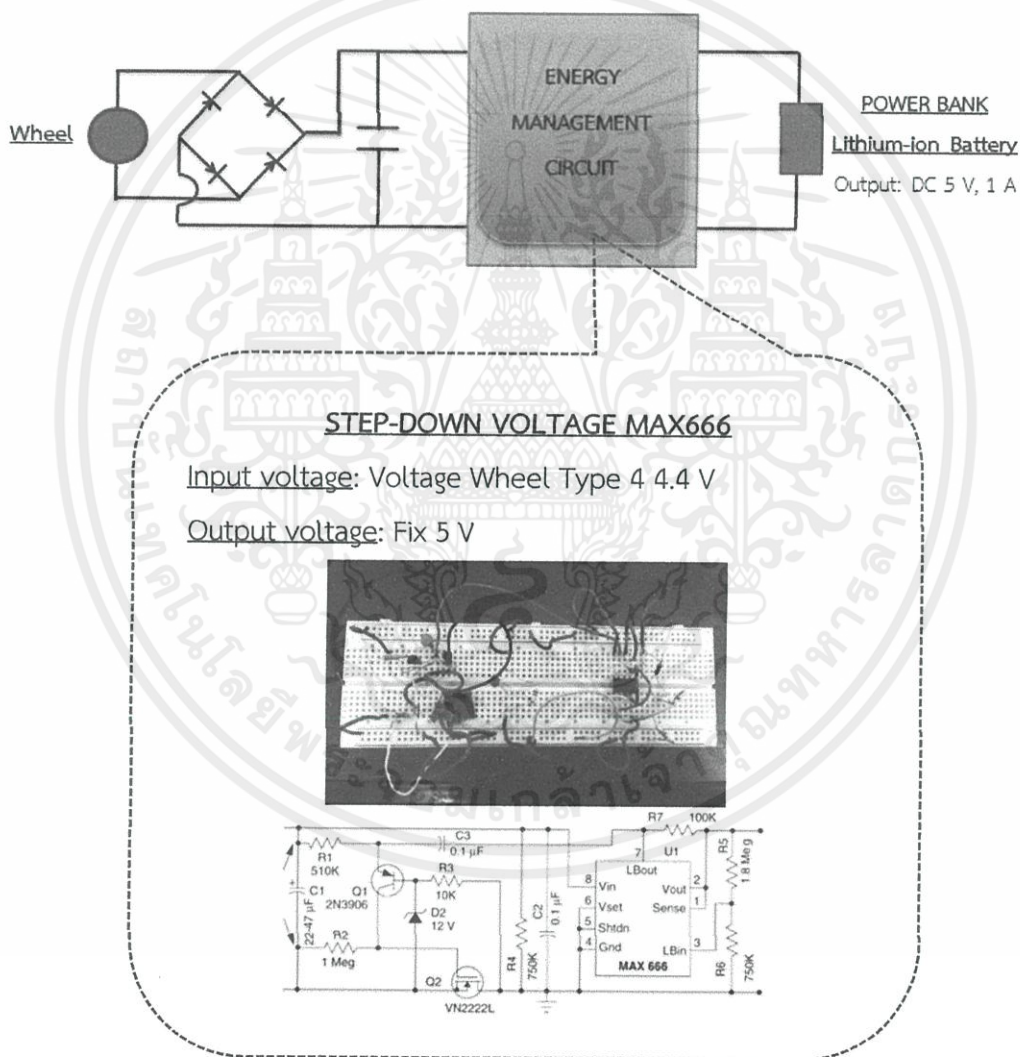
ขนาดตัวเก็บประจุ ( $\mu\text{F}$ )	การป้อนลอร์ดเซ็นลอร์ดแบบที่ 4 ด้วยมอเตอร์ ระยะเวลา 30 นาที				เวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ด้วยโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม (วินาที)
	แรงดันและกระแสก่อนเข้าวงจรจัดการพลังงาน		แรงดันและกระแสหลังจากวงจรจัดการพลังงาน ประจุเข้าแบตเตอรี่		
	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (mA)	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (mA)	
4700	4.4	18	3.81	18	131
6900	4.4	18	3.84	19	133
10000	4.4	18	3.83	19	132

ขนาดตัวเก็บประจุ ( $\mu\text{F}$ )	การเซ็นรถเซ็นลอร์ดแบบที่ 4 จากการใช้งานจริง ระยะเวลา 30 นาที				เวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ด้วยโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม (วินาที)
	แรงดันและกระแสก่อนเข้าวงจรจัดการพลังงาน		แรงดันและกระแสหลังจากวงจรจัดการพลังงาน ประจุเข้าแบตเตอรี่		
	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (mA)	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (mA)	
4700	4.4	18	3.85	19	140
6900	4.4	18	3.83	18	141
10000	4.4	18	3.87	20	139

#### 4.8.2 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานชาร์จแบบต่างๆ

แหล่งกำเนิดพลังงานที่ออกจากล้อเป็นกระแสสลับ เมื่อผ่านวงจรบริดจ์แล้วกระแสไฟฟ้าสลับที่ได้จะกลายเป็นกระแสตรงมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุที่มีขนาด 4700  $\mu\text{F}$ , 6900  $\mu\text{F}$ , 10000  $\mu\text{F}$  เมื่อตัวเก็บประจุสะสมแรงดันไฟฟ้าได้ถึงประมาณ 12 V แรงดันไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านตัวซีเนอร์ได้ทำให้ทรานซิสเตอร์ (2N3906) ทำงาน และเกิดแรงดันไฟฟ้ามาตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R2 ทำให้มอสเฟต (VN2222L) ทำงาน จากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เข้าไปที่ไอซี MAX666 จะมีค่า 12 V และถูกแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากโหลดให้เหลือ 5 V เพื่อนำไปประจุให้กับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน และเมื่อ

แรงดันไฟฟ้าที่ไหลเข้า MAX666 ลดลงเรื่อยๆ จนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R6 มีค่าต่ำกว่า 1.3 V จะทำให้ขา LBO ของ MAX666 ลัดลงกราวด์ ซึ่งจะทำให้มอสเฟต (VN2222L) หยุดทำงาน และรอชาร์ตใหม่จนกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 12 V อีกครั้ง ดังรูปที่ 4.44 โดยวิธีการทดลองนั้นจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับ การเข็นรถเข็นข้อปึงจำลองสถานการณ์จริงดังรูปที่ 4.43 จากนั้นทำการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ผ่านความต้านทาน 50 โอห์ม เปรียบเทียบผลเวลาที่ได้จากการปั่นล้อจากการใช้มอเตอร์ และการเข็นรถเข็นข้อปึงจากสถานการณ์จริงดังตารางที่ 4.13



รูปที่ 4.44 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของ การป้อนลอร์ดเซ็นด้วยมอเตอร์ กับ การเซ็นรถเซ็นข้อปึงจากการใช้งานจริง ที่ผ่าน วงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ

ขนาดตัวเก็บประจุ ( $\mu\text{F}$ )	การป้อนลอร์ดเซ็นลอร์ดแบบที่ 4 ระยะเวลา 30 นาที					
	แรงดันและกระแสที่ วงจรจัดการพลังงาน		แรงดันและกระแสที่ ออกจากวงจรจัดการพลังงาน ประจุเข้า แบตเตอรี่		เวลาการคายประจุจาก แบตเตอรี่ด้วยโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม	
	$V_{in}$ (V) ค่าแรงดันที่ เซ็นเซอร์	$I_{in}$ (mA)	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (mA)	การป้อน ลอร์ดด้วยมอเตอร์ (วินาที)	การใช้งาน เซ็นจริง (วินาที)
4700	8.3	12	5	18	7.67	6
	9.1	12	5	17	16	16
	10	12	5	18	22.33	22
6900	8.3	12	5	18	8	7.23
	9.1	12	5	17	17	16.42
	10	12	5	18	23.66	23
10000	8.3	12	5	18	9.3	8
	9.1	12	5	17	17	17
	10	12	5	18	24	24.12

จากผลการทดลองตารางที่ 4.13 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายโหลดจะมีลักษณะแบบช่วงจ่ายโหลดกับ ช่วงชาร์จประจุ ยิ่งค่าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ช่วงจ่ายโหลดกับช่วงชาร์จประจุจะมีช่วงที่กว้างขึ้น แต่ จากการทดลองพบว่าที่ช่วงจ่ายโหลดสั้นๆ ของตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อย ไม่สามารถที่จะเก็บพลังงานลง โหลดที่เป็นแบตเตอรี่ได้ เพราะเนื่องจากช่วงสั้นๆ จ่ายแบตเตอรี่จะเริ่มทำการเช็คแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามาซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามานั้นเป็นช่วงสั้นๆ จึงทำให้ไม่สามารถเก็บพลังงานได้

ดังนั้นผลการทดลองที่เปรียบเทียบการประจุพลังงานผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับ

แรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง และวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จช่วงๆ จะพบได้ว่าการ ประจุพลังงานผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่องจะได้พลังงานที่มากกว่า ไม่ว่าการมีไวด์ทั้งสั้น อีกทั้งยังมีให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ และสามารถนำไปใช้งานคายประจุผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์มได้นานกว่าด้วย

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุป

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ได้ทำการเปลี่ยนรูปทรงของขดลวดตัวนำจากเดิมที่มีรูปทรงเป็นรูปหยดน้ำ (ลวดต้นแบบที่ 1) เปลี่ยนรูปทรงเป็นรูปวงกลม (ลวดต้นแบบที่ 3) เพื่อให้มีรูปร่างเดียวกับแม่เหล็ก พบว่ารูปทรงที่เป็นวงกลม (ลวดต้นแบบที่ 3) จะให้พลังงานที่มากกว่ารูปทรงหยดน้ำ (ลวดต้นแบบที่ 1) ซึ่งจะให้กำลังไฟฟ้าที่ 88.134 มิลลิวัตต์ แต่เนื่องจากพลังงานจากลวดต้นแบบที่ 3 ไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ จึงออกแบบลวดต้นแบบที่ 4 ลวดต้นแบบที่ 5 และลวดต้นแบบที่ 6 และนำพลังงานของลวดต้นแบบทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าพลังงานที่ได้จะมีค่ามากขึ้นตามลำดับ ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพลังงานของลวดเหล่านั้นสามารถสรุปได้ว่า ลวดต้นแบบที่ 6 สามารถผลิตพลังงานได้มากกว่าลวดต้นแบบอื่นๆ โดยมีกำลังไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่ 177.3846 มิลลิวัตต์ แต่เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของลวดต้นแบบที่ 6 ไม่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ จึงเลือกลวดต้นแบบที่ 4 ซึ่งเหมาะสมสำหรับการนำไปเป็นลวดต้นแบบในการประจุพลังงานลงยังแบตเตอรี่ โดยจากการเซ็นลวดเซ็นด้วยมอเตอร์และการเซ็นจริงในระยะเวลา 30 นาที เปรียบเทียบกันจะพบว่า การประจุพลังงานแบบชาร์จต่อเนื่องจะสามารถประจุพลังงานลงยังแบตเตอรี่ได้มากกว่าวงจรจัดการพลังงานชาร์จแบบช่วงๆ โดยสามารถคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านความต้านทานได้ระยะเวลาการทำงานอยู่ที่ประมาณ 131 วินาที ดังนั้นลวดต้นแบบที่ 4 จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง และสามารถนำแบตเตอรี่นี้ไปใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

#### 5.2 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข

1. ในขั้นการทดลองเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้า เราไม่สามารถที่จะได้ค่าที่แม่นยำจากการเซ็นแต่ละครั้งได้ เป็นผลมาจากการเซ็นแต่ละครั้งความเร่งไม่เท่ากัน ค่าที่จะนำมาเปรียบเทียบอาจเกิดค่าผิดพลาดได้ การแก้ปัญหาจึงสร้างชุดทดสอบขึ้น โดยมีมอเตอร์ในการหมุนลวดด้วยความเร่งและความเร็วคงที่ตามต้องการได้

2. ในการออกแบบเพิ่มขนาดของลวดต้นแบบที่ 5 ที่ระยะห่างของแม่เหล็ก 9 เซนติเมตร เป็นระยะห่างที่มากเกินไปจนทำให้สนามแม่เหล็กไม่ส่งผ่านถึงกัน จึงทำให้ลวดไม่สามารถผลิตพลังงานได้เท่าที่ควร จึงใช้โปรแกรมวิเคราะห์แม่เหล็กเพื่อที่จะหาระยะที่สนามแม่เหล็กจะส่งผ่านถึงกัน และทำการแก้ไขระยะห่างของลวดใหม่เป็น 4.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การประกอบล้อเมื่อทำการเพิ่มแม่เหล็กเป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ตัวแม่เหล็กที่ใส่ลงไปจะเกิดการดูดกันทำให้ยากต่อการใส่ จึงแก้โดยการทำบล็อกใส่แม่เหล็ก และวางแม่เหล็กต่างขั้วที่ต้องการไว้ด้านใต้อีกฝั่งของล้อเพื่อเหนี่ยวนำให้ดูดติดกันจะทำให้ง่ายต่อการใส่

### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

จากล้อรถเข็นต้นแบบที่ 4 จำนวน 1 ล้อ ที่นำมาประจุลงแบตเตอรี่นั้นสามารถเพิ่มจำนวนล้ออีก 1 ล้อ แล้วนำไปติดตั้งกับรถเข็นจริงเพื่อที่สามารถประจุพลังงานลงแบตเตอรี่ได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยแบตเตอรี่ที่มีการประจุพลังงานจากล้อต้นแบบนั้นสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการประยุกต์ใช้กับแอปพลิเคชันต่างๆ ได้ เช่น หน้าจอแสดงรายการสินค้าที่ติดอยู่บนรถเข็นข้อปึง การชาร์จโทรศัพท์มือถือขณะเข็นรถเข็นข้อปึงตามห้างสรรพสินค้า เป็นต้น โดยการนำพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ได้มีการประจุพลังงานจากล้อต้นแบบมาเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับพวกแอปพลิเคชันเหล่านี้ได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ.[Online].Available :  
<http://www.thaigoodview.com/library/contest2552/type1/science03/11/Electri-city-web/html/content-html/electricalGenerator-html/dynamo.html>.
- [2] ตัวเหนี่ยวนำ.[Online].Available :  
<http://kpp.ac.th/elearning/elearning3/book-04.html>.
- [3] กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.[Online].Available :  
[http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com\\_content&task=view&id=2531&Itemid=3](http://www.neutron.rmutphysics.com/news/index.php?option=com_content&task=view&id=2531&Itemid=3).
- [4] โซลินอยด์.[Online].Available :  
[http://electronics.se-ed.com/contents/046s061/046s061\\_p02.asp](http://electronics.se-ed.com/contents/046s061/046s061_p02.asp).
- [5] ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor).[Online].Available :  
<http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewbulletin/2041-%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%A7%E0%B9%80%E0%B8%AB%E0%B8%99%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B8%A2%E0%B8%A7%E0%B8%99%E0%B8%B3+%28Inductor%29?groupid=296>.
- [6] ตัวเหนี่ยวนำ.[Online].Available :  
<http://www2.tatc.ac.th/e-learning/story6.html>.
- [7] Permeability (electromagnetism).[Online].Available :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability\\_%28electromagnetism%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Permeability_%28electromagnetism%29).
- [8] AWG Copper Wire Size and Data.[Online].Available :  
[http://www.engineersedge.com/copper\\_wire.html](http://www.engineersedge.com/copper_wire.html).
- [9] วงจรเรียงกระแส.[Online].Available :  
<http://www.neutron.rmutphysics.com/physicsboard/forum/index.php?topic=689.0>.
- [10] แบตเตอรี่.[Online].Available :  
<http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%81%E0%B8%9A%E0%B8%95%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%AD%E0%B8%A3%E0%B8%B5%E0%B9%88#.E0.B9.83.E0.B8.8A.E0.B9.89.E0.B9.81.E0.B8.A5.E0.B9.89.E0.B8.A7.E0.B8.97.E0.B8.B4.E0.B9.89.E0.B8.87>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] แบตเตอรี่ลิเธียมไอออน.[Online].Available :  
<http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=nacl&month=07-2005&date=01&group=2&blog=1>.
- [12] หลักการทำงานของโซลินอยด์.[Online].Available :  
<http://board.212cafe.com/FreeForumskscom/view/4f0d0e3c846567ae0500107c>.
- [13] Pololu 5V Step-Up/Step-Down Voltage Regulator S7V8F5.[Online].Available :  
<http://www.pololu.com/product/2123>.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### กราฟผลการทดลอง

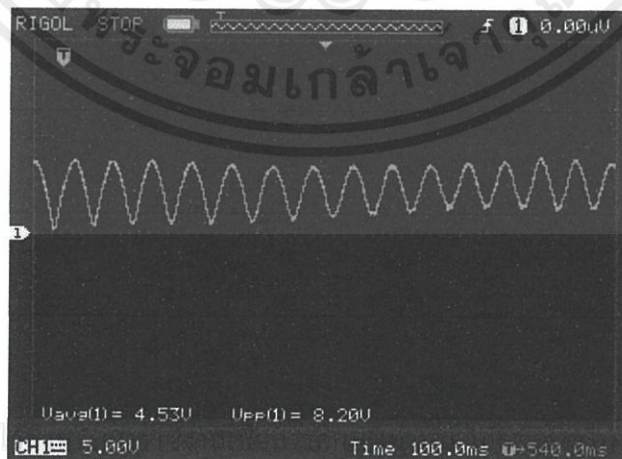
ในการทดลองล้อยัตนแบบทั้งหกแบบ มีการบันทึกภาพกราฟผลการทดลอง ซึ่งจะยกมาเป็นตัวอย่างบางส่วน

ตัวอย่างกราฟแรงดันของล้อยัตนแบบ ที่ไม่ได้ผ่านวงจรเรียงกระแส ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 กราฟแรงดันของล้อยัตนแบบที่ 1 ที่โหลด 200 โอห์ม

ตัวอย่างกราฟแรงดันของล้อยัตนแบบ ที่ผ่านวงจรเรียงกระแส ดังรูปที่ ก.2

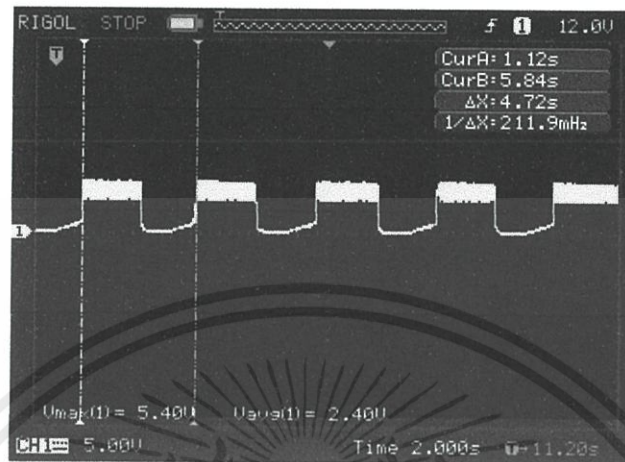


รูปที่ ก.2 กราฟแรงดันของล้อยัตนแบบที่ 1 ที่โหลด 200 โอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

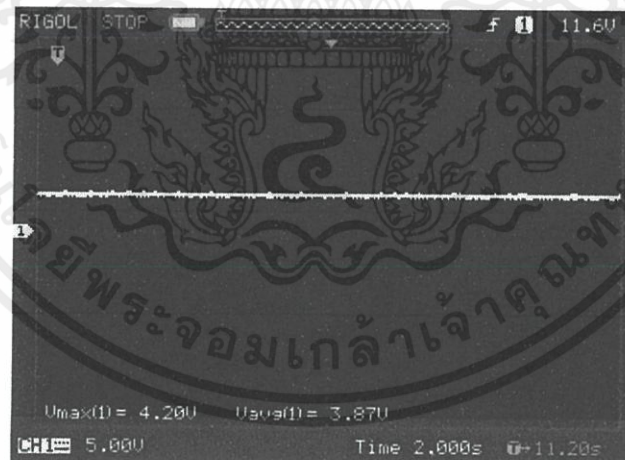
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างกราฟแรงดันของล้อยันแบบ ขณะประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบชาร์จช่วงๆ ดังรูปที่ ก.3



รูปที่ ก.3 กราฟแรงดันของล้อยันแบบที่ 4 ขณะประจุลงแบตเตอรี่ ที่ค่าตัวเก็บประจุ 10000  $\mu\text{F}$

ตัวอย่างกราฟแรงดันของล้อยันแบบ ขณะประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน ผ่าน วงจรจัดการพลังงานแบบชาร์จต่อเนื่อง ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 กราฟแรงดันของล้อยันแบบที่ 4 ขณะประจุลงแบตเตอรี่ ที่ค่าตัวเก็บประจุ 6900  $\mu\text{F}$

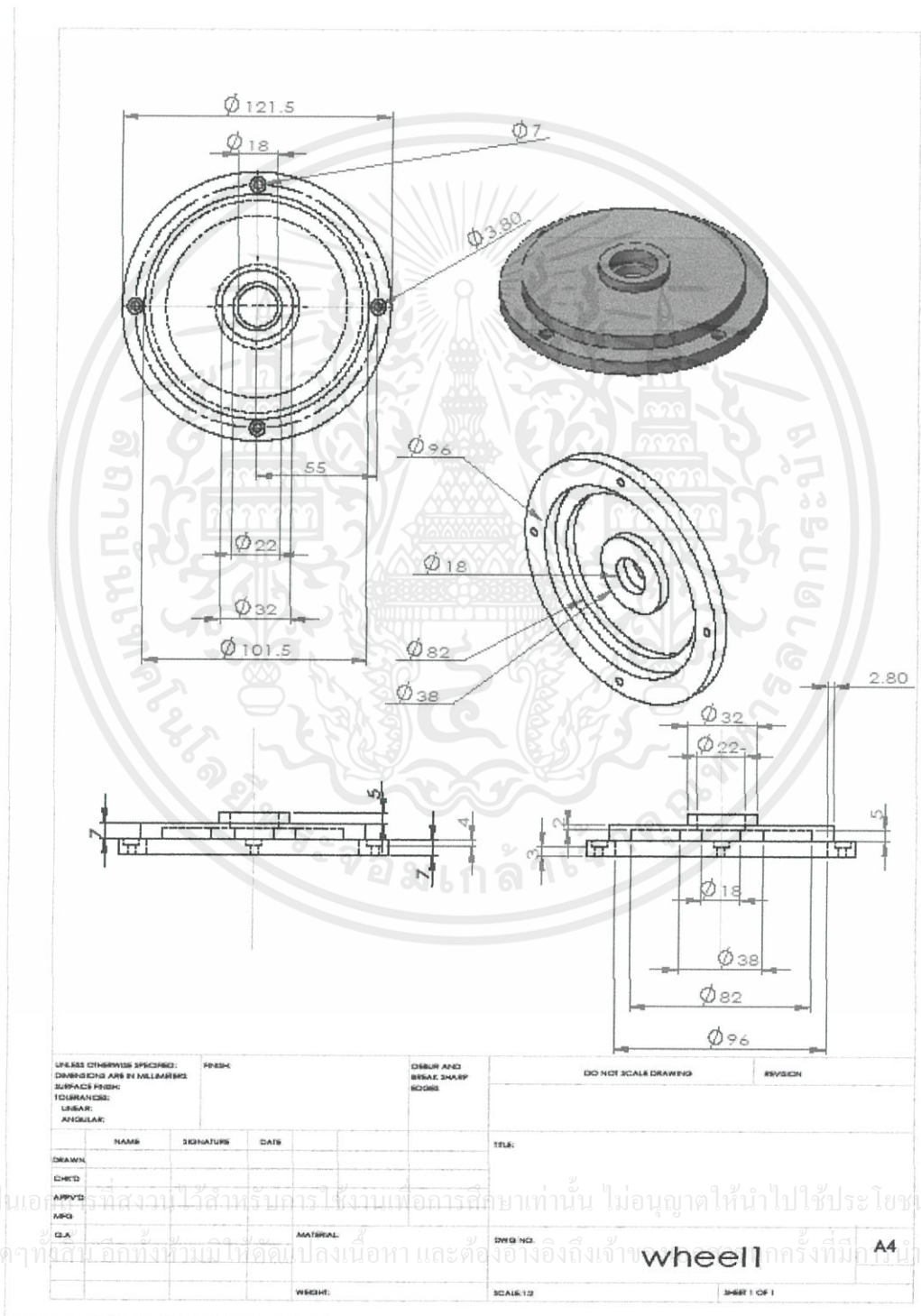
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ข.1 โครงสร้างล้อรถเข็นกำเนิดพลังงาน

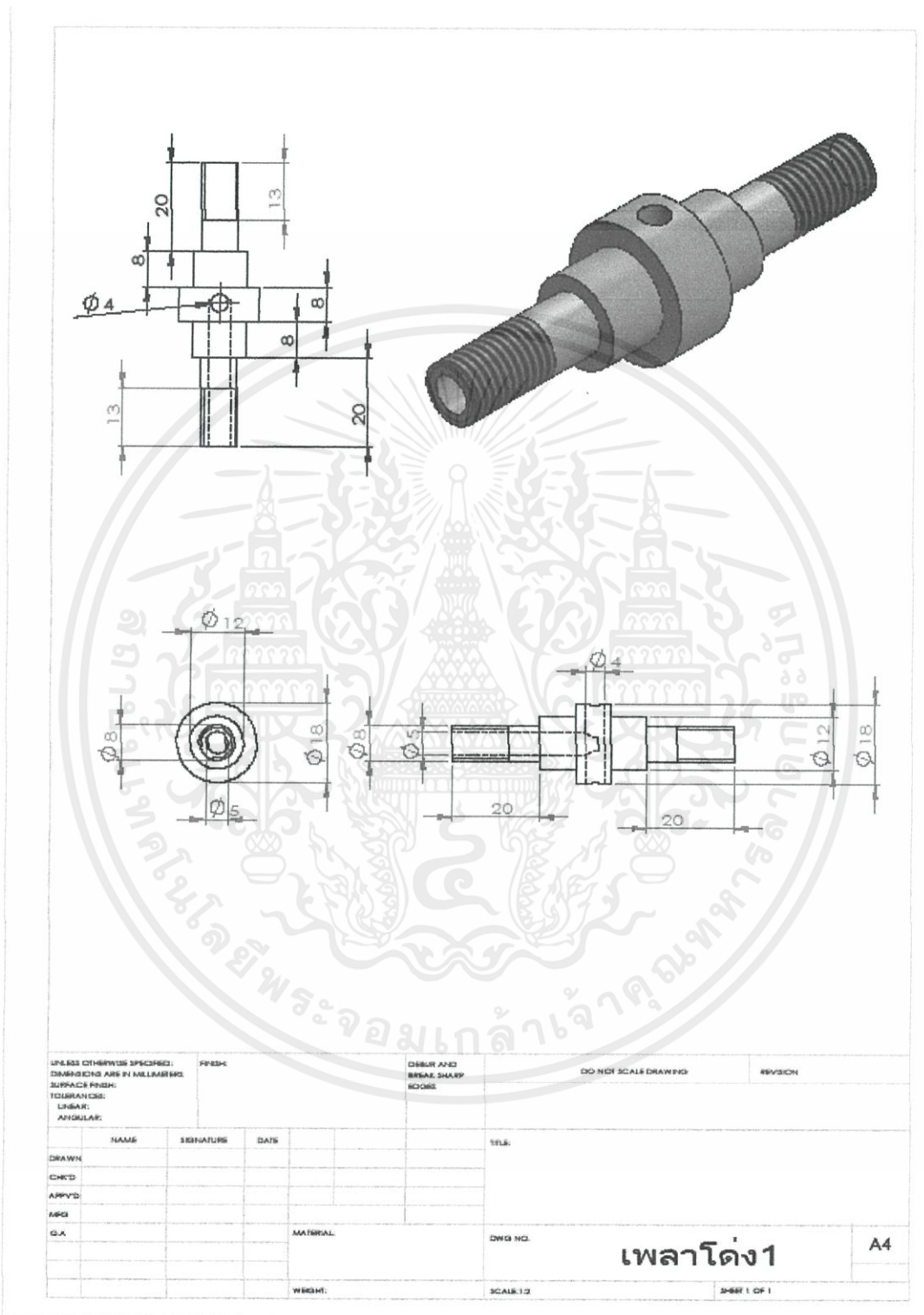
ข.1.1 ล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 4

ข.1.1.1 ตัวล้อชิ้นที่ 1



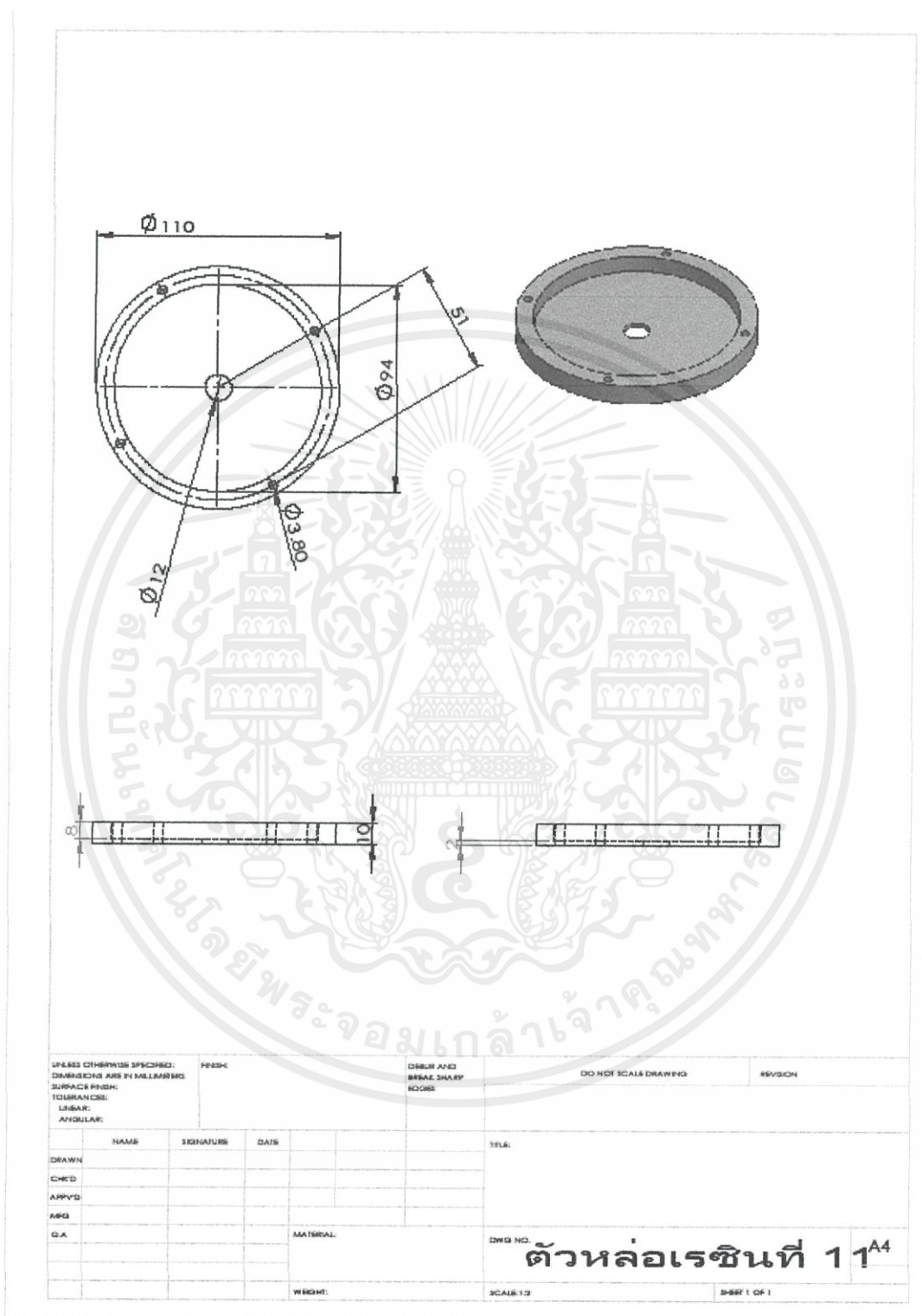
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีโอกาสนำไปใช้

## ข.1.1.2 เฟลา



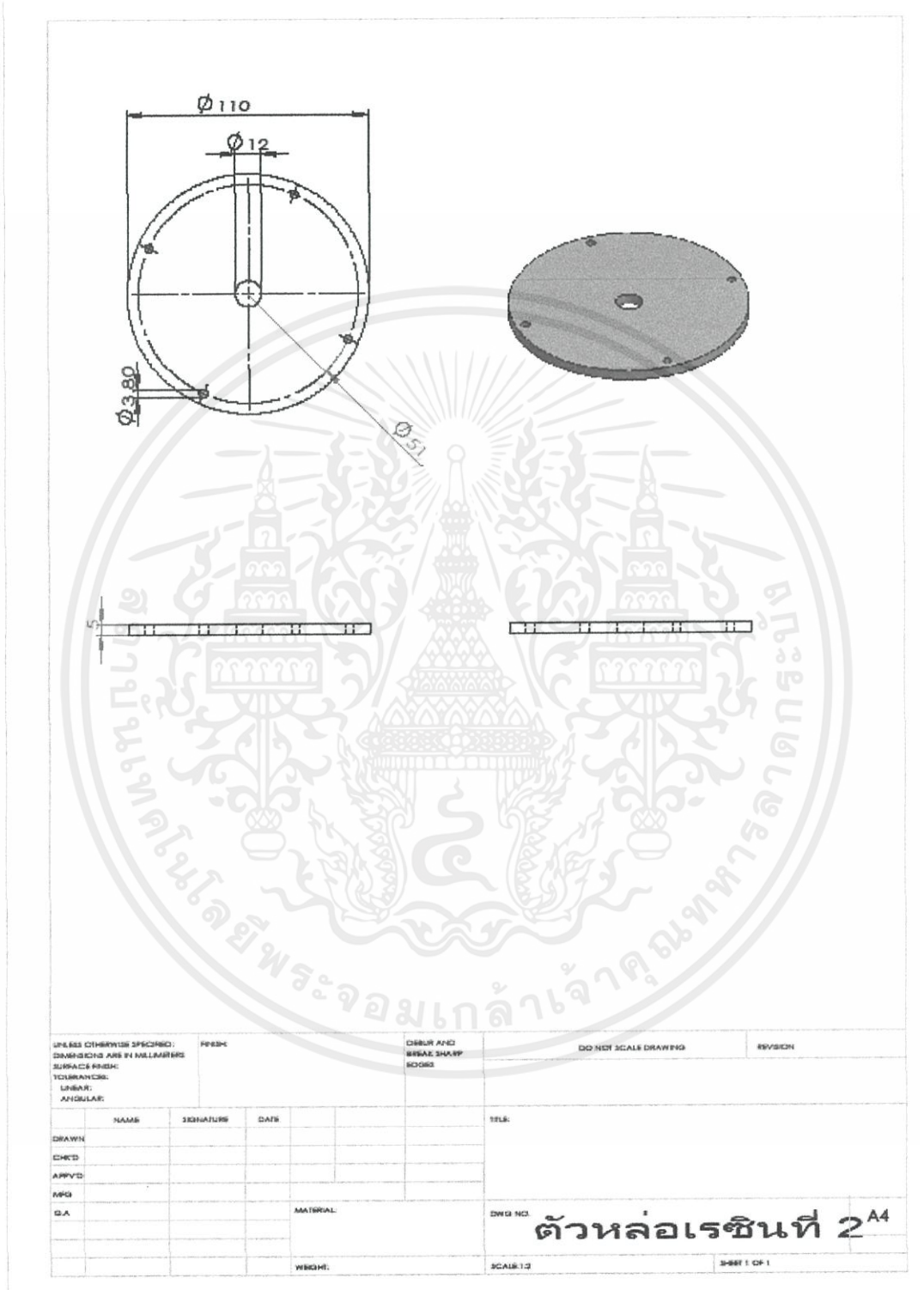
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ข.1.1.3 แท่นหล่อเรซิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

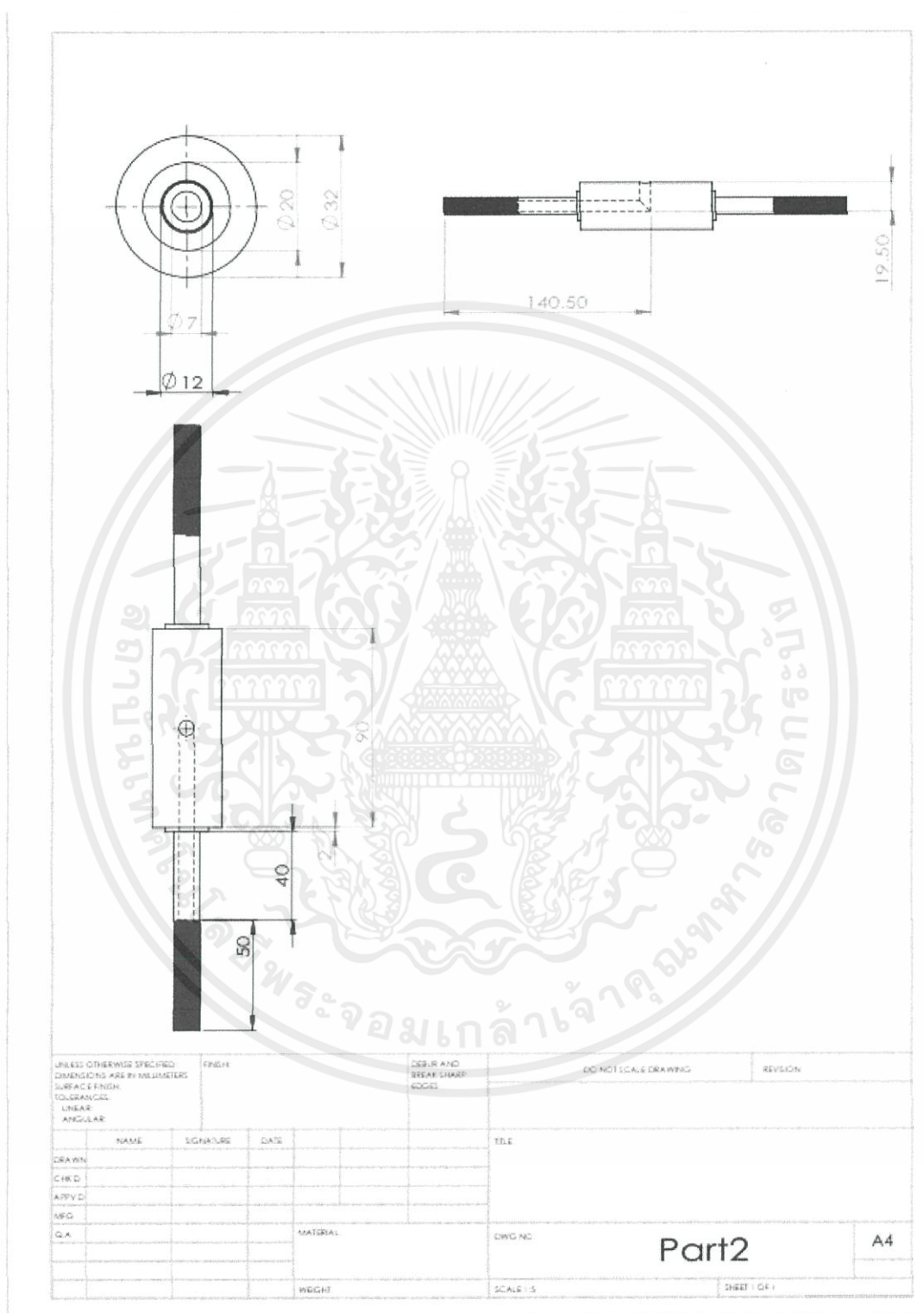
### ข.1.1.4 ฝาปิดแท่นหล่อเรซิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

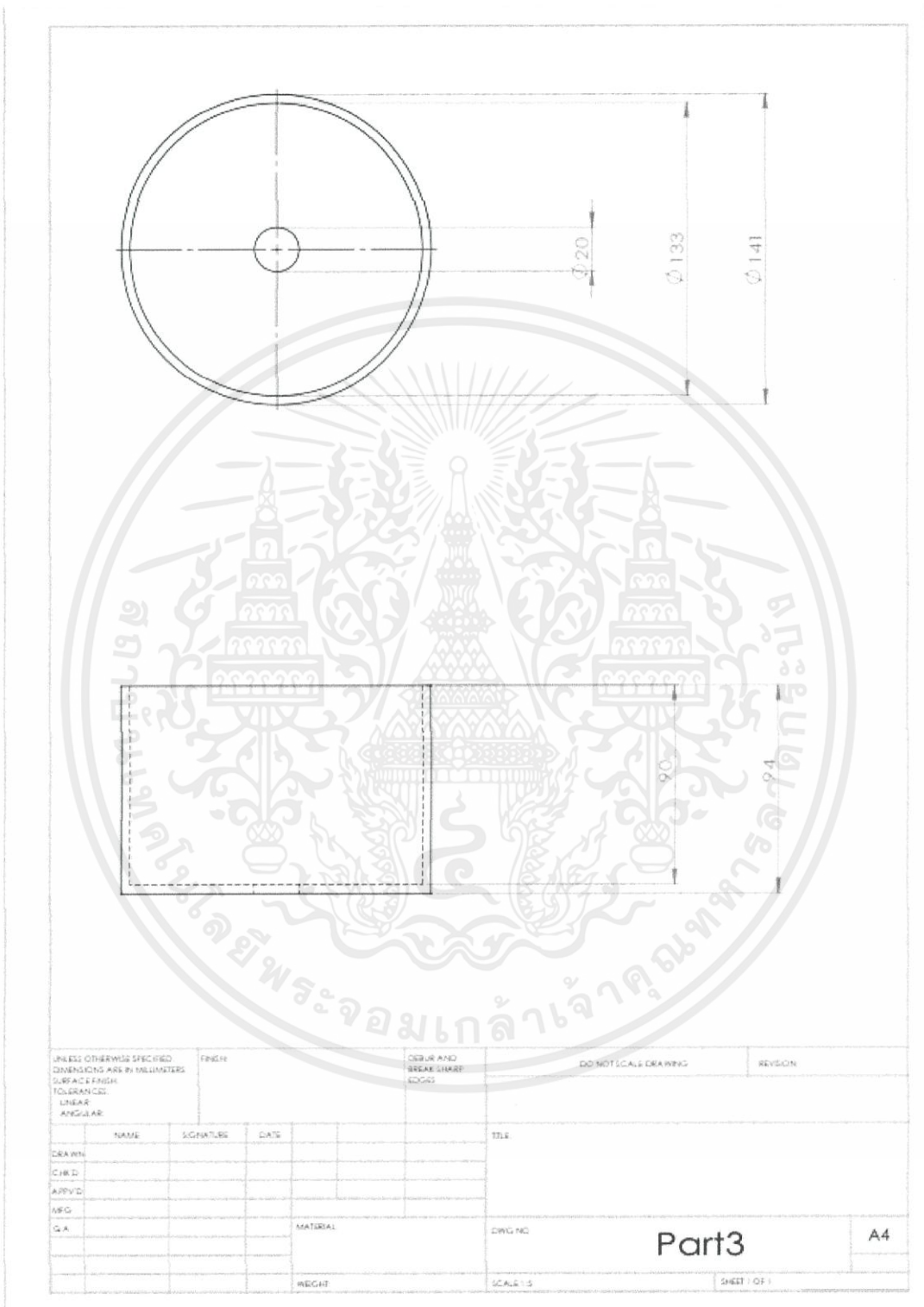


## ข.1.2.2 เฟลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

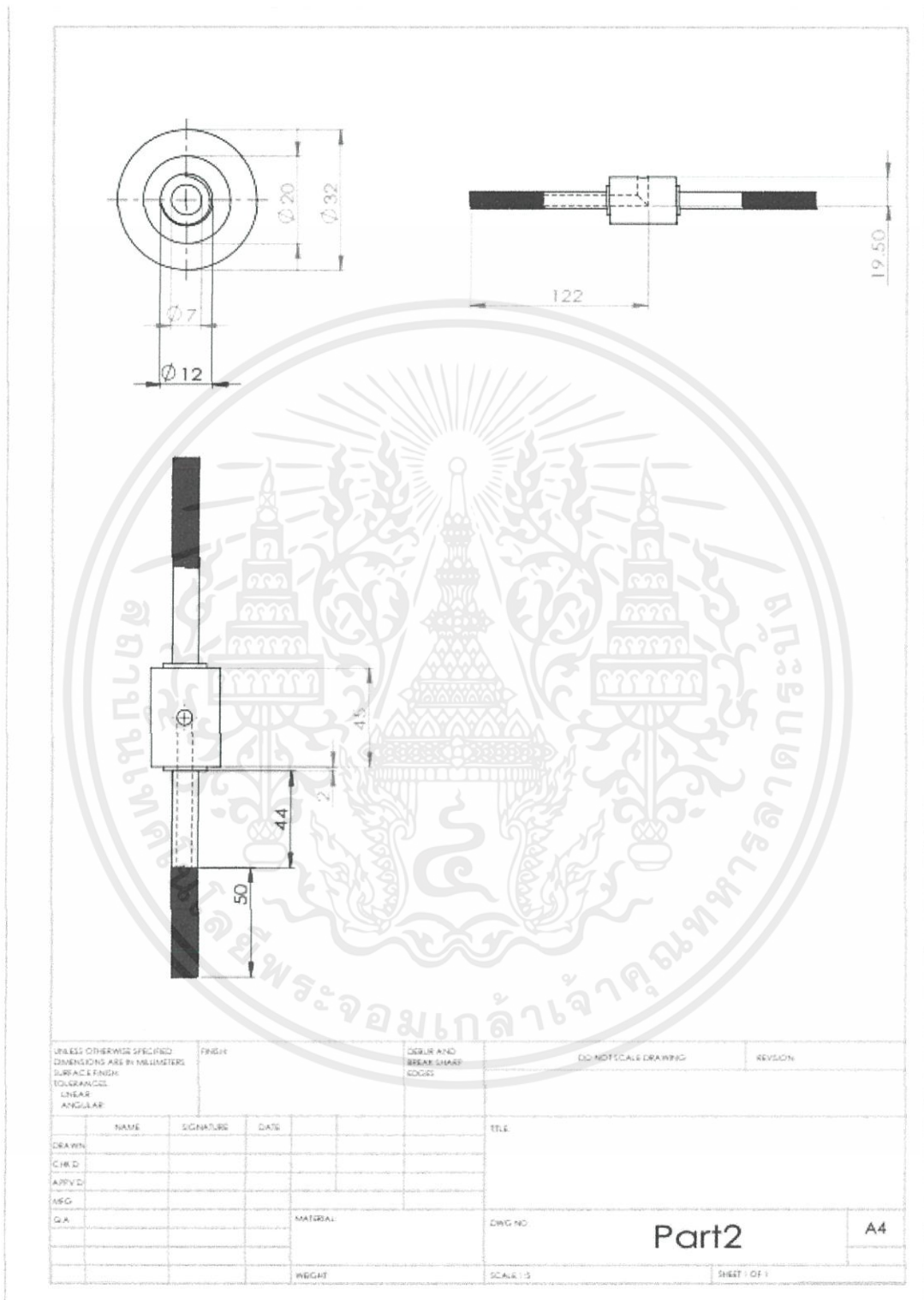
### ข.1.1.3 แท่นหล่อเรซิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ข.1.3.2 เฟลา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 Data sheet อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของวงจรจัดการพลังงาน

ข.2.1 Max666

19-0921; Rev 1, 7/96

# MAXIM

## Dual Mode™ 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

MAX663/MAX664/MAX666

**General Description**

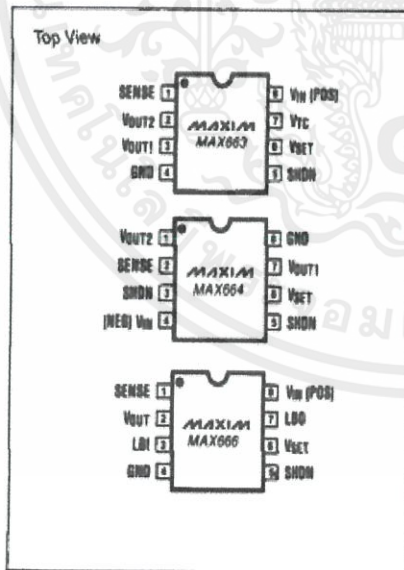
The MAX663/664/666 CMOS voltage regulators have a maximum quiescent current of 12µA. They can be used either as 5 volt, fixed output regulators with no additional components, or can be adjusted from 1.3V to 16V using two external resistors. Fixed or adjustable operation is automatically selected via the V<sub>SET</sub> input. The MAX66X series, ideally suited for battery powered systems, has an input voltage range of 2 to 16.5V, an output current capability of 40mA, and can operate with low input-output differentials. Other features include current limiting and low power shut down.

The MAX663 positive regulator and MAX664 negative regulator are both pin and electrically compatible with the ICL7663 and ICL7664 and can plug-in replace these devices, improving performance and eliminating the need for external resistors in 5V applications. The MAX666 has a positive output and includes on-chip low-battery detection circuitry.

**Applications**

- Handheld Instruments
- LCD Display Systems
- Pagers
- Remote Data Acquisition and Telemetry
- Radio Controlled Devices
- Long-life Battery Powered Systems

**Pin Configuration**



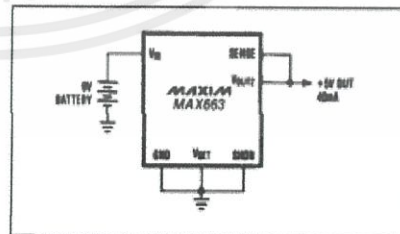
**Features**

- ◆ Dual Mode Operation: Fixed +5V or Adjustable from +1.3V to +16V
- ◆ Low Power CMOS: 12µA Max Quiescent Current
- ◆ 40mA Output Current, with Current Limiting
- ◆ Pin-Compatible Upgrade of ICL7663 and ICL7664
- ◆ +2V to +16.5V Operating Range
- ◆ Low Battery Detector (MAX666)
- ◆ No Output Over-Shoot on Power Up

**Ordering Information**

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MAX663C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX663CPA	0°C to +70°C	8 Lead Plastic DIP
MAX663CSA	0°C to +70°C	8 Lead Small Outline
MAX663EPA	-40°C to +85°C	8 Lead Plastic DIP
MAX663ESA	-40°C to +85°C	8 Lead Small Outline
MAX663MJA	-55°C to +125°C	8 Lead Cerdip
MAX664C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX664CPA	0°C to +70°C	8 Lead Plastic DIP
MAX664CSA	0°C to +70°C	8 Lead Small Outline
MAX664EPA	-40°C to +85°C	8 Lead Plastic DIP
MAX664ESA	-40°C to +85°C	8 Lead Small Outline
MAX664MJA	-55°C to +125°C	8 Lead Cerdip
MAX666C/D	0°C to +70°C	Dice
MAX666CPA	0°C to +70°C	8 Lead Plastic DIP
MAX666CSA	0°C to +70°C	8 Lead Small Outline
MAX666EPA	-40°C to +85°C	8 Lead Plastic DIP
MAX666ESA	-40°C to +85°C	8 Lead Small Outline
MAX666MJA	-55°C to +125°C	8 Lead Cerdip

**Typical Operating Circuit**



MAXIM

Maxim Integrated Products 1

เอกสารนี้เป็นเอกสาร **For free samples & the latest literature: <http://www.maxim-ic.com>, or phone 1-800-998-8800** ขอสงวนสิทธิ์ในเงื่อนไขการจำหน่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

<b>MAX663 and MAX666</b>	
Input Supply Voltage	+18V
Terminal Voltage	
Pins 1,3,5,6, MAX663 — Pin 7	
and MAX666 — Pin 2	GND -0.3V to $V_{IN} + 0.3V$
MAX663 — Pin 2	GND -0.3V to $V_{OUT1} + 0.3V$
MAX666 — Pin 7	GND -0.3V to +16.5V
Output Source Current	
MAX663, 666 — Pin 2 ( $V_{OUT2}$ , $V_{OUT}$ )	50mA
MAX663 — Pin 3 ( $V_{OUT1}$ )	25mA
Output Sink Current, Pin 7	-20mA
<b>MAX664</b>	
Input Supply Voltage	-18V
Terminal Voltage	
Pins 1,3,5,6,7	$V_{IN} - 0.3V$ to GND +0.3V
Pin 2	$V_{IN} - 0.3V$ to $V_{OUT1} + 0.3V$
Output Sink Current, (Pins 1,7)	-25mA

### ALL DEVICES

Power Dissipation	
Plastic DIP (Derate 8.3mW/°C above +50°C)	625mW
Small Outline (Derate 6mW/°C above +50°C)	450mW
CERDIP (Derate 8mW/°C above +50°C)	800mW
Operating Temperature Range	
MAX66XC	0°C to +70°C
MAX66XE	-40°C to +85°C
MAX66XM	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering 10 seconds)	+300°C

Stresses above those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of the specifications is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS, MAX663 AND MAX666

( $V_{IN} = +9V$ ,  $V_{OUT} = +5V$ ,  $T_A = +25^\circ C$ , unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Voltage	$V_{IN}$	Over Temperature (C) Over Temperature (E, M)	2.0 2.2		18.5	V
Quiescent Current	$I_Q$	No Load, $V_{IN} = +16.5V$ $T_A = +25^\circ C$ Over Temperature (C) Over Temperature (E, M)		6 15 20	12	$\mu A$
Output Voltage	$V_{OUT}$	$V_{SET} = GND$ Over Temperature (C, E) Over Temperature (M)	4.75 4.5	5.0 5.0	5.25 5.5	V
Line Regulation	$\Delta V_{OUT} / \Delta V_{IN}$	+2V $\leq V_{IN} \leq$ +15V, $V_{OUT} = V_{REF}$		0.03	0.35	%/V
Load Regulation	$\Delta V_{OUT} / \Delta I_{OUT}$	MAX663: 1mA $\leq I_{OUT2} \leq$ 20mA MAX663: 50 $\mu A \leq I_{OUT1} \leq$ 5mA MAX666: 1mA $\leq I_{OUT} \leq$ 20mA		3.0 1.0 3.0	7.0 5.0 7.0	$\Omega$
Reference Voltage	$V_{SET}$	$V_{OUT} = V_{SET}$	1.27		1.33	V
Reference Tempco	$\Delta V_{SET} / \Delta T$	Over Temperature		$\pm 100$		ppm/°C
$V_{SET}$ Internal Threshold for Fixed +5V or Adjustable Output	$V_{FA}$	$V_{SET} < V_{FA}$ for +5V Out $V_{SET} > V_{FA}$ for Adjustable Out		50		mV
$V_{SET}$ Input Current	$I_{SET}$	Over Temperature (C, E) Over Temperature (M)		-0.01	$\pm 10$ $\pm 25$	nA
Shutdown Input Voltage	$V_{SHDN}$	$V_{SHDN} HI =$ Output Off $V_{SHDN} LO =$ Output On	1.4		0.3	V
Shutdown Input Current	$I_{SHDN}$			$\pm 0.01$	$\pm 10$	nA
SENSE Input Threshold	$V_{OUT} - V_{SENSE}$	Current Limit Threshold		0.5		V
SENSE Input Resistance	$R_{SENSE}$			3		M $\Omega$
Input-Output Saturation Resistance, MAX663 - $V_{OUT1}$	$R_{SAT}$	$V_{IN} = +2V$ , $I_{OUT} = 1mA$ $V_{IN} = +9V$ , $I_{OUT} = 2mA$ $V_{IN} = +15V$ , $I_{OUT} = 5mA$		200 70 50	500 150 150	$\Omega$
Output Current, $V_{OUT2}$ ( $V_{OUT}$ on MAX666)	$I_{OUT}$	+3V $\leq V_{IN} \leq$ +16.5V $V_{IN} - V_{OUT} = +1.5V$	40			mA
Minimum Load Current	$I_{LIMIN}$	$T_A = +25^\circ C$ Over Temperature (C, E) Over Temperature (M)			1.0 5.0 10.0	$\mu A$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS, MAX663 AND MAX666 (continued)

( $V_{IN} = +9V$ ,  $V_{OUT} = +5V$ ,  $T_A = +25^\circ C$ , unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
LBI Input Threshold	$V_{LBI}$	MAX666	1.21	1.28	1.37	V
LBI Input Current	$I_{LBI}$	MAX666		$\pm 0.01$	$\pm 10$	nA
LBO Output Saturation Resistance	$R_{SAT}$	MAX666, $I_{SAT} = 2mA$		35	100	$\Omega$
LBO Output Leakage Current		MAX666, LBI = +1.4V		10		nA
$V_{TC}$ Open-Circuit Voltage (Note 1)	$V_{TC}$	MAX663		0.9		V
$V_{TC}$ Sink Current (Note 1)	$I_{TC}$	MAX663		8.0	2.0	mA
$V_{TC}$ Temperature Coefficient (Note 1)		MAX663		+2.5		mV/ $^\circ C$

Note 1: This output (MAX663 only) has a positive temperature coefficient. Using it in conjunction with the input of the regulator at  $V_{SET}$ , a negative coefficient results in the output voltage. The  $V_{TC}$  pin will not source current.

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS, MAX664

( $V_{IN} = -9V$ ,  $V_{OUT} = -5V$ ,  $T_A = +25^\circ C$ , unless otherwise noted.)

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Input Voltage	$V_{IN}$	Over Temperature (C) Over Temperature (E, M)	-2.0 -2.2		-18.5	V
Quiescent Current	$I_Q$	No Load, $V_{IN} = -18.5V$ $T_A = +25^\circ C$ Over Temperature (C) Over Temperature (E, M)		6	12 15 20	$\mu A$
Output Voltage	$V_{OUT}$	$V_{SET} = GND$ Over Temperature (C, E) Over Temperature (M)	-4.75 -4.5	-5.0	-5.25 -5.5	V
Line Regulation	$\Delta V_{OUT}/\Delta V_{IN}$	$-2V \leq V_{IN} \leq -15V$ , $V_{OUT} = V_{REF}$		0.03	0.35	%/V
Load Regulation	$\Delta V_{OUT}/\Delta I_{OUT}$	$V_{OUT2}$ connected to $V_{OUT1}$ , $1mA \leq I_{OUT} \leq 15mA$		2.0	5.0	$\Omega$
Reference Voltage	$V_{SET}$	$V_{OUT} = V_{SET}$	-1.27		-1.33	V
Reference Tempco	$\Delta V_{SET}/\Delta T$	Over Temperature		$\pm 100$		ppm/ $^\circ C$
$V_{SET}$ Internal Threshold for Fixed -5V or Adjustable Output Operation	$V_{FA}$	$V_{SET} < V_{FA}$ for -5V Out, $V_{SET} > V_{FA}$ for Variable Out		-50		mV
$V_{SET}$ Input Current	$I_{SET}$	Over Temperature (C, E) Over Temperature (M)		$\pm 0.01$	$\pm 10$ $\pm 25$	nA
Shutdown Input Voltage	$V_{SHDN}$	$V_{SHDN HI} =$ Output Off $V_{SHDN LO} =$ Output On	-1.4		-0.3	
Shutdown Input Current	$I_{SHDN}$			$\pm 0.01$	$\pm 10$	nA
SENSE Input Threshold	$V_{OUT} - V_{SENSE}$	Current Limit Threshold		-0.6		V
SENSE Input Resistance	$R_{SENSE}$			3		M $\Omega$
Input-Output Saturation Resistance	$R_{SAT}$	$V_{OUT2}$ connected to $V_{OUT1}$ $V_{IN} = -2V$ , $I_{OUT} = -1mA$ $V_{IN} = -9V$ , $I_{OUT} = -2mA$ $V_{IN} = -15V$ , $I_{OUT} = -5mA$		150 40 30	500 80 60	$\Omega$
Minimum Load Current	$I_{LIMNI}$	$T_A = +25^\circ C$ Over Temperature (C, E) Over Temperature (M)			-1.0 -5.0 -10.0	$\mu A$

MAX663/MAX664/MAX666

MAXIM

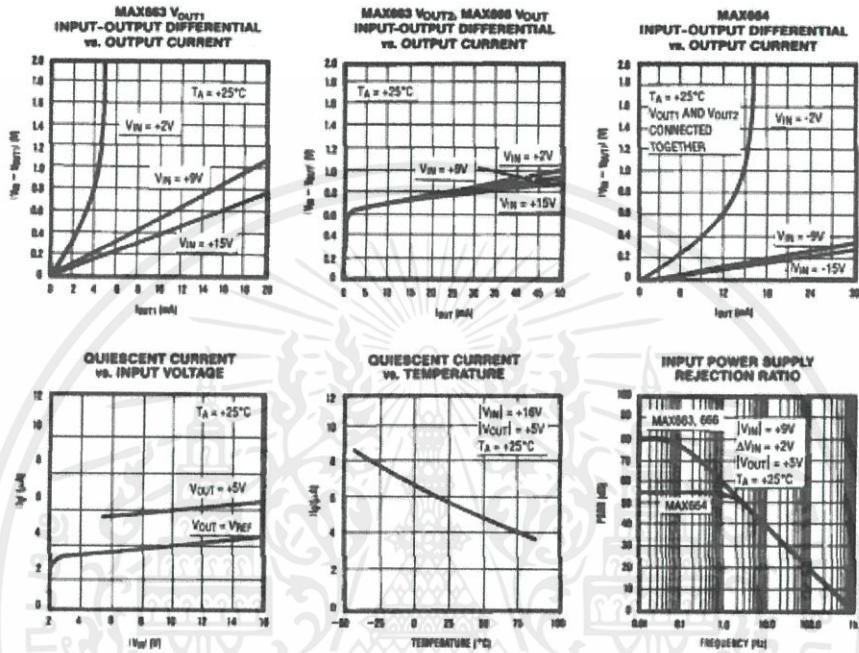
3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

### Typical Operating Characteristics

MAX663/MAX664/MAX666



### Pin Description

NAME	FUNCTION (See text for details)
$V_{OUT1(1)2}$	Regulator Output(s)
$V_{IN}$	Regulator Input
SENSE	Current limit sense input
LBI	Low battery detection input
LBO	Low battery detection output
SHUTDOWN	Disables output for minimum power consumption
$V_{SET}$	Ground this pin for 5V output or Connect to external resistive divider for adjustable output
$V_{TC}$	Temperature-proportional voltage for negative TC output

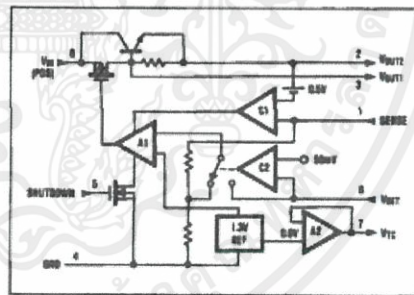


Figure 1. MAX663 Positive Regulator, Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

MAX663/MAX664/MAX666

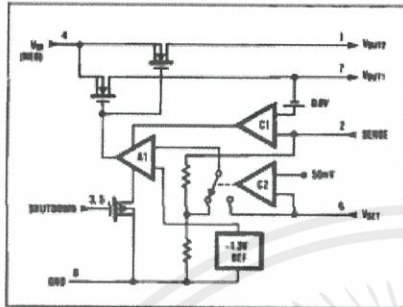


Figure 2. MAX664 Negative Regulator, Block Diagram

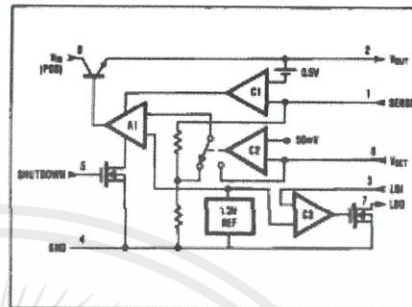


Figure 3. MAX666 Positive Regulator With Low Battery Detector, Block Diagram

### Detailed Description

As shown in the block diagrams for each device (Figures 1, 2, and 3), the main elements of the MAX66X family of regulators are a micropower bandgap reference, an error amplifier, and one or two series pass output devices. A P-channel FET and an NPN transistor are used in the MAX663, and two N-channel FETs are used in the MAX664, and one NPN output transistor is used in the MAX666. All regulators also contain two comparators, one for current limiting (C1) and another which selects fixed 5V or adjustable output operation (C2).

The bandgap reference, which is trimmed to 1.30V ±30mV, is internally connected to one input of the error amplifier, A1. The feedback signal from the regulator output is supplied to the A1's other input by either an on-chip voltage divider or by two external resistors. When V<sub>SET</sub> is grounded the internal divider provides the error amplifier's feedback signal for a fixed 5V output. When V<sub>SET</sub> is more than 50mV above ground (below ground for the MAX664) the error amplifier's input is switched directly to the V<sub>SET</sub> pin and external resistors set the output voltage.

Comparator C1 monitors the output current via the SENSE input and shuts down the regulator's output(s) by disabling A1. An external current sense resistor, R<sub>CL</sub>, sets the limit value. The MAX663 and MAX666 current-limit when the voltage on R<sub>CL</sub> exceeds 0.5V. The MAX664 current limits at 0.6V.

The MAX663 has an additional amplifier, A2, which provides a temperature-proportional output, V<sub>TC</sub>. When this is summed into the inverting input of the error amplifier, a negative temperature coefficient results at the output. This is useful when powering liquid crystal displays over wide temperature ranges.

The MAX666 has a third comparator, C3, which compares the LBI input to the internal 1.30V reference. The Low Battery Output, LBO, is an open drain FET connected to Ground. The Low Battery threshold can also be set with a voltage divider at LBI. In addition, all devices also have a SHUT-DOWN input which disables the error amplifier and regulator output(s).

### Basic Circuit Operation

Figure 4 shows the connections for fixed 5V output positive and negative regulators. The V<sub>SET</sub> input is grounded and no external resistors are required. Figure 5 shows adjustable output operation with current limiting. The output voltage is set by R1 and R2 and the current limit threshold is set by R<sub>CL</sub>. V<sub>OUT</sub> should be connected to SENSE if current limiting is not used and the SHUTDOWN input should be grounded if not used.

### Output Voltage Selection

If V<sub>SET</sub> is not connected to Ground, the output voltage is set by the equation:

$$V_{OUT} = V_{SET} \times \frac{R1 + R2}{R1}, \text{ where } V_{SET} = 1.30V$$

or, to simplify resistor selection:

$$R2 = R1 \times \left( \frac{V_{OUT}}{1.30V} - 1 \right)$$

Since the input bias current at V<sub>SET</sub> has a maximum value of 10nA, relatively large values can be used for R1 and R2 with no loss of accuracy. 1MΩ is a typical value for R1. The tolerance on V<sub>SET</sub> is guaranteed to be less than ±30mV. This allows the output to be preset without trim pots, using only fixed resistors in most cases.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAX663/MAX664/MAX666

## Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

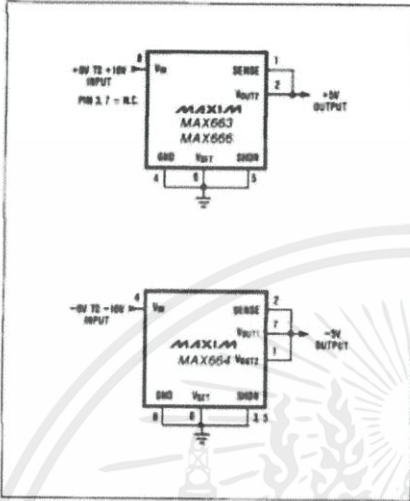


Figure 4. Connections for Fixed 5V Output

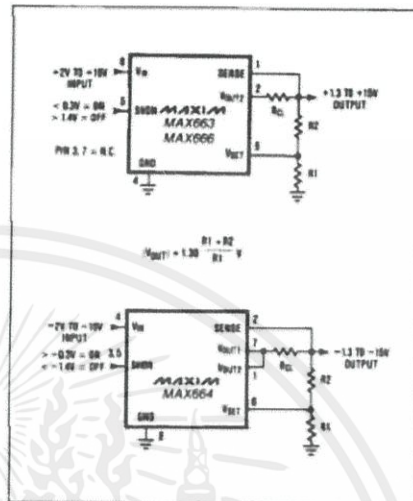


Figure 5. Connections for Adjustable Output

### Current Limiting

Internal current limiting is activated on all MAX66X devices when the voltage difference between  $V_{OUT}$  and the SENSE input exceeds an internal threshold. The limit value is externally set by  $R_{CL}$  using the equation:

$$R_{CL} = \frac{V_{CL}}{I_{CL}}$$

$V_{CL} = 0.5V$  for MAX663 and MAX666  
 $V_{CL} = -0.6V$  for MAX664  
 $(V_{CL} = V_{OUT} - V_{SENSE})$

where  $R_{CL}$  is the current limit sense resistor and  $I_{CL}$  is the maximum current.  $R_{CL}$  should be chosen so that neither the 50mA absolute maximum output current specification nor the maximum power dissipation is exceeded.

If current limiting is used, remember that the additional voltage drop across  $R_{CL}$  must be considered when determining the regulator's dropout voltage. If current limiting is not used, the SENSE input should be connected to the output(s).

### Shutdown Input

The SHUTDOWN input allows the regulator to be turned off with a logic level signal. Since the current drain in shutdown mode is limited to the regulator's quiescent current (12µA Max) this is sometimes desirable in applications where very low power consumption is needed. The SHUTDOWN input

should be driven with a CMOS logic level since the input threshold is only 0.3V (-0.3V on the MAX664). In TTL systems, an open-collector driver with a pullup resistor will work with the MAX663/666 if a small collector current is used to keep the output's  $V_{SAT}$  below 0.3V. Collector currents as low as 1µA are suitable since the SHUTDOWN pin's input current is less than 10nA. Note that the MAX664's SHUTDOWN input is activated by a negative level. On both positive and negative regulators the SHUTDOWN input should be grounded for normal operation.

### Low Battery Detection

The MAX666 contains on-chip circuitry for low battery or low power supply detection. If the voltage at LBI (Low Battery Input, pin 3) falls below the regulator's internal reference (1.30V) then LBO (Low Battery Output, pin 7), an open drain output, goes low. The threshold can be set to any level above the reference voltage by connecting a resistive divider to LBI (Figure 6) based on the equation:

$$R3 = R4 \times \left( \frac{V_{BATT}}{1.30V} - 1 \right)$$

where  $V_{BATT}$  is the desired threshold of the Low Battery Detector and  $R3$  and  $R4$  are the LBI input divider resistors. Since LBI's input current is no more than 10nA, then  $R3$  and  $R4$  can have high

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

MAX663/MAX664/MAX666

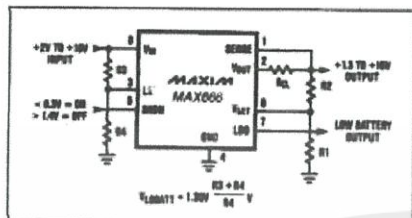


Figure 6. Adjustable Positive Output With Low Battery Detection

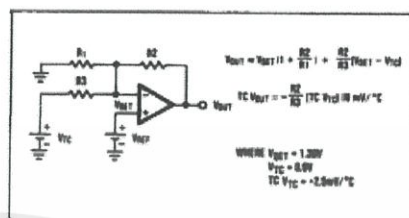


Figure 7. Temperature-Proportional Output Equations, MAX663

values to minimize loading. If, for example,  $V_{OUT}$  were 5V, then a 6V low-battery threshold could be set using  $10\text{M}\Omega$  for  $R3$  and  $2.7\text{M}\Omega$  for  $R4$ . When megohm resistor values are used, special attention should be paid to PC board leakage which can introduce error at the LBI input.

### Temperature-Proportional Output

The  $V_{TC}$  output (MAX663 only) has a positive temperature coefficient of about  $+2.5\text{mV/}^\circ\text{C}$ . When connected to the summing junction of the error amplifier ( $V_{SET}$ ) through a resistor, this positive coefficient results in a controllable negative temperature coefficient at the output of the MAX663. At  $25^\circ\text{C}$  the voltage at the  $V_{TC}$  output is typically 0.9V. Figure 7 shows a simplified diagram of the MAX663 and the equations for setting both the output voltage and the tempco when  $V_{TC}$  is used. When not used,  $V_{TC}$  should be left unconnected.

Negative output temperature coefficients are most commonly used in multiplexed LCD modules or display systems to compensate for the inherent negative tempco of the LCD threshold. Figure 8 shows a MAX663 generating a temperature compensated  $V_{DISP}$  for the Maxim ICM7233 triplexed LCD display driver.

### Application Hints

#### Input-Output (Dropout) Voltage

A regulator's minimum input-output differential, or dropout voltage, determines the lowest usable input voltage. In battery-powered systems this will determine the useful end-of-life battery voltage. The MAX663 and MAX666 have a dropout voltage of 1V at full output. This means that as 5V regulators, for example, they will provide a regulated 5V output at 40mA as long as the input voltage is 6V or greater.

For low current applications ( $I_{OUT} < 5\text{mA}$ ) the MAX663 can operate with input-output differentials below 1V when  $V_{OUT1}$  is used. The dropout voltage will then depend on the P-channel output FET's saturation resistance multiplied by the load current (see MAX663 Electrical Specifications,  $R_{SAT}$ ).

The MAX664 (negative output) uses two N-channel FETs as output devices so its dropout voltage is also a function of  $R_{SAT}$  times its load current (see Electrical Specifications).

### Output Connections

When using  $V_{OUT1}$  on the MAX663 for low current, low dropout applications,  $V_{OUT2}$  and  $V_{OUT1}$  must be connected together since the current limit circuitry is referenced only to  $V_{OUT2}$  (Figure 1).  $V_{OUT2}$  does not supply load current in this configuration since the base of the NPN output transistor is shorted by the output connection. For high current operation  $V_{OUT2}$  should be used alone and  $V_{OUT1}$  should be left unconnected.  $V_{OUT1}$  is not provided on the MAX666. On the MAX664,  $V_{OUT1}$  and  $V_{OUT2}$  should always be connected together for proper operation and lowest dropout voltage.

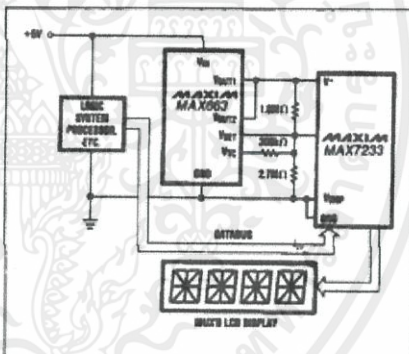


Figure 8. Driving a Multiplexed LCD Display. Consistent operation over more than  $40^\circ\text{C}$  temperature span, as opposed to about  $10^\circ\text{C}$  with fixed drive voltage, is allowed by negative temperature coefficient drive voltage to the displays. Based on EPSON LDB-728 Display or equivalent.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAX663/MAX664/MAX666

### Dual Mode 5V/Programmable Micropower Voltage Regulators

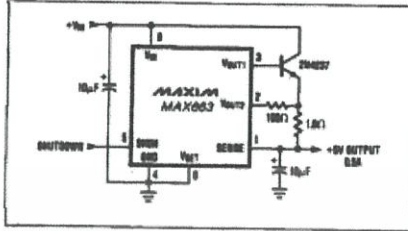


Figure 9. Positive Regulator With Boosted Output, Current Limit, and Low  $I_q$  Shutdown

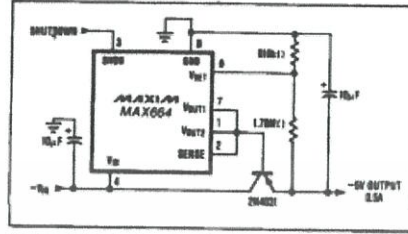


Figure 10. Negative Regulator With Boosted Output and Low  $I_q$  Shutdown

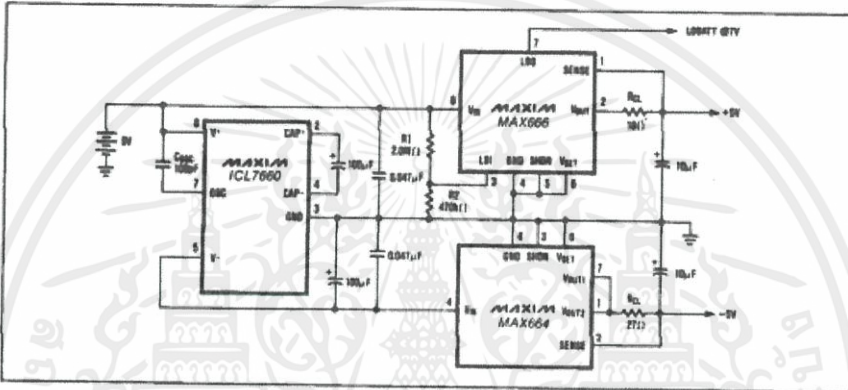


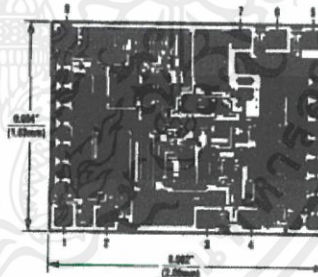
Figure 11.  $\pm 5V$  Power Supply Using One 9V Battery

#### Bypass Capacitors

The MAX66X series of CMOS regulators is designed primarily for low quiescent current battery powered systems and has limited line and load regulation at frequencies above 10Hz. The high frequency performance is easily improved by adding an output filter capacitor across the load. 10 $\mu$ F is a good typical value. If high frequency performance is not an issue then an output bypass capacitor is not required.

In battery powered systems an input capacitor helps to reduce noise, improve dynamic performance, and reduce the input rate-of-rise at the regulator's input. In extreme cases excessive voltage rate-of-rise at the inputs of CMOS devices can cause SCR latch-up. The low impedance of Ni-Cad and Lead-Acid batteries make this possible when they are switched directly to the regulator input with no current limiting resistance, inductance, or input filtering. The addition of a 0.1 $\mu$ F or greater input capacitor limits the input rate-of-rise to a safe level.

#### Chip Topography



(See Pin Configurations (front page) for pin functions)

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are implied. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

8 Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 (408) 737-7600

© 1996 Maxim Integrated Products

Printed USA

MAXIM is a registered trademark of Maxim Integrated Products.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ๓.2.2 Mosfets VN222L



VN0610L, VN10KLS, VN222L  
Vishay Siliconix

### N-Channel 60-V (D-S) MOSFETs with Zener Gate

PRODUCT SUMMARY				
Part Number	$V_{(BR)DSS}$ Min (V)	$r_{DS(on)}$ Max ( $\Omega$ )	$V_{GS(th)}$ (V)	$I_D$ (A)
VN0610L	60	3 @ $V_{GS} = 10$ V	0.8 to 2.5	0.27
VN10KLS		3 @ $V_{GS} = 10$ V	0.8 to 2.5	0.31
VN222L		7.5 @ $V_{GS} = 10$ V	0.6 to 2.5	0.23

#### FEATURES

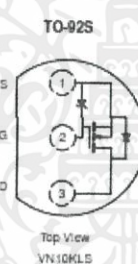
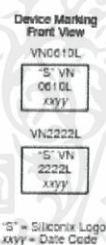
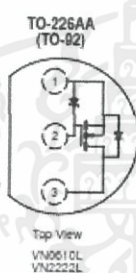
- Zener Diode Input Protected
- Low On-Resistance: 3  $\Omega$
- Ultralow Threshold: 1.2 V
- Low Input Capacitance: 38 pF
- Low Input and Output Leakage

#### BENEFITS

- Extra ESD Protection
- Low Offset Voltage
- Low-Voltage Operation
- High-Speed, Easily Driven
- Low Error Voltage

#### APPLICATIONS

- Drivers: Relays, Solenoids, Lamps, Hammers, Displays, Memories, Transistors, etc.
- Battery Operated Systems
- Solid-State Relays
- Inductive Load Drivers



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ UNLESS OTHERWISE NOTED)				
Parameter	Symbol	VN222L VN0610L	VN10KLS	Unit
Drain-Source Voltage	$V_{DS}$	60	60	V
Gate-Source Voltage	$V_{GS}$	15-0.3	15-0.3	
Continuous Drain Current ( $T_J = 150^\circ\text{C}$ )	$I_D$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.27	A
		$T_A = 100^\circ\text{C}$	0.17	
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>	$I_{DM}$	1	1.0	A
Power Dissipation	$P_D$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	0.8	
		$T_A = 100^\circ\text{C}$	0.32	0.4
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	150	139	$^\circ\text{C}/\text{W}$
Operating Junction and Storage Temperature Range	$T_J, T_{STG}$	-55 to 150		$^\circ\text{C}$

Notes

a. Pulse width limited by maximum junction temperature.

Document Number: 70213  
S-04279—Rev. F, 16-Jul-01

www.vishay.com  
11-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**VN0610L, VN10KLS, VN2222L**  
**Vishay Siliconix**


SPECIFICATIONS (T <sub>A</sub> = 25° C UNLESS OTHERWISE NOTED)								
Parameter	Symbol	Test Conditions	Typ <sup>a</sup>	Limits				Unit
				VN0610L VN10KLS		VN2222L		
				Min	Max	Min	Max	
<b>Static</b>								
Drain-Source Breakdown Voltage	V <sub>DS(BR)</sub>	V <sub>GS</sub> = 0 V, I <sub>D</sub> = 100 μA	120	60		60		V
Gate-Threshold Voltage	V <sub>GS(th)</sub>	V <sub>GS</sub> = V <sub>DS</sub> , I <sub>D</sub> = 1 mA	1.2	0.8	2.5	0.6	2.5	V
Gate-Body Leakage	I <sub>GBS</sub>	V <sub>GS</sub> = 0 V, V <sub>DS</sub> = 15 V	1		100		100	nA
Zero Gate Voltage Drain Current	I <sub>DSS</sub>	V <sub>GS</sub> = 48 V, V <sub>DS</sub> = 0 V T <sub>J</sub> = 125° C			10		10	μA
On-State Drain Current <sup>b</sup>	I <sub>DS(on)</sub>	V <sub>GS</sub> = 10 V, V <sub>DS</sub> = 10 V	1	0.75		0.75		A
Drain-Source On-Resistance <sup>b</sup>	r <sub>DS(on)</sub>	V <sub>GS</sub> = 5 V, I <sub>D</sub> = 0.2 A	4		7.5		7.5	Ω
		V <sub>GS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 0.5 A	3		5		7.5	
		T <sub>J</sub> = 125° C	3.6		9		13.5	
Forward Transconductance <sup>b</sup>	g <sub>fs</sub>	V <sub>GS</sub> = 10 V, I <sub>D</sub> = 0.5 A	300	100		100		mS
Common Source Output Conductance <sup>b</sup>	g <sub>os</sub>	V <sub>GS</sub> = 7.5 V, I <sub>D</sub> = 0.05 A	0.2					mS
<b>Dynamic</b>								
Input Capacitance	C <sub>iss</sub>	V <sub>GS</sub> = 25 V, V <sub>DS</sub> = 0 V, f = 1 MHz	38		60		60	pF
Output Capacitance	C <sub>oss</sub>		10		25		25	
Reverse Transfer Capacitance	C <sub>rss</sub>		2		5		5	
<b>Switching<sup>c</sup></b>								
Turn-On Time	t <sub>ON</sub>	V <sub>GS</sub> = 15 V, R <sub>L</sub> = 23 Ω I <sub>D</sub> = 0.6 A, V <sub>GS1</sub> = 10 V R <sub>θ</sub> = 25 Ω	7		10		10	ns
Turn-Off Time	t <sub>OFF</sub>		9		10		10	ns

**Notes**

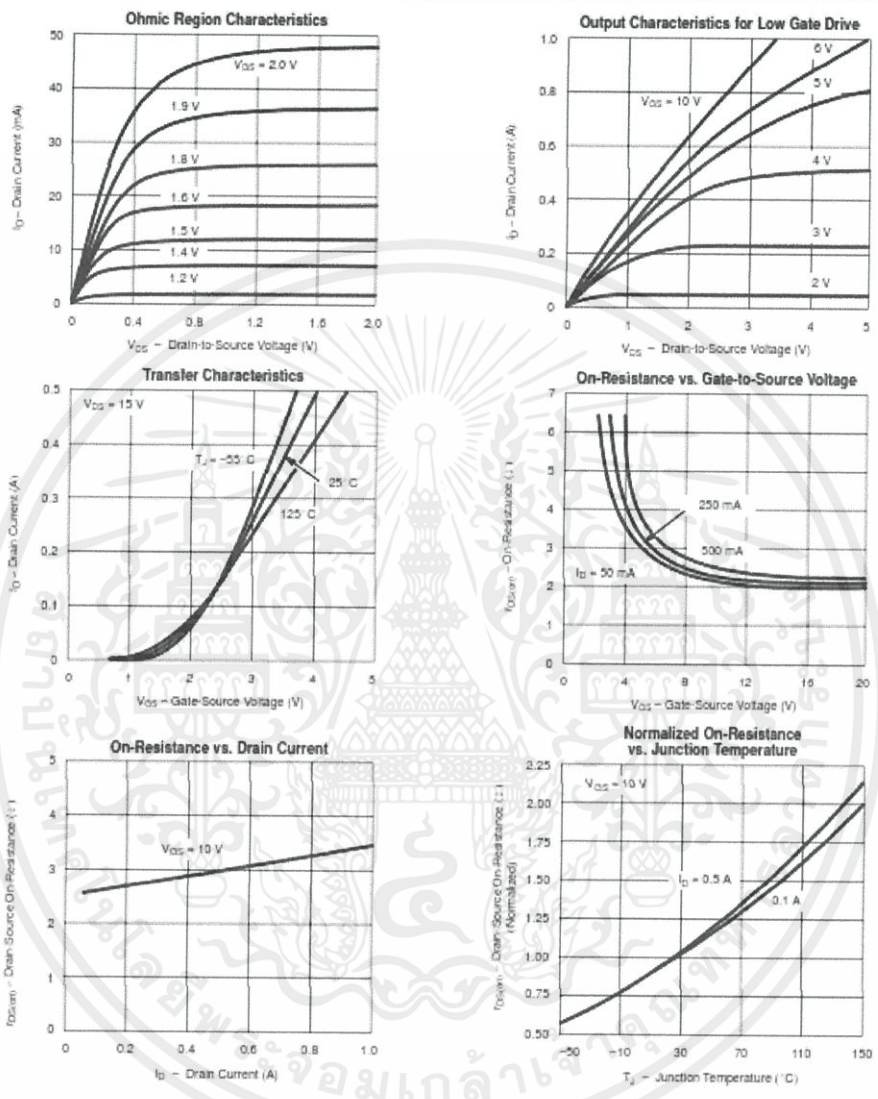
- a. For DESIGN AID ONLY, not subject to production testing.  
 b. Pulse test. PW ≤ 300 μs duty cycle ≤ 2%.  
 c. Switching time is essentially independent of operating temperature.

VNDP06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**TYPICAL CHARACTERISTICS (T<sub>A</sub> = 25 °C UNLESS OTHERWISE NOTED)**



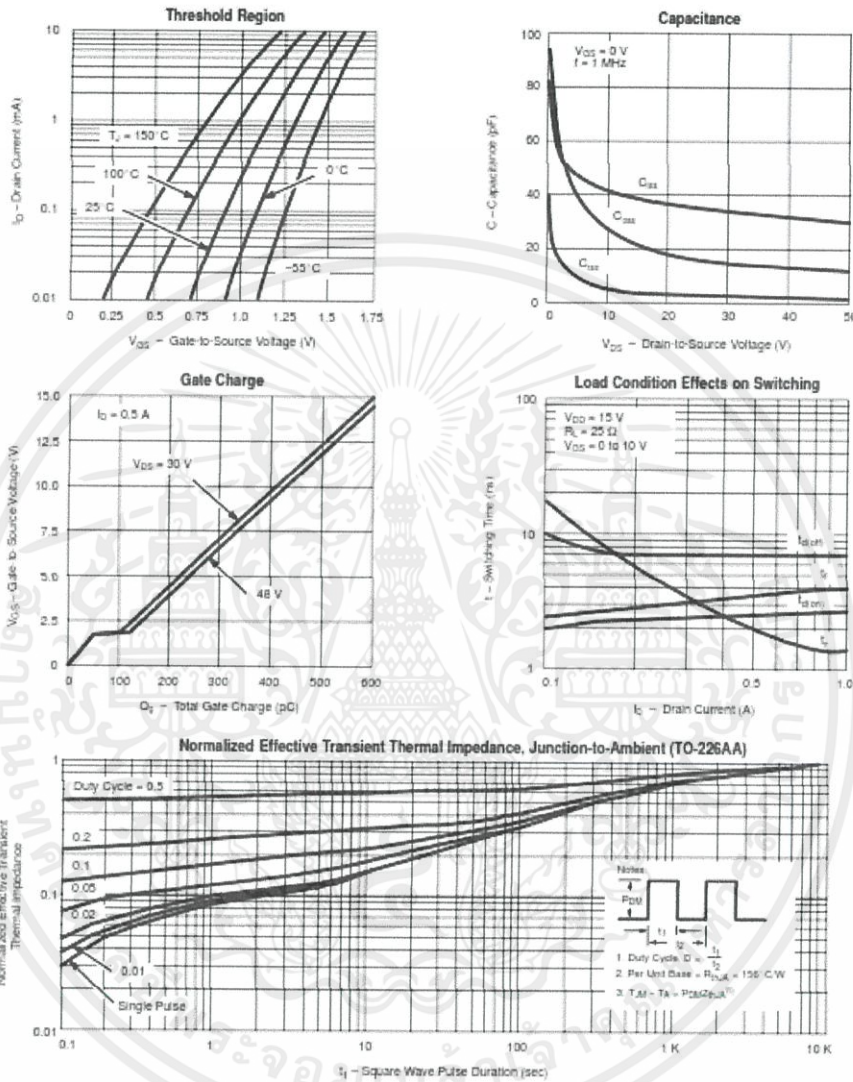
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VN0610L, VN10KLS, VN2222L

Vishay Siliconix



TYPICAL CHARACTERISTICS (T<sub>A</sub> = 25°C UNLESS OTHERWISE NOTED)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกุนนำไปใช้

๒.2.3 Transistor (PNP) 2N3906



2N3906

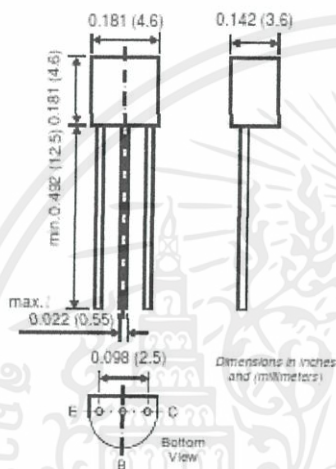
New Product

Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

Small Signal Transistor (PNP)



TO-226AA (TO-92)



Features

- PNP Silicon Epitaxial Planar Transistor for switching and amplifier applications.
- As complementary type, the NPN transistor 2N3904 is recommended.
- On special request, this transistor is also manufactured in the pin configuration TO-18.
- This transistor is also available in the SOT-23 case with the type designation MMBT3906.

Mechanical Data

Case: TO-92 Plastic Package

Weight: approx. 0.18g

Packaging Codes/Options:

- E6/Bulk – 5K per container, 20K/box
- E7/4K per Ammo mag., 20K/box

Maximum Ratings & Thermal Characteristics

Ratings at 25°C ambient temperature unless otherwise specified.

Parameter	Symbol	Value	Unit
Collector-Emitter Voltage	$-V_{CE0}$	40	V
Collector-Base Voltage	$-V_{CB0}$	40	V
Emitter-Base Voltage	$-V_{EB0}$	5.0	V
Collector Current	$-I_C$	200	mA
Power Dissipation	$T_A = 25^\circ\text{C}$	625	mW
	$T_C = 25^\circ\text{C}$	1.5	W
Thermal Resistance Junction to Ambient Air	$R_{\theta JA}$	250 <sup>(1)</sup>	$^\circ\text{C/W}$
Junction Temperature	$T_J$	150	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_S$	-65 to +150	$^\circ\text{C}$

Note: (1) Valid provided that leads are kept at ambient temperature.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2N3906**

Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

**Electrical Characteristics** (T<sub>J</sub> = 25 °C unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
DC Current Gain	hFE	-VCE = 1 V, -IC = 0.1 mA	60	—	—	—
		-VCE = 1 V, -IC = 1 mA	80	—	—	
		-VCE = 1 V, -IC = 10 mA	100	—	300	
		-VCE = 1 V, -IC = 50 mA	60	—	—	
		-VCE = 1 V, -IC = 100 mA	30	—	—	
Collector-Emitter Cutoff Current	-ICEV	-VEB = 3 V, -VCE = 30 V	—	—	50	nA
Emitter-Base Cutoff Current	-IEBV	-VEB = 3 V, -VCE = 30 V	—	—	50	nA
Collector Saturation Voltage	-VCEsat	-IC = 10 mA, -IB = 1 mA	—	—	0.25	V
		-IC = 50 mA, -IB = 5 mA	—	—	0.4	
Base Saturation Voltage	-VBEsat	-IC = 10 mA, -IB = 1 mA	—	—	0.85	V
		-IC = 50 mA, -IB = 5 mA	—	—	0.95	
Collector-Emitter Breakdown Voltage	-V(BR)CEO	-IC = 1 mA, IB = 0	40	—	—	V
Collector-Base Breakdown Voltage	-V(BR)CBO	-IC = 10 μA, IB = 0	40	—	—	V
Emitter-Base Breakdown Voltage	-V(BR)EBO	-IE = 10 μA, IC = 0	5	—	—	V
Input Impedance	hie	-VCE = 10 V, -IC = 1 mA, f = 1 kHz	1	—	10	kΩ
Voltage Feedback Ratio	hre	-VCE = 10 V, -IC = 1 mA, f = 1 kHz	0.5 · 10 <sup>-4</sup>	—	8 · 10 <sup>-4</sup>	—
Current Gain-Bandwidth Product	fr	-VCE = 20 V, -IC = 10 mA, f = 100 MHz	250	—	—	MHz
Collector-Base Capacitance	Ccbo	-VCE = 5 V, f = 100 kHz	—	—	4.5	pF
Emitter-Base Capacitance	Cebo	-VEB = 0.5 V, f = 100 kHz	—	—	10	pF
Small Signal Current Gain	h <sub>ie</sub>	-VCE = 10 V, -IC = 1 mA, f = 1 kHz	100	—	400	—
Output Admittance	h <sub>oe</sub>	-VCE = 1 V, -IC = 1 mA, f = 1 kHz	1	—	40	μS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2N3906

Vishay Semiconductors  
formerly General Semiconductor

### Electrical Characteristics (T<sub>J</sub> = 25 °C unless otherwise noted)

Parameter	Symbol	Test Condition	Min	Typ	Max	Unit
Noise Figure	F	-V <sub>CE</sub> = 5 V, -I <sub>C</sub> = 100 μA, R <sub>G</sub> = 1 kΩ, f = 10...15000 Hz	—	—	4	dB
Delay Time (see fig. 1)	t <sub>d</sub>	-I <sub>B1</sub> = 1 mA, -I <sub>C</sub> = 10 mA	—	—	35	ns
Rise Time (see fig. 1)	t <sub>r</sub>	-I <sub>B1</sub> = 1 mA, -I <sub>C</sub> = 10 mA,	—	—	35	ns
Storage Time (see fig. 2)	t <sub>s</sub>	I <sub>B1</sub> = -I <sub>B2</sub> = 1 mA, -I <sub>C</sub> = 10 mA	—	—	225	ns
Fall Time (see fig. 2)	t <sub>f</sub>	I <sub>B1</sub> = -I <sub>B2</sub> = 1 mA, -I <sub>C</sub> = 10 mA	—	—	75	ns

Fig. 1: Test circuit for delay and rise time

\* total shunt capacitance of test jig and connectors

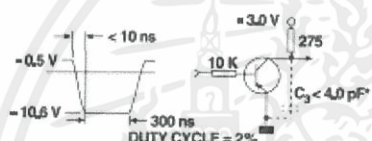
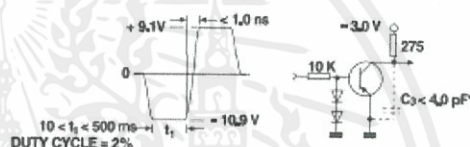


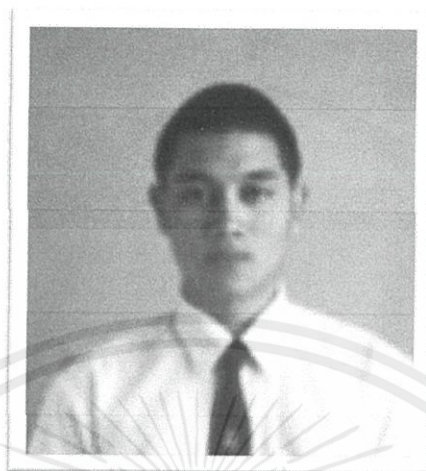
Fig. 2: Test circuit for storage and fall time

\* total shunt capacitance of test jig and connectors



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



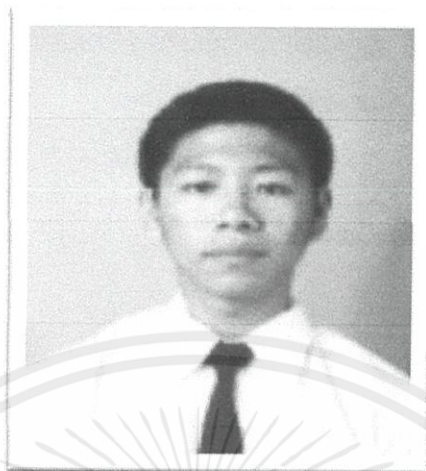
- นายวรยุทธ์ พิทักษ์วงศ์
- เกิดวันที่ 3 กันยายน พ.ศ. 2534
- ที่อยู่ 119/1024 หมู่บ้านศุภาลัยวิลล์ ซอย 24 ถนนรัตนานิเบศร์ ตำบลบางกะสอ อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000
- โทรศัพท์ 089-200-3142
- E-mail : thetae\_wp@hotmail.com
- Facebook : [https://www.facebook.com/THELUUUUUAETAE?ref=tn\\_tnmn](https://www.facebook.com/THELUUUUUAETAE?ref=tn_tnmn)

### ประวัติการศึกษา

- 2007 – 2009 โรงเรียนสามเสนวิทยาลัย เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร  
สายการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์

• 2010 – 2014 หลักสูตรวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากำรนา ไปใช้  
ลาดกระบัง

## ประวัติผู้แต่ง



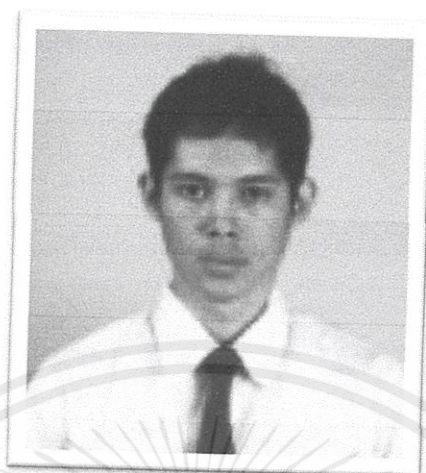
- นายวสิน หริมรุ่งเรือง
- เกิดวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2535
- ที่อยู่ 15/875 หมู่ 10 ซอยสุขุมวิท 107 ถนนสุขุมวิท ตำบลสำโรงเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ 10270
- โทรศัพท์ 089-456-4598
- E-mail : gotzilachan@hotmail.com
- Facebook : [https://www.facebook.com/wasin.rimrungruang?ref=tn\\_tnmn](https://www.facebook.com/wasin.rimrungruang?ref=tn_tnmn)

### ประวัติการศึกษา

- 2007 – 2009 โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว เขตบางแก้ว จังหวัดสมุทรปราการ  
สายการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์
- 2010 – 2014 หลักสูตรวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้แต่ง



- นายนพดล ทองมี
- เกิดวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2534
- ที่อยู่ 1/23 หมู่ 9 ตำบลทอไกร อำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร 66120
- โทรศัพท์ 087-730-7744
- E-Mail : Nopdon\_First@hotmail.com
- Facebook : <https://www.facebook.com/nopdon.first>

### ประวัติการศึกษา

- 2007 - 2009 โรงเรียนบางมูลนากภูมิวิทยาคม อำเภอบางมูลนาก จังหวัดพิจิตร  
สายการเรียน วิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์
- 2010 - 2014 หลักสูตรวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้