



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

รถเข็นผลิตพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

E²-Cart: Eco & Energy Cart

ดอน อิศรากร

สองเมือง นันทขว้าง

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ รถเข็นผลิตพลังงานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

แหล่งเงิน โครงการงบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ.....2556.....จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน.....330000.....บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย.....1.....ปี ตั้งแต่.....ต.ค. 56.....ถึง.....ก.ย. 57.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัยพร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

หัวหน้าโครงการ ดร. ดอนอิศรากรสังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

ผู้ร่วมโครงการ นายสองเมือง นันทขว้างสังกัดคณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการทดลอง และการออกแบบเพื่อพัฒนาล้อรถเข็นให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานจากการเข็นรถเข็นของมนุษย์ให้ได้มากที่สุด โดยนำพลังงานที่ได้นั้นไปจับเก็บลงในแบตเตอรี่ เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป โดยที่ตัวล้อจะเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของล้อโดยการเข็น เป็นหลักการของฟาราเดย์ คือเมื่อขดลวดตัดผ่านแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นตัวล้อจะประกอบไปด้วยส่วนหลักสองส่วนคือ ชุดแม่เหล็ก และชุดขดลวดทองแดง โดยชุดแม่เหล็กจะเป็นชุดที่หมุนไปกับล้อ ติดตั้งบริเวณฝาข้างซ้ายขวา และชุดขดลวดทองแดงจะเป็นชุดที่หยุดอยู่นิ่งโดยการหล่อเรซินติดกับแกนเพลาลำโพงกึ่งกลางระหว่างฝาแม่เหล็กทั้งสองด้าน ในการทดสอบจะนำล้อต้นแบบยึดกับแท่น และหมุนด้วยความเร็วคงที่ที่ความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วเฉลี่ยของคนเดินเข็นรถเข็นปกติ แล้วนำพลังงานที่ได้มาแปลงและจัดเก็บเข้าแบตเตอรี่

Research Title: E²-Cart: Eco & Energy Cart

Researcher: Dr.Don Isarakorn, Mr.Songmoung Nundrakwang

Faculty:Engineering.....**Department:**Instrumentation and Control Engineering.....

ABSTRACT

The research 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 used for control electronics devices. The wheels will generate an energy source from pushing its and also transferring to electrical energy, according to Faraday's Law. The wheel 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 wheel spinning , it brings about electricity. Whit testing the prototype wheels, it is found that give the 2.22 km/hr of velocity. Therefore, We also collect this energy to the battery

กิตติกรรมประกาศ

ทั้งงานวิจัยนี้สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ได้นั้นเกิดจากการที่คณะที่มิวิจัยได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนโครงการงบประมาณเงินรายได้ประจำปีงบประมาณ 2556 ทางทีมงานจึงต้องขอขอบพระคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นอย่างสูง

ดร.ดอน อิศรากร

นายสองเมือง นันทขว้าง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.5 ขอบเขตการศึกษา	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการผลิตกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.1.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	4
2.1.2 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction)	6
2.1.3 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)	7
2.1.4 ขดลวดโซลินอยด์	8
2.1.4.1 หลักการทำงานของขดลวดโซลินอยด์	8
2.1.5 ตัวเหนี่ยวนำ	9
2.1.5.1 ตัวเหนี่ยวนำอากาศ	11
2.1.5.2 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็ก	11
2.1.5.3 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์	11
2.1.5.4 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยด์	11
2.1.5.5 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก	11
2.1.6 ประเภทของตัวเหนี่ยวนำ	12
2.1.6.1 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors)	12
2.1.6.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่า (Variable Inductors)	12
2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ	13
2.1.8 ขดลวดตัวนำ (Coil)	14

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.1.9 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก	16
2.1.9.1 แม่เหล็ก	16
2.1.9.2 สนามแม่เหล็ก	16
2.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง	16
2.2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (FULL-WAVE RECTIFICATION)	16
2.3 แบตเตอรี่	19
2.3.1 ประเภทของแบตเตอรี่	19
2.3.2 แบตเตอรี่ชนิด Lithium-ion	19
2.3.2.1 การชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	20
2.3.2.2 วงจรป้องกันของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	22
2.3.2.3 ข้อแนะนำการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน	23
บทที่ 3 หลักการออกแบบ	
3.1 โครงสร้างทางกายภาพของล้อยำเนิดพลังงาน	25
3.1.1 แม่เหล็ก	25
3.1.2 ขดลวดตัวนำ	25
3.2 การออกแบบล้อยันแบบที่ 1	26
3.2.1 แม่เหล็ก	26
3.2.2 ขดลวดตัวนำ	26
3.3 การออกแบบล้อยันแบบที่ 2	27
3.3.1 แม่เหล็ก	27
3.3.2 ขดลวดตัวนำ	27
3.4 การออกแบบล้อยันแบบที่ 3	28
3.4.1 แม่เหล็ก	28
3.4.2 ขดลวดตัวนำ	29
3.5 การออกแบบล้อยันแบบที่ 4	29
3.5.1 แม่เหล็ก	29
3.5.2 ขดลวดตัวนำ	30
3.6 การออกแบบล้อยันแบบที่ 5	30
3.5.1 แม่เหล็ก	32
3.5.2 ขดลวดตัวนำ	33

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.7 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 6	33
3.6.1 แม่เหล็ก	33
3.6.2 ขดลวดตัวนำ	34
3.8 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 7	34
3.8.1 แม่เหล็ก	34
3.8.2 ขดลวดตัวนำ	35
3.9 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 4	35
3.9.1 ฝาครอบ	36
3.9.2 เฟลา	36
3.9.3 ยางหุ้มล้อ	37
3.9.4 ลูกปืน	37
3.10 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 5	38
3.10.1 ฝาครอบ	38
3.10.2 เฟลา	39
3.10.3 ลูกปืน	39
3.11 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 6	40
3.11.1 ฝาครอบ	40
3.11.2 เฟลา	41
3.11.3 ลูกปืน	41
3.12 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 7	42
3.13 การหล่อเรซินและการประกอบล้อต้นแบบทั้งหมด	44
3.13.1 การหล่อเรซิน	44
3.13.2 การประกอบล้อรถเข็น	47
3.14 ชุดออกแบบการทดลองการต่อล้อแบบอนุกรมและขนาน	49
3.14.1 การต่อล้อ 2 ล้อแบบอนุกรม	49
3.14.2 การต่อล้อ 2 ล้อแบบขนาน	49
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดลองล้อต้นแบบที่ 1	50
4.1.1 การทดลองล้อต้นแบบที่ 1 ต่อกันจำนวน 2 ล้อโดยผ่านวงจรเรียงกระแส	53

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.1.1 การต่อล้อยันแบบที่1 จำนวน 2 ล้อยันบนุกรม	54
4.1.1.2 การต่อล้อยันแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อยันบนาน	56
4.1.2 การทดลองหาพลังงานของล้อยันแบบที่ 1 เข้าตัวเก็บประจุ	58
4.1.2.1 การล้อยันแบบที่ 1 จำนวน 1 ล้อยันเปรียบเทียบกับ 2 ล้อยัน	58
4.2 การทดลองล้อยันแบบที่ 2	60
4.3 การทดลองล้อยันแบบที่ 3	62
4.4 การทดลองล้อยันแบบที่ 4	64
4.4.1 การทดลองหาพลังงานของล้อยันแบบที่ 4 เข้าตัวเก็บประจุ	67
4.4.1.1 การต่อล้อยันแบบที่ 4 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	67
4.5 การทดลองล้อยันแบบที่ 5	68
4.6 การทดลองล้อยันแบบที่ 6	71
4.6.1 การทดลองหาพลังงานของล้อยันแบบที่ 6 เข้าตัวเก็บประจุ	74
4.6.1.1 การต่อล้อยันแบบที่ 6 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	74
4.7 การทดลองล้อยันแบบที่ 7	75
4.8 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อยันแบบรถเข็น	77
4.8.1 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อยันแบบที่ 1	77
4.8.2 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อยันแบบที่ 3 ถึงล้อยันแบบที่ 7	78
4.9 การประจุพลังงานจากล้อยันแบบลงในแบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน	79
4.9.1 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบชาร์จต่อเนื่อง	79
4.9.2 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานชาร์จแบบช่วงๆ	81
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	
5.1 สรุปผลการทดลอง	84
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางแก้ไข	84
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา	85
เอกสารอ้างอิง	86
ประวัติผู้จัดทำ	88

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงหลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ [2]	4
2.2 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ [3]	5
2.3 แสดงขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก [3]	5
2.4 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด	7
2.5 แสดงถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวด[4]	8
2.6 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่มีกระแสไหล [4]	8
2.7 แสดงการเพิ่มเหล็กอ่อนเข้ามาเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก [4]	8
2.8 แสดงการเคลื่อนที่ของแกนกระทุ้ง [5]	9
2.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ [5]	10
2.10 ชนิดของตัวเหนี่ยวนำ [6]	10
2.11 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ [6]	12
2.12 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ [6]	12
2.13 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ [9]	17
2.14 ไดโอด D1 และ D2 ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_{out})[9]	17
2.15 ไดโอด D3 และ D4 ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_{out})[9]	17
2.16 รูปคลื่น V_{out} เปรียบเทียบกับ V_{in} ของวงจรกระแสแบบบริดจ์[9]	18
2.17 แสดงค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด V_p ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น[9]	18
2.18 แรงดันและกระแสของเซลล์ลิเทียมไอออนขณะชาร์จ [11]	20
2.19 ขอบเขตการใช้งานที่ปลอดภัยของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน[11]	21
2.20 แสดงการสูญเสียความจุถาวรของเซลล์ลิเทียมตามฟังก์ชันของอุณหภูมิและระดับการชาร์จ	22
2.21 แสดงวงจรจำกัดแรงดันและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ปลอดภัย	23
3.1 ภาพรวมหลักการทำงานของการทำงานการเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นซ็อบปิ้ง	25
3.2 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อต้นแบบที่ 1	26
3.3 ลักษณะการวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 1	26
3.4 ชุดขดลวดตัวนำของล้อต้นแบบที่ 1	27
3.5 ชุดขดลวดตัวนำของล้อต้นแบบที่ 2	27
3.6 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อแบบที่ 3	28
3.7 การวางแม่เหล็กของล้อแบบที่ 3	28
3.8 ชุดขดลวดตัวนำของล้อแบบที่ 3	29
3.9 การวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 4	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กล๊อตต้นแบบที่ 4 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 20 มม.	30
3.11 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กล๊อตต้นแบบที่ 5 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 90 มม.	31
3.12 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กล๊อตต้นแบบที่ 6 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 45 มม.	31
3.13 แม่เหล็กไนโอโดเมียมของล๊อตต้นแบบที่ 5	32
3.14 การวางแม่เหล็กของล๊อตต้นแบบที่ 5	32
3.15 ชุดขดลวดตัวนำของล๊อตต้นแบบที่ 5	33
3.16 ชุดขดลวดตัวนำของล๊อตต้นแบบที่ 6	34
3.17 แม่เหล็กของล๊อตต้นแบบที่ 7	34
3.18 ชุดขดลวดตัวนำของล๊อตต้นแบบที่ 7	35
3.19 ฝาครอบของล๊อตต้นแบบที่ 1 ถึงล๊อตต้นแบบที่ 4	36
3.20 เพลลาของล๊อตต้นแบบที่ 1 ถึงล๊อตต้นแบบที่ 4	36
3.21 ยางหุ้มล๊อตของล๊อตต้นแบบที่ 1 ถึงล๊อตต้นแบบที่ 4	37
3.22 ลูกปืนของล๊อตต้นแบบที่ 1 ถึงล๊อตต้นแบบที่ 4	37
3.23 ฝาครอบของล๊อตต้นแบบที่ 5	38
3.24 เพลลาของล๊อตต้นแบบที่ 5	39
3.25 ลูกปืนของล๊อตต้นแบบที่ 5	39
3.26 ฝาครอบของล๊อตต้นแบบที่ 6	40
3.27 เพลลาของล๊อตต้นแบบที่ 6	41
3.28 ส่วนแกนยึดขดลวดของล๊อตต้นแบบที่ 7	42
3.29 ฝาครอบของล๊อตต้นแบบที่ 7	42
3.30 ตำแหน่งขดลวดของล๊อตต้นแบบที่ 7	43
3.31 ตำแหน่งของแม่เหล็กเมื่อเทียบกับขดลวดของล๊อตต้นแบบที่ 7	43
3.32 การเชื่อมต่อขดลวดตัวนำของล๊อตต้นแบบทั้ง 6 ล็อต	44
3.33 แบบหล่อเรซินของล๊อตต้นแบบที่ 1 ถึงล๊อตต้นแบบที่ 4	44
3.34 แบบหล่อเรซินของล๊อตต้นแบบที่ 5 และล๊อตต้นแบบที่ 6	45
3.35 การหล่อเรซินของขดลวดล๊อตต้นแบบที่ 1 ถึงล๊อตต้นแบบที่ 4	45
3.36 การหล่อเรซินของขดลวดล๊อตต้นแบบที่ 5 และล๊อตต้นแบบที่ 6	45
3.37 การหล่อเรซินของขดลวดล๊อตต้นแบบที่ 7	46
3.38 การเชื่อมสายไฟของขดลวดล๊อตต้นแบบที่ 7	46
3.39 การติดแม่เหล็กเข้ากับฝาครอบล๊อตเรซินทั้ง 2 ฝา	47

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.40 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ	47
3.41 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ	48
3.42 รถเข็นกำเนิดพลังงาน	48
3.43 การต่อล้อย 2 ล้อ แบบอนุกรม	49
3.44 การต่อล้อย 2 ล้อ แบบขนาน	49
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	52
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน	52
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	53
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	53
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	55
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	55
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	57
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	57
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	57
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา	59
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลาเมื่อต่อแบบอนุกรม	59
4.12 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลาเมื่อต่อแบบขนาน	59
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	61
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	61
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	61
4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	63
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	63
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	63
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	65
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน	65
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	66
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	66
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา	67
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	69
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน	69

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	70
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	70
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	72
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน	72
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	73
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	73
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา	74
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	76
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับค่าความต้านทาน	76
4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	76
4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	77
4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน	77
4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน	78
4.39 วงจรการประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่จากถ่านไฟฉายผ่านวงจรจัดการพลังงาน	79
4.40 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง	80
4.41 ทดลองใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อ และการเซ็นเซอร์ช้อปป์จากการใช้งานจริงประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน	80
4.42 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าความชื้นซาบทางแม่เหล็กของแกนชนิดต่างๆ [7]	13
2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า [8]	14
4.1 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่1ผ่านวงจรเรียงกระแส	51
4.2 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบอนุกรมผ่านวงจรเรียงกระแส	54
4.3 ผลการทดลองของการต่อล้อยึดแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบขนานผ่านวงจรเรียงกระแส	56
4.4 การทดลองล้อยึดแบบที่ 1 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	58
4.5 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่ 2 ผ่านวงจรเรียงกระแส	60
4.6 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่3ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	62
4.7 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่4ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	64
4.8 การทดลองล้อยึดแบบที่4 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	67
4.9 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่5 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 90 มม.) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	68
4.10 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่6 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 45 มม.) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส	71
4.11 การทดลองล้อยึดแบบที่6 จำนวน 1 ล้อ ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	74
4.12 ผลการทดลองของล้อยึดแบบที่7	75
4.13 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของ การปั่นล้อยึดขึ้นด้วยมอเตอร์ กับการเข็นรถเข็นข้อปึงจากการใช้งานจริง ที่ผ่านวงจรจัด การพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง	81
4.14 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของ การปั่นล้อยึดขึ้นด้วยมอเตอร์ กับการเข็นรถเข็นข้อปึงจากการใช้งานจริง ที่ผ่านวงจรจ การพลังงานลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการศึกษา

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

จากที่กล่าวมาข้างต้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนออุปกรณ์กำเนิดพลังงานที่สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้จากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน โดยจะเห็นว่ามีการใช้รถเข็นหลากหลายชนิดในการทำกิจกรรมต่างๆ มากมายเช่น รถเข็นเด็ก รถเข็นขายสินค้า รถเข็นช้อปปิ้ง เป็นต้น และเนื่องจากปัจจุบันจะเห็นว่าผู้คนใช้ระยะเวลาไม่น้อยไปกับการเลือกซื้อสินค้าต่าง ๆ ภายในห้างสรรพสินค้า โดยใช้สิ่งอำนวยความสะดวกในการขนส่งสินค้าคือรถเข็น ซึ่งจะต้องเข็นไปด้วยทุกที่ที่เลือกซื้อสินค้า และส่วนประกอบของรถเข็นที่มีพลังงานกลมากพอที่จะนำมาผลิตพลังงานได้ คือส่วนล้อของรถเข็นจึงทำการออกแบบล้อรถเข็นเป็นอุปกรณ์กำเนิดพลังงาน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและนำพลังงานที่ได้ไปปรับระดับให้อยู่ในระดับที่สามารถใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

โครงการขึ้นนี้มีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้จากการหมุนของล้อรถเข็นโดยการอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า
2. เพื่อนำพลังงานที่ได้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ต่อไป เช่น นำไปชาร์ตแบตเตอรี่ เป็นต้น

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ

การผลิตกระแสไฟฟ้าที่ได้จากล้อรถเข็นนั้นจะประกอบด้วยกัน 2 ส่วน คือ ส่วนที่เคลื่อนที่(ฝาครอบล้อ)และส่วนที่ไม่เคลื่อนที่(เพลาลูกเบี้ยว)โดยมีการติดแม่เหล็กไว้กับฝาครอบล้อและแกนขดลวดที่ติดอยู่กับเพลาลูกเบี้ยว เมื่อขดลวดเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก หรือสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดแล้วจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าขึ้น โดยในขั้นตอนการทำงานแรกจะมีการออกแบบโครงสร้างของล้อรถเข็นในรูปแบบที่แตกต่างกันเพื่อที่จะนำมาเป็นต้นแบบล้อรถเข็นที่สามารถให้พลังงานที่เหมาะสม สำหรับการออกแบบล้อรถเข็นรูปแบบต่างๆ นั้นจะอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก ซึ่งมีการเปลี่ยนขนาดรูปทรงของแม่เหล็ก ขนาดของขดลวดทองแดง รูปทรงของขดลวดตัวนำ จำนวนชั้นในการวางแม่เหล็ก และขนาดโครงสร้างของล้อโดยการทดลองนั้นจะทำการเข็นรถเข็นด้วยความเร็วเดินช้า (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)บันทึกค่าที่ได้จากการทดลองและสรุปผลการทดลองต่อไป

เริ่มต้นด้วยการออกแบบล้อกำเนิดพลังงาน ในเบื้องต้นจะยึดหลักตามโครงสร้างของล้อรถเข็นเดิมที่มีอยู่ทั่วไป จึงได้ออกแบบล้อต้นแบบที่ 1 เป็นล้อต้นแบบสำหรับการพัฒนาล้อต้นแบบอื่น จากนั้นมีการพัฒนาโครงสร้างแบบล้อใหม่โดยมีการคำนวณพื้นที่ที่ใช้จัดวางแม่เหล็กและขดลวดให้เหมาะสม โดยมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของแม่เหล็ก ขนาดล้อ ขนาดของขดลวดทองแดง และจำนวนแม่เหล็ก ตามแบบโครงสร้างของล้อต้นแบบที่ 2-7

หลังจากออกแบบล้อรถเข็นทั้ง 7 แบบ จะเลือกต้นแบบที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานโดยการนำพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบนั้นผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบต่างๆ ซึ่งสิ้นสุดแล้วจะสามารถนำพลังงานที่เก็บเกี่ยวได้ชาร์จเข้าไปเก็บไว้ในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานกลที่เกิดจากการเข็นรถเข็นโดยเปล่าประโยชน์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่างๆ
- 2.พลังงานที่ได้เป็นพลังงานสะอาดและเกิดขึ้นอย่างไม่มีวันสิ้นสุดโดยไม่ต้องอาศัยการประจุไฟฟ้าจากภายนอก
3. เพิ่มมูลค่าให้กับรถเข็นซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงและประยุกต์เข้ากับรถเข็นแบบต่างๆได้
- 4.เกิดการพัฒนาค่ายอดโครงสร้างของล้อรถเข็นซึ่งสามารถผลิตพลังงานที่ได้มากกว่ารูปแบบเดิม

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ในการศึกษาโครงการนี้เป็นการศึกษาและค้นคว้าการเก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้จากการเคลื่อนที่ของรถเข็นซิปป์ ซึ่งมีการพัฒนาโครงสร้างของล้อรถเข็นให้เป็นล้อต้นแบบที่สามารถกำเนิดพลังงานได้จากการเคลื่อนที่ได้ด้วยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวด จากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ ซึ่งเป็นการออกแบบตัวกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็ก โดยจะกำหนดให้ขดลวดตัวนำอยู่กับที่ และให้ตัดผ่านกับสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าภายในขดลวดตัวนำนั้นตามที่ต้องการ โดยล้อรถเข็นต้นแบบนี้สามารถที่จะผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาได้ ซึ่งจะสามารถนำพลังงานไฟฟ้าที่ได้นี้ไปใช้ประโยชน์โดยนำไปประจุเข้าไปเก็บยังแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ด้วยวงจรจัดการพลังงานต่างๆ

บทที่ 2

ทฤษฎี และความรู้ที่เกี่ยวข้อง

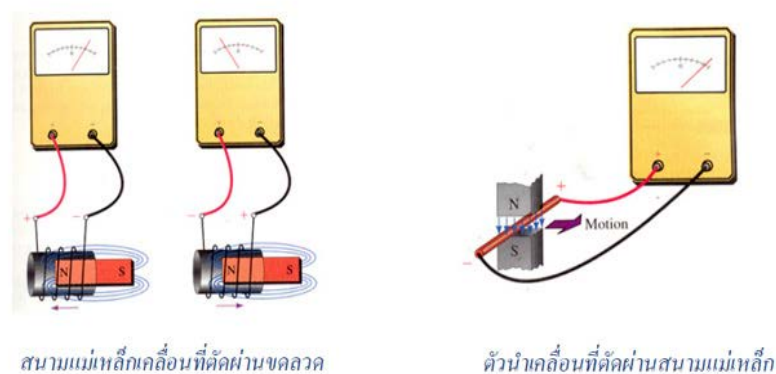
จากที่กล่าวมาข้างต้นในบทที่ 1 แล้วว่า โครงการงานการเก็บเกี่ยวพลังงานจากระณขัณขัณขัณจะอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดตัดกันกับสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นเราจึงได้ศึกษาค้นคว้า และหาข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้อง ซึ่งจะนำมาประยุกต์ใช้กับการทำโครงการชิ้นนี้เพื่อให้โครงการชิ้นนี้เป็นไปได้ตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ ดังนั้นในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงองค์ประกอบต่างๆ เพื่อที่จะนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งหลักการทฤษฎีต่างๆก็จะประกอบไปด้วย หลักการพื้นฐานของการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ เช่น ทฤษฎีการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของฟาราเดย์ กฎของเลนซ์กฎมือขวาของเฟรมมิงกฎไดนาโม ทฤษฎีแม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก รวมไปถึงรูปแบบของการวางขดลวดและการพันขดลวดรูปแบบต่างๆ เพื่อที่จะผลิตให้ได้กระแสไฟฟ้าในประสิทธิภาพสูงสุด

2.1 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของการผลิตกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

2.1.1 กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ทุกวันนี้ ทั้งที่ใช้ทั่วไปตามบ้านเรือน หรือสถานที่ต่างๆ นั้น แทบทั้งหมดจะถูกผลิตขึ้นจากหลักการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีการเหนี่ยวนำ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าแบบนี้ เรามักจะคุ้นกับชื่อของ ไดนาโม [1]

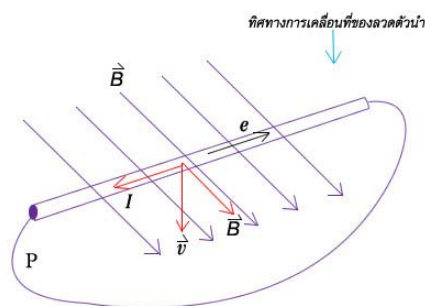
จากการทดลองของไมเคิลฟาราเดย์ และเฮนรีเฮวิตเพื่อที่จะต้องการทราบว่า ฟลักซ์แม่เหล็กทำให้เกิดมีกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำได้หรือไม่ สรุปได้ว่าเข็มของแอมมิเตอร์เบนไปจากตำแหน่งเดิม แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นในขดลวดทองแดงในทางกลับกันถ้าให้ขดลวดทองแดงอยู่กับที่ แต่เคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กไป-มาให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดขดลวดทองแดงเปลี่ยนแปลงก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าผ่านแอมมิเตอร์ได้เช่นกัน นั่นคือ มีกระแสไฟฟ้าในขดลวดทองแดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงหลักการเบื้องต้นของการเหนี่ยวนำ [2]

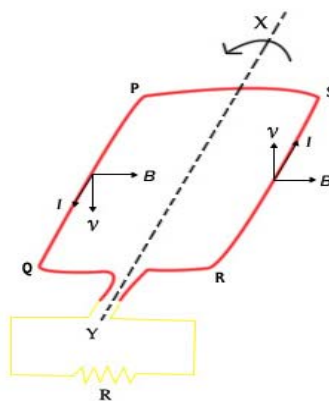
กระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำเกิดจากฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำมีการเปลี่ยนแปลง เรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า(electromagnetic induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(induced current)

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 แสดงว่าปลายทั้งสองของเส้นลวดตัวนำทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ(induced electromotive force) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในเส้นลวดตัวนำ [3]

จากที่กล่าวมาแล้วเป็นการใช้เส้นลวดตัวนำตรงเคลื่อนที่ตัดฟลักซ์แม่เหล็กถ้าให้ขดลวดตัวนำรูปสี่เหลี่ยมหมุนรอบจุดตัดฟลักซ์แม่เหล็กในแนวตั้งฉากกับทิศสนามแม่เหล็กจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดรูปสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงขดลวดตัวนำหมุนตัดฟลักซ์แม่เหล็ก[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 ได้และนำขดลวดนี้เคลื่อนที่เข้าใกล้หรือออกห่างแท่งแม่เหล็ก จะพบว่าขณะที่ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่นั้น จะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นซึ่งสังเกตได้จากการเบนของเข็มชี้ของแอมมิเตอร์แต่ขณะที่ขดลวดตัวนำอยู่นิ่งจะไม่มีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเนื่องจากกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นผลที่ได้จากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อฟลักซ์แม่เหล็กผ่านที่ขดลวดตัวนำมีค่าเปลี่ยนแปลงจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นในขดลวดตัวนำ ซึ่งเป็นผลให้กระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำนั้น

2.1.2 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction)

ไมเคิลฟาราเดย์ได้ทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง และสรุปได้ว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในขดลวดเป็นส่วนกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดนั้นเมื่อเทียบกับเวลา ข้อความนี้เรียกว่า กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Faraday's Law of Induction) เรียกสั้นๆ ว่า กฎของฟาราเดย์ซึ่งเป็นกฎพื้นฐานของไฟฟ้าและแม่เหล็กดังสมการที่ 2.1

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

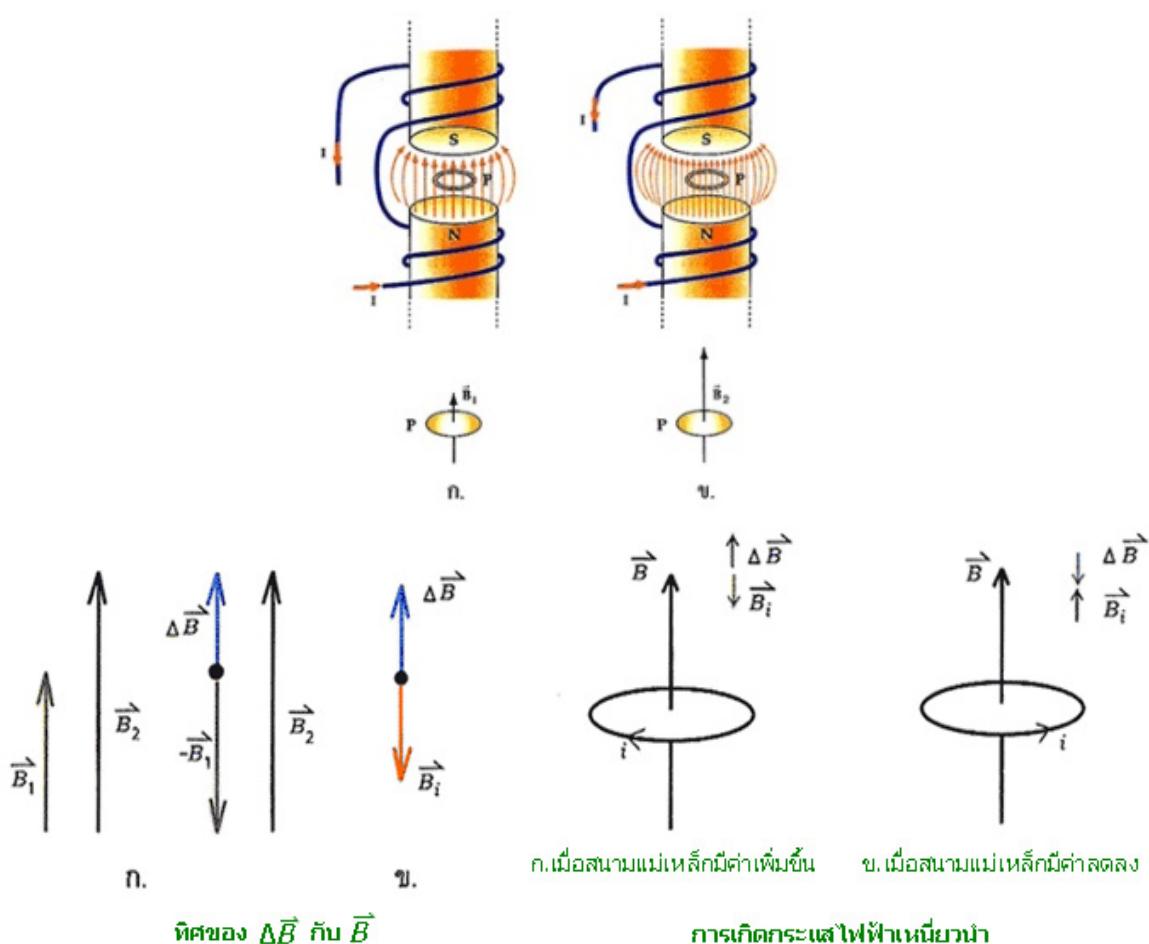
เมื่อ	$\mathcal{E}$	คือ	แรงเคลื่อนไฟฟ้า	หน่วย โวลต์
	ϕ_B	คือ	ฟลักซ์แม่เหล็ก	หน่วย เวเบอร์
	t	คือ	เวลา	หน่วย วินาที
	N	คือ	จำนวนรอบขดลวด	

พิจารณาระนาบของขดลวดอยู่ในแนวเดียวกับสนามแม่เหล็ก ในตอนแรกไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กผ่านขดลวดเมื่อขดลวดหมุนจากตำแหน่งเริ่มต้น ระนาบของขดลวดจะทำมุมต่างๆกับสนามแม่เหล็ก ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและมีค่าสูงสุดเมื่อระนาบของขดลวดตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก สรุปคือในช่วงการหมุนของขดลวดที่ระนาบขดลวดหมุนกวาดมุมไป 90 องศาจากตำแหน่งเริ่มต้นนี้ ฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงดังนั้นจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำขดลวดต่อไปจะศึกษาว่าถ้าขดลวดอยู่กับที่และฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดเปลี่ยนแปลงจะมีกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นหรือไม่และกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กับทิศทางการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กอย่างไร

2.1.3 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

การหาทิศของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดตัวนำ หาได้จากกฎของเลนซ์ (Lenz's law) ซึ่งมีใจความว่า “ แรงแเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดจะเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในทิศที่จะทำให้เกิดฟลักซ์แม่เหล็กใหม่ขึ้นมาต้านการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กเดิมที่ตัดผ่านขดลวดนั้น ”

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

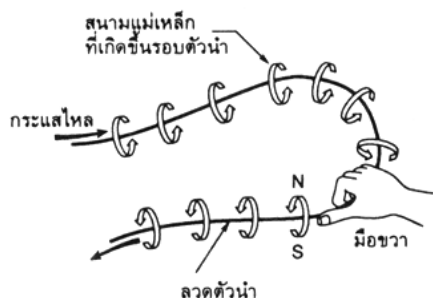


รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวด

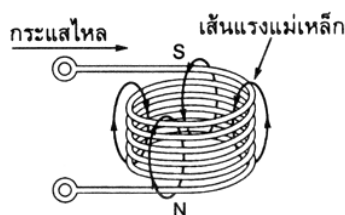
2.1.4 ขดลวดโซลินอยด์

2.1.4.1 หลักการทำงานของขดลวดโซลินอยด์

เออร์สเตด เป็นผู้ตั้งกฎ ค้นพบว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดตัวนำใดๆ ก็ตามจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบๆ ตัวนำนั้น ดังรูปที่ 2.5 และยังออกกฎมือขวามาให้ดูทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กด้วย คือถ้าเอามือขวากำรอบเส้นลวด โดยนิ้วหัวแม่มือแทนทิศทางกระแสไหล นิ้วที่เหลือทั้งหมด (ซึ่งมี 4 นิ้วและจะหันไปทางเดียวกัน) จะแสดงทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กจากขั้วใต้ไปขั้วเหนือ

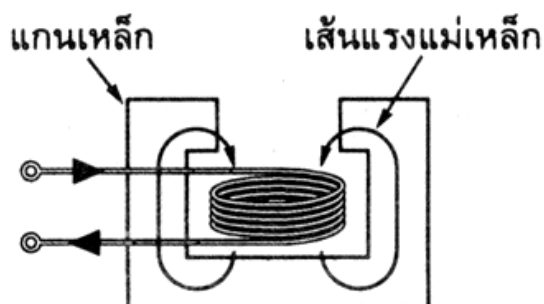


รูปที่ 2.5 แสดงถึงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไหลผ่านเส้นลวด[4]

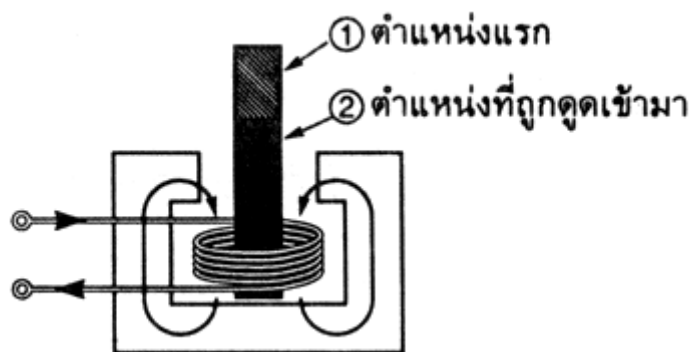


รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในขดลวดที่มีกระแสไหล [4]

เมื่อนำเส้นลวดที่มีความยาวมากกว่าเดิมมาขดเป็นวงๆ หลายๆ วงก็จะเกิดลักษณะของขดลวดขึ้น ดังรูปที่ 2.6 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดแต่ละขดจะอยู่ในทิศทางเสริมกัน และก่อกำเนิดเป็นเส้นแรงแม่เหล็กถาวรแท่งหนึ่งซึ่งพร้อมที่จะดูดสารแม่เหล็กทันที แต่เนื่องจากสภาพรอบๆ ขดลวดอาจเป็นอากาศเส้นแรงแม่เหล็กจึงไม่เข้มข้นมากนัก



รูปที่ 2.7 แสดงการเพิ่มเหล็กอ่อนเข้ามาเพื่อเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก [4]



รูปที่ 2.8 แสดงการเคลื่อนที่ของแกนกระทุ้ง [5]

มีข้อแตกต่างอยู่ระหว่างโซลินอยด์ไฟตรง และโซลินอยด์ไฟสลับ คือในโซลินอยด์ไฟตรง กระแสที่ไหลในขดลวดจะค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไม่ว่าแกนกระทุ้งจะอยู่ในตำแหน่งใดก็ตาม แต่โซลินอยด์ไฟสลับกระแสในขณะที่ยกแกนกระทุ้งอยู่นอกขดลวดจะมีค่าสูงและเมื่อแกนกระทุ้งถูกดูดเข้ามาจนสุดขดลวด กระแสจะลดต่ำลงลักษณะแบบนี้เองที่ทำให้ต้องระวังอย่าให้เกิดการกระทุ้งในโซลินอยด์ไฟสลับ เพราะจะทำให้เกิดกระแสมาก ๆ ไหลค้างอยู่ ทำให้ขดลวดร้อนขึ้น และอาจจะไหม้เสียหายได้

ในโครงสร้างของโซลินอยด์แบบไฟสลับนั้น จะต้องพันขดลวด Shaded coil หรือ แหวน (Ring) ซึ่งเป็นลวดพัน รอบแกนเหล็กเพียงรอบเดียวหรือไม่ก็รอบลวดวงจรเอาไว้เลย จุดประสงค์ที่พันไว้เพราะในไฟสลับกระแสจะลดลงมาเป็นศูนย์ ทำให้แรงดูดแม่เหล็กลดลง และทำให้เกิดเสียงขึ้น และการดูดก็ไม่แน่นแผ่นขดลวดแหวนที่เพิ่มเติมเข้าไปนี้ จะทำให้วงจรแม่เหล็กเกิดเป็นสภาพ 2 เฟสคือ แม้ในขณะที่กระแสเป็นศูนย์ก็ตาม ขดลวดแหวนซึ่งมีกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำกับสนามแม่เหล็กจะยังคงมีแรงแม่เหล็กมาเสริมการดูดในช่วงนี้ได้ แต่ก็ทำให้เกิดการสูญเสีย (Loss) ของความร้อนในขดลวดบ้างเป็นข้อแลกเปลี่ยน

2.1.5 ตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งโดยมีการใช้งานกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปมีตั้งแต่ขนาดเล็กมาก ๆ ประมาณปลายนิ้วมือจนกระทั่งถึงขนาดใหญ่เท่าห้องปฏิบัติการลักษณะของตัวเหนี่ยวนำจะเป็นการนำเอาลวดตัวนำมาพันเรียงกันเป็นขดลวดอาจมีจำนวนรอบไม่ก็รอบจนกระทั่งถึงพันรอบแล้วแต่ค่าความเหนี่ยวนำที่ต้องการใช้งานการพันขดลวดของตัวเหนี่ยวนำอาจพันบนแกนชนิดต่าง ๆ หรือเป็นแบบไม่มีแกน (แกนอากาศ) ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.9

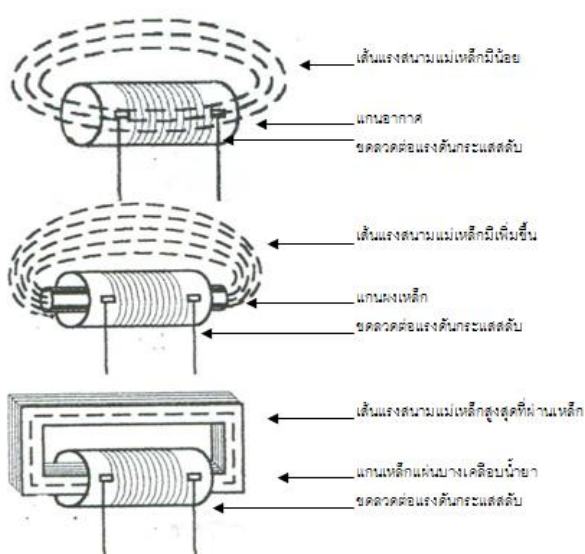


รูปที่ 2.9 ตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้าประเภทต่างๆ [5]

หลักการทำงานของตัวเหนี่ยวนำใช้หลักการสนามแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดจะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดซึ่งจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำขึ้นตัวเหนี่ยวนำแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือแบบค่าคงที่และแบบปรับค่าได้ตัวเหนี่ยวนำเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าอินดักเตอร์ หรือ คอยล์ (Coil) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าตัวแอล (L) หน่วยของการเหนี่ยวนำคือเฮนรี (Henry)

การเรียกชื่อตัวเหนี่ยวนำจะเรียกตามโครงสร้างของตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยขดลวด (Coil) พันรอบแกน (Core) ซึ่งแกนนี้อาจจะเป็นแกนอากาศแกนเหล็กหรือแกนเฟอร์ไรท์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของการเหนี่ยวนำไฟฟ้างดังรูปที่ 2.10 แบ่งออกได้เป็น

- 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

ตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับทำมาจากวัสดุที่เป็นฉนวนเช่น คาร์บอนพลาสติกไฟเบอร์และ PVC เป็นต้นหรืออาจพันลอยๆไว้โดยไม่มีอะไรรองรับ ตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้นิยมนำไปใช้งานกับพวกความถี่สูงๆหรือความถี่วิทยุ(RF)จึงมักเรียกตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ว่าRF icoตัวเหนี่ยวนำแกนอากาศเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าความเหนี่ยวนำต่ำ เพราะแกนไม่สามารถช่วยเสริมค่าความเหนี่ยวนำได้การจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นต้องใช้จำนวนรอบในการพันขดลวดเพิ่มขึ้น

2.1.5.2 ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผงเหล็กชนิดอัดแน่นโดยนำผงเหล็กผสมกับกาวอัดแน่นเป็นแท่งช่วยลดการสูญเสียสัญญาณจากกระแสไหลวน (Eddy Current)ลงได้ สัญญาณส่งผ่านตัวเหนี่ยวนำแกนผงเหล็กอัดได้สูงขึ้นเกิดการสูญเสียสัญญาณภายในตัวเหนี่ยวนำลดลงใช้งานได้ดีในย่านความถี่สูงๆมีความเหนี่ยวนำสูงแต่มีขนาดเล็ก

2.1.5.3 ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์

ตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเฟอร์ไรต์ ส่วนผสมของเฟอร์ไรต์มีความแตกต่างกันหลายอย่างเช่นแมกนีเซียมกับสังกะสีแมกนีเซียมกับแมงกานีสแมกนีเซียมกับทองแดงนิกเกิลกับสังกะสีและแมงกานีสกับสังกะสี เป็นต้น แต่ละชนิดของเฟอร์ไรต์ให้ความเข้มของค่าความเหนี่ยวนำแตกต่างกันข้อดีของตัวเหนี่ยวนำแกนเฟอร์ไรต์คือสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆ ได้ใช้งานได้ดีทั้งความถี่ต่ำและความถี่สูง

2.1.5.4 ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยต์

ตัวเหนี่ยวนำแกนทอรอยต์เป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยผลึกชนิดอัดแน่นหรือเฟอร์ไรต์โดยสร้างขึ้นเป็นรูปวงแหวนขดลวดถูกพันรอบแกนทอรอยต์โดยรอบ ข้อดีของการใช้แกนทอรอยต์คือเส้นแรงแม่เหล็กจะไม่แพร่กระจายออกไปภายนอกและสนามแม่เหล็กจากภายนอกก็ไม่เข้ามารบกวนสามารถทำให้ตัวเหนี่ยวนำแบบนี้มีความเหนี่ยวนำสูงในขนาดที่สร้างได้เล็ก ลงนิยมนำไปใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงที่ต้องการหาค่าความเหนี่ยวนำสูงและมีสนามแม่เหล็กรบกวนต่ำ

2.1.5.5 ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็ก

ตัวเหนี่ยวนำแกนเหล็กแผ่นเป็นตัวเหนี่ยวนำที่แกนหรือฐานรองรับเส้นลวดทำด้วยเหล็กแผ่นบางวางซ้อนกันเหล็กแผ่นบางแต่ละแผ่นเคลือบฉนวนไว้เพื่อช่วยลดการสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนและช่วยทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นการใช้งานนิยมนำไปใช้งานในย่านความถี่ต่ำในย่านความถี่เสียง(AF)มักเรียกว่าAF icoเช่นใช้เป็นตัวกรองไฟ (Filter) แรงดันไฟสลับเป็นแรงดันไฟตรง เป็นต้น

2.1.6 ประเภทของตัวเหนี่ยวนำ

ตัวเหนี่ยวนำที่ผลิตออกมาในปัจจุบันมีหลายแบบหลายขนาดวัสดุที่ใช้ทำแกนที่นิยมก็คือ แกนอากาศ, แกนเหล็กและแกนเฟอร์ไรท์เราสามารถแบ่งตัวเหนี่ยวนำได้ 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) และตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors)

2.1.6.1 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ (Fixed Inductors) คือตัวเหนี่ยวนำที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ โดยปกติตัวเหนี่ยวนำประเภทนี้ ทำมาจากขดลวดทองแดงแกนที่ใช้พันขดลวดจะมีปลายลวดยื่นออกมาทั้งสองข้างรูปร่างโดยทั่วไปจะเป็นแกนยาวแบบทรงกระบอกดังรูปที่ 2.11 มีชื่อเรียกแตกต่างกันเช่น โซลินอยด์ เซอร์เฟสเมาท์ โซลิดคอร์รอยด์ และแบบแถบสี่ เป็นต้น



รูปที่ 2.11 ตัวเหนี่ยวนำแบบค่าคงที่ [6]

2.1.6.2 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่า (Variable Inductors)

ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ (Variable Inductors) ดังรูปที่ 2.12 นิยมใช้ในเครื่องรับวิทยุค่าการเหนี่ยวนำจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของแกนหมุนที่สามารถปรับสกรูเลื่อนตำแหน่งของขดลวดให้เข้าหรือออกเพื่อเปลี่ยนค่าของความเหนี่ยวนำ ถ้าแกนเคลื่อนที่ออกมาจนสุดค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่าต่ำ แต่ถ้าหมุนสกรูให้แกนเคลื่อนที่เข้าไปในขดลวดมากจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วยในการปรับควรใช้เครื่องมือที่ทำด้วยพลาสติก หรืออุปกรณ์จำพวกที่ไม่ใช่โลหะ เนื่องจากวัสดุที่ทำมาจากโลหะจะไปรบกวนการเกิดสนามแม่เหล็กและมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำได้



รูปที่ 2.12 ตัวเหนี่ยวนำแบบปรับค่าได้ [6]

2.1.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ประการคือ

- **จำนวนรอบของขดลวด**เขียนแทนด้วยอักษร N ถ้าจำนวนรอบของขดลวดมีปริมาณมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วยค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนรอบของขดลวด

- **วัสดุที่นำมาทำเป็นแกน** เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ μ วัสดุที่นำมาทำเป็นแกนมีหลายชนิดเช่น อากาศเหล็กเฟอร์ไรท์โคบอล ฯลฯ เป็นต้น แต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติในการเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็กที่เรียกว่าความซาบซึม (Permeability) แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.1 ในกรณีที่มีความซาบซึมมากก็จะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความซาบซึมของแกน

ตารางที่ 2.1 ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนชนิดต่างๆ [7]

Magnetic susceptibility and Permeability data for selected materials		
Materials	Permeability (μ)	Relative permeability (μ/μ_0)
Metglas	1.26	1000000
Iron (99.95% pure Fe annealed in H)	0.25	200000
Permalloy	1.0×10^{-2}	8000
Iron (99.8% pure)	6.3×10^{-3}	5000
Electrical steel	5.0×10^{-3}	4000
Ferritic stainless steel (annealed)	1.26×10^{-3} - 2.26×10^{-3}	1000–1800
Martensitic stainless steel (annealed)	9.42×10^{-4} - 1.19×10^{-3}	750–950
Ferrite (manganese zinc)	$> 8.0 \times 10^{-4}$	640 (or more)
Ferrite (nickel zinc)	2.0×10^{-5} - 8.0×10^{-4}	16–640
Carbon Steel	1.26×10^{-4}	100
Nickel	1.26×10^{-4} - 7.54×10^{-4}	100 – 600
Neodymium magnet	1.32×10^{-6}	1.05
Aluminum	1.256665×10^{-6}	1.000022
Wood	$1.25663760 \times 10^{-6}$	1.00000043
Air	$1.25663753 \times 10^{-6}$	1.00000037
Vacuum	$\pi^4 \times 10^{-7} (\mu_0)$	1
Copper	1.256629×10^{-6}	0.999994

- **พื้นที่หน้าตัดของแกน** เขียนแทนด้วยอักษร A ถ้าพื้นที่ของแกนมีปริมาณมากจะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำมากขึ้นตามไปด้วยค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับพื้นที่ของแกน

- **ความยาวของแกน** เขียนแทนด้วยอักษร l ถ้าความยาวของแกนมีปริมาณมากจะทำให้เกิดค่าความเหนี่ยวนำน้อยค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผกผันกับความยาวของแกน

ดังนั้นจะพบว่า ค่าความเหนี่ยวนำขึ้นอยู่กับขนาด 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 ละเป็นสัดส่วนผกผันกับพื้นที่หน้าตัดของตัวนำไฟฟ้า

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า[8]

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

ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบขนาดขดลวดทองแดงไฟฟ้า (ต่อ)

AWG NO.	Diameter		Area [mm ²]	Resistance		Max Current [Amperes]
	[inches]	[mm]		[Ohms / 1000 ft]	[Ohms / km]	
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
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

แม่เหล็กเป็นแร่หรือโลหะที่มีสมบัติดูดเหล็กได้แม่เหล็กสามารถทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้นั้นคือมันสามารถส่งแรงดูดหรือแรงผลัก ออกไปรอบๆตัวมันได้แม้ว่าสนามแม่เหล็กจะเป็นสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้แต่มันเป็นเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติสำคัญของแม่เหล็กโดยตรง ได้แก่คุณสมบัติการดูดและการผลักกันระหว่างแท่งแม่เหล็ก

คุณสมบัติของแม่เหล็ก

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

2.1.9.2 สนามแม่เหล็ก

สนามแม่เหล็กคือบริเวณหรือขอบเขตที่แม่เหล็กส่งเส้นแรงแม่เหล็กที่มีอำนาจการดึงดูดออกไปได้ถึง

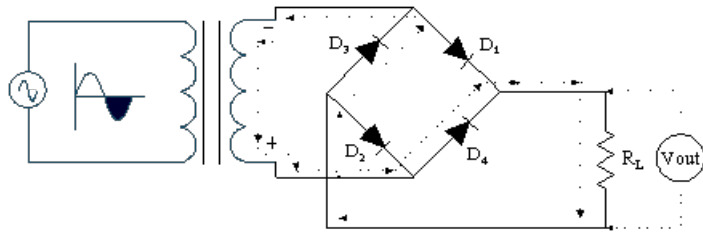
คุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็ก

- มีทิศออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ขั้วแม่เหล็กทั้งขั้วเหนือและขั้วใต้จะดูดสารแม่เหล็กเสมอ
- ถ้ามีเส้นแรงแม่เหล็กปริมาณมาก เส้นแรงแม่เหล็กจะรวมกัน หรือต้านกันออกไปทำให้เกิดจุดสะเทินซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเข้มสนาม แม่เหล็กเป็นศูนย์ฟลักซ์แม่เหล็ก คือ ปริมาณเส้นแรงแม่เหล็กหรือจำนวนของเส้นแรงแม่เหล็ก ใช้สัญลักษณ์ Φ

2.2 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (FULL-WAVE RECTIFICATION)

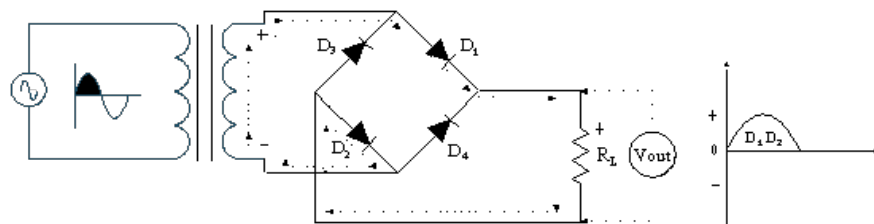
วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพราะแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่นข้อแตกต่างระหว่างการเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นธรรมดาต่างกันตรงการต่อวงจรไดโอด แบบเต็มคลื่นจะใช้ไดโอด 2 ตัวแต่แบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัว และหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ก็แตกต่างกัน แบบเต็มคลื่นธรรมดาใช้หม้อแปลงมีแท็ปกลาง (Center Tap, CT) มี 3 ขั้ว แบบบริดจ์ใช้หม้อแปลง 2 ขั้วหรือ 3 ขั้วก็ได้ดังรูป 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ [9]

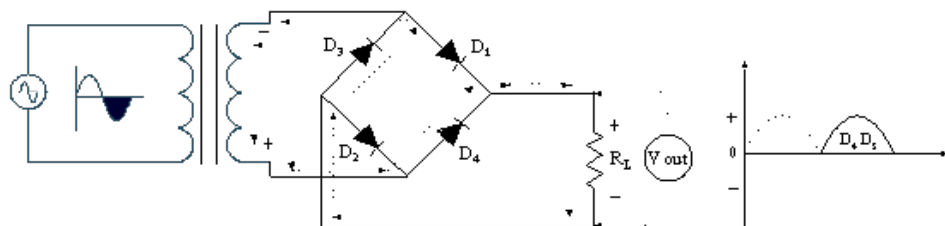
การทำงานของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์

การทำงานของวงจรไดโอดจะผลัดกันนำกระแสครึ่งละ 2 ตัวโดยเมื่อไซเคิลบวกของแรงดันไฟสลับ (V_{in}) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงและด้านล่างจะเป็นลบจะทำให้ไดโอด D_1 และ D_2 ได้รับไบอัสตรงจะมีกระแสไหลผ่านไดโอด D_1 ผ่านโหลด R_L ผ่านไดโอด D_2 ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านล่างมีแรงดันตกคร่อมโหลด R_L ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุตดังรูป 2.14

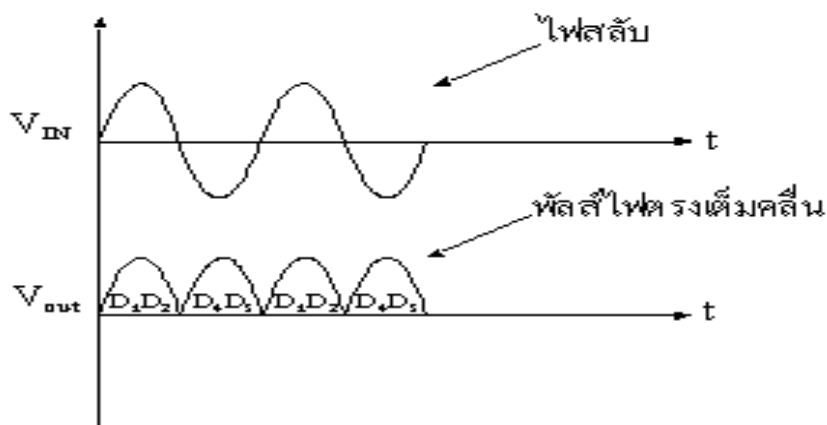


รูปที่ 2.14 ไดโอด D_1 และ D_2 ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_{out}) [9]

ในช่วงเวลาต่อมาไซเคิลลบของแรงดันไฟสลับ (V_{in}) ปรากฏที่ด้านบนของขดทุติยภูมิของหม้อแปลงและด้านล่างเป็นบวก ดังรูปที่ 2.15 ในช่วงเวลานี้ไดโอด D_1 และ D_2 จะได้รับไบอัสกลับแต่ไดโอด D_3 และ D_4 จะได้รับไบอัสตรงทำให้มีกระแสไหลผ่านไดโอด D_4 ผ่านโหลด R_L และผ่านไดโอด D_3 ครบวงจรที่หม้อแปลงด้านบนมีแรงดันตกคร่อมโหลด R_L ด้านบนเป็นบวก ด้านล่างเป็นลบได้แรงดันไฟช่วงบวกออกทางเอาต์พุตทำให้ได้คลื่นไฟตรงรวมกันเต็มคลื่นดังรูปที่ 2.16

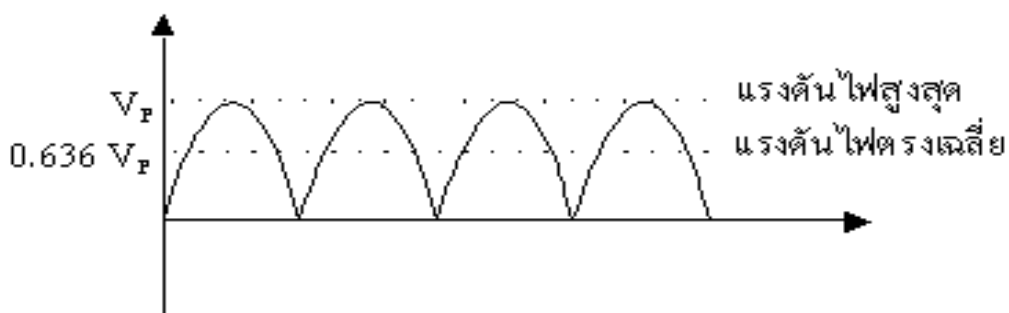


รูปที่ 2.15 ไดโอด D_3 และ D_4 ได้รับไบอัสตรงและรูปคลื่นแรงดันตกคร่อมโหลด (V_{out}) [9]



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

แรงดันเอาต์พุตของวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นทั้งแบบมีแท่งกลางและแบบบริดจ์จะให้แรงดันเอาต์พุตทุกๆครึ่งรอบของแรงดันโพลาร์ที่เข้ามาทั้งซีกบวกและซีกลบค่าเฉลี่ยของแรงดันเอาต์พุตจึงมีค่าเป็น 2 เท่าของแรงดันไฟตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าเป็น 0.636 เท่าของแรงดันไฟสูงสุด ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงค่าแรงดันไฟตรงกับค่าแรงดันไฟสูงสุด V_P ของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น[9]

2.3 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ หมายถึง อุปกรณ์อย่างหนึ่งที่ใช้เก็บพลังงานและนำมาใช้ได้ในรูปแบบของไฟฟ้า แบตเตอรี่นั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมีเช่นเซลล์กัลวานิกหรือเซลล์เชื้อเพลิง อย่างน้อยหนึ่งเซลล์ ดังนั้นการเลือกใช้แบตเตอรี่ต้องเลือกให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับงานที่จะใช้งาน

2.3.1 ประเภทของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่แบ่งออกได้เป็น2 ประเภท

- **เซลล์ปฐมภูมิ** คือแบตเตอรี่ที่ใช้แล้วทิ้งเรียกอีกอย่างว่าใช้ได้ครั้งเดียวเนื่องจากไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารเคมีเมื่อสารเคมีเปลี่ยนแปลงหมดไฟฟ้าก็จะหมดจากแบตเตอรี่ แบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กและสามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก ใช้ไฟน้อย หรือในที่ที่ห่างไกลจากพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ เช่น Zinc-carbon battery, Alkaline battery, Silver-oxide battery, Lithium battery, Mercury battery และ Zinc-air battery เป็นต้น [10]

- **เซลล์ทุติยภูมิ** คือ แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้หลังจากไฟหมดเนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้จัดไฟนี้เรียกว่า ชาร์จเจอร์ หรือ รีชาร์จเจอร์ เช่น Lead-acid battery, Lithium-ion battery, Lithium ion polymer battery, Na₂S battery, Nickel metal hydride battery, Nickel-cadmium battery, Sodium-metal chloride battery และ Nickel-zinc battery เป็นต้น [10]

2.3.2 แบตเตอรี่ชนิด Lithium-ion

ข้อดีของลิเทียมไอออน

- ความหนาแน่นพลังงานสูง
- ไม่จำเป็นต้องกระตุ้นก่อนใช้ หลังจากเก็บเป็นเวลานาน
- มีอัตราการคายประจุตัวเองต่ำ
- ไม่ต้องดูแลรักษามาก

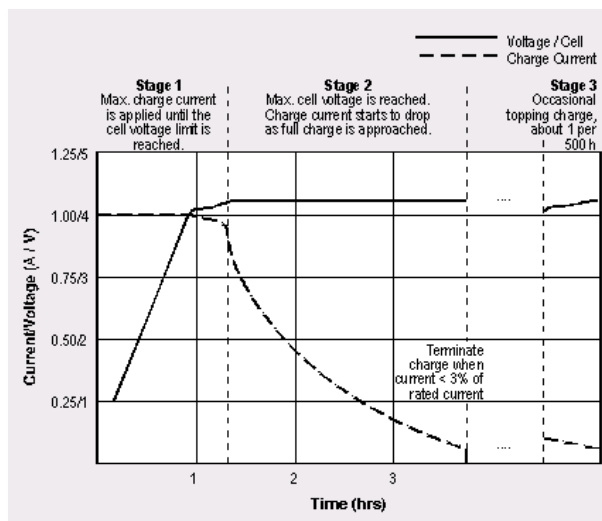
ข้อจำกัดของลิเทียมไอออน

- จำต้องใช้วงจรป้องกันแรงดันและกระแสให้อยู่ในเขตปลอดภัย
- มีการเสื่อมอายุตามเวลาแม้ว่าจะไม่มีการใช้งาน
- อัตราการจ่ายกระแสไม่สูงมาก ไม่เหมาะกับงานที่ใช้โหลดหนักๆ

2.3.2.1 การชาร์จแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

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

เซลล์ส่วนใหญ่ชาร์จเต็มที 4.2 โวลต์ โดยมีค่าคลาดเคลื่อน ± 0.05 โวลต์ต่อเซลล์ การชาร์จด้วยแรงดัน 4.1 โวลต์ จะได้ความจุต่ำกว่าปกติ 10 % แต่ได้อายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.18 แรงดันและกระแสของเซลล์ลิเทียมไอออนขณะชาร์จ [11]

การใช้กระแสที่สูงเพื่อชาร์จไม่ได้ช่วยเร่งความเร็วให้ชาร์จเต็มเร็วขึ้นมากนัก แม้ว่าแรงดันจะขึ้นถึง 4.2 โวลต์เร็วขึ้นก็ตามแต่ระยะเวลาส่วนใหญ่ที่ใช้อยู่ที่ช่วงที่สองมากกว่า

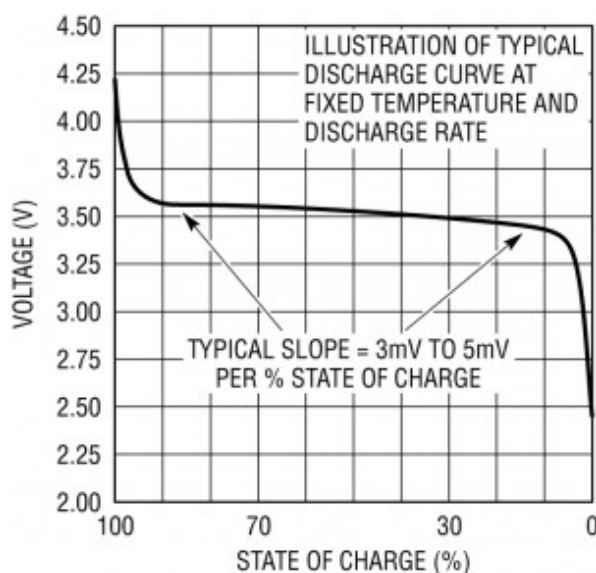
ระยะเวลาที่ใช้ชาร์จจะประมาณ 3 ชั่วโมง แบตเตอรี่เล็กๆ อย่างที่ใช้ในโทรศัพท์มือถือสามารถชาร์จโดยแหล่งจ่ายแรงดันคงที่ 4.2 โวลต์ จำกัดกระแส $1C^*$ (1 เท่าของความจุเซลล์) ได้ส่วนแบตเตอรี่ใหญ่ๆ อย่างในแลปท็อปคอมพิวเตอร์ควรจะชาร์จที่ 0.8 C ค่าพลังงานสูญเสียระหว่างการชาร์จอยู่ที่ 0.1 % ดังนั้นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะไม่เกิดความร้อนเลยขณะชาร์จ การดูว่าเต็มหรือยังจะดูที่แรงดันคร่อมแบตเตอรี่สูงขึ้นจนถึงแรงดันที่จ่ายให้ คือ 4.2 โวลต์และกระแสที่ไหลลดลงเหลือ 3 % ของกระแสที่ตั้งไว้

* ค่า xC คือจำนวนเท่าของความจุ (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 (คนละตัวกับความหนาแน่นพลังงานซึ่งคิดเป็นกำลังต่อน้ำหนัก หรือ วัตต์ต่อกิโลกรัม) ความจุคือความสามารถการจ่ายกระแสในเวลา 1 ชั่วโมงถ้ามีแบตเตอรี่ 1000 mAh จะสามารถจ่ายโหลดที่ดึงกระแส 1000 mA ได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หรือ

สามารถจ่ายโหลด 500 mA ได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หรือจ่ายโหลดที่ดึงกระแส 2000mA ได้เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนถูกออกแบบให้ใช้งานได้อย่างปลอดภัยในช่วงแรงดันทำงานปกติแต่จะเกิดความไม่มีเสถียรภาพถ้าชาร์จให้แรงดันสูงกว่านั้นเมื่อชาร์จจนแรงดันสูงถึง 4.3 โวลต์ภายในเซลล์จะเกิดการก่อตัวของโลหะลิเทียมบนขั้วลบส่วนที่ขั้วบวกจะเกิดสารออกซิไดส์ สูญเสียความจุและเกิดก๊าซออกซิเจนขึ้นการชาร์จเกินทำให้เซลล์ร้อนขึ้น ถ้าทิ้งไว้โดยไม่ได้อะไร เซลล์จะแตกและเกิดไฟลุก (โลหะลิเทียมไวต่อปฏิกิริยาเคมีมาก โดยเฉพาะเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจน)นอกจากแรงดันชาร์จเกินแล้วยังต้องระวังการใช้งานจนแรงดันตกต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ยอมรับได้วงจรป้องกันถูกออกแบบให้ตัดวงจรออกเมื่อแบตเตอรี่ถูกใช้งานจนแรงดันต่ำกว่า 2.5 โวลต์ต่อเซลล์ เมื่อวงจรตัดไปแล้วแบตเตอรี่ไม่สามารถใช้งานได้อีกดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.19 ขอบเขตการใช้งานที่ปลอดภัยของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน[11]

การนำไปชาร์จโดยชาร์จเจอร์ตามปกติไม่สามารถทำได้ แต่มีวิธีแก้ไขอยู่ซึ่งจะกล่าวต่อไป ถ้าเซลล์ถูกปล่อยให้แรงดันตกลงมาจนเหลือ 1.5 โวลต์ต่อเซลล์หรือต่ำกว่าเป็นเวลาเพียงสองสามวัน ควรหลีกเลี่ยงการชาร์จเข้าไปอีกเพราะภายในเซลล์จะเกิดการก่อตัวของโลหะทองแดง ซึ่งอาจทำให้เกิดลัดวงจรภายในเซลล์แบตเตอรี่นั้นจะไม่มีเสถียรภาพอาจจะเกิดการลัดวงจรในก้อนเซลล์เมื่อไรก็ได้ซึ่งทำให้มีความร้อนสูงขึ้นได้เองและไม่ปลอดภัยต่อการใช้งาน

อายุการเก็บรักษาของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นสิ่งที่มักถูกมองข้ามขึ้นอยู่กับระดับไฟที่มีและอุณหภูมิการเก็บแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีอายุการเก็บประมาณ 2-3 ปี(นานกว่านี้ถ้าชาร์จไว้บางส่วนและเก็บในที่เย็น)การสูญเสียสภาพเกิดจากการเพิ่มของความต้านทานภายในที่เพิ่มขึ้นเองจากปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งถ้าความต้านทานภายในเพิ่มถึงจุดหนึ่งเซลล์นั้นก็จะไม่สามารถจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ได้แม้ว่าการวัดความจุจะยังวัดได้สูงอยู่ก็ตาม ดังรูปที่ 2.17

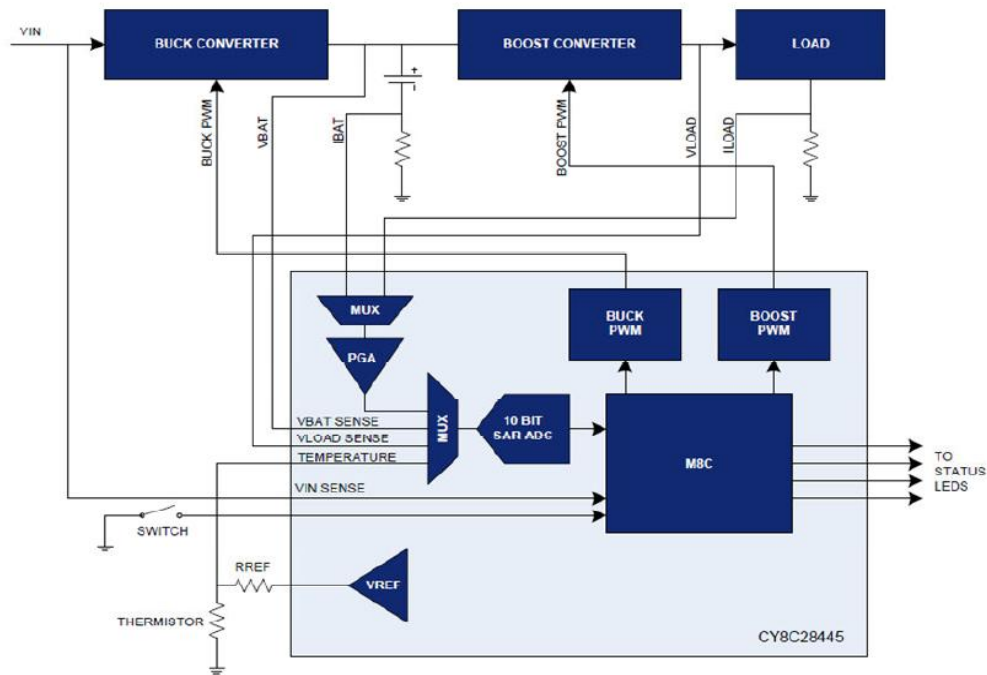
Temperature	40% charge level (recommended storage charge level)	100% charge level (typical user charge level)
0°C	98% after 1 year	94% after 1 year
25°C	96% after 1 year	80% after 1 year
40°C	85% after 1 year	65% after 1 year
60°C	75% after 1 year	60% after 3 months

รูปที่ 2.20 แสดงการสูญเสียความจุถาวรของเซลล์ลิเทียมตามฟังก์ชันของอุณหภูมิและระดับการชาร์จ

ดังนั้น ควรเก็บแบตเตอรี่ในที่เย็น โดยประจุไฟไว้ประมาณ 40 % วัดแรงดันตัวเปล่าได้ 3.75 - 3.8 โวลต์ระหว่างการเก็บอาจจะต้องนำมาชาร์จซ้ำเพราะวงจรป้องกันจะดึงกระแสไปใช้เล็กน้อยระหว่างการเก็บทำให้แรงดันลดต่ำลงจนอาจถึงจุดที่วงจรป้องกันตัดวงจรออกสิ่งที่ทำอันตรายได้มากที่สุดคือการชาร์จไฟจนเต็มที่อุณหภูมิสูง

2.3.2.2 วงจรป้องกันของแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

เมื่อมีการจ่ายแรงดันเข้าวงจร วงจรจะส่งแรงดันเข้าไมโครคอนโทรเลอร์ เพื่อที่จะวัดและทำการลดระดับแรงดันที่เข้ามาให้เหลือ 4.2 V และนำพลังงานไปสะสมไว้ในแบตเตอรี่ ซึ่งแบตเตอรี่จะมีการส่งแรงดันออกเข้าไปในไมโครคอนโทรเลอร์เพื่อที่จะส่งข้อมูลแสดงผลเป็นไฟ LED ออกมาและเมื่อมีการต่อโหลดจะมีวงจรปรับระดับแรงดันขึ้นและส่งแรงดันไฟฟ้าแปลงเป็นลอจิกเข้าไมโครคอนโทรเลอร์เพื่อที่จะคอยปรับวงจรบูทให้คงที่แล้วส่งไปยังโหลดจากนั้นเมื่อโหลดไม่มีการต่อหรือใช้โหลดที่ดึงกระแสผิดปกติ ก็จะส่งกระแสแปลงเป็นลอจิกสั่งงานให้ไมโครคอนโทรเลอร์ สั่งให้วงจรบูทหยุดทำงาน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.21 แสดงวงจรจำกัดแรงดันและอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงการใช้งานที่ปลอดภัย

2.3.2.3 ข้อเสนอแนะการใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน

- หลีกเลี่ยงการใช้แบตเตอรี่จนหมดก่อนเพราะจะทำให้เกิดคราบสะสมบนอิเล็กโทรดในก้อนเซลล์การใช้งานไปเพียงบางส่วนและชาร์จบ่อยๆดีกว่าการใช้ให้หมดและชาร์จครั้งเดียวการชาร์จจนไฟยังไม่หมดไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆไม่มีปัญหาเรื่องความจำในแบตเตอรี่
- แบตเตอรี่ที่มีระบบวัดพลังงาน ควรปรับตั้งให้สเกลตรงโดยการใช้ให้หมดก่อนโดยอุปกรณ์นั้นสัก 1 ครั้ง ทุกๆการชาร์จ 30 ครั้งถ้าไม่ได้ทำ สเกลแบตเตอรี่จะไม่ตรงในบางกรณีอาจทำให้เตือนแบตเตอรี่หมดก่อนเวลาที่เหมาะสม
- เก็บแบตเตอรี่ในที่เย็น หลีกเลี่ยงการทิ้งไว้ในรถถ้าจำเป็นต้องเก็บไว้นานๆ ควรชาร์จไว้ 40 % ก่อนเก็บ

บทที่ 3

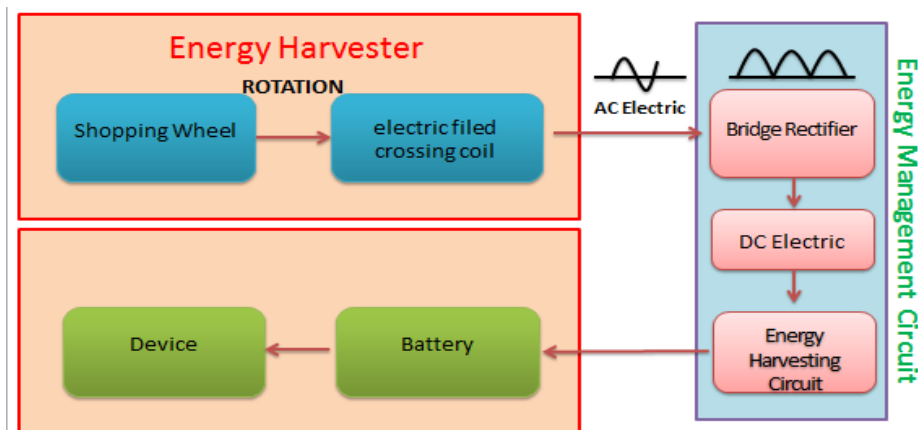
หลักการออกแบบ

หลักการออกแบบล้อรถเข็นกำเนิดพลังงานนั้นจะอาศัยทฤษฎีหลักการเหนี่ยวนำเข้ามาช่วยในการออกแบบ ซึ่งขั้นต้นจะต้องเข้าใจถึงหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ก่อน กล่าวได้คือ ถ้ามีการนำสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวด หรือนำขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ล้วนก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าภายในขดลวดเกิดขึ้น ทั้งนี้ทั้งนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยนั้นก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนรอบขดลวดที่พัน ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด ค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก จำนวนชั้นของแม่เหล็ก ค่าความซึมซาบทางแม่เหล็กของแกนขดลวด(Permeability) และความเร็วรอบในการเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กของล้อเป็นต้น ดังนั้นสำหรับการออกแบบล้อจึงมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน นั่นคือ

- ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (เพลาล้อ)
- ส่วนที่เคลื่อนที่ (ฝาครอบล้อ)

เริ่มต้นด้วยล้อต้นแบบที่ 1 โดยออกแบบโครงสร้างของล้อให้มีลักษณะและขนาดใกล้เคียงกับล้อรถเข็นข้อปั้งในห้างสรรพสินค้าทั่วไป แต่ภายในล้อจะประกอบด้วยชุดแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ได้และชุดขดลวดที่ถูกยึดติดอยู่กับเพลาล้อที่ใช้ยึดกับขาหนีบโดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้มีความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง)จากนั้นออกแบบล้อต้นแบบที่ 2 โดยการเปลี่ยนแกนกลางของขดลวดตัวนำจากแกนอากาศเป็นแกนเหล็กหล่อเพื่อเพิ่มค่าซึมซาบทางแม่เหล็ก และออกแบบล้อต้นแบบที่ 3 โดยการเปลี่ยนรูปทรงของแม่เหล็กและขดลวดเพื่อเปรียบเทียบกับล้อต้นแบบที่ 2 ว่ารูปทรงแบบใดให้พลังงานงานมากกว่ากัน จากหลักการของล้อต้นแบบที่ 3 ที่มีอยู่แต่จะทำการเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มเส้นแรงแม่เหล็กให้มากขึ้นจึงกลายเป็นล้อต้นแบบที่ 4 ได้มีการนำข้อมูลทั้งหมดมาประยุกต์ทำเป็นล้อต้นแบบที่ 5 โดยใช้แม่เหล็กและขดลวดเป็นรูปวงกลม เพิ่มพื้นที่หน้าตัดของลวดทองแดงเพื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้า เพิ่มจำนวนชั้นของขดลวด เพิ่มขนาดและจำนวนชั้นของแม่เหล็ก สุดท้ายได้มีการออกแบบล้อต้นแบบที่ 6 โดยลดความยาวของขดลวดตัวนำจากล้อต้นแบบที่ 5 ที่มีอยู่ เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กส่งถึงกันได้มากขึ้น

ภาพรวมหลักการทำงานของการทำงานของล้อรถเข็น สามารถแสดงได้ดังแผนผังดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมหลักการทำงานของระบบเก็บเกี่ยวพลังงานจากรถเข็นข้อปิ้ง

3.1 โครงสร้างทางกายภาพของล้อกำเนิดพลังงาน

การออกแบบล้อจะออกแบบโดยยึดโครงสร้างของล้อที่มีอยู่แล้วเป็นหลัก โดยการจัดวางแม่เหล็กและการวางชุดขดลวดนั้นจะคำนึงถึงขนาดของล้อที่มีอยู่ซึ่งแนวทางในการออกแบบจะกล่าวดังต่อไปนี้

3.1.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กเป็นหนึ่งในสองส่วนประกอบที่สำคัญของล้อกำเนิดพลังงาน เนื่องจากแม่เหล็กเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องมีการเลือกขนาดแม่เหล็กให้ใหญ่เหมาะสมกับขนาดของล้อที่ออกแบบและยังต้องคำนึงถึงรูปร่างของแม่เหล็กเพื่อที่จะทำให้เกิดกระบวนการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้ามากที่สุด สำหรับคุณสมบัติแม่เหล็กที่เลือกใช้คือเลือกใช้แม่เหล็กแรงสูงแบบถาวรแม่เหล็กแรงสูงนีโอไดเมียม(NdFeB) มีส่วนผสมของแร่หายากชนิดหนึ่งคือแร่นีโอไดเมียม ซึ่งมีค่าพลังงานแม่เหล็กถาวรที่มากที่สุดและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

3.1.2 ขดลวดตัวนำ

ขดลวดตัวนำเป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของล้อต้นแบบ จำนวนรอบที่พันขดลวดและจำนวนขดลวดล้วนมีผลต่อการเหนี่ยวนำทั้งสิ้น กล่าวได้คือ ยิ่งจำนวนรอบที่พันมาก แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ก็จะมากตาม และถ้านำขดลวดหลายๆชุดมาต่ออนุกรมต่อเนื่องกันมากเท่าไรก็จะทำให้ได้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากตามไปด้วย ดังนั้นการออกแบบล้อจึงต้องคำนึงถึงพื้นที่ที่ใช้ติดตั้งขดลวดและรูปแบบลักษณะการพันขดลวดร่วมด้วย

3.2 การออกแบบล้อต้นแบบที่ 1

3.2.1 แม่เหล็ก

เลือกใช้แม่เหล็กที่ขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.2 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อต้นแบบที่ 1

หลักการในการวางแม่เหล็ก คือวางแม่เหล็กให้ขั้วเหนือขั้วใต้สลับกันจนครบรอบของฝาทั้งสองด้านดังรูป3.3เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ ซึ่งจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมากได้

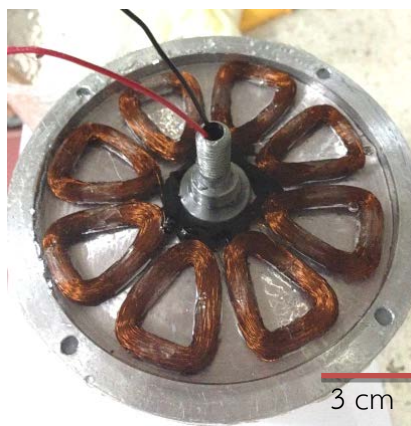


รูปที่ 3.3 ลักษณะการวางแม่เหล็กของล้อต้นแบบที่ 1

3.2.2 ขดลวดตัวนำ

ขดลวดตัวนำล้อต้นแบบที่ 1 ออกแบบโดยใช้ขดลวดเบอร์ 36 จำนวน 8 ขด พันขดละ 600 รอบ ซึ่งมีขนาดเหมาะสมกับโครงสร้างของล้อพอดีโดยพันขดลวดให้มีรูปร่างแบบทรงหยดน้ำดังรูปที่

3.4



รูปที่ 3.4 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยันแบบที่ 1

3.3 การออกแบบล้อยันแบบที่ 2

3.3.1 แม่เหล็ก

เลือกใช้แม่เหล็กที่มีรูปทรงและขนาดแบบเดียวกับล้อยันแบบที่ 1 โดยมีขนาดกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งหลักการในการวางแม่เหล็กก็ยังคงวางรูปแบบเดียวกันกับล้อยันแบบที่ 1 คือวางแม่เหล็กให้ขั้วเหนือขั้วใต้สลับกันจนครบรอบของฝาทั้งสอง ด้านดังรูป 3.3 เพื่อให้เส้นแรงแม่เหล็กมีทิศทางสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ ซึ่งจะก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำเกิดขึ้นมากได้

3.3.2 ขดลวดตัวนำ

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



รูปที่ 3.5 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยันแบบที่ 2

3.4 การออกแบบลวดต้นแบบที่ 3

ลวดต้นแบบที่ 3 มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงขนาดของแม่เหล็กและชุดขดลวดตัวนำ โดยจะคำนึงถึงขนาดของลวดต้นแบบเดิมซึ่งการออกแบบลวดต้นแบบที่ 3 นี้จะออกแบบให้ขดลวดทองแดงมีรูปทรงแบบเดียวกันกับรูปทรงของแม่เหล็ก

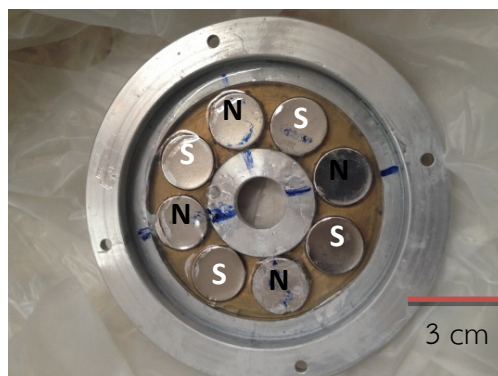
3.4.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของลวดแบบที่ 3

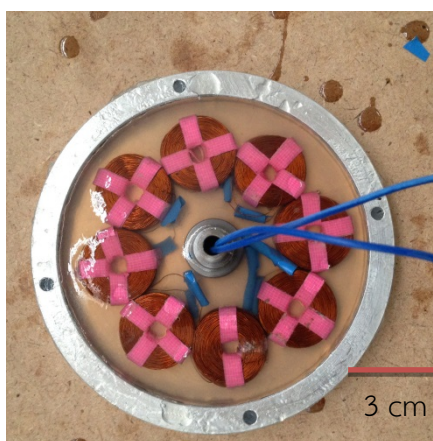
การเลือกแม่เหล็กต้องเลือกขนาดแม่เหล็กให้มีการวางให้กินพื้นที่ของลวดให้มากที่สุดและวางให้แม่เหล็กขั้วเหนือและใต้สลับกันจนครบรอบเป็นวงกลมดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การวางแม่เหล็กของลวดแบบที่ 3

3.4.2 ขดลวดตัวนำ

การออกแบบขดลวดตัวนำล้อยันแบบที่3 ได้ออกแบบให้ขดลวดมีขนาดและรูปร่างให้ใกล้เคียงกับแม่เหล็กมากที่สุดโดยต้องการให้ความต้านทานของขดลวดรวมมีขนาดรวม 270 โอห์ม เพื่อที่จะได้นำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับล้อยันแบบที่ 1 ซึ่งจะได้ตัวแปรที่ใช้ในการเปรียบเทียบที่เหมือนกันโดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ 36 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขดขดละ 900 รอบ ดังรูปที่ 3.8



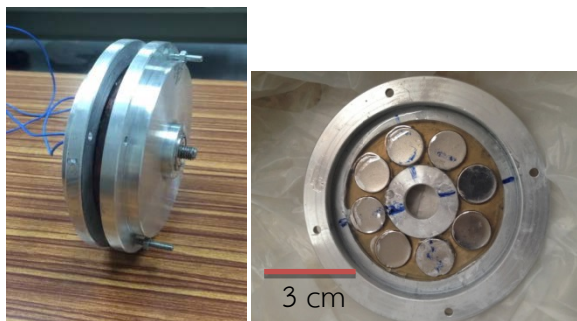
รูปที่ 3.8 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยันแบบที่ 3

การออกแบบนี้เพื่อให้ขดลวดนั้นเกิดการเหนี่ยวนำกับแม่เหล็กให้มากที่สุดจึงออกแบบให้รูปร่างของขดลวดและรูปร่างของแม่เหล็กมีรูปร่างที่เหมือนกันและรูปทรงที่เป็นวงกลมทำให้มีจุดที่เส้นลวดขนานกับสนามแม่เหล็กมีน้อย(ถ้าสนามแม่เหล็กขนานกับขดลวดจะไม่เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้า)

3.5 การออกแบบล้อยันแบบที่ 4

3.5.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียมมีรูปทรงและขนาดแบบเดียวกับล้อยันแบบที่ 3 ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10 แต่สำหรับการวางแม่เหล็กของล้อยันแบบที่ 4 จะมีการวางจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งชั้น เพื่อที่จะเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะส่งผลก่อให้เกิดการเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามมา ดังรูปที่ 3.9



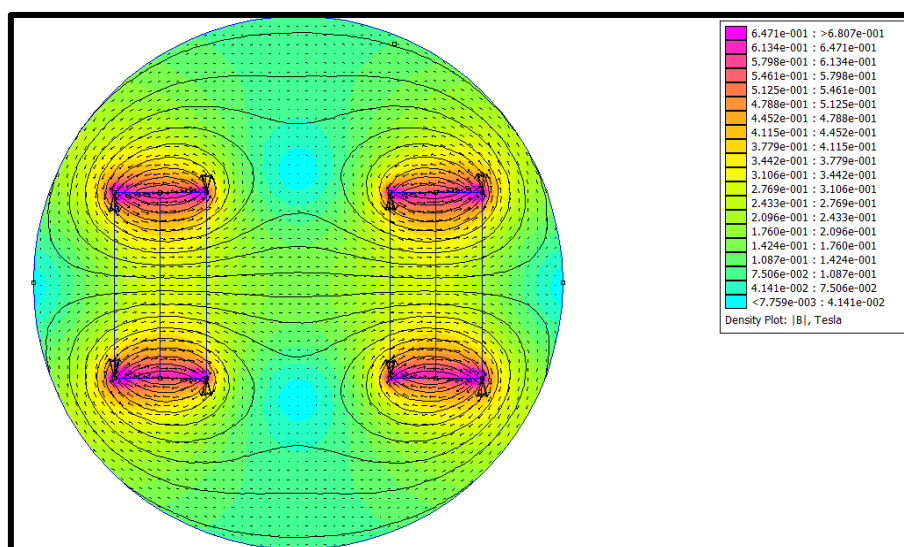
รูปที่ 3.9 การวางแม่เหล็กของลวดต้นแบบที่ 4

3.5.2 ขดลวดตัวนำ

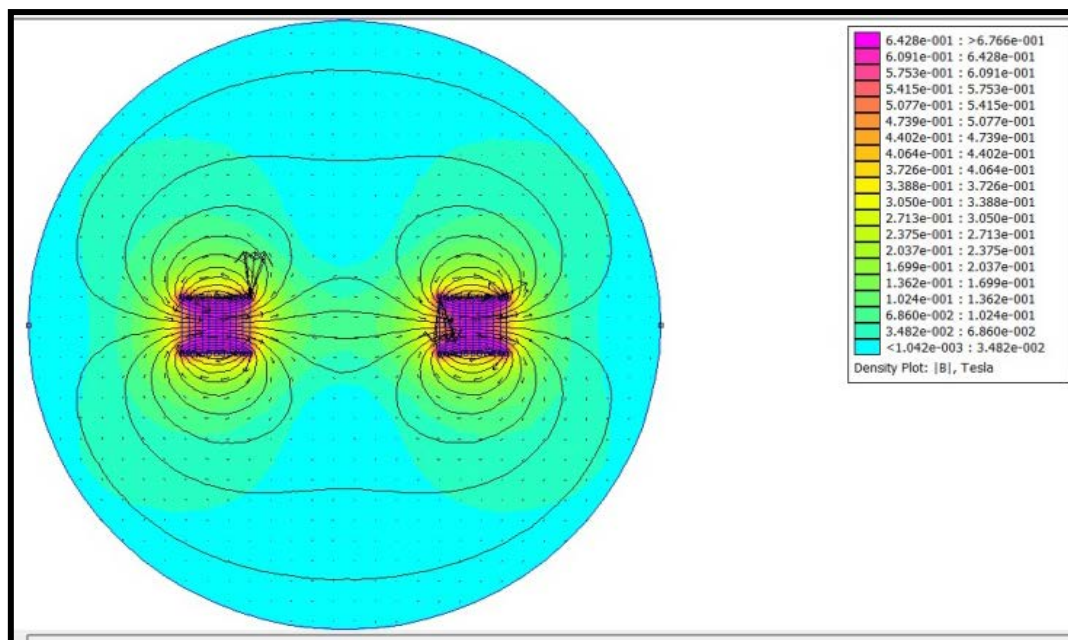
การออกแบบขดลวดตัวนำของลวดที่แบบที่ 4 จะออกแบบให้ขดลวดตัวนำมีขนาดและรูปร่างให้ใกล้เคียงกับแม่เหล็กมากที่สุด โดยต้องการให้ความต้านทานของขดลวดรวมมีขนาดรวม 270 โอห์ม แบบเช่นเดียวกับลวดต้นแบบที่ 4 ซึ่งจะใช้ลวดทองแดงเบอร์ 36 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 900 รอบ ดังรูปที่ 3.8

3.6 การออกแบบลวดต้นแบบที่ 5

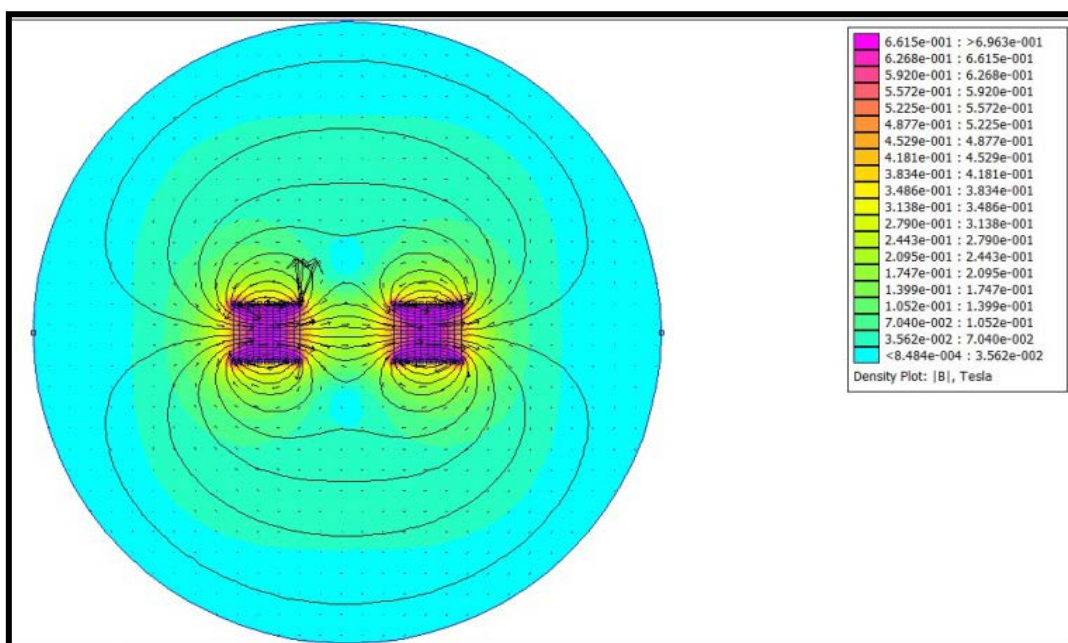
การออกแบบลวดต้นแบบที่ 5 มีการเพิ่มขนาดความใหญ่ของลวดขึ้นเพื่อที่จะสามารถเพิ่มชั้นจำนวนของแม่เหล็กได้มากขึ้น และสามารถเพิ่มความยาวของลวดหนึ่งขดได้มาก โดยเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้น ซึ่งจะอาศัยโปรแกรมคำนวณค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กเปรียบเทียบจำนวนที่มีผลต่อค่าความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กดังรูปที่ 3.10 รูปที่ 3.11 และรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.10 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กลวดต้นแบบที่ 4 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 20 มม.



รูปที่ 3.11 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กลวดตันแบบที่ 5 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 90 มม.



รูปที่ 3.12 แสดงค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กลวดตันแบบที่ 6 มีระยะห่างของแม่เหล็ก 45 มม.

3.6.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม วงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แม่เหล็กนีโอไดเมียมของล้อแบบที่ 5

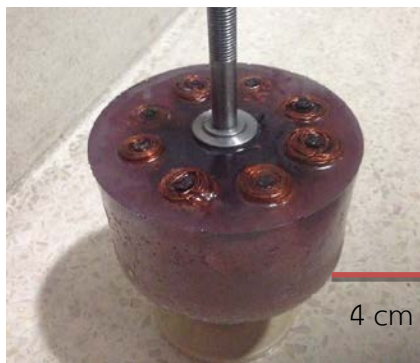
การเลือกแม่เหล็กต้องเลือกขนาดแม่เหล็กให้มีการวางให้กินพื้นที่ของล้อให้มากที่สุดและวางให้แม่เหล็กขั้วเหนือและใต้สลับกันจนครบรอบเป็นวงกลม จำนวน 10 ชั้นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การวางแม่เหล็กของล้อแบบที่ 5

3.6.2 ขดลวดตัวนำ

ออกแบบให้ขดลวดตัวนำมีขนาดและรูปร่างให้ใกล้เคียงกับแม่เหล็กมากที่สุดโดยใช้ลวดทองแดงเบอร์ 23 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 1600 รอบดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.15 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยับแบบที่ 5

การออกแบบล้อยับกำหนดพลังงานแบบที่ 5 เพื่อเพิ่มแรงเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้น เนื่องจากมีการเปลี่ยนขนาดของเบอร์ขดลวดทองแดง และมีการเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มค่าสนามแม่เหล็กให้มีความมากขึ้น โดยมีการออกแบบให้รูปทรงของขดลวดตัวนำมีรูปทรงแบบเดียวกันกับรูปทรงของแม่เหล็ก

3.7 การออกแบบล้อยับแบบที่ 6

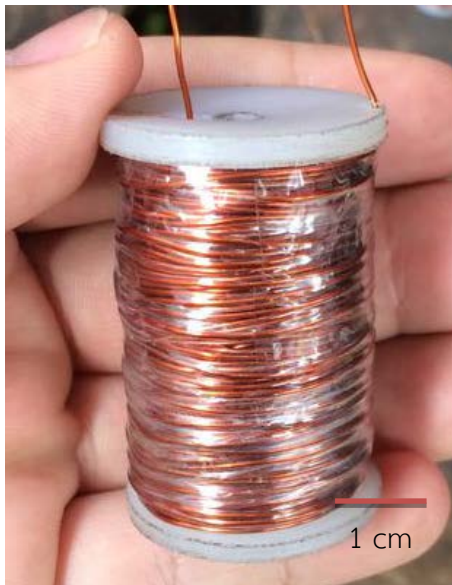
ล้อยับแบบที่ 6 ออกแบบโดยการลดขนาดของล้อยับแบบที่ 5 เพื่อที่จะให้สนามแม่เหล็กส่งถึงกันมากขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้าเยอะขึ้น

3.7.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม มีขนาด และรูปทรงเหมือนกันกับล้อยับแบบที่ 5 โดยมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร หนา 3.2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.10

3.7.2 ขดลวดตัวนำ

ขดลวดตัวนำของล้อยันแบบที่ 6 มีการลดขนาดจากล้อยันแบบที่ 5 ที่มีอยู่ โดยใช้ ลวดทองแดงเบอร์ 23 จำนวนขดลวดทั้งหมด 8 ขด ขดละ 800รอบดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยันแบบที่ 6

3.8 การออกแบบล้อยันแบบที่ 7

3.8.1 แม่เหล็ก

แม่เหล็กที่ใช้เป็นชนิดนีโอไดเมียม รูปทรงสี่เหลี่ยม ขนาด 20x15 มิลลิเมตร หนา 5มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.17 ซึ่งหนากว่ารุ่นก่อน ทำให้มีเส้นแรงแม่เหล็กที่มากกว่า และคาดว่าจะผลิตกระแสไฟได้มากกว่าด้วย



รูปที่ 3.17 แม่เหล็กของล้อยันแบบที่ 7

3.8.2 ขดลวดตัวนำ

ขดลวดตัวนำของล้อยึดแบบที่ 7 ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 30 พันรูปทรงสามเหลี่ยม 400 รอบ จำนวนทั้งหมด 9 ขด ลักษณะดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ชุดขดลวดตัวนำของล้อยึดแบบที่ 7

3.9 องค์ประกอบของล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4

องค์ประกอบส่วนที่สำคัญสำหรับล้อยึดแบบที่ 1 ถึงล้อยึดแบบที่ 4 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญได้แก่

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศ จำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นเรขาคณิตที่หล่อเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 94 มิลลิเมตร และหนา 8 มิลลิเมตร ซึ่งภายในประกอบด้วยขดลวดตัวนำ
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็ก จำนวน 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีการวางแม่เหล็กดังรูปที่ 3.3 และดังรูปที่ 3.7 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ดังนั้น จึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อยึดที่จะนำไปติดเป็นล้อยึดเซ็นเซอร์ ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบด้านซ้าย ส่วนฝาครอบด้านขวาซึ่งไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนของเพลายึดล้อยึด

3.9.1 ฝาครอบ

เป็นฝาอลูมิเนียมที่ออกแบบเอง จำนวน 2 ชิ้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 121.5 มิลลิเมตร มีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 19 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 18 มิลลิเมตร และมีการเจาะลงเป็นชั้น 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเจาะลึกลงมาจากผิวด้านในเท่ากับ 7 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 96 มิลลิเมตร เพื่อไว้เป็นช่องสำหรับติดตั้งชุดขดลวด และชั้นที่เจาะเป็นร่องเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 82 มิลลิเมตร และ 38 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเจาะลึกลงมาจากผิวด้านใน 12 มิลลิเมตร เพื่อเป็นที่ติดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 ฝาครอบของล้อยันแบบที่ 1 ถึงล้อยันแบบที่ 4

3.9.2 เพล่า

เพล่าทำจากสแตนเลส มีความยาวเท่ากับ 64 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพล่าหลักเท่ากับ 8 มิลลิเมตร บริเวณที่ประกบกับฝาครอบเท่ากับ 12 มิลลิเมตร และตรงกลางเพล่าบริเวณที่ยึดกับขดลวดมีขนาดเท่ากับ 18 มิลลิเมตร และเจาะรูทะลุผ่านตรงกลางเพล่าด้วย เพื่อไว้สำหรับร้อยสายไฟออกมาได้ ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 เพล่าของล้อยันแบบที่ 1 ถึงล้อยันแบบที่ 4

3.9.3 ยางหุ้มล้อ

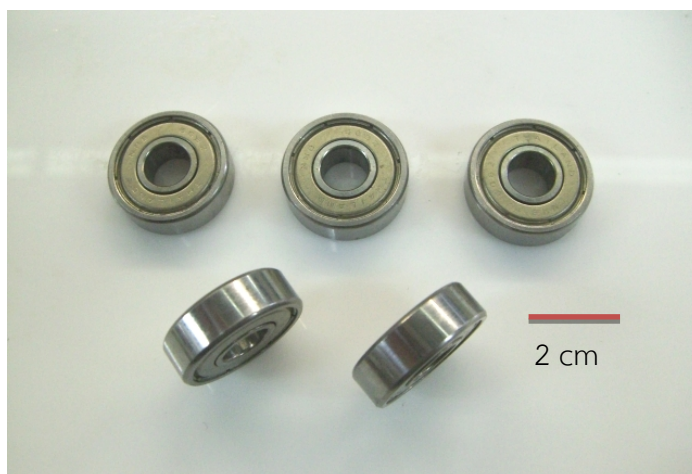
เป็นยางที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 130 มิลลิเมตร ของยางหนาเท่ากับ 28 มิลลิเมตร และมีขนาดหน้ายางเท่ากับ 28 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ยางหุ้มล้อของล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 4

3.9.4 ลูกปืน

ใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร รูปน็อตเบอร์เอ็ม 8 ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 ลูกปืนของล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 4

3.10 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 5

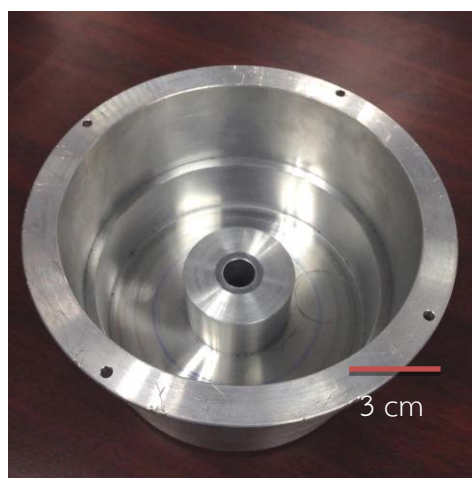
องค์ประกอบส่วนที่สำคัญ สำหรับล้อต้นแบบที่ 5 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญได้แก่

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศ จำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นเรซินที่หล่อเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 133 มิลลิเมตร และหนา 90 มิลลิเมตร ซึ่งภายในประกอบด้วยขดลวดตัวนำเบอร์ 23 พันเป็นรูปวงกลมจำนวน 8 ขด ขดละ 1600 รอบ
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็ก จำนวน 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีการวางแม่เหล็กดังรูปที่ 3.11 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ดังนั้น จึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อ ที่จะนำไปติดเป็นล้อรถเข็น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบซ้ายและขวาไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนเพลายึดล้อ

3.10.1 ฝาครอบ

เป็นฝาอลูมิเนียมที่ออกแบบเอง จำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 161 มิลลิเมตร มีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 91 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมีการเจาะลงเป็นชั้น 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเจาะลึกลงไปจากผิวด้านในเท่ากับ 47 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 135 มิลลิเมตร เพื่อไว้เป็นช่องสำหรับติดตั้งชุดขดลวด และชั้นที่เจาะเป็นร่องเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 125 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเจาะลึกลงไปจากผิวด้านใน 34 มิลลิเมตร เพื่อเป็นที่ติดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ฝาครอบของล้อต้นแบบที่ 5

3.10.2 เผลา

เผลาทำจากสแตนเลส มีความยาวเท่ากับ 274 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเผลาหลักเท่ากับ 12 มิลลิเมตร บริเวณที่ประกบกับฝาครอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และตรงกลางเผลาบริเวณที่ยึดกับขดลวดมีขนาดเท่ากับ 32 มิลลิเมตร และเจาะรูทะลุผ่านตรงกลางเผลาด้วย เพื่อไว้สำหรับร้อยสายไฟออกมาได้ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 เผลาของล้อต้นแบบที่ 5

3.10.3 ลูกปืน

ใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร รูบน็อตเบอร์เอ็ม 12 ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ลูกปืนของล้อต้นแบบที่ 5

3.11 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 6

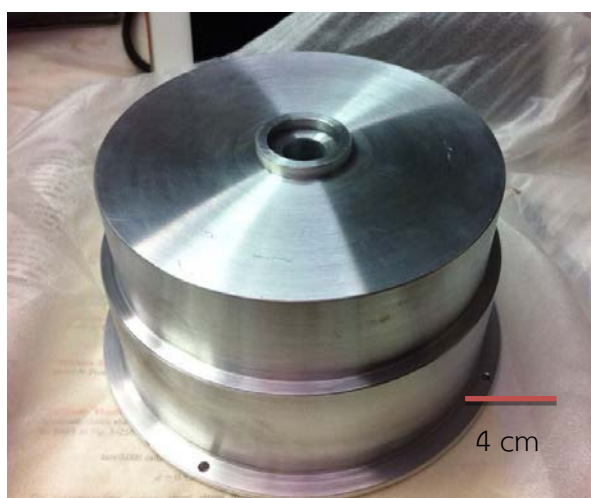
องค์ประกอบส่วนที่สำคัญ สำหรับล้อต้นแบบที่ 6 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญได้แก่

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศ จำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นเรซินที่หล่อเป็นรูปวงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 133 มิลลิเมตร และหนา 45 มิลลิเมตร ซึ่งภายในประกอบด้วยขดลวดตัวนำเบอร์ 28 พันเป็นรูปวงกลมจำนวน 8 ขด ขดละ 1600 รอบ
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็ก จำนวน 2 ชั้น โดยแต่ละชั้นจะมีการวางแม่เหล็กดังรูปที่ 3.11 ที่ได้กล่าวไว้แล้ว

ดังนั้น จึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อ ที่จะนำไปติดเป็นล้อรถเข็น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบซ้ายและขวาไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนเพลายึดล้อ

3.11.1 ฝาครอบ

เป็นฝาอลูมิเนียมที่ออกแบบเอง จำนวน 2 ชั้น ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 161 มิลลิเมตร มีความหนาทั้งหมดเท่ากับ 68.5 มิลลิเมตร มีรูตรงกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 14 มิลลิเมตร และมีการเจาะลงเป็นชั้น 2 ชั้น ซึ่งชั้นแรกเจาะลึกลงไปจากผิวด้านในเท่ากับ 24.5 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 135 มิลลิเมตร เพื่อไว้เป็นช่องสำหรับติดตั้งชุดขดลวด และชั้นที่เจาะเป็นร่องเป็นรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 125 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยเจาะลึกลงไปจากผิวด้านใน 34 มิลลิเมตร เพื่อเป็นที่ติดแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ฝาครอบของล้อต้นแบบที่ 6

3.11.2 เพลา

เพลาทำจากสแตนเลส มีความยาวเท่ากับ 143 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนเพลาลึกเท่ากับ 12 มิลลิเมตร บริเวณที่ประกบกับฝาครอบเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และตรงกลางเพลามีบริเวณที่ยึดกับขดลวดมีขนาดเท่ากับ 32 มิลลิเมตร และเจาะรูทะลุผ่านตรงกลางเพลาด้วย เพื่อไว้สำหรับร้อยสายไฟออกมาได้ ดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.27 เพลาของล้อต้นแบบที่ 6

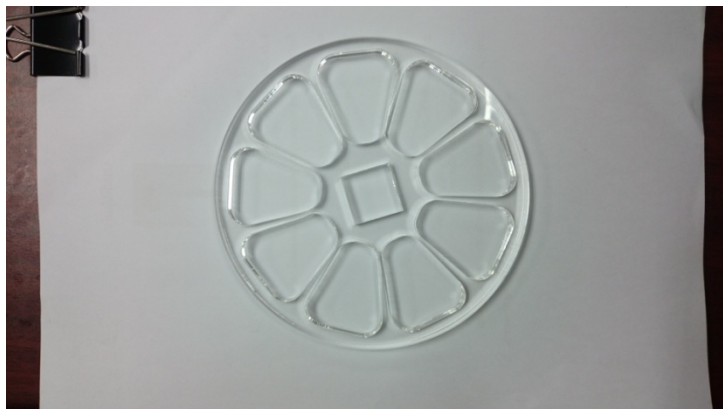
3.11.3 ลูกปืน

ใช้ลูกปืนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 มิลลิเมตร รูบน็อตเบอร์เอ็ม 12 ซึ่งมีขนาดเท่ากับล้อต้นแบบที่ 5 ดังรูปที่ 3.25

3.12 องค์ประกอบของล้อต้นแบบที่ 7

องค์ประกอบส่วนที่สำคัญ สำหรับล้อต้นแบบที่ 7 มีอยู่ 2 ส่วนสำคัญได้แก่

- ส่วนของขดลวดตัวนำแกนอากาศ จำนวน 1 ชั้น มีลักษณะเป็นพลาสติกอะคริลิกวงกลมหนา 5 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 135 มิลลิเมตร อนุญาตเป็นช่องใส่สำหรับใส่ขดลวดทั้ง 9 ขด และหล่อเรซินทับขดลวดไว้ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ส่วนแกนยึดขดลวดของล้อต้นแบบที่ 7

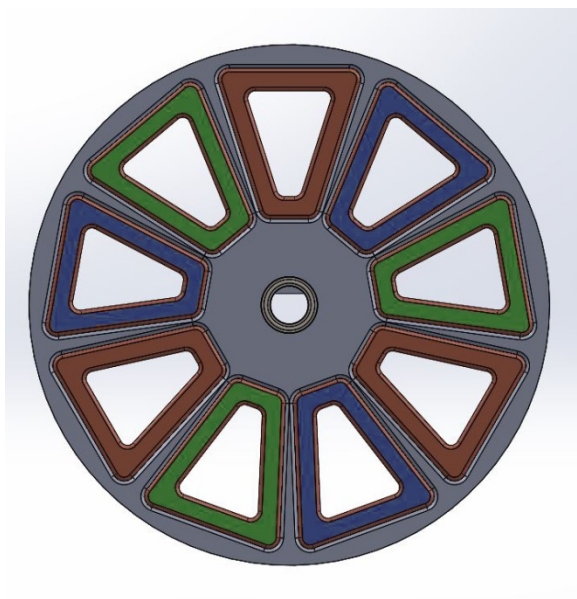
- ส่วนของฝาครอบติดแม่เหล็ก 2 ด้าน เส้นผ่านศูนย์กลาง 154 มิลลิเมตร แต่ละด้านจะมีแม่เหล็กทั้งหมด 12 ชิ้นวางเรียงสลับขั้วเหนียวได้กัน ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ฝาครอบของล้อต้นแบบที่ 7

ดังนั้น จึงมีการออกแบบโครงสร้างของล้อ ที่จะนำไปติดเป็นล้อรถเข็น ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 3 ส่วน คือ ส่วนฝาครอบซ้ายและขวาไว้สำหรับติดแม่เหล็ก และส่วนเพลายึดล้อ

การจัดเรียงขดลวดทั้ง 9 ขด จะแบ่งออกเป็น 3 ชุดแต่ละชุดจะมีขดลวด 3 ขดที่มุมห่างกัน 120 องศา มาต่ออนุกรมกัน จะได้เป็น Generator แบบสามเฟส ใช้แม่เหล็กทั้งหมด 12 ก้อน วางเรียงสลับซ้ายเหนือใต้ ดังรูปที่ 3.30 และรูปที่ 3.31 ซึ่งการจัดเรียงอุปกรณ์แบบนี้ จะถูกเรียกว่า AFPM Generator (Axial-Flux Permanent Magnet Generator) ซึ่งเป็น Generator ที่สามารถให้ประสิทธิภาพสูงในรอบการหมุนที่ต่ำได้ ดังนั้นจึงเป็นแบบล้อที่สามารถผลิตพลังงานได้มากที่สุด ในขนาดที่เล็กที่สุดได้



รูปที่ 3.30 ตำแหน่งขดลวดของล้อต้นแบบที่ 7

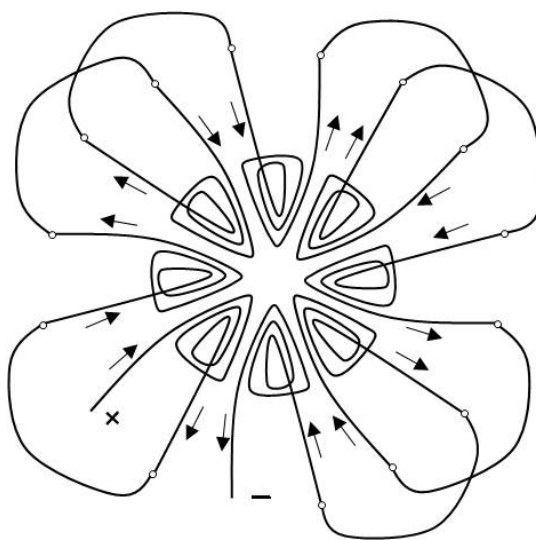


รูปที่ 3.31 ตำแหน่งของแม่เหล็กเมื่อเทียบกับขดลวดของล้อต้นแบบที่ 7

3.13 การหล่อเรซินและการประกอบล้อต้นแบบทั้งหมด

3.13.1 การหล่อเรซิน

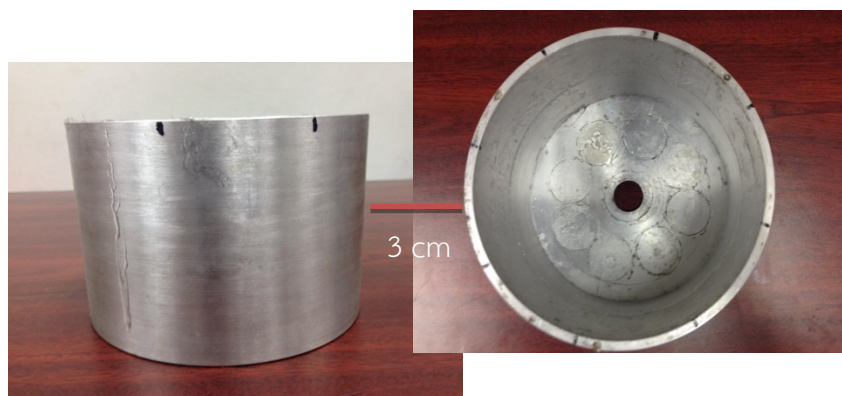
การหล่อเรซินจะใช้แบบหล่อที่ออกแบบ ดังรูปที่ 3.33 และรูปที่ 3.34 โดยก่อนหล่อนั้นต้องจัดเรียงสายไฟและเชื่อมต่อสายไฟแต่ละขดลวดให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.32 แล้วจัดวางขดลวดลงในแบบหล่อ แล้วจึงเทน้ำยาหล่อเรซินลงไป ดังรูปที่ 3.35 และรูปที่ 3.36 ทิ้งไว้รอจนน้ำยาแข็งตัว จึงค่อยแกะออกจากแบบหล่อ



รูปที่ 3.32 การเชื่อมต่อขดลวดตัวนำของล้อต้นแบบทั้ง 6 ล้อ



รูปที่ 3.33 แบบหล่อเรซินของล้อต้นแบบที่ 1 ถึงล้อต้นแบบที่ 4



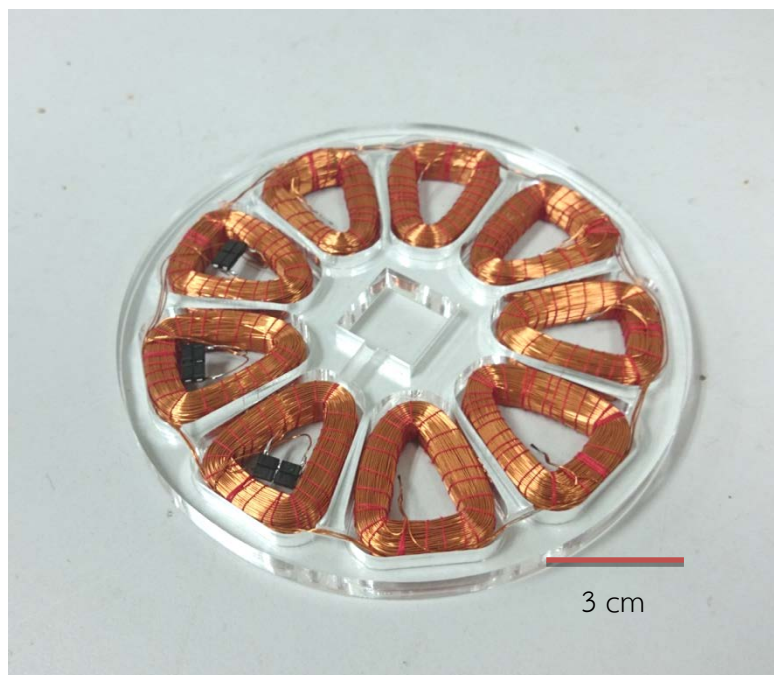
รูปที่ 3.34 แบบหล่อเรซินของล้อยตันแบบที่ 5 และล้อยตันแบบที่ 6



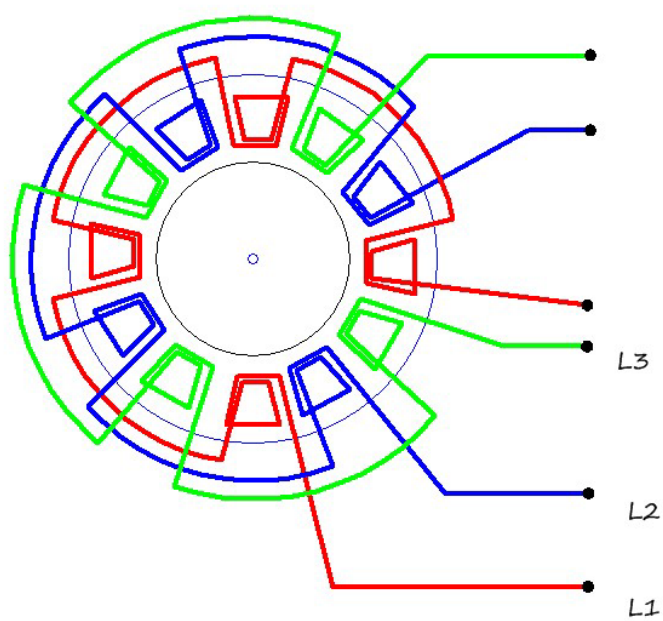
รูปที่ 3.35 การหล่อเรซินของขดลวดล้อยตันแบบที่ 1 ถึงล้อยตันแบบที่ 4



รูปที่ 3.36 การหล่อเรซินของขดลวดล้อยตันแบบที่ 5 และล้อยตันแบบที่ 6



รูปที่ 3.37 การหล่อเรซินของขดลวดลัดต้นแบบที่ 7



รูปที่ 3.38 การเชื่อมสายไฟของขดลวดลัดต้นแบบที่ 7

3.13.2 การประกอบล้อรถเข็น

การประกอบล้อรถเข็นของล้อต้นแบบที่ 1 ถึง ล้อต้นแบบที่ 7 เข้ากับตัวโครงสร้างของรถเข็น จะใช้วิธีและหลักการแบบเดียวกัน โดยมีวิธีประกอบล้อรถเข็นเข้ากับตัวโครงสร้างรถเข็น ดังวิธีต่อไปนี้

1) นำลูกปืนมาใส่ที่ด้านนอกของฝาครอบล้อรถเข็นทั้งสองด้านให้เรียบร้อย จากนั้นนำแม่เหล็กมาติดที่ด้านในของฝาครอบล้อทั้งสองด้าน โดยการติดแม่เหล็กแต่ละฟานั้นจะต้องติดแม่เหล็กขั้วเหนือสลับกับขั้วใต้ไปจนครบ 8 ตัว ดังรูปที่ 3.39



รูปที่ 3.39 การติดแม่เหล็กเข้ากับฝาครอบล้อรถเข็นทั้ง 2 ฝา

2) นำชุดขดลวดที่หล่อด้วยเรซินแล้วมาใส่เข้ากับฝาครอบด้านใดด้านหนึ่ง แล้วนำฝาครอบทั้งสองฟามาประกอบเข้าด้วยกัน ซึ่งในการประกอบฝาครอบนั้นต้องให้แม่เหล็กขั้วเหนือของฝาครอบอันหนึ่งอยู่ตรงข้ามกับขั้วใต้ของฝาครอบอีกฟาที่เหลือ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดสนามแม่เหล็กตัดผ่านชุดขดลวดตัวนำที่อยู่ตรงกลาง ดังรูปที่ 3.40



รูปที่ 3.40 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ

3) เมื่อประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดเรียบร้อยแล้ว ให้หุ้มลวดด้วยยางที่เตรียมไว้ให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.41 เพื่อที่จะนำไปประกอบเข้ากับโครงสร้างรถเข็นสำหรับการเข็นทดสอบจริงต่อไป



รูปที่ 3.41 การประกอบฝาครอบกับชุดขดลวดตัวนำ

4) นำลวดที่ได้ไปติดตั้งกับรถเข็นให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.42

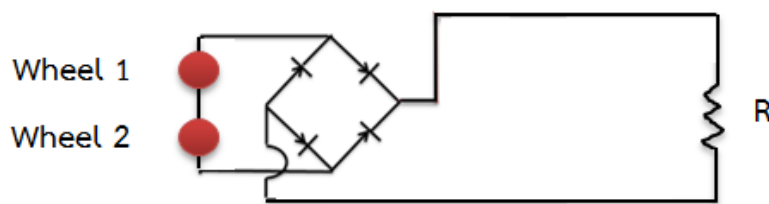


รูปที่ 3.42 รถเข็นกำเนิดพลังงาน

3.14 ชุดออกแบบการทดลองการต่อล้อแบบอนุกรมและขนาน

3.14.1 การต่อล้อ 2 ล้อแบบอนุกรม

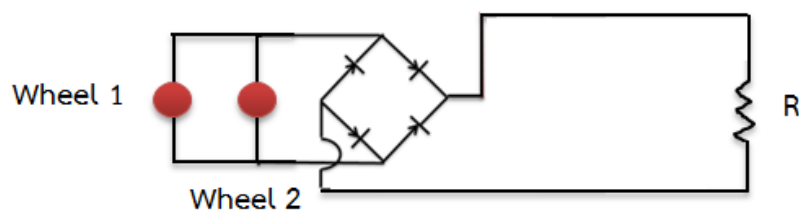
นำล้อแต่ละล้อผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วนำมาต่อแบบอนุกรมโดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานค่าต่างๆโดยเซ็นรถเซ็นข้อปั้งด้วยความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังผลการทดลองในบทที่ 4 ดังรูปที่ 3.43



รูปที่ 3.43 การต่อล้อ 2 ล้อ แบบอนุกรม

3.14.2 การต่อล้อ 2 ล้อแบบขนาน

นำล้อแต่ละล้อผ่านวงจรเรียงกระแสแล้วนำมาต่อแบบขนานโดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมความต้านทานค่าต่างๆโดยเซ็นรถเซ็นข้อปั้งด้วยความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ดังผลการทดลองในบทที่ 4 ดังรูปที่ 3.44

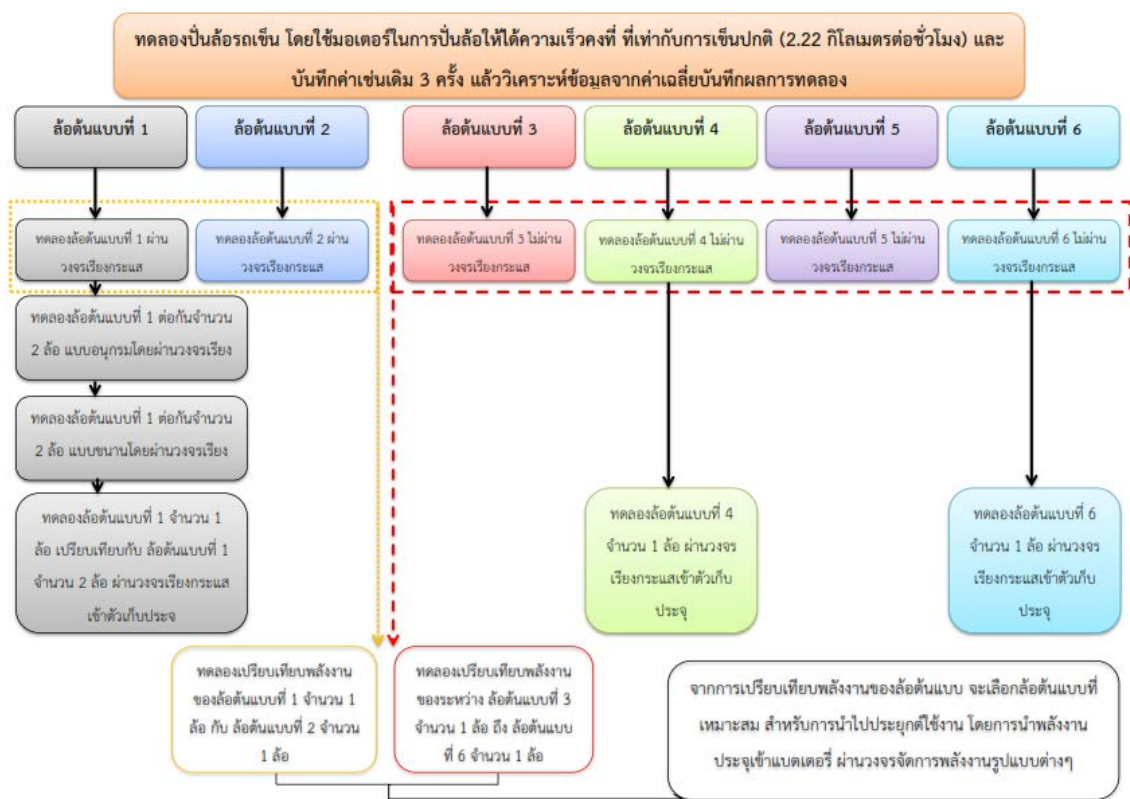


รูปที่ 3.44 การต่อล้อ 2 ล้อ แบบขนาน

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองของล้อต้นแบบทั้ง 7 แบบที่ได้ออกแบบไว้ตามหัวข้อของบทที่ 3 ที่ผ่านมาซึ่งจะเลือกล้อต้นแบบที่เหมาะสมสำหรับการประจุพลังงานจากล้อต้นแบบที่เลือกนั้นลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออน โดยการผ่านวงจรจัดการพลังงานรูปแบบต่างๆ และสามารถนำพลังงานที่ประจุลงแบตเตอรี่ไปใช้ประโยชน์อีกต่อไปได้



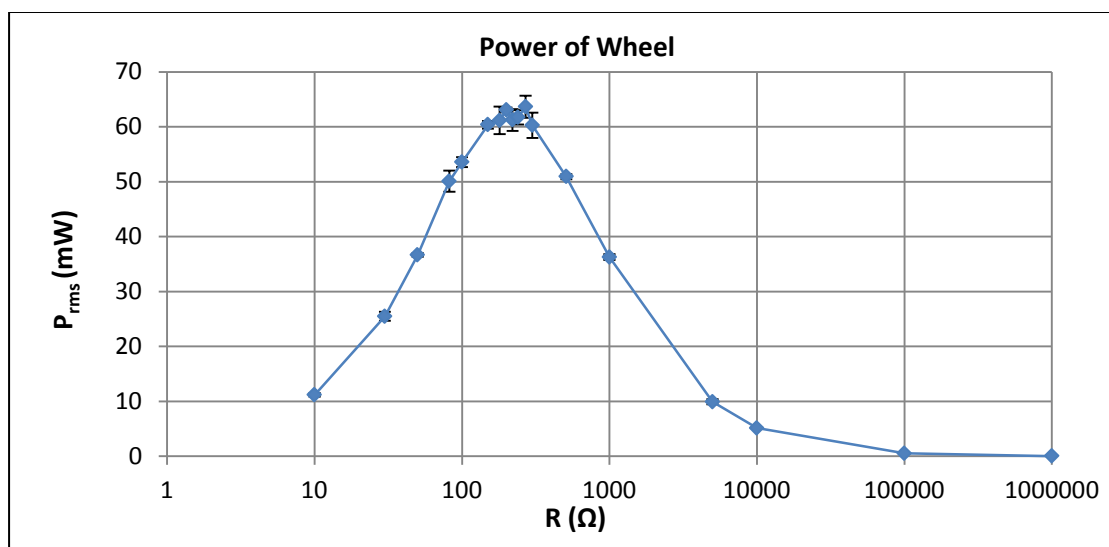
4.1 การทดลองล้อต้นแบบที่ 1

ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาส่วนของพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบที่ 1 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ(2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และ บันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

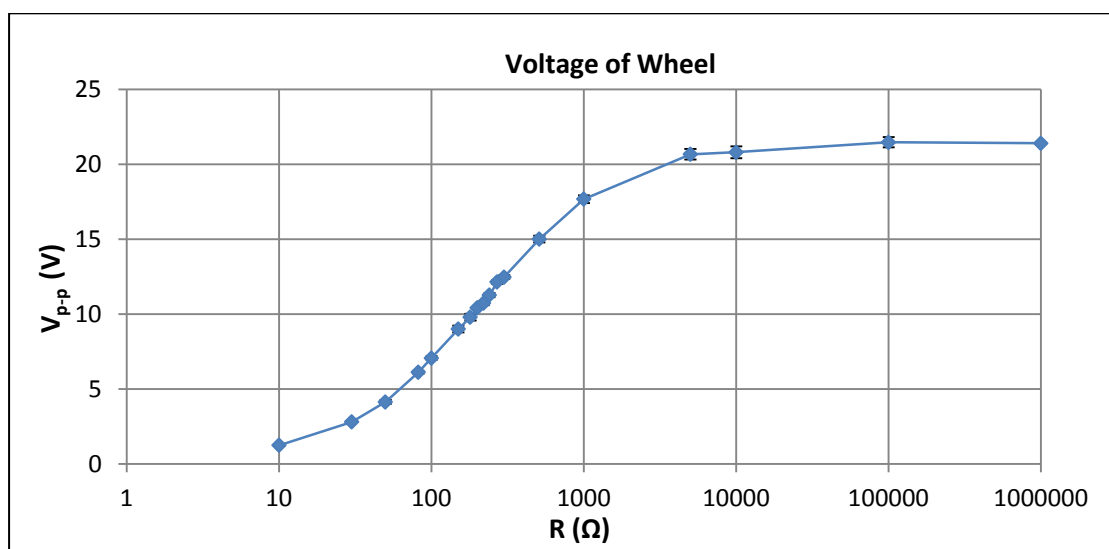
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่1ผ่านวงจรเรียงกระแส

R (ohm)	เฉลี่ย		P = V*I (mW)
	V _{avg} (V)	I _{avg} (A)	
10	0.2096	0.02096	4.393216
30	0.6268	0.020893333	13.09594133
50	0.993666667	0.019873333	19.74746889
82	1.509666667	0.018410569	27.79382249
100	1.638666667	0.016386667	26.85228444
150	2.217666667	0.014784444	32.78696963
180	2.45	0.013611111	33.34722222
200	2.633	0.013165	34.663445
220	2.72	0.012363636	33.62909091
240	2.89	0.012041667	34.80041667
270	3.058	0.011325926	34.63468148
300	3.154666667	0.010515556	33.17307259
510	3.913666667	0.007673856	30.03291525
1000	4.693333333	0.004693333	22.02737778
5000	5.395333333	0.001079067	5.821924356
10000	5.736333333	0.000573633	3.290552011
100000	6.066	0.00006066	0.36796356
No Load	7.539	0.000007539	0.056836521

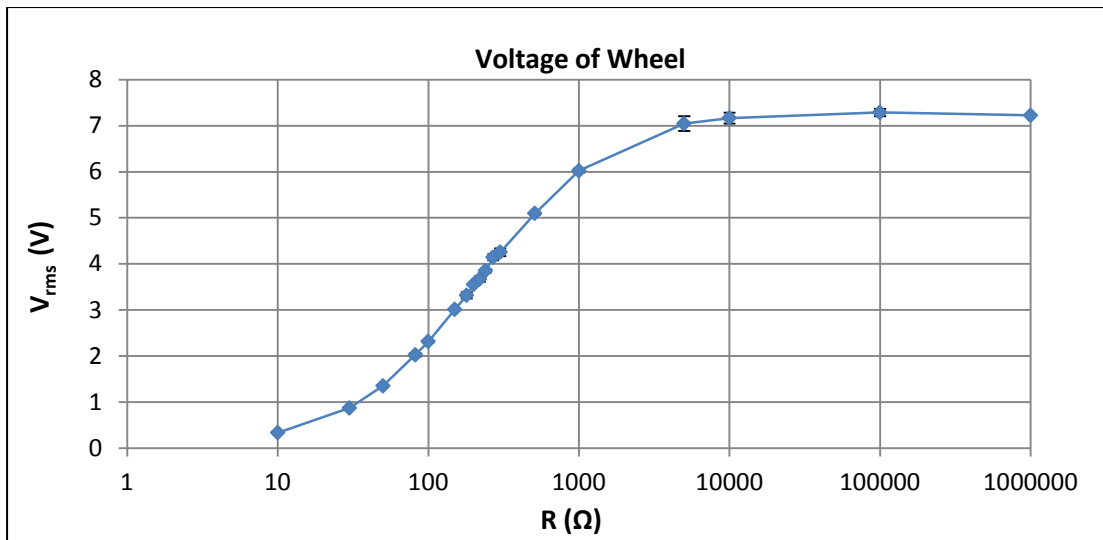
จากผลการทดลองที่ได้ที่ค่าความต้านทานภายในขดลวดเท่ากับ 270 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 63.64 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.1 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 12.13 โวลต์ ดังรูปที่ 4.2 ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.14 โวลต์ ดังรูปที่ 4.3 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 15 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.4



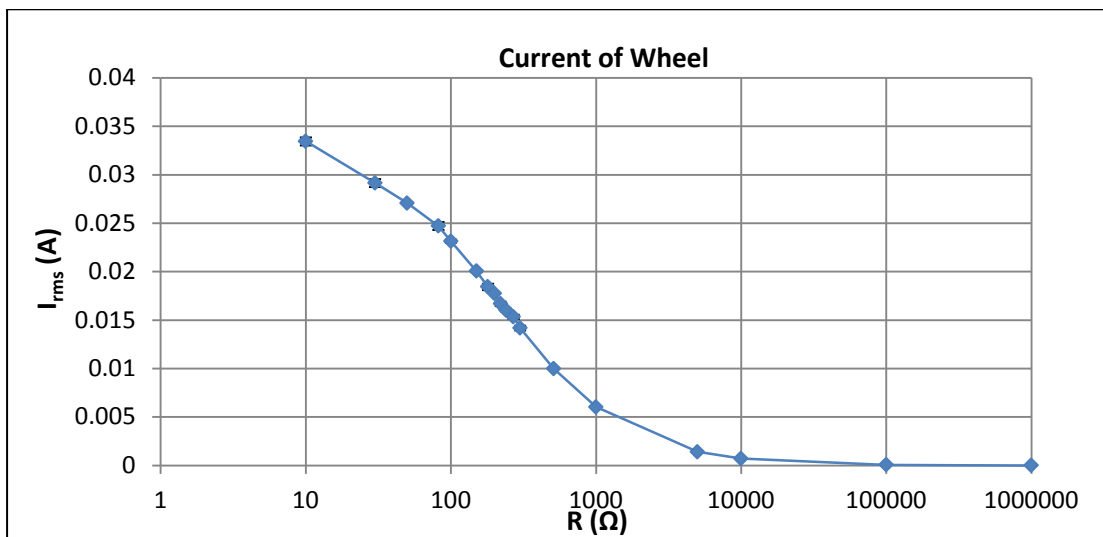
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

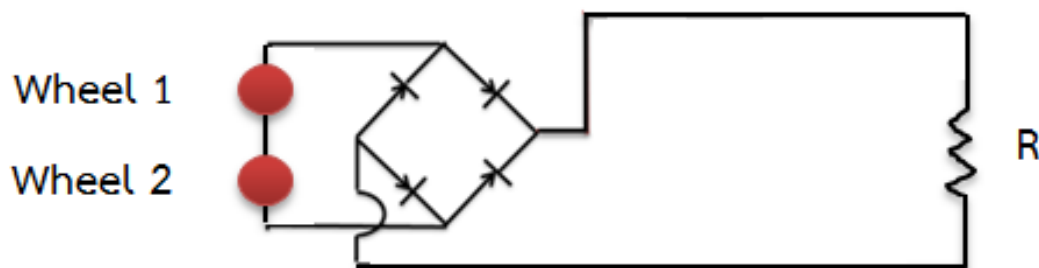


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.1.1 การทดลองลัดต้นแบบที่ 1 ต่อกันจำนวน 2 ล้อโดยผ่านวงจรเรียงกระแส

การทดลองนี้ จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากการต่อสองล้อเข้าด้วยกันโดยประกอบล้อเข้ากับรถเข็นซีอปปิงและทดลองเซ็นจริงด้วยความเร็วของคนเดินปกติที่ความเร็ว 2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง หรือ 90 รอบต่อนาที และเนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่ได้ออกมาเป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่ไม่คงที่ ทำให้ไม่สามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ ดังนั้นจึงทำการแปลงแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นโดยใช้ไดโอดเบอร์ BAT46 ที่มีแรงดันตกคร่อมเพียง 450 มิลลิโวลต์ ซึ่งมีการสูญเสียแรงดันต่ำและมีผลการทดลองดังนี้

4.1.1.1 การต่อล้อต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบอนุกรม

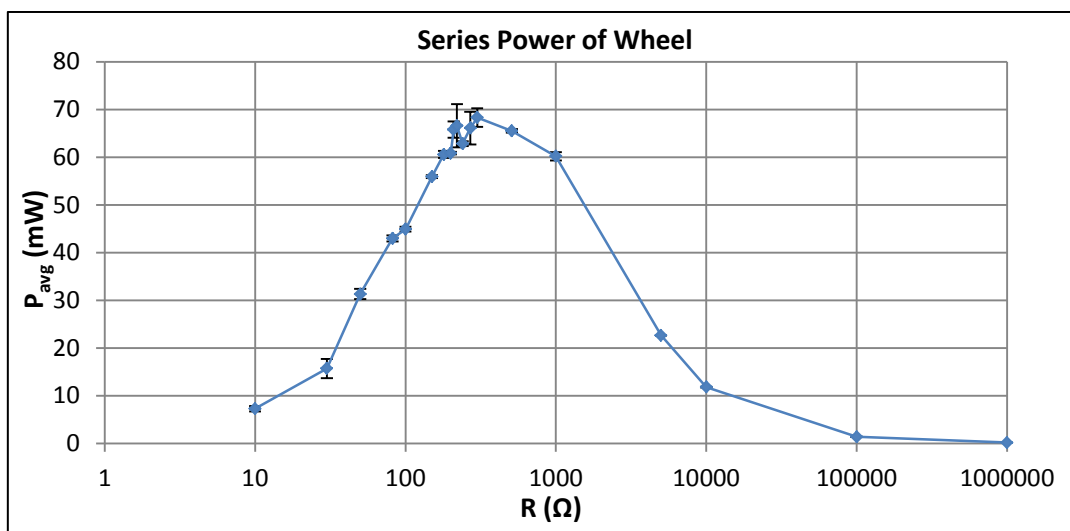


ผลการทดลอง นี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ โดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นการเก็บค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการต่อ 2 ล้อแบบอนุกรม ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.2

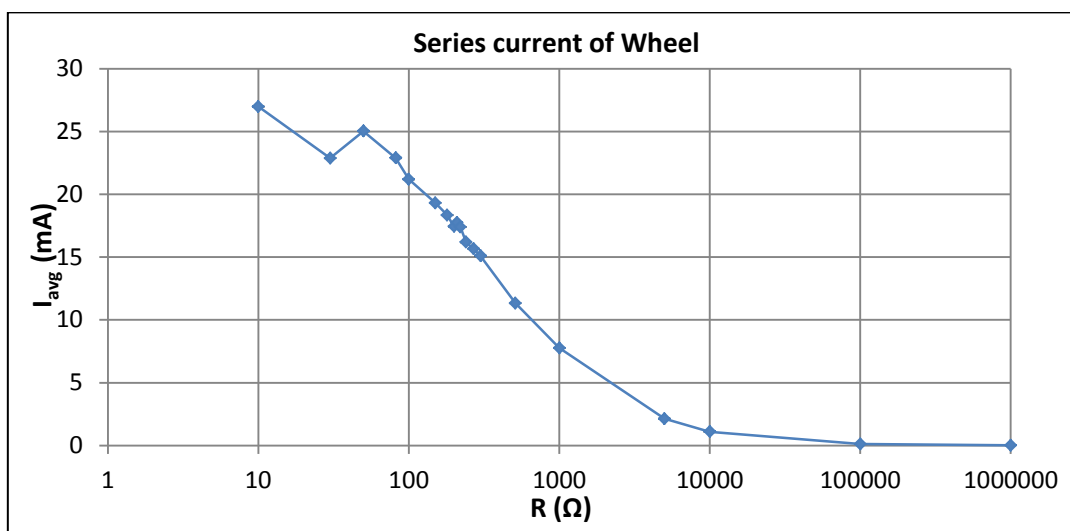
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของล้อต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบอนุกรมผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	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

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ ที่ค่าความต้านทาน 300 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 68.31 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.5 ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 15.09 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.6 และค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.527 โวลต์ ดังรูปที่ 4.7

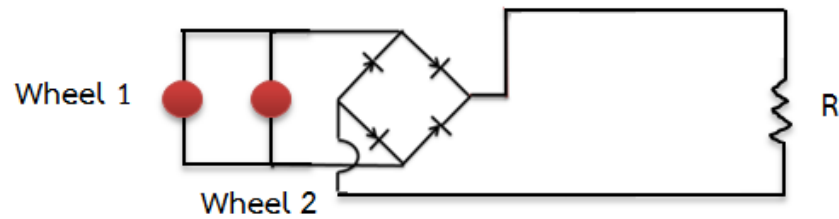


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

4.1.1.2 การต่อลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบขนาน

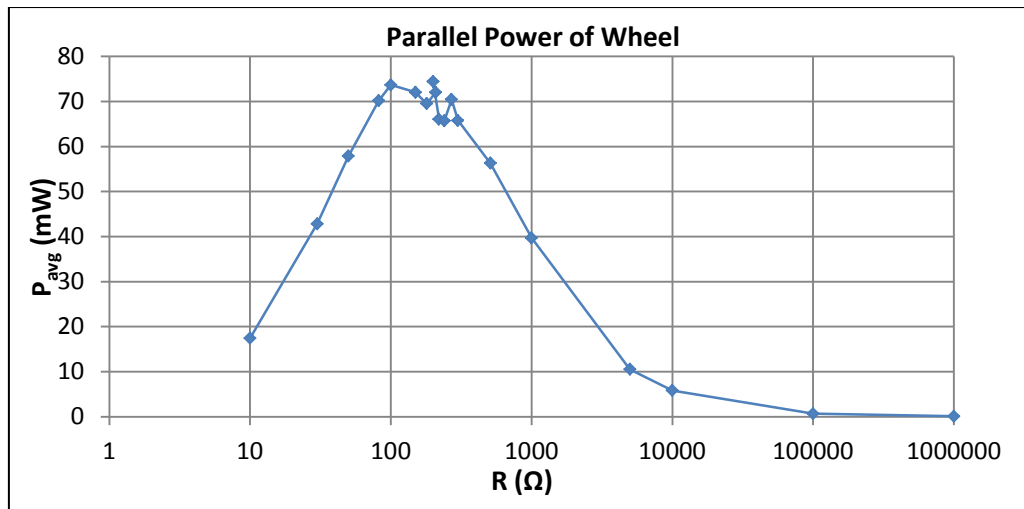


ผลการทดลอง นี้แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อ โดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นการเก็บค่าไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากการต่อ 2 ล้อต่อแบบขนาน ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.3

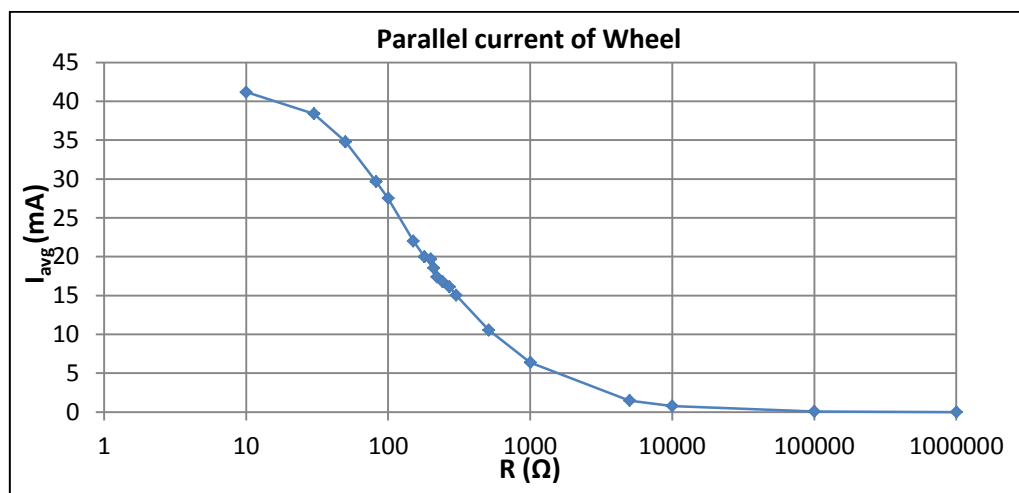
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของการต่อลัดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ล้อแบบขนานผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	I_{avg} (mA)	V_{avg} (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
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

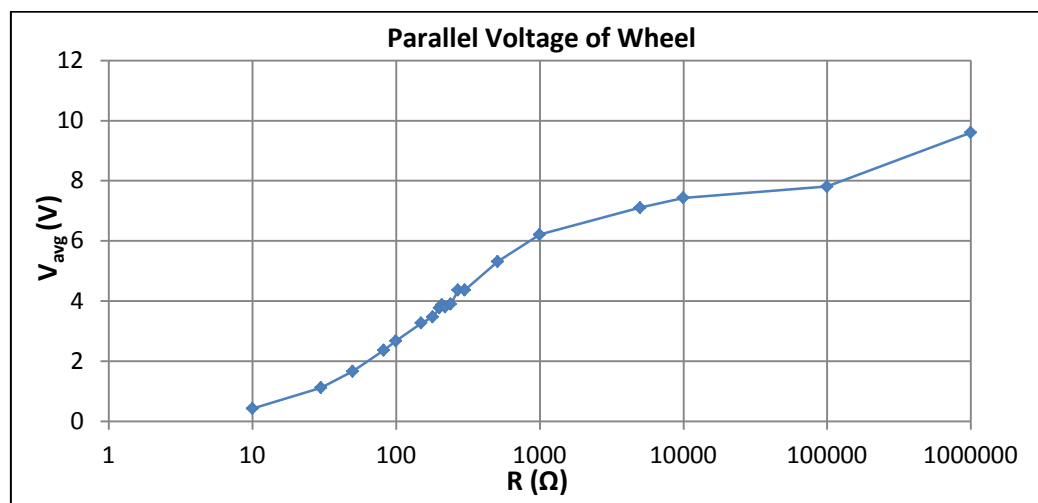
ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ค่าความต้านทาน 200 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 74.44 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.7 ค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 19.72 มิลลิแอมป์ ดังรูปที่ 4.8 และค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3.77 โวลต์ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน

จากผลการทดลองที่ได้เราจะเห็นว่าเมื่อเราใช้โหนดที่ต่ำกว่า 300 โอห์ม หรือใช้กระแสที่มากกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ การต่อลวดแบบขนานจะให้พลังงานที่ดีกว่าแต่ถ้าเราใช้กับโหนดที่มากกว่า 300 โอห์ม หรือใช้กระแสที่ต่ำกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ การต่อแบบอนุกรมจะให้พลังงานที่ดีกว่า

4.1.2 การทดลองหาพลังงานของลวดต้นแบบที่ 1 เข้าตัวเก็บประจุ

การทดลองนี้ จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากการต่อหนึ่งลวดและสองลวดโดยวิธีการทดลอง จะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นลวดให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ(2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุแล้วบันทึกเวลาพลังงานเข้าจุดเสถียรจำนวน 5 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปหาพลังงานต่อวินาทีเพื่อที่จะเปรียบเทียบการต่ออนุกรมกับการต่อขนาน

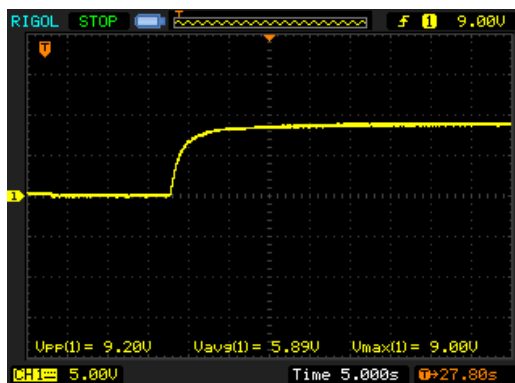
4.1.2.1 การลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 1 ลวดเปรียบเทียบกับ 2 ลวด

ผลการทดลองนี้ แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นลวด 1 ลวดเปรียบเทียบกับลวด 2 ลวด โดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสและต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 2200 ไมโครฟารัด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.4

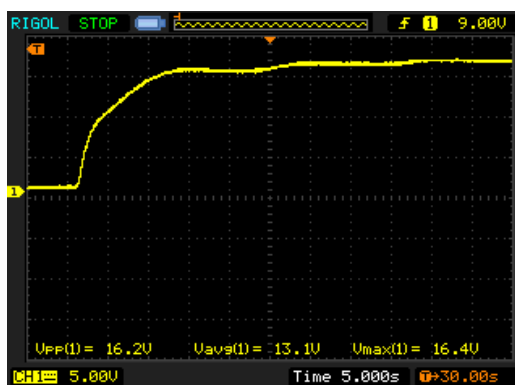
ตารางที่ 4.4 การทดลองลวดต้นแบบที่ 1 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

	Volt (v)	Time (s)	Energy (mJ)	Energy (mJ/s)
การทดลองลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 1 ลวดผ่าน วงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	27.2	9.06	90.42	5.02
การทดลองลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลวด ต่ออนุกรมผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	47.5	15.83	275.76	9.19
การทดลองลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลวด ต่อขนานผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ	26.6	8.87	86.48	7.86

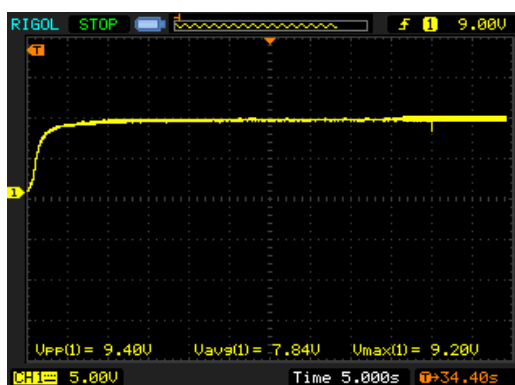
ซึ่งผลการทดลองที่ได้ลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 1 ลวดจะให้กระแสที่ 27.2 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 9.06 วินาทีและให้พลังงานต่อวินาทีที่ 5.02 จูลต่อวินาทีดังรูปที่ 4.10 และการเข็นลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลวดต่อแบบอนุกรมจะให้กระแสที่ 47.5 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 15.833 วินาทีและให้พลังงานต่อวินาทีที่ 9.192 จูลต่อวินาทีดังรูปที่ 4.11 และการเข็นลวดต้นแบบที่ 1 จำนวน 2 ลวดต่อแบบขนานจะให้กระแสที่ 26.6 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 8.86 วินาที และให้พลังงานต่อวินาทีที่ 7.86 จูลต่อวินาทีดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลาเมื่อต่อแบบอนุกรม



รูปที่ 4.12 รูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลาเมื่อต่อแบบขนาน

จากผลการเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่า การต่อแบบขนานจะได้ผลดีเมื่อมีการใช้กระแสที่มากกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ เมื่อดูจากกราฟ 4.11 และ 4.12 เปรียบเทียบกัน จะเห็นว่าความชันของกราฟอนุกรมตั้งแต่เริ่มจะมีค่าความชันมากกว่าการต่อแบบขนานหมายความว่า กระแสที่ตัวเก็บประจุชาร์จ ใช้กระแสน้อยกว่า 15.09 มิลลิแอมป์ จึงทำให้การต่อแบบอนุกรมให้พลังงานต่อวินาทีที่มากกว่าสำหรับล้อยต้นแบบที่ 1

4.2 การทดลองล้อยันแบบที่ 2

การทดลองล้อยันแบบที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบข้อมูลกับล้อยันแบบที่ 1 เนื่องจากล้อยันแบบที่ 2 มีการเปลี่ยนแกนกลางของขดลวดตัวนำโดยอ้างอิงจากทฤษฎีค่าความซึมซาบทางสนามแม่เหล็กโดยที่ชนิดของแกนกลางของขดลวดตัวนำจะมีผลการเหนี่ยวนำต่อการเกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้นเพียงใด โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มัลติมิเตอร์ในการป้อนค่าให้ได้ความเร็วคงที่ที่เท่ากับการเดินปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

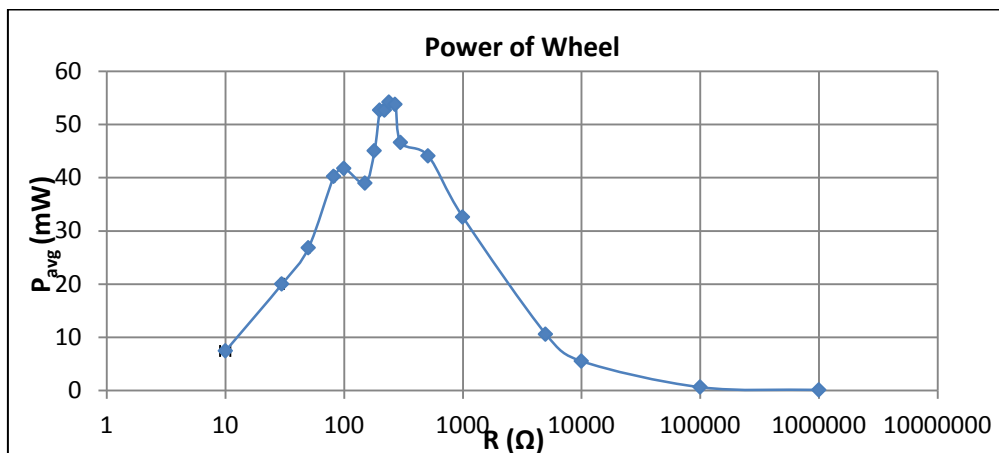
การทดลองล้อยันแบบที่ 2

ผลการทดลองในส่วนนี้เพื่อที่จะเปรียบเทียบข้อมูลกับล้อยันแบบที่ 1 ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดและบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.5

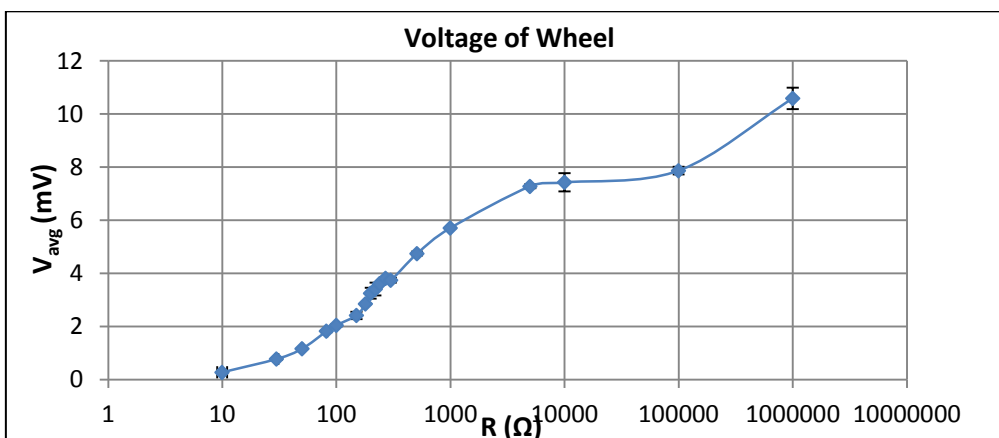
ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่ 2 ผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	เฉลี่ย 5 ครั้ง		P = V*I (mW)
	I _{avg} (mA)	V _{avg} (V)	
10	0.027278	0.27278	7.441
30	0.025843	0.77528	20.035
50	0.02316	1.158	26.819
82	0.022159	1.817	40.262
100	0.020434	2.0434	41.755
150	0.016117	2.4176	38.965
180	0.01582	2.8476	45.049
200	0.016237	3.2474	52.728
220	0.01548	3.4056	52.719
240	0.015028	3.6068	54.204
270	0.014114	3.8108	53.786
300	0.012463	3.739	46.6
510	0.009299	4.7426	44.102
1000	0.005709	5.7092	32.595
5000	0.001455	7.277	10.591
10000	0.000742	7.4244	5.512
100000	7.87E-05	7.8686	0.619
No Load	1.06E-05	10.5896	0.112

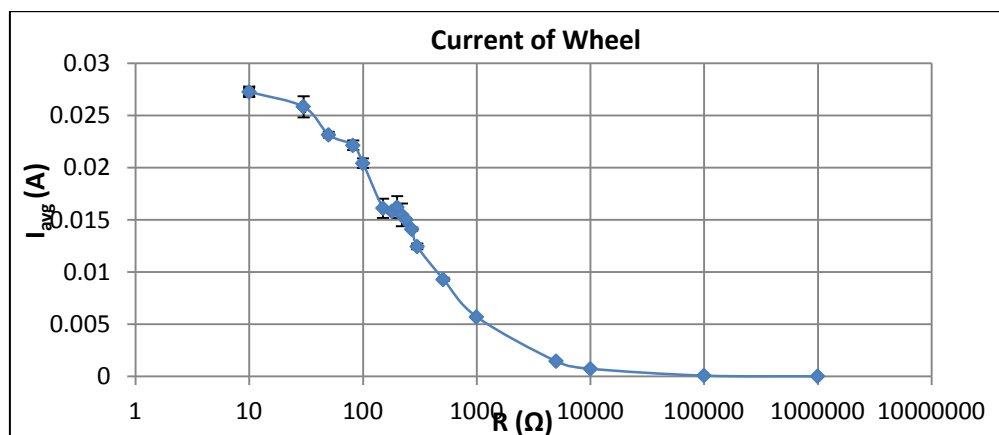
จากผลการทดลองที่ค่าความต้านทาน 240 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 54.204 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.13 ค่าแรงดันเฉลี่ยมีค่าประมาณ 3.6068 โวลต์ดังรูปที่ 4.14 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 0.015028 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.2 การทดลองล้อยันแบบที่ 3

เนื่องจากล้อยันแบบที่ 1 และล้อยันแบบที่ 2 ยังให้พลังงานที่น้อยอยู่ดังนั้นในส่วนนี้จะเป็นการทดลองเปลี่ยนรูปแบบและขนาดรูปทรงของแม่เหล็กให้มีรูปร่างแบบเดียวกับขดลวดเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในการให้พลังงานระหว่างรูปทรงแม่เหล็กที่มีรูปแบบที่แตกต่างกันโดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อยันให้ได้ความเร็วคงที่ที่การเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

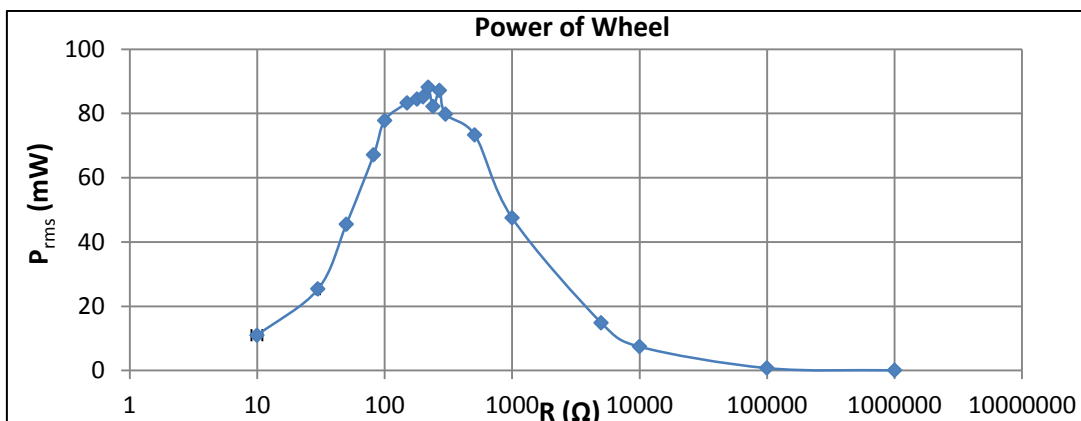
การทดลองล้อยันแบบที่ 3

ผลการทดลองในส่วนนี้จะเปรียบเทียบข้อมูลกับล้อยันแบบที่ 1 ว่ามีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใด เนื่องจากการเปลี่ยนรูปทรงขนาดแม่เหล็กให้มีรูปร่างเดียวกันกับขดลวด และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.6

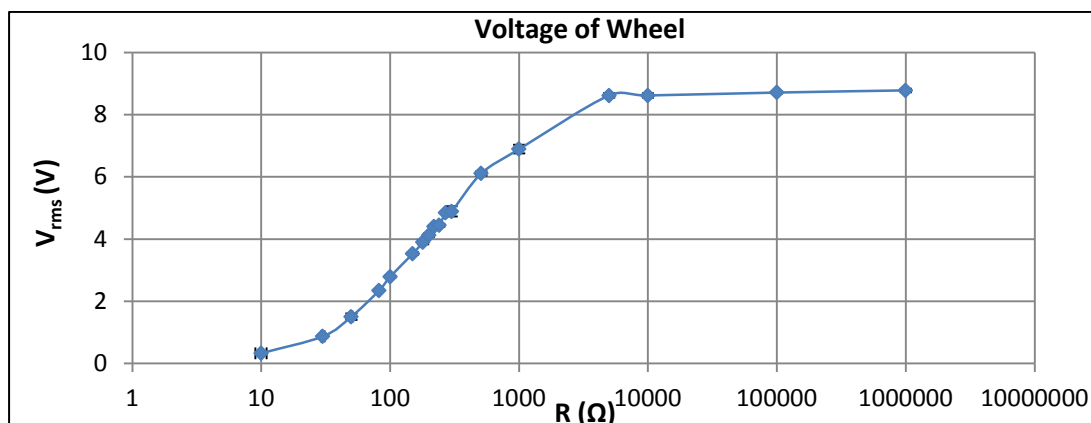
ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่ 3 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}(A)$	$P = I*V$ (mW)
	V_{p-p} (V)	$V_{rms}(V)$		
10	0.904	0.331333	0.033133	10.99666667
30	2.446667	0.872	0.029067	25.35628889
50	3.92	1.506667	0.030133	45.50933333
82	6.053333	2.346667	0.028618	67.15853659
100	7.266667	2.79	0.0279	77.84566667
150	8.993333	3.533333	0.023556	83.236
180	10.06667	3.9	0.021667	84.51444444
200	10.53333	4.126667	0.020633	85.15566667
220	11.4	4.403333	0.020015	88.13409091
240	11.56667	4.44	0.0185	82.14583333
270	12.33333	4.85	0.017963	87.12209877
300	12.73333	4.89	0.0163	79.75566667
510	15.56667	6.113333	0.011987	73.28496732
1000	18	6.89	0.00689	47.48196667
5000	22.06667	8.616667	0.001723	14.84994
10000	22.2	8.616667	0.000862	7.42497
100000	22.36	8.71	8.71E-05	0.758645667
No load	23	8.78	8.78E-06	0.077090067

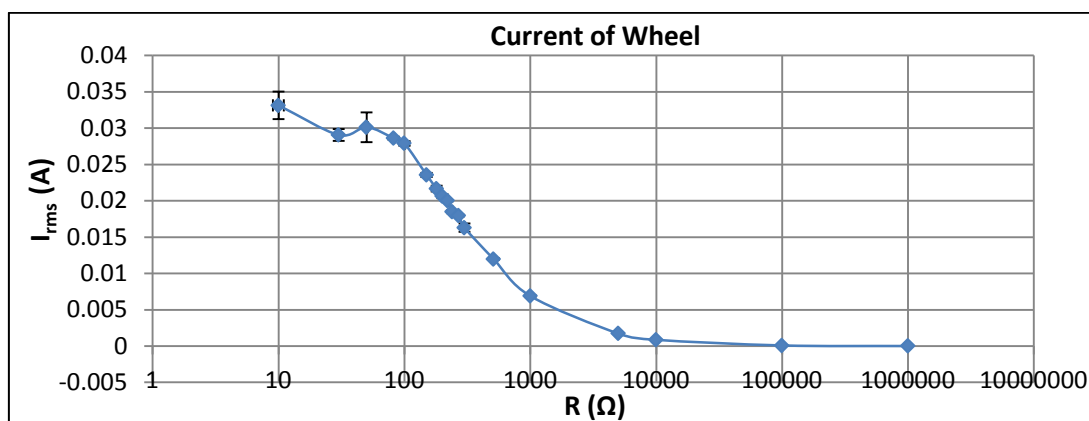
ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีพลังงานเพิ่มขึ้นจากล้อยต้นแบบที่ 1 โดยที่ค่าความต้านทาน 220 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 88.134 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.16 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 11.4 โวลต์ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.40 โวลต์ดังรูปที่ 4.17 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 20.22 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.4 การทดลองล้อยันแบบที่ 4

เนื่องจากล้อยันแบบที่ 3 ยังให้พลังงานไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นล้อยันแบบที่ 4 จะเป็นการทดลองเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กจากล้อยันแบบที่ 3 เพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้นโดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อยันให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

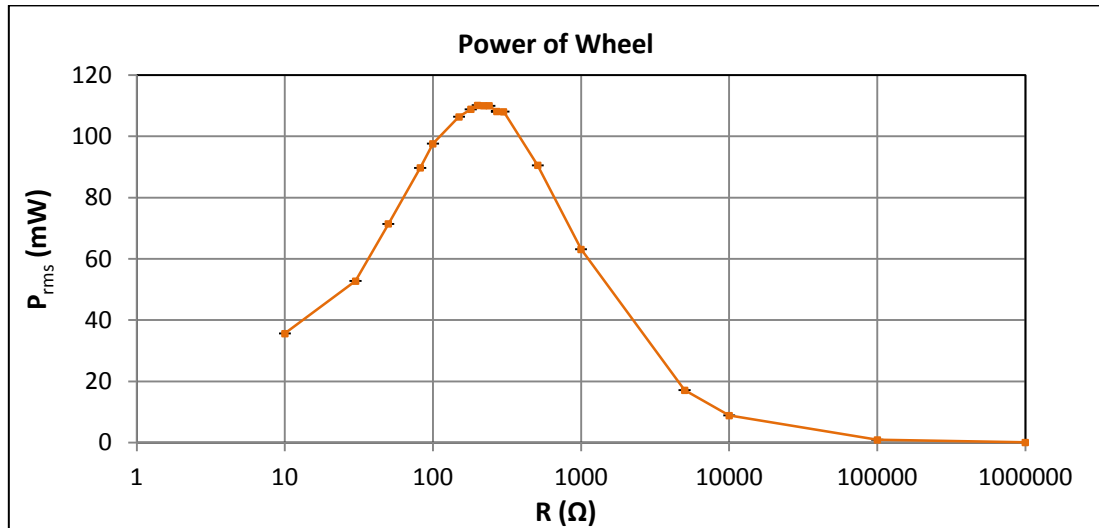
การทดลองล้อยันแบบที่ 4 (เพิ่มขึ้นจำนวนแม่เหล็ก)

ผลการทดลองในส่วนนี้เพื่อที่จะเปรียบเทียบล้อยันแบบที่ 3 ว่าจะมีความแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดเนื่องจากการเพิ่มขึ้นจำนวนแม่เหล็กเข้าไปเพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.7

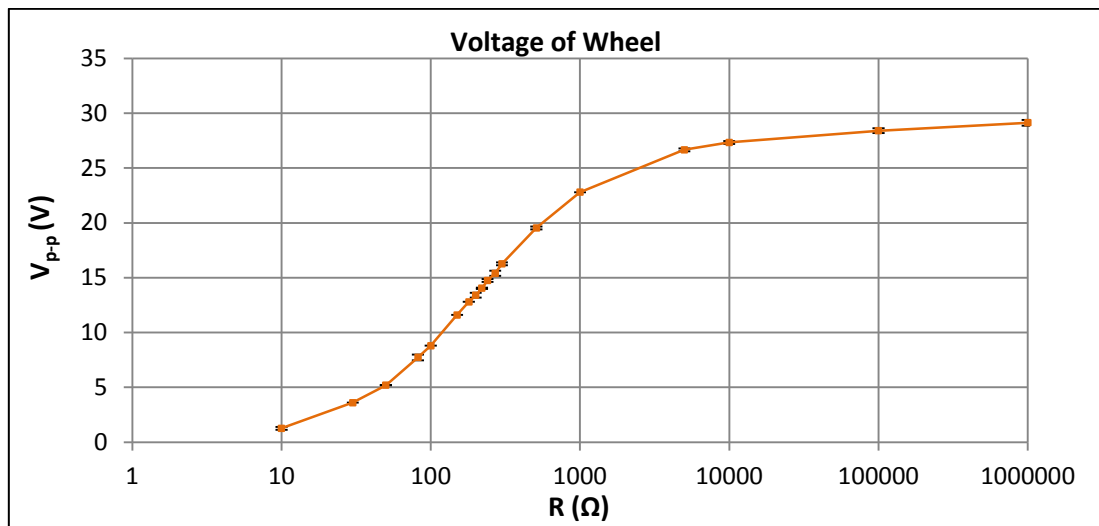
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่ 4 ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}(A)$	$P = I \cdot V$ (mW)
	V_{p-p} (V)	V_{rms} (V)		
10	1.2666	0.5968	0.05968	35.62070867
30	3.6033	1.258333	0.041944	52.78027778
50	5.1966	1.889667	0.037793	71.4179
82	7.7333	2.712333	0.033077	89.71695528
100	8.8033	3.124	0.03124	97.59474667
150	11.6033	3.995	0.026633	106.4015044
180	12.8033	4.426333	0.024591	108.8468907
200	13.4	4.693333	0.023467	110.1383033
220	14.0333	4.919667	0.022362	110.0153348
240	14.7333	5.138	0.021408	109.9985861
270	15.4	5.403333	0.020012	108.1364025
300	16.2666	5.693667	0.018979	108.06221
510	19.5333	6.796333	0.013326	90.5701732
1000	22.8	7.944	0.007944	63.10780067
5000	26.6666	9.251	0.00185	17.11640353
10000	27.3333	9.418	0.000942	8.869891667
100000	28.4	9.632	9.63E-05	0.927754747
No Load	29.1333	9.718	9.72E-06	0.094442886

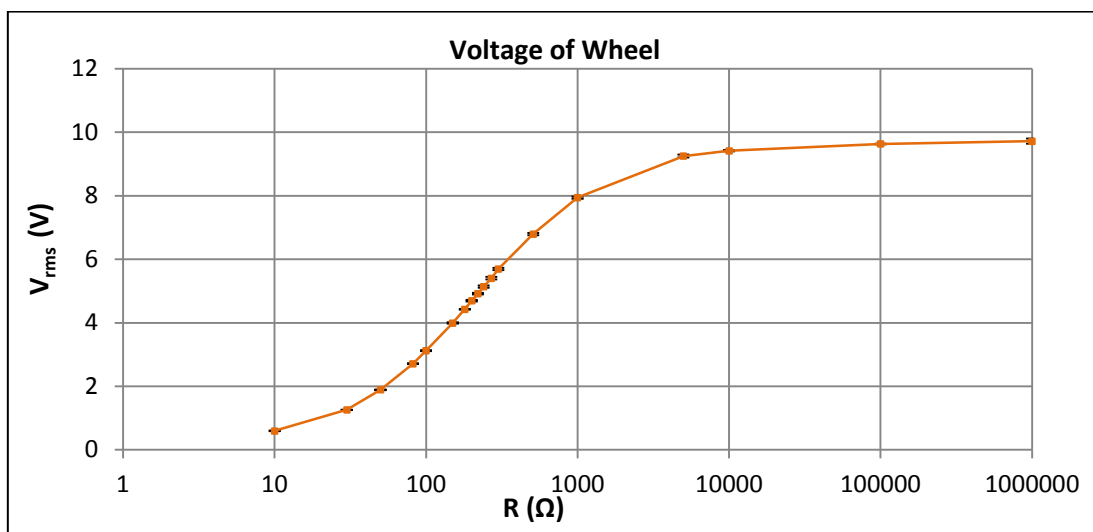
ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีค่าความแตกต่างจากล้อยต้นแบบที่ 1 ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีที่มีความเข้มสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเพิ่มขึ้นโดยที่ค่าความต้านทาน 200 โอห์ม จะมีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด มีค่าประมาณ 110.14 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.19 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 13.4 โวลต์ดังรูปที่ 4.20 ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 4.69 โวลต์ดังรูปที่ 4.21 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 23.4 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.22



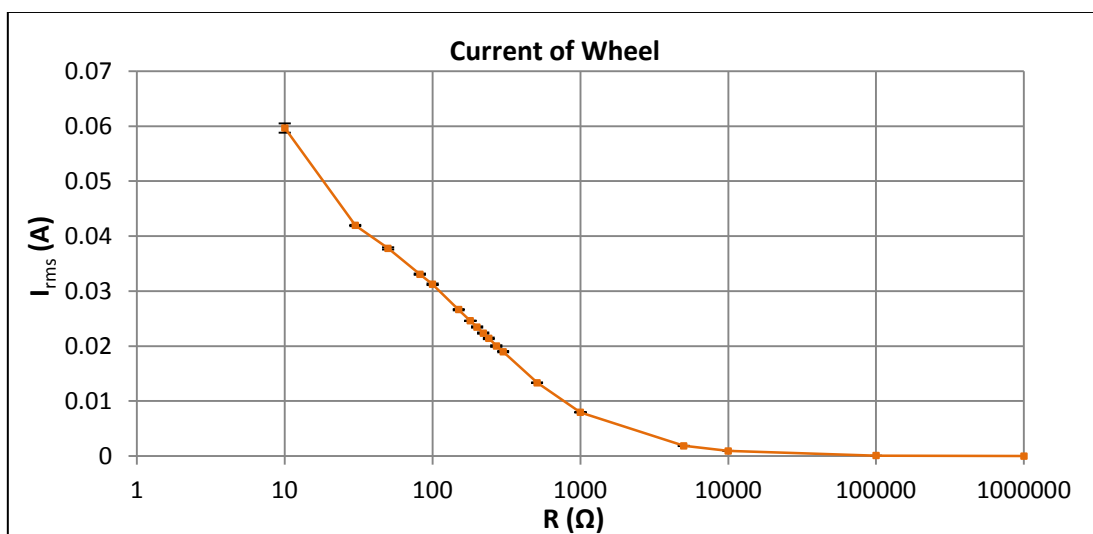
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.4.1 การทดลองหาพลังงานของล้อยันแบบที่ 4 เข้าตัวเก็บประจุ

การทดลองนี้ จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากล้อยันแบบที่ 4 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อยันให้มีความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุแล้วบันทึกเวลาพลังงานเข้าจุดเสถียรจำนวน 5 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปหาพลังงานต่อวินาที

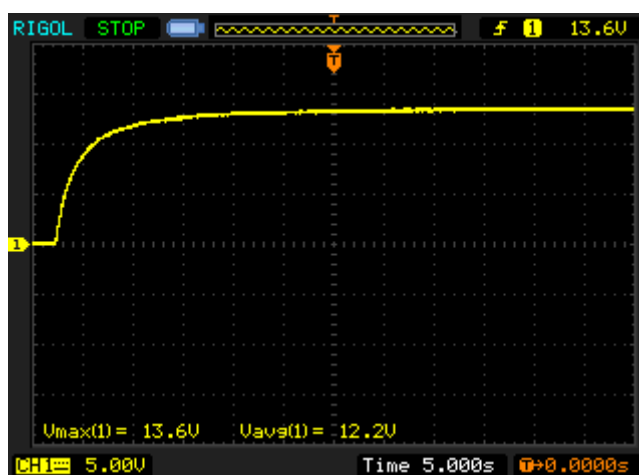
4.4.1.1 การต่อล้อยันแบบที่ 4 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

ผลการทดลองนี้ แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อยัน 1 ล้อยันโดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสและต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 10000 ไมโครฟารัด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การทดลองล้อยันแบบที่ 4 จำนวน 1 ล้อยัน ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

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

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ 1 ล้อยันจะให้กระแสที่ 13.6 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 18 วินาทีและให้พลังงานต่อวินาทีที่ 51.37 จูลต่อวินาทีดังรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา

4.5 การทดลองล้อยันแบบที่ 5

จากแนวคิดล้อยันแบบที่ 2 และล้อยันแบบที่ 4 ทำให้ทราบว่า จำนวนชั้นของแม่เหล็กและขนาดของขดลวดทองแดงมีผลต่อการเหนี่ยวนำให้เกิดแรงเคลื่อนทางไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการออกแบบล้อยันกำเนิดพลังงานใหม่โดยเพิ่มขนาดความใหญ่ของล้อยันเพื่อที่จะสามารถเพิ่มขึ้นจำนวนของแม่เหล็กได้มากขึ้น และสามารถเพิ่มความยาวของลวดหนึ่งขดได้มาก ดังนั้นในส่วนนี้ จะเป็นการทดลองล้อยันแบบที่ 5 จากการเพิ่มจำนวนชั้นของแม่เหล็กเพื่อเพิ่มค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กให้มีค่ามากขึ้น และมีการเปลี่ยนขนาดความยาวของขดลวดโดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อยันให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

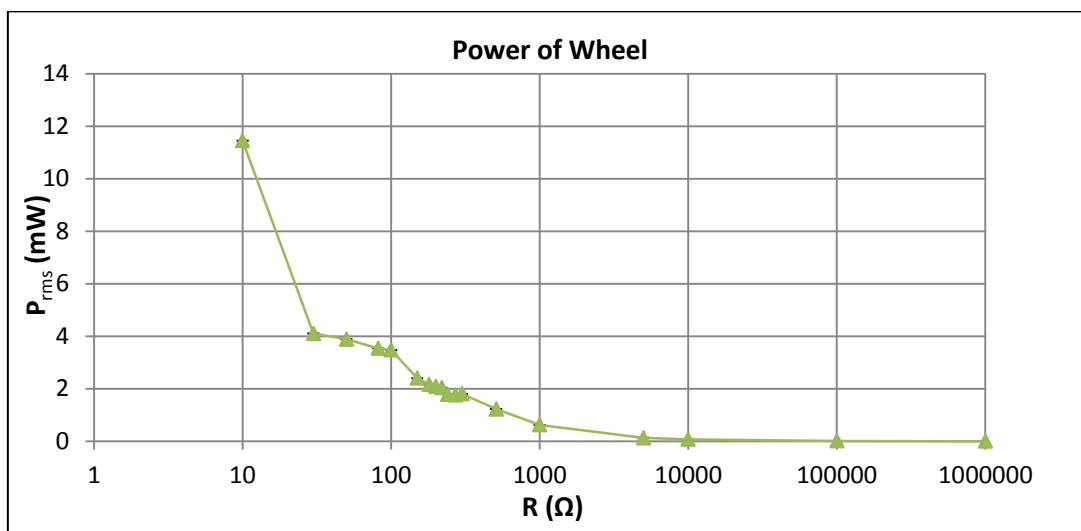
การทดลองล้อยันแบบที่ 5 (แม่เหล็กจำนวน 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 90 มม.)

ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองล้อยันที่ได้มีการออกแบบใหม่ โดยมีการเพิ่มขึ้นจำนวนแม่เหล็กเข้าไปและเปลี่ยนขนาดความยาวของขดลวดตัวนำ และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.9

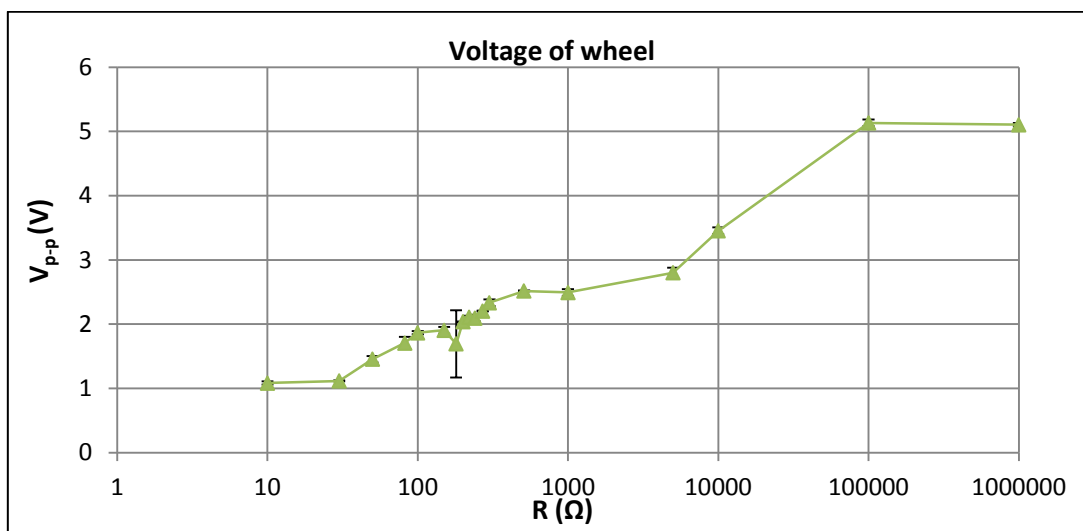
ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่ 5 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 90 มม.) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}(A)$	P = $I \cdot V$ (mW)
	$V_{p-p}(V)$	$V_{rms}(V)$		
10	1.0833	0.3383	0.03383	11.4491
30	1.1166	0.3507	0.01169	4.100467111
50	1.4533	0.4407	0.00881	3.885822733
82	1.7066	0.5380	0.00656	3.534757317
100	1.8666	0.5892	0.00589	3.472043367
150	1.9066	0.5998	0.00399	2.398877605
180	1.6933	0.6243	0.00346	2.165359648
200	2.0366	0.6454	0.00322	2.082946683
220	2.1066	0.6686	0.00303	2.032712636
240	2.0933	0.6541	0.00272	1.783052625
270	2.2033	0.6891	0.00255	1.759079617
300	2.3333	0.7360	0.002453	1.806027356
510	2.51666	0.78996	0.001548	1.223865797
1000	2.49333	0.78923	0.000789	0.623089163
5000	2.8	0.79706	0.000159	0.127064207
10000	3.45333	0.8435	8.43533E-05	0.071155153
100000	5.13333	0.9260	9.26067E-06	0.008646404
No Load	5.10666	0.9276	9.27667E-07	0.000863641

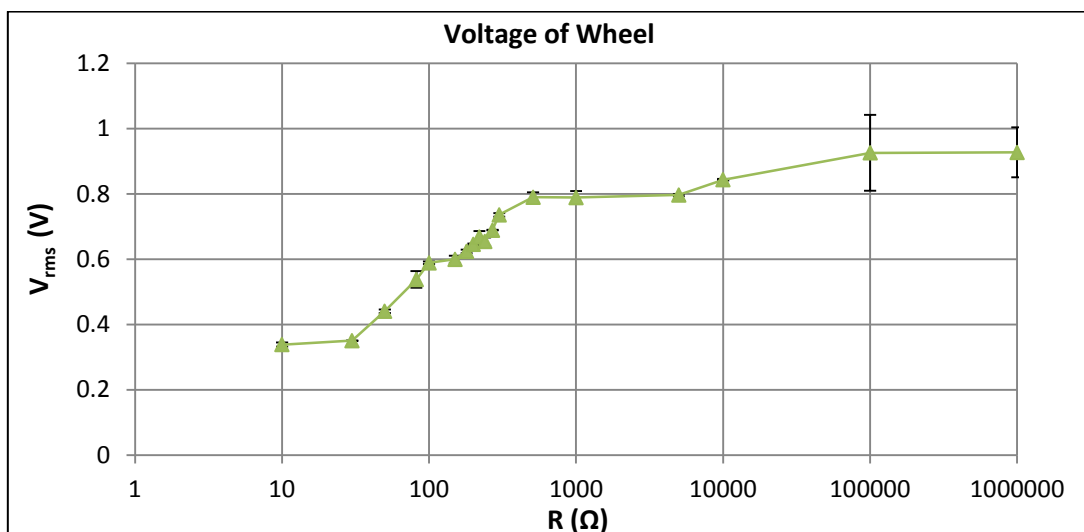
จากผลการทดลองที่ได้มีค่าความต่างแตกจากล้อยต้นแบบที่ 1 และล้อยต้นแบบที่ 2 ซึ่งผลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎีที่ เนื่องจากผลที่ได้มีค่าพลังงานน้อยกว่าล้อยต้นแบบเดิม ทั้งนี้ทั้งนั้นมีผลมาจากระยะความยาวของขดลวดมีความยาวมากเกินไป ส่งผลให้ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไม่ส่งแรงดูดกัน ส่งผลให้ค่าที่ได้มีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่าประมาณ 11.4 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.24 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 1.11 โวลต์ดังรูปที่ 4.25 ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.35 โวลต์ดังรูปที่ 4.26 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 11.6 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.27



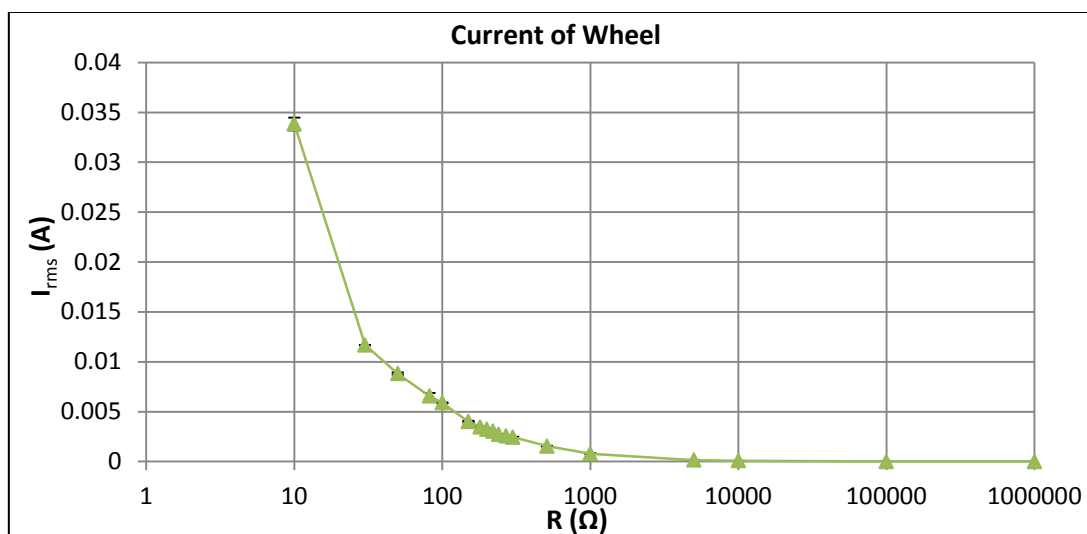
รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.6 การทดลองลัดต้นแบบที่ 6

จากผลการทดลองลัดต้นแบบที่ 5 ทำให้ทราบว่า ระยะห่างระหว่างแม่เหล็กมีมากเกินไปจนทำให้เส้นแรงแม่เหล็กส่งผ่านถึงกันได้น้อยจึงทำให้พลังงานที่ได้มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงมีการออกแบบลัดต้นแบบที่ 6 ขึ้นมาโดยการลดความยาวของขดลวดเพื่อที่จะลดระยะห่างระหว่างแม่เหล็ก โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นลัดให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

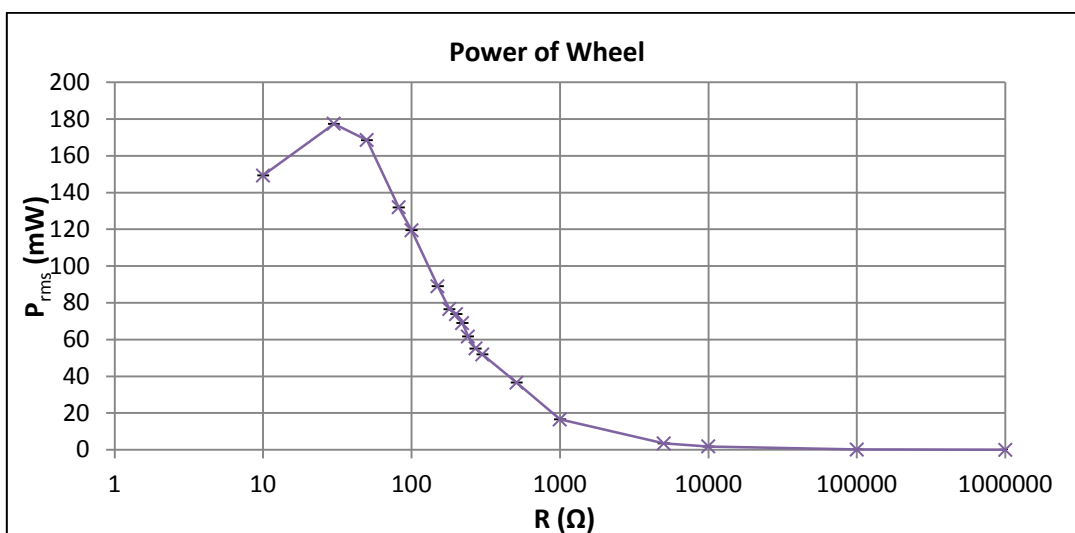
การทดลองลัดต้นแบบที่ 6 (แม่เหล็กจำนวน 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 45 มม.)

ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองลัดที่ได้มีการออกแบบใหม่ และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

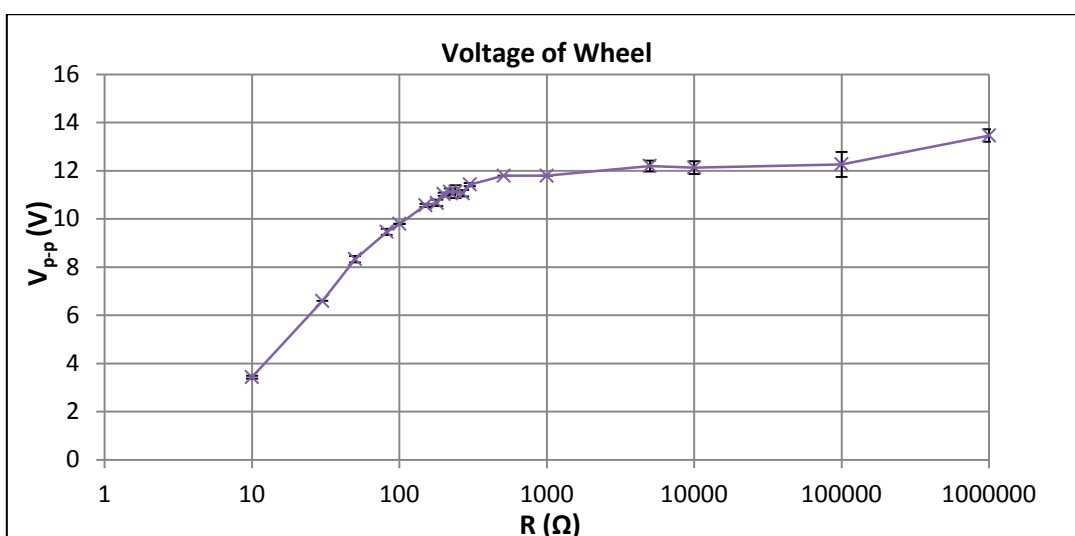
ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองของลัดต้นแบบที่ 6 (แม่เหล็ก 10 ชั้น ระยะความยาวของขดลวด 45 มม.) ไม่ผ่านวงจรเรียงกระแส

R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง		$I_{rms}(A)$	$P = I \cdot V$ (mW)
	$V_{p-p}(V)$	$V_{rms}(V)$		
10	3.4333	1.222	0.1222	149.329
30	6.6	2.30666	0.076888889	177.3846
50	8.3333	2.903	0.05806	168.5527533
82	9.4666	3.28833	0.040101626	131.924687
100	9.7966	3.45733	0.034573333	119.53398
150	10.566	3.654	0.02436	89.01291111
180	10.666	3.71266	0.020625926	76.58053704
200	11.0333	3.84433	0.019221667	73.89450167
220	11.1333	3.89633	0.017710606	69.00682879
240	11.1333	3.84666	0.016027778	61.654525
270	11.0666	3.857	0.014285185	55.1006358
300	11.4333	3.94766	0.013158889	51.94849889
510	11.8	4.30666	0.008444444	36.6171281
1000	11.8	4.065666	0.004065667	16.53126167
5000	12.2	4.199666	0.000839933	3.528418333
10000	12.1333	4.266333	0.000426633	1.8201603
100000	12.2666	4.30333	4.30333E-05	0.185222167
No Load	13.4666	4.364666	4.36467E-06	0.019050622

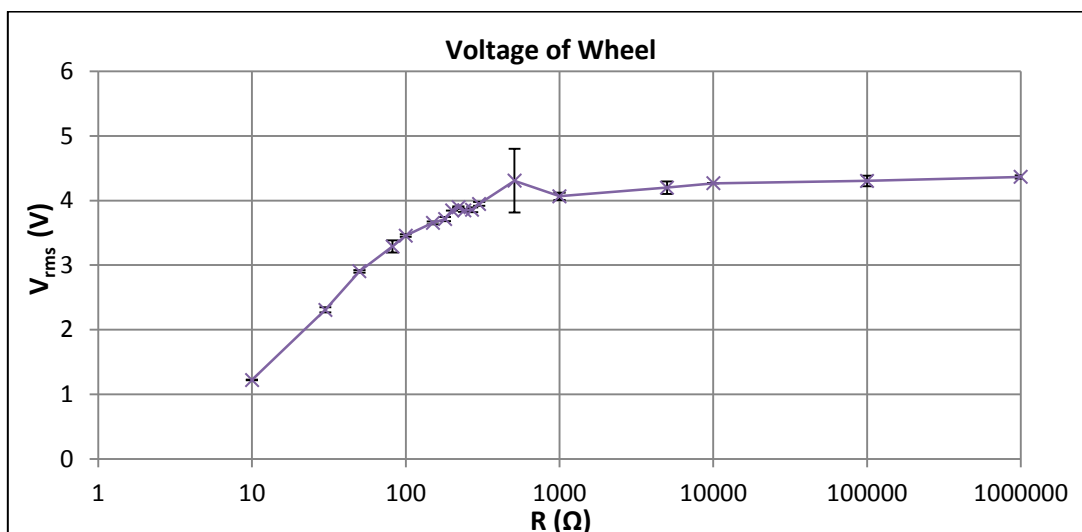
จากผลการทดลองที่ได้มีค่าความต่างแตกต่างจากล๊อตต้นแบบที่ 5 ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่มีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด ที่ค่าความต้านทาน 30 โอห์ม มีค่าประมาณ 177.38 มิลลิวัตต์ดังรูปที่ 4.28 ค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดมีค่าประมาณ 6.6 โวลต์ดังรูปที่ 4.29 ค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยมีค่าประมาณ 2.306 โวลต์ดังรูปที่ 4.30 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 76.88 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.31 ซึ่งการข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ล๊อตต้นแบบที่ 6 สามารถให้กระแสไฟฟ้าได้สูงเพราะมีการเพิ่มขนาดหน้าตัดของขดลวด แต่เนื่องจากการลดขนาดของความยาวขดลวดเพื่อลดระยะห่างระหว่างแม่เหล็กจึงทำให้จำนวนรอบของขดลวดลดลงตามไปด้วย จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มามีค่าน้อย



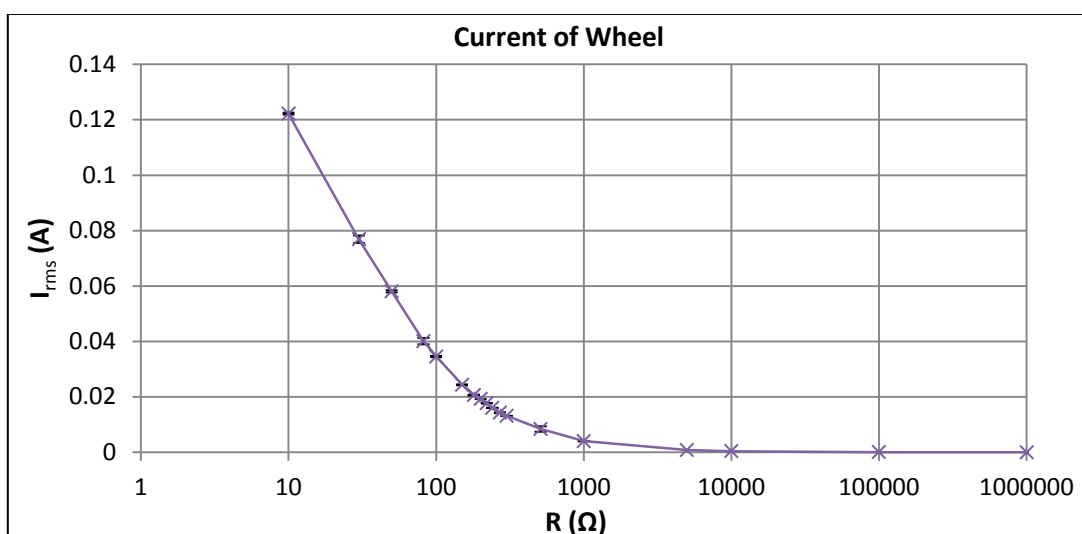
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันจากจุดยอดถึงจุดยอดกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันรากของกำลังสองเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

4.6.1 การทดลองหาพลังงานของล้อยันแบบที่ 6 เข้าตัวเก็บประจุ

การทดลองนี้ จะทดลองเก็บค่าพลังงานที่ได้จากล้อยันแบบที่ 6 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อยันให้มีความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุแล้วบันทึกเวลาพลังงานเข้าจุดเสถียรจำนวน 5 ครั้งแล้วนำค่าเฉลี่ยที่ได้ไปหาพลังงานต่อวินาที

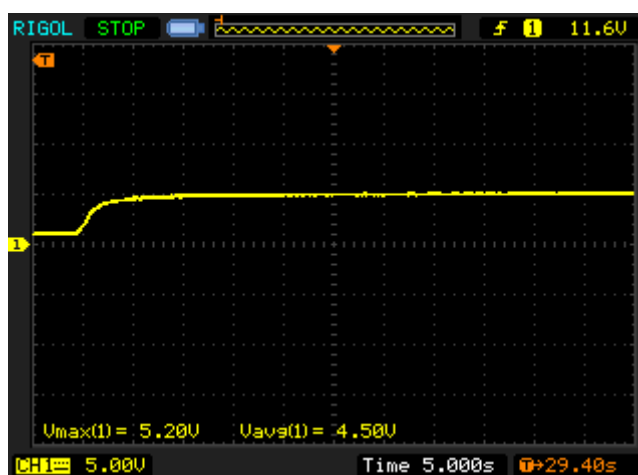
4.6.1.1 การจvloล้อยันแบบที่ 6 ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

ผลการทดลองนี้ แสดงค่าพลังงานที่ได้จากการเข็นล้อยัน 1 ล้อยันโดยมีการผ่านวงจรเรียงกระแสและต่อเข้ากับตัวเก็บประจุขนาด 10000 ไมโครฟารัด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การทดลองล้อยันแบบที่ 6 จำนวน 1 ล้อยัน ผ่านวงจรเรียงกระแสเข้าตัวเก็บประจุ

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

ซึ่งผลการทดลองที่ได้ที่ 1 ล้อยันจะให้กระแสที่ 5.2 โวลต์โดยจะเริ่มคงที่ที่ 9 วินาทีและให้พลังงานต่อวินาทีที่ 15.02 จูลต่อวินาทีดังรูปที่ 4.32



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับเวลา

4.7 การทดลองล้อยันแบบที่ 7

จากผลการทดลองล้อยันแบบทั้ง 6 แบบ ทำให้ทราบว่า การต่อขดลวดเข้าด้วยกันทั้งหมดเป็นเฟสเดียว และ ต่อแม่เหล็กเท่าจำนวนขดลวดเลยนั้น ทำให้ล้อยันมีประสิทธิภาพต่ำและยังไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานจริง ดังนั้นจึงมีการออกแบบล้อยันแบบที่ 7 ขึ้นมาโดยการต่อขดลวดเป็นแบบสามเฟส และโครงสร้างแบบ AFPM Generator เพื่อสร้างพลังงานจากการหมุนล้อยันที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และบันทึกค่าเช่นเดิม 3 ครั้ง แล้ววิเคราะห์ข้อมูลจากค่าเฉลี่ยซึ่งมีผลการทดลองดังนี้

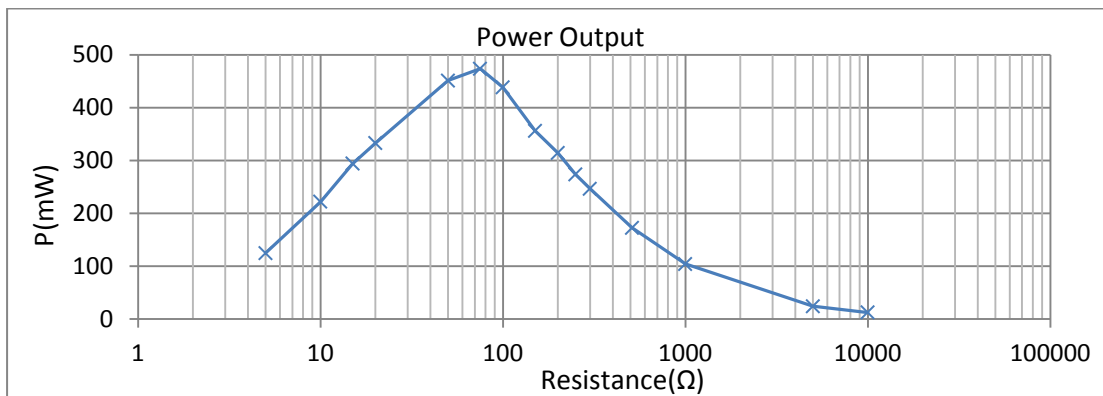
การทดลองล้อยันแบบที่ 7

ผลการทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองล้อยันที่ได้มีการออกแบบใหม่ และบันทึกผลการทดลองที่ค่าความต้านทานต่างๆ ลงในตารางบันทึกผล มีผลการทดลองดังตารางที่ 4.12

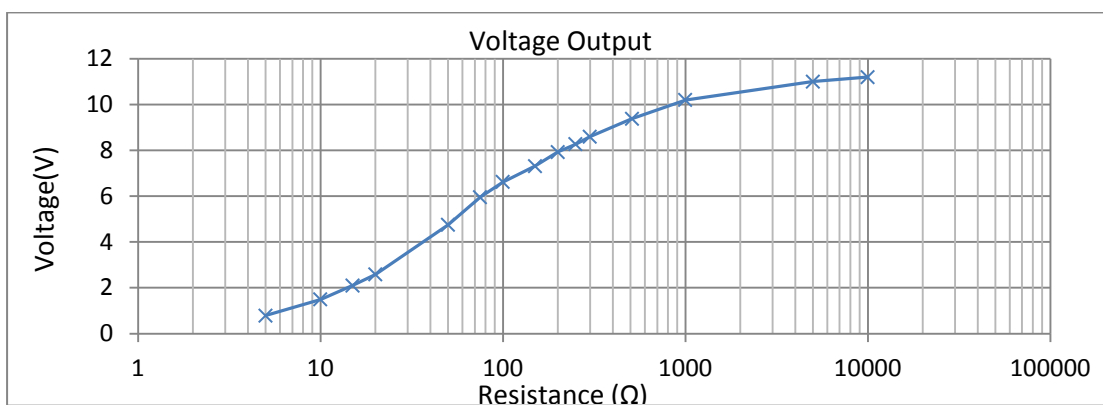
ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองของล้อยันแบบที่ 7

R (Ω)	เฉลี่ย 3 ครั้ง	$I_{dc}(A)$	$P = I \cdot V$ (mW)
	$V_{dc}(V)$		
5	0.79	158.00	124.8200
10	1.49	148.00	222.0100
15	2.10	140.00	297.0000
20	2.58	129.00	332.8200
50	4.75	95.00	451.2500
75	5.96	79.47	473.6213
100	6.38	63.80	407.0440
150	7.31	48.73	356.2407
200	7.93	39.65	314.4245
250	8.27	33.08	273.5716
300	8.60	28.67	246.5333
510	9.38	18.39	172.5184
1000	10.20	10.20	104.0400
5000	11.00	2.20	24.2000
10000	11.20	1.12	12.5440
No Load	13.80	0.00	0.00

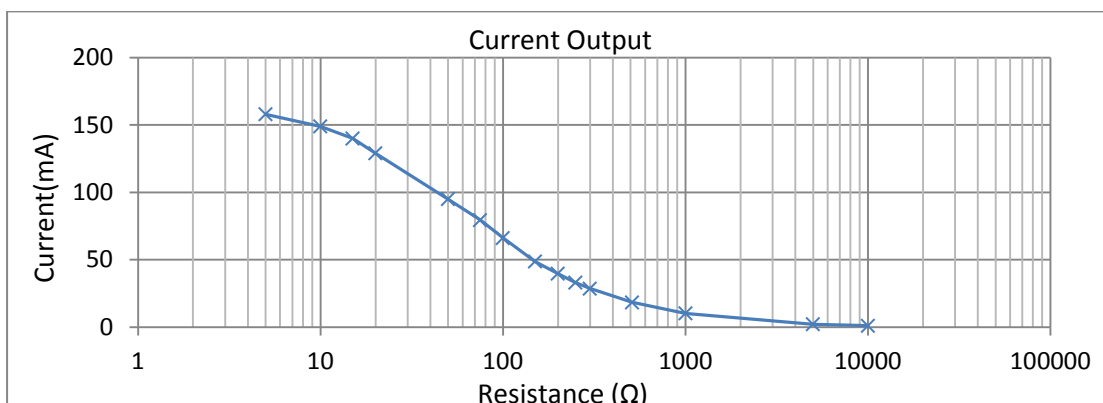
จากผลการทดลองมีค่าความต่างแตกต่างจากล้อยต้นแบบทั้ง 7 แบบซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่มีค่ากำลังไฟฟ้ามากที่สุด ที่ค่าความต้านทานประมาณ 75 โอห์ม มีค่าประมาณ 473.62 มิลลิวัตต์ ดังรูปที่ 4.33 โดยแรงดันกระแสตรงมีค่าประมาณ 5.96 โวลต์ดังรูปที่ 4.34 และค่ากระแสไฟฟ้าประมาณ 79.47 มิลลิแอมป์ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งการข้อมูลดังกล่าวจะเห็นได้ว่า ล้อยต้นแบบที่ 7 สามารถให้กระแสไฟฟ้าได้สูงเพราะโครงสร้างแบบ AFPM Generator เหมาะสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าที่รอบการหมุนต่ำ จึงเหมาะแก่การนำมาใช้เนื่องจากความเร็วในการเดินขึ้นรถเข็นเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันกับค่าความต้านทาน

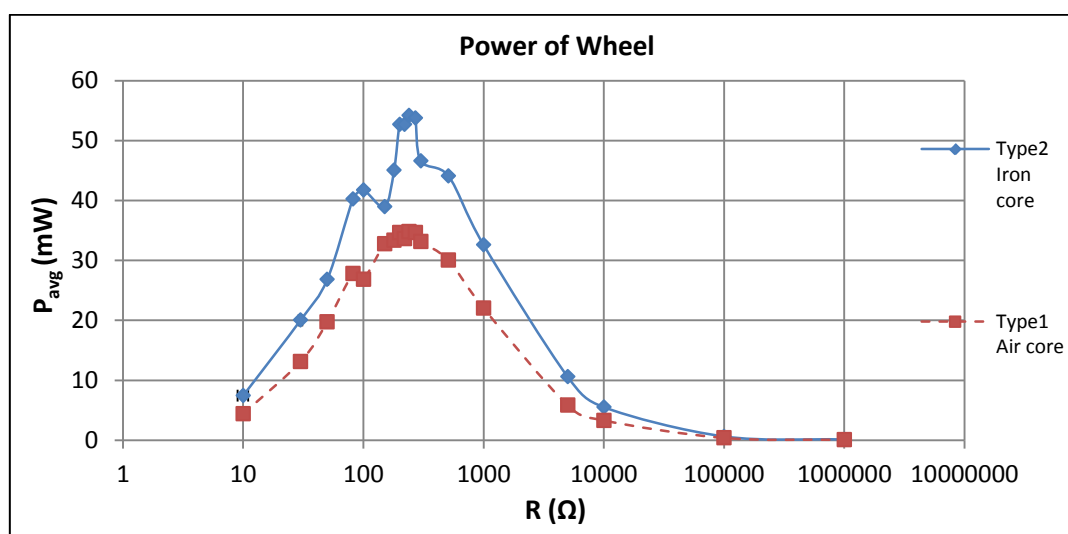


รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

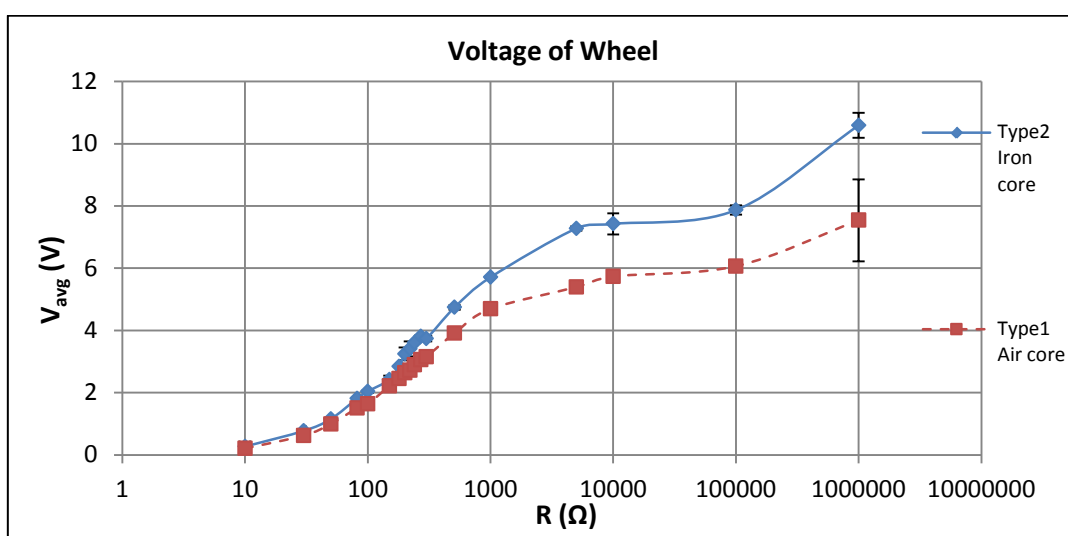
4.8 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อต้นแบบรถเข็น

4.8.1 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อต้นแบบที่ 1 (แกนอากาศ) กับล้อต้นแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ)

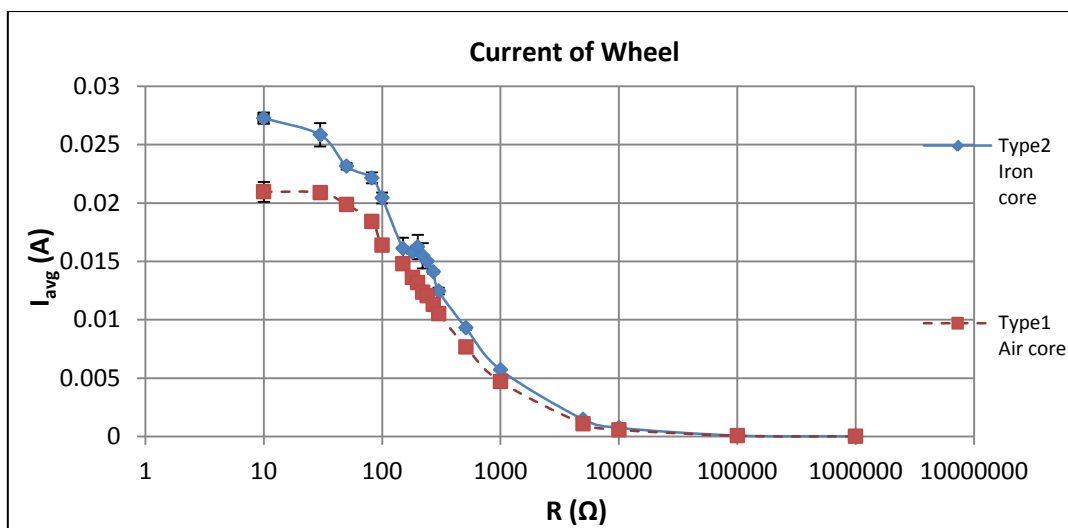
เมื่อนำผลการทดลองของล้อต้นแบบที่ 1 (แกนอากาศ) กับล้อต้นแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ) มาเปรียบเทียบพลังงานที่ได้ พบว่าล้อต้นแบบที่ 2 (แกนเหล็กหล่อ) ได้พลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแกนกลางของขดลวดตัวนำจะเป็นการเพิ่มความขี้นขาคทางแม่เหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้ความเข้มของเส้นแรงแม่เหล็กตัดผ่านขดลวดตัวนำได้ดีขึ้น โดยมีค่ากำลังไฟฟ้าที่เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.36 ค่าแรงดันเฉลี่ยเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.37 และค่ากระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดันเฉลี่ยกับค่าความต้านทาน



รูปที่ 4.38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต้านทาน

จากข้อมูลเปรียบเทียบด้านบน รูปที่ 4.36 รูปที่ 4.37 และรูปที่ 4.38 สามารถสรุปได้ว่า การเปลี่ยนชนิดของแกนกลางจากแกนอากาศเป็นแกนเหล็กหล่อทำให้ล้อสามารถผลิตพลังงานได้เพิ่มขึ้น แต่เนื่องจากต้องใช้แรงในการเข็นเพิ่มขึ้นอย่างมาก เพราะแกนกลางเหล็กหล่อจะส่งแรงดูดไปยังแม่เหล็กที่อยู่บนฝาครอบทั้งสองด้าน ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมกับการใช้งานจริง

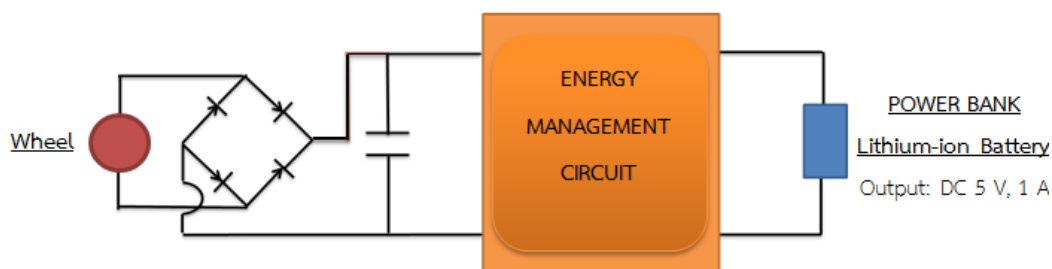
4.8.2 การเปรียบเทียบพลังงานของล้อต้นแบบที่ 3 ถึงล้อต้นแบบที่ 7

หลังจากทดสอบล้อกำเนิดพลังงานต้นแบบทั้งหมด 7 แบบ แล้วนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบข้อมูลกัน เพื่อที่จะตัดสินใจเลือกใช้ล้อในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริงกับรถเข็น

จากผลการเปรียบเทียบข้อมูลเห็นได้ว่า ล้อต้นแบบที่ 7 ให้พลังงานมากที่สุด เนื่องจากออกแบบโดยคำนึงถึงรอบการหมุนที่ต่ำแล้วยังต้องผลิตพลังงานได้สูง โดยมีค่ากำลังไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้ามากที่สุด แต่การที่จะเลือกใช้ล้อรูปแบบไหนนั้นก็ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่เราจะนำไปประยุกต์ใช้โดยจะนำพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบที่เลือกนำไปใช้กับวงจรจัดการพลังงานแบบต่างๆ เพื่อที่จะนำพลังงานที่ได้นั้นประจุใส่ลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 4.9

4.9 การประจุพลังงานจากล้อต้นแบบลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนผ่านวงจรจัดการพลังงาน

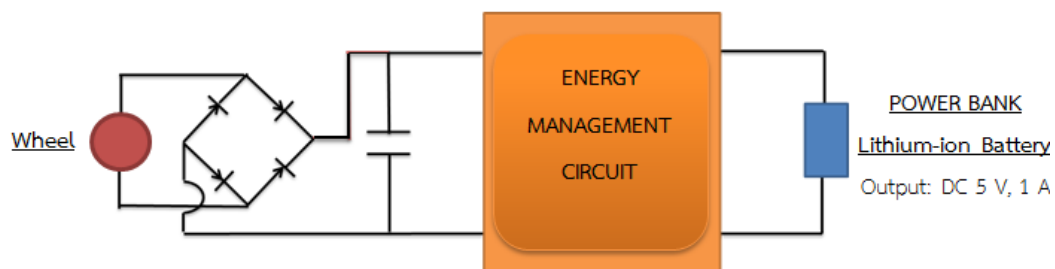
การทดลองในหัวข้อนี้ เป็นการนำพลังงานที่ได้จากล้อต้นแบบประจุลงในแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบต่างๆ ดังรูปที่ 4.39 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับ การเข็นรถเข็นข้อปึงจำลองสถานการณ์จริง ซึ่งจะเลือกล้อต้นแบบที่มีพลังงานที่เหมาะสมที่สามารถประจุลงแบตเตอรี่ได้ โดยจากผลการทดลองเห็นได้ว่า ล้อต้นแบบที่ 6 ให้พลังงานมากที่สุด แต่เนื่องจากแรงดันที่ได้จากล้อต้นแบบที่ 6 มีค่าน้อยซึ่งไม่สามารถประจุเข้าไปยังแบตเตอรี่ได้ ดังนั้นจึงเลือกล้อต้นแบบที่ 4 เนื่องจากมีแรงดันเพียงพอสำหรับการประจุเข้าแบตเตอรี่



รูปที่ 4.39 วงจรการประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่จากล้อรถเข็นผ่านวงจรจัดการพลังงาน

4.9.1 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานแบบชาร์ตต่อเนื่อง

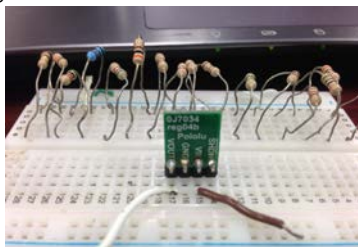
แหล่งกำเนิดพลังงานที่ออกจากล้อ เป็นกระแสสลับ เมื่อผ่านวงจรบริดจ์แล้วกระแสไฟฟ้าสลับที่ได้จะกลายเป็นกระแสตรงมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุที่มีขนาด $4700\ \mu\text{F}$, $6900\ \mu\text{F}$, $10000\ \mu\text{F}$ เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากนั้นกระแสที่ผ่านออกมาจากตัวเก็บประจุจะผ่านเข้าไปในส่วนวงจรจัดการพลังงาน ซึ่งวงจรจัดการพลังงานในส่วนนี้จะป้อนวงจรลดระดับแรงดันไฟฟ้า โดยจะทำการดึงแรงดันไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุแล้วทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าเพื่อประจุเข้าแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 4.45 โดยวิธีการทดลองจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับ การเข็นรถเข็นข้อปึงจำลองสถานการณ์จริง ดังรูปที่ 4.42 จากนั้นทำการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ผ่านความต้านทาน $50\ \Omega$ เปรียบเทียบผลเวลาที่ได้จากการปั่นล้อจากการใช้มอเตอร์ และการเข็นรถเข็นข้อปึงจากสถานการณ์จริงดังตารางที่ 4.10



STEP-DOWN VOLTAGE REGULATOR S7V8F5

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

Output voltage: Fix 5 V



รูปที่ 4.40 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง



รูปที่ 4.41 ทดลองใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อ และการเซ็นรตเซ็นช้อปป์จากการใช้งานจริงประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของ การป้อนลอจิกเซ็นด้วยมอเตอร์ กับ การเซ็นรูดเซ็นข้อปึงจากการใช้งานจริง ที่ผ่านวงจรจัดการพลังงาน ลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง

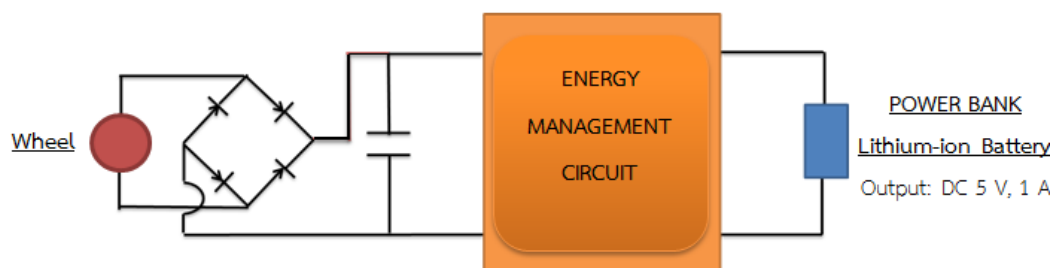
ขนาดตัวเก็บประจุ (μF)	การป้อนลอจิกเซ็นลัดต้นแบบที่ 4 ด้วยมอเตอร์ระยะเวลา 30 นาที				
	แรงดันและกระแสก่อน เข้าวงจรจัด การพลังงาน		แรงดันและกระแสหลัง ออกจากวงจรจัด การพลังงานประจุเข้า แบตเตอรี่		เวลาการคายประจุ จากแบตเตอรี่ด้วย โหลดความต้านทาน 50 โอห์ม (วินาที)
	V_{in} (V)	I_{in} (mA)	V_{out} (V)	I_{out} (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 (μF)	การเซ็นรูดเซ็นลัดต้นแบบที่ 4 จากการใช้งานจริง ระยะเวลา 30 นาที				
	แรงดันและกระแสก่อน เข้าวงจรจัด การพลังงาน		แรงดันและกระแสหลัง ออกจากวงจรจัด การพลังงานประจุเข้า แบตเตอรี่		เวลาการคายประจุ จากแบตเตอรี่ด้วย โหลดความต้านทาน 50 โอห์ม (วินาที)
	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

4.9.2 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานชาร์จแบบช่วงๆ

แหล่งกำเนิดพลังงานที่ออกจากล้อ เป็นกระแสสลับ เมื่อผ่านวงจรบริดจ์แล้วกระแสไฟฟ้าสลับที่ได้จะกลายเป็นกระแสตรงมาเก็บไว้ที่ตัวเก็บประจุที่มีขนาด 4700 μF , 6900 μF , 10000 μF เมื่อตัวเก็บประจุสะสมแรงดันไฟฟ้าได้ถึงประมาณ 12 V แรงดันไฟฟ้าจะสามารถไหลผ่านตัวซีเนอร์ได้ ทำให้ทรานซิสเตอร์ (2N3906) ทำงานและเกิดแรงดันไฟฟ้ามาตกคร่อมที่ตัวต้านทาน R2 ทำให้มอสเฟต (VN2222L) ทำงานจากนั้นแรงดันไฟฟ้าที่เข้าไปที่ไอซี MAX666 จะมีค่า 12 V และถูกแปลงลดระดับแรงดันไฟฟ้าจากโหลดให้เหลือ 5V เพื่อนำไปประจุให้กับแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนและเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ไหลเข้า MAX666 ลดลงเรื่อยๆจนแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน R6 มีค่าต่ำกว่า 1.3 V จะทำให้ขา LBO ของ MAX666 ถัดลงกราวด์ ซึ่งจะทำให้มอสเฟต (VN2222L) หยุดทำงานและรอชาร์ตใหม่จนกว่าแรงดันที่ตัวเก็บประจุจะมีแรงดันไฟฟ้าประมาณ 12 V อีกครั้งดังรูปที่ 4.42 โดย

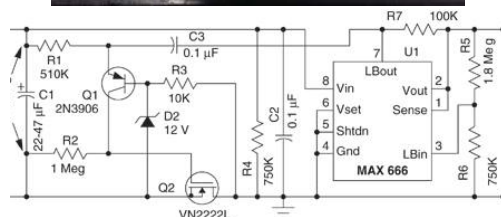
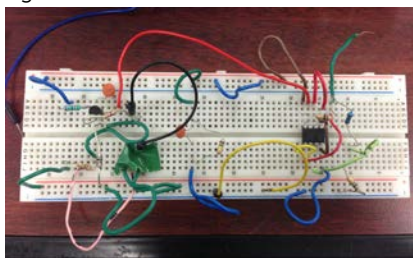
วิธีการทดลองนั้นจะทำการใช้มอเตอร์ในการปั่นล้อให้ได้ความเร็วคงที่ ที่เท่ากับการเข็นปกติ (2.22 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) และเปรียบเทียบกับ การเข็นรถเข็นข้อปึงจำลองสถานการณ์จริง ดังรูปที่ 4.41 จากนั้นทำการคายประจุออกจากแบตเตอรี่ผ่านความต้านทาน 50 โอห์ม เปรียบเทียบผลเวลาที่ได้จากการปั่นล้อจากการใช้มอเตอร์ และการเข็นรถเข็นข้อปึงจากสถานการณ์จริงดังตารางที่ 4.13



STEP-DOWN VOLTAGE MAX666

Input voltage: Voltage Wheel Type 44.4 V

Output voltage: Fix 5 V



รูปที่ 4.42 วงจรประจุพลังงานใส่แบตเตอรี่ผ่านวงจรจัดการพลังงานลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบเวลาการคายประจุจากแบตเตอรี่ผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ของ การป้อนลอทเซ็นด้วยมอเตอร์ กับ การเซ็นรณเซ็นซอปั้งจากการใช้งานจริง ที่ผ่านวงจการจัดการพลังงาน ลดระดับแรงดันชาร์จแบบช่วงๆ

ขนาดตัวเก็บประจุ (μF)	การป้อนลอทเซ็นลัดต้นแบบที่ 4 ระยะเวลาย 30 นาที					
	แรงดันและกระแสที่ วงจการจัดการพลังงาน		แรงดันและกระแสหลัง ออกจากวงจการจัด การพลังงานประจุเข้า แบตเตอรี่		เวลาการคายประจุจาก แบตเตอรี่ด้วยโหลดความ ต้านทาน 50 โอห์ม	
	V_{in} (V) ค่าแรงดันที่ เซ็นอร์	I_{in} (mA)	V_{out} (V)	I_{out} (mA)	การป้อน ลัดด้วยมอเตอร์ (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 4.14 แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายโหลดจะมีลักษณะแบบ ช่วงจ่ายโหลดกับ ช่วงชาร์จประจุ ยิ่งค่าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่ ช่วงจ่ายโหลดกับช่วงชาร์จประจุ จะมีช่วงที่กว้างขึ้นแต่ จากการทดลองพบว่าที่ ช่วงจ่ายโหลดสั้นๆของตัวเก็บประจุที่มีค่าน้อย ไม่สามารถที่จะเก็บพลังงานลง โหลดที่เป็นแบตเตอรี่ได้ เพราะเนื่องจากช่วงสั้นๆๆ จ่ายแบตเตอรี่จะเริ่มทำการเช็คแรงดันไฟฟ้าที่เข้า มาซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามานั้นเป็นช่วงสั้นๆจึงทำให้ไม่สามารถเก็บพลังงานได้

ดังนั้นผลการทดลองที่เปรียบเทียบการประจุพลังงานผ่านวงจการจัดการพลังงานลดระดับ แรงดันแบบชาร์จต่อเนื่อง และวงจการจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จช่วงๆ จะพบได้ว่าการ ประจุพลังงานผ่านวงจการจัดการพลังงานลดระดับแรงดันแบบชาร์จต่อเนื่องจะได้พลังงานที่มากกว่า และสามารถนำไปใช้งานคายประจุผ่านโหลดความต้านทาน 50 โอห์ม ได้นานกว่าด้วย

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองที่ได้ทำการเปลี่ยนรูปทรงของขดลวดตัวนำจากเดิมที่มีรูปทรงเป็นรูปหยดน้ำ (ลวดต้นแบบที่ 1) เปลี่ยนรูปทรงเป็นรูปวงกลม (ลวดต้นแบบที่ 3) เพื่อให้มีรูปร่างเดียวกับแม่เหล็ก จากการทดลองที่ได้รูปทรงที่เป็นวงกลม (ลวดต้นแบบที่ 3) จะให้พลังงานที่มากกว่ารูปทรงหยดน้ำ (ลวดต้นแบบที่ 1) และเมื่อทำการเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็กและเพิ่มขนาดของลวดทองแดงโดยการออกแบบขนาดลวดกำเนิดพลังงานใหม่ (ลวดต้นแบบที่ 4 ลวดต้นแบบที่ 5 และลวดต้นแบบที่ 6) พลังงานที่ได้ก็จะมีค่ามากขึ้นตามผลการทดลอง เมื่อออกแบบและจัดวางขดลวดกับแม่เหล็กใหม่ทั้งหมดเป็นแบบ AFPM Generator (ลวดต้นแบบที่ 7) พบว่าพลังงานที่ได้มีค่าสูงกว่าลวดต้นแบบที่ 6 ถึง 267% ทั้งยังมีขนาดเล็กกว่ามาก ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบพลังงานของลวดเหล่านั้น ทำให้สามารถเลือกลวดที่เหมาะสมนำไปเป็นลวดต้นแบบ (ลวดต้นแบบที่ 7) สำหรับการประจุลงยังแบตเตอรี่โดยการผ่านวงจรจัดการพลังงานในรูปแบบต่างๆ โดยที่วงจรจัดการพลังงานแบบชาร์จต่อเนื่องจะสามารถประจุพลังงานลงยังแบตเตอรี่ได้มากกว่าวงจรจัดการพลังงานแบบชาร์จแบบช่วงๆ ซึ่งอาศัยการทดสอบจากการขึ้นลวดขึ้นด้วยมือและการจำลองขึ้นด้วยสถานการณ์จริงเปรียบเทียบกัน ทั้งนี้แบตเตอรี่ที่ประจุจากการชาร์จจากลวดเหล่านั้นสามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบและวิธีการแก้ไข

1. ในขั้นการทดลองเพื่อหาค่าแรงดันไฟฟ้า เราไม่สามารถที่จะได้ค่าที่แม่นยำจากการขึ้นแต่ละครั้งได้ เป็นผลมาจากการขึ้น แต่ละครั้งความแรงไม่เท่ากันและไม่รู้ความเร็วที่แน่นอน ค่าที่จะนำมาเปรียบเทียบอาจเกิดค่าผิดพลาดจนไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ การแก้ปัญหาจึงสร้างชุดทดสอบขึ้น โดยมีมอเตอร์ในการหมุนลวดที่ความเร็วคงที่ ที่ความเร็วที่เราต้องการได้

2. ในการออกแบบเพิ่มขนาดของลวดต้นแบบที่ 6 ที่ระยะห่างของแม่เหล็ก 9 เซนติเมตร เป็นระยะห่างที่มากเกินไปจนทำให้สนามแม่เหล็กไม่ส่งผ่านถึงกัน จึงทำให้ลวดไม่สามารถผลิตพลังงานได้เท่าที่ควร จึงใช้โปรแกรมวิเคราะห์แม่เหล็กเพื่อที่จะหาระยะที่สนามแม่เหล็กจะส่งผ่านถึงกัน และทำการแก้ระยะห่างของลวดใหม่เป็น 4.5 เซนติเมตร

3. การประกอบลวด เมื่อทำการเพิ่มแม่เหล็กเป็นจำนวนมาก เพื่อเพิ่มความเข้มสนามแม่เหล็ก ตัวแม่เหล็กที่ใส่ลงไปจะเกิดการดูดกันทำให้ยากต่อการใส่ จึงแก้โดยการทำบล็อกใส่แม่เหล็ก และวางแม่เหล็กต่างขั้วที่ต้องการไว้ด้านได้อีกฝั่งของลวดเพื่อเหนี่ยวนำให้ดูดติดกัน จะทำให้ง่ายต่อการใส่

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าและพัฒนา

จากผลการทดสอบการเข็นล้อรถเข็นข้างต้น จะเห็นได้ว่าล้อกำเนิดพลังงานที่เลือกนั้นสามารถประจุพลังงานที่ผลิตได้ใส่ลงยังแบตเตอรี่ได้จริง ซึ่งแนวทางการพัฒนาต่อนี้สามารถที่จะผลิตและออกแบบจำนวนล้อให้เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยที่สามารถออกแบบล้อกำเนิดพลังงานรูปแบบใหม่ที่สามารถผลิตพลังงานได้เยอะขึ้นแต่ยังคงรูปแบบและหลักการการทำงานเช่นเดิมอยู่ ทั้งนี้พลังงานที่ประจุเข้าแบตเตอรี่เองนั้น สามารถที่จะนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคตได้ โดยการพัฒนาโครงสร้างของรถเข็นข้อปึงให้มีความทันสมัยมากขึ้นโดยอาจจะนำประโยชน์จากพลังที่ชาร์จเข้าแบตเตอรี่นั้นมาใช้ในการเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับพวกหน้าจอแสดงสินค้าตามรถเข็นต่างๆ ได้ เป็นต้น

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.
- [4] โซลินอยด์.[Online].Available:
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.
- [8] AWG Copper Wire Size and Data.[Online].Available:
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>.

[11] แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.[Online].Available:

<http://www.bloggang.com/viewdiary.php?id=nacl&month=07-2005&date=01&group=2&blog=1>.

[12] หลักการทำงานของโซลีนอยด์.[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>.

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล.....ดร.ดอน อิศรากร.....

เพศ ☒ ชาย ☐ หญิง วันเดือนปีเกิด.....4 ธันวาคม 2520.....อายุ 36.....ปี

สถานภาพ ☐ โสด ☒ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
Ph.D.	Microsystems and Microelectronics	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland	2011
M.Eng.	Control Engineering	KMITL	2003
B.Eng.	Electronics Engineering	KMITL	2000

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ.....Microsensors and microactuators, Piezoelectric materials for sensing and actuating applications, MEMS process development, Energy harvesting systems, PowerMEMS.....

รางวัลด้านวิชาการ/ด้านวิจัย/งานสร้างสรรค์ (ด้านศิลปะ หรืออื่นๆ) ที่ได้รับ

ปี พ.ศ.	ชื่อรางวัล	สถาบันที่ให้
2013	Sci & Tech Initiative and Sustainability Awards (STISA 6 th)	The Thai Institute of Chemical Engineering and Applied Chemistry
2011	Good Ph.D. thesis award	Office of National Research Council of Thailand
2011	Prix de La Ville de La Chaux-de-Fonds 2011	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland

ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2006-2010	Thai Government Science and Technology Scholarship	Thai Government
2001-2003	Royal Thai Government Scholarship	Thai Government

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่ (ระดับชาติและนานาชาติ)

- **Don Isarakorn** (Principal investigator), Noppadol Maneerat and Bundit Pasaya, **“Fundus Image Database System and Primary Diabetic Retinopathy Screening Software,”** A New Researcher Scholarship of CSTC, MOST, 2012.
- **Don Isarakorn** (Principal investigator), Songmoung Nundrakwang, Noppadol Maneerat and Kasemsuk Sepsirisuk, **“Design and Development of an Electric Stand-up Wheelchair,”** Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.
- **Don Isarakorn** (Principal investigator) and Songmoung Nundrakwang, **“Self-powered System for Machine Condition Monitoring Applications,”** Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2012.

การเสนอผลงานวิชาการ

- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ธัชพล สิลพิพัฒน์, ภาณุพงศ์ โลจรัส, วชรินทร์ กิจวิไลรักษ์ และหฤษฎ์ เอี่ยมประภากุล, **“อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานขนาดเล็กส่วนจากการเคลื่อนที่ของมนุษย์,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 94-99, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ธัชพล พรณัฐพิกุล, วิชุด แหม่มซ้อย และสิรินาถ มาวรณ, **“การเก็บเกี่ยวพลังงานจากข้อต่อหัวเข้าโดยใช้สเตปเปอร์มอเตอร์,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 154-159, 2556

- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ธนากร หมู่ทอง, ธนาพร สิริโสภภาพรรณราย, พรสุดา พัสตร และวิรุฒม์ ชื่นยง, **“การเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงเฉือนข้อปิ้ง,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 160-165, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ฐาปนันท์ สุทธวิยางกูร, นุสพร สุกใส และเฉลิมชัย จงสินทวี, **“การเก็บเกี่ยวพลังงานจากการกระแทกโดยใช้เพียโซบักเซอร์เพื่อติดตามสภาพเครื่องจักร,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 205-210, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, โกมล บัญญัติเลิศถาวร, กฤษฏา ประภาณุกิต และวิภา จงเจริญกมล, **“พื้นที่กำเนิดพลังงานจากเพียโซอิเล็กทริก,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 988-993, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ธนพล บุญโชติ, นุสกร สีเหลืองเย็น และพงษ์ศธร นุ่มทอง, **“การออกแบบใบหญ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานจากลม,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 1000-1005, 2556
- ดอน อิศรากร, สองเมือง นันทขว้าง, ฌวันยุทธ แสนจิตร, ฌัฐพงศ์ เหมือนหม้อ และธงชัย ทองคำ, **“การศึกษาระดับการสั่นของสะพานเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเซนเซอร์,”** การประชุมเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 9, นครนายก, ประเทศไทย หน้า 89-93, 2556

ผลงานสิทธิบัตร/สิ่งประดิษฐ์/งานสร้างสรรค์ (ศิลปะ หรือ อื่นๆ)

“Energy Scavenging from a Rotating Gear using an Impact Type Piezoelectric MEMS Scavenger”, International Patent: P2203PC00/
European Patent: N^oEP 11168703.4

“Piezoelectric energy generating device from impact force”, Thai patent:
Patent pending no. 1201006020

“Piezoelectric energy harvesting floor”, Thai patent: Patent pending no.
1201006021

ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

ประวัติส่วนตัว

ชื่อ-สกุล.....นายสองเมือง นันทขว้าง.....

เพศ ☒ ชาย ☐ หญิง วันเดือนปีเกิด.....อายุ.....ปี

สถานภาพ ☐ โสด ☒ สมรส

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
M.Eng.	Control Engineering	KMITL	2005
B.Eng.	Control Engineering	KMITL	2003

ประสบการณ์วิจัยหรือสาขาที่ชำนาญ.....Machine.....Design,.....Mechatronic.....System
Modeling, Control Systems.....