

รถฟอร์คลิฟท์พลังงานอัจฉริยะ
SMART ENERGY FORKLIFT

นายยุทธนา	กรวยเกรียงไกร
นายอนุวัตร	กุดแดง
นางสาวโศภิชฐ์	กางกั้น

โครงการนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ปีการศึกษา 2556
56EE119

หัวข้อโครงการ

รถฟอร์คลิฟท์พลังงานอัจฉริยะ

โดย

นายยุทธนา กรวยเกรียงไกร

นายอนุวัตร กุดแถลง

นางสาวโสภิญฐ์ กางกั้น

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์เพชร นันทิวัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม อนุมัติให้นับโครงการ
วิศวกรรมฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

..... หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
(ดร.ภรชัย จูอนุวัฒน์กุล) และอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์เพชร นันทิวัฒนา)

(วันที่.....เดือน.....พ.ศ.2557)

รหัสโครงการ 56EE119

รถฟอร์คลิฟท์พลังงานอัจฉริยะ SMART ENERGY FORKLIFT

บทคัดย่อ (Abstract)

โครงการนี้เป็นการนำเสนอ ระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายซึ่งนำมาใช้กับรถฟอร์คลิฟท์ไฟฟ้าในคลังสินค้าหรือโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการสร้างเป็นชุดโมเดลสาธิตการทำงานของชุดชาร์จแบตเตอรี่ไร้สายกับโมเดลรถฟอร์คลิฟท์ หลักการทำงานของชุดรับ-ส่งพลังงานแบบไร้สายนั้นจะเป็นการส่งพลังงานไฟฟ้าเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ ซึ่งอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของขดลวดตัวนำสองชุดที่มีการเดินทางของฟลักซ์แม่เหล็กในอากาศโดยเกิดจากปรากฏการณ์ของกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำที่เป็นขดลวดตามกฎของฟาราเดย์ การดำเนินโครงการในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาและทดสอบการส่งพลังงานแบบไร้สายจากโมดูลต้นแบบที่มีขนาดของขดลวดแตกต่างกันจำนวนสองชุด และมีการประเมินประสิทธิภาพการส่งพลังงานของโมดูลทั้งสองชุดนี้ ในส่วนหลังจะเป็นการออกแบบชุดรับ-ส่งพลังงานแบบไร้สายซึ่งนำมาใช้ในการจำลองระบบการชาร์จแบตเตอรี่ของรถฟอร์คลิฟท์ในชุดโมเดลสาธิต ซึ่งเป็นการออกแบบโดยทำการขยายข้อจำกัดด้านกำลังงานของโมดูลต้นแบบ ท้ายสุดจะเป็นการทดลองความเป็นไปได้ของการพัฒนาชุดชาร์จไฟแบบไร้สาย ทดสอบและประเมินประสิทธิภาพของชุดโมเดลสาธิตการทำงานของชุดชาร์จแบตเตอรี่ไร้สายกับโมเดลรถฟอร์คลิฟท์เสมือนการใช้งานจริงในคลังสินค้าหรือโรงงานอุตสาหกรรม โดยจะควบคุมการทำงานของโมเดลรถฟอร์คลิฟท์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จากความอนุเคราะห์และการอบรมสั่งสอนของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา กอเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และอาจารย์เพชร นันทิวัดนา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความรู้ จรรยาบรรณวิชาชีพ แรงบันดาลใจ แนวทางการคิดและการแก้ปัญหา รวมทั้งคำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ มาโดยตลอด ทางผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและต้องขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นอกจากนี้ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิมิต บุญภิรมย์ รองคณบดีและอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่สละเวลาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการหาแนวทางการแก้ไขปัญหาบางส่วนในโครงการนี้ และต้องขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศรีปทุมที่ให้สถานที่และห้องปฏิบัติการในการจัดทำโครงการ รวมถึงอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการทั้งสองที่ให้เบิกใช้อุปกรณ์บางส่วนในห้องปฏิบัติการและห้องทดลอง ท้ายสุด ขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษา รวมไปถึงความช่วยเหลือต่างๆตลอดการจัดทำโครงการ ซึ่งทำให้โครงการนี้สำเร็จเรียบร้อยได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
กิตติกรรมประกาศ	ข
สารบัญ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ประโยชน์ของโครงการ	2
1.4 โครงสร้างของโครงการ	2
1.5 ขอบเขตของโครงการ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 รถฟอร์คลิฟท์	5
2.2 การชาร์จรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย	6
2.3 เทคนิคการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย	6
2.4 กฎของฟาราเดย์	11
2.5 ขดลวดทองแดง	12
2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์	18
2.7 ทรานซิสเตอร์กำลัง	18
บทที่ 3 การศึกษาและการออกแบบระบบจำลองการชาร์จไร้สายของรถฟอร์คลิฟท์	20
3.1 การศึกษาจากโมดูลชาร์จไร้สาย	20
3.2 โครงสร้างของระบบการชาร์จไร้สายในรถฟอร์คลิฟท์	23
3.3 ชุดตัวส่งพลังงาน	24
3.4 ชุดตัวรับพลังงาน	29
3.5 การออกแบบขดลวดและการพันขดลวด	35

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.6 การออกแบบวงจร LC Resonance	38
3.7 การออกแบบรางที่ใช้ในการจำลองระบบชาร์จ	39
3.8 การออกแบบและควบคุมการวิ่งของรถฟอร์คลิฟท์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	41
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	42
4.1 การทดลองขั้นที่ 1: การทดสอบการส่งพลังงานแบบไร้สายจากโมดูล	42
4.2 การทดลองขั้นที่ 2: การทดสอบวงจรชาร์จไร้สายจากการออกแบบ	63
4.3 การทดสอบวงจรชาร์จไร้สายเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอด	72
4.4 การทดสอบระบบชาร์จไร้สายในโมเดลรถฟอร์คลิฟท์	75
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก ก ขดลวดทองแดงมาตรฐาน AWG	83
ภาคผนวก ข โปรแกรมควบคุมการวิ่งของโมเดลรถฟอร์คลิฟท์	84
ภาคผนวก ค ตารางผลการทดสอบการทดลองขั้นที่ 1	85
ภาคผนวก ง ตารางผลการทดสอบการทดลองขั้นที่ 2	86
รางวัลและเกียรติบัตร	87

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าความซาบซึ่มของวัสดุชนิดต่างๆ	16
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของโมลูลชาร์จไร้สาย	20
ตารางที่ 3.2 ค่าความเหนียวนำและค่าความต้านทานของขดลวดแกนอากาศ	38

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงการ	2
ภาพที่ 1.2 ระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายภายในคลังสินค้า	3
ภาพที่ 2.1 การส่งพลังงานไร้สายชนิดเหนี่ยวนำแบบธรรมดา	10
ภาพที่ 2.2 การส่งพลังงานไร้สายชนิดเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนท์	11
ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในขดลวด	12
ภาพที่ 2.4 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อจำนวนรอบของขดลวด	14
ภาพที่ 2.5 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ของขดลวด	14
ภาพที่ 2.6 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อความยาวของขดลวด	15
ภาพที่ 2.7 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อวัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด	16
ภาพที่ 2.8 ขดลวดแกนอากาศ	17
ภาพที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Half-Bridge	18
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างและวงจรภายในมอสเฟตกำลังชนิด N-channel	19
ภาพที่ 3.1 โมดูลชาร์จไร้สาย	20
ภาพที่ 3.2 วงจรฝั่งส่งของโมดูลชาร์จไร้สาย	21
ภาพที่ 3.3 วงจรฝั่งรับของโมดูลชาร์จไร้สาย	22
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างของระบบการชาร์จไร้สายในรถฟอร์คลิฟท์	23
ภาพที่ 3.5 วงจรสวิตซ์ฝั่งส่งพลังงานแบบ Half-Bridge Inverter	24
ภาพที่ 3.6 การต่อใช้งานไอซีกำเนิดสัญญาณ PWM TL494 แบบ Single-ended	25
ภาพที่ 3.7 วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ PWM	26
ภาพที่ 3.8 วงจรขับขาเกต Power MOSFET โดยใช้ IR2110	27
ภาพที่ 3.9 ภาพรวมวงจรชุดส่งพลังงาน	28
ภาพที่ 3.10 โมเดลรถฟอร์คลิฟท์	29
ภาพที่ 3.11 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดขนาด 6V 1.2Ah	30
ภาพที่ 3.12 วงจรชุดรับพลังงานและชาร์จแบตเตอรี่	30
ภาพที่ 3.13 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4	32
ภาพที่ 3.14 วงจรเซ็นเซอร์ชนิดอินฟราเรด	33
ภาพที่ 3.15 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ไอซีเบอร์ L293D	35
ภาพที่ 3.16 ขดลวดทองแดงแกนอากาศ	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 3.17 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ด้วย 4263B LCR Meter (Agilent)	37
ภาพที่ 3.18 รางอะคริลิกขนาด 22.5 cm x 210 cm	39
ภาพที่ 3.19 การติดตั้งชุดขาร์จบนรางอะคริลิก (มุมด้านข้าง)	40
ภาพที่ 3.20 การติดตั้งชุดขาร์จบนรางอะคริลิก (มุมด้านบน)	40
ภาพที่ 3.21 การแปะสติ๊กเกอร์สีบนรางอะคริลิก (มุมด้านบน)	40
ภาพที่ 3.22 โฟล์วชาร์ตควบคุมการวิ่งของโมเดลรพอร์ทลิฟท์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	41
ภาพที่ 4.1 การทดลองที่ 1 วัดค่าแรงดันและกระแส	43
ภาพที่ 4.2 การทดลองที่ 1 โดยแนวขดลวดตรงกัน ระยะห่าง 1 mm	43
ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	44
ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	44
ภาพที่ 4.5 การทดลองที่ 2 โดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน	45
ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	46
ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	46
ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	47
ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	47
ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	48
ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	48
ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	49
ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	49
ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	50
ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	50
ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	51
ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	51
ภาพที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	52
ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	52
ภาพที่ 4.20 การทดลองที่ 3 โดยแนวขดลวดตรงกัน	53
ภาพที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	54
ภาพที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	54

สารบัญญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.23 การทดลองที่ 3 โดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน	55
ภาพที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	56
ภาพที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	56
ภาพที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	57
ภาพที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	57
ภาพที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	58
ภาพที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	58
ภาพที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	59
ภาพที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	59
ภาพที่ 4.32 การทดลองที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทั้งสองฝั่งมีขนาดไม่เท่ากัน	60
ภาพที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	61
ภาพที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	61
ภาพที่ 4.35 วงจรออกแบบฝั่งส่ง	63
ภาพที่ 4.36 วงจรออกแบบฝั่งรับ	64
ภาพที่ 4.37 ขดลวดทองแดงชนิดวงกลมเบอร์ 18 AWG จำนวน 20 รอบ	64
ภาพที่ 4.38 ขดลวดทองแดงชนิดสี่เหลี่ยมเบอร์ 18 AWG จำนวน 20 รอบ	65
ภาพที่ 4.39 รูปแบบการทดลองวงจรจริงโดยแนวขดลวดตรงกัน	65
ภาพที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	66
ภาพที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	66
ภาพที่ 4.42 รูปแบบการทดลองวงจรจริงโดยแนวขดลวดตรงกันที่ระยะห่าง 10 mm	67
ภาพที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อค่าความต้านทานต่างๆ	68
ภาพที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อค่าความต้านทานต่างๆ	68
ภาพที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	69
ภาพที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	70
ภาพที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด	70
ภาพที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด	71
ภาพที่ 4.49 กราฟความสัมพันธ์ของความถี่และกำลังงานไฟฟ้าที่ได้รับ	72
ภาพที่ 4.50 อุปกรณ์ประจำวันที่มีอยู่ภายในสำนักงาน	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้า
ภาพที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ของอุปกรณ์แต่ละชนิดต่อการเหนี่ยวนำของวงจรฟุ้งส่ง	74
ภาพที่ 4.52 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันในแบตเตอรี่ต่อเวลาเมื่อไม่มีการชาร์จ	75
ภาพที่ 4.53 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันในแบตเตอรี่ต่อเวลาเมื่อมีการชาร์จ	76
ภาพที่ 4.54 การทดลองวงจบบนราง	77

บทที่ 1

บทนำ

ระบบการขนส่งหรือการเคลื่อนย้ายสินค้าในโรงงานอุตสาหกรรม คลังสินค้า สนามบิน ห้างสรรพสินค้า ฯลฯ นั้นจำเป็นต้องใช้รถยก (Forklift) ในการเคลื่อนย้ายสินค้าเพื่อเป็นการอำนวยความสะดวกและประหยัดแรงงานคน อุตสาหกรรมในปัจจุบันจึงมักเลือกใช้รถยนต์เป็นต้นกำลังของรถ แต่สิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้คือค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิง

รถฟอร์คลิฟท์สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทตามการใช้พลังงาน คือ รถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้น้ำมัน รถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้ก๊าซ และรถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้ไฟฟ้า แต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อด้อยแตกต่างกันออกไป เช่น รถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้น้ำมันในการขับเคลื่อนนั้น จะมีเวลาในการเติมเชื้อเพลิงสั้น แต่ต้นทุนค่าเชื้อเพลิงสูง ส่วนรถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้ก๊าซในการขับเคลื่อนนั้น จะมีต้นทุนค่าเชื้อเพลิงต่ำ แต่เครื่องยนต์มีอายุการใช้งานสั้นและรถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนนั้นสามารถประหยัดต้นทุนด้านเชื้อเพลิงและไร้ปัญหาด้านมลพิษ ดังนั้นจึงทำให้รถฟอร์คลิฟท์ที่ใช้ไฟฟ้าเป็นที่นิยมมากในปัจจุบัน

1.1 ความสำคัญของปัญหา

การใช้รถฟอร์คลิฟท์พลังงานไฟฟ้าในปัจจุบันนี้เจ้าของกิจการจำเป็นต้องมีอาคารสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ และจำเป็นต้องมีแบตเตอรี่สำรองเพื่อเปลี่ยนกับแบตเตอรี่ที่ใช้งานหมดแล้วระหว่างช่วงเวลารอชาร์จ ซึ่งการสร้างอาคารสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ และการเตรียมแบตเตอรี่สำรองนั้นเป็นการลงทุนที่มีค่าใช้จ่ายสูงมากและเสียเวลาในการเปลี่ยนแบตเตอรี่ ทำให้การทำงานขาดความต่อเนื่องดังนั้นการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายในระหว่างการใช้งาน จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมและดีกว่า โดยเป็นการประหยัดต้นทุนการสร้างอาคารสำหรับชาร์จแบตเตอรี่ ลดต้นทุนในการซื้อแบตเตอรี่สำรองและเป็นการลดการใช้ทรัพยากรอย่างไม่คุ้มค่า

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

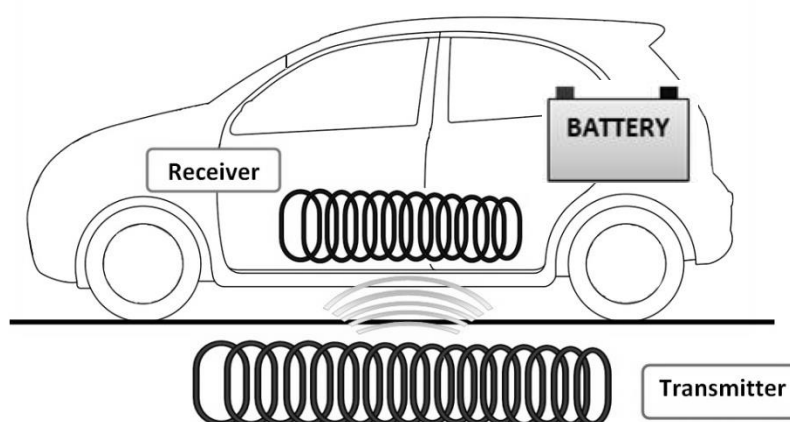
1. ศึกษาและประเมินการส่งพลังงานแบบไร้สายแต่ละเทคนิค
2. เพื่อนำทฤษฎีการส่งพลังงานแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่
3. สร้างชุดต้นแบบของการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายของรถฟอร์คลิฟท์

1.3 ประโยชน์ของโครงการ

1. ประหยัดต้นทุนการก่อสร้างพื้นที่ชาร์จแบตเตอรี่ เชื้อเพลิง และการใช้แบตเตอรี่สำรอง
2. ลดเวลาในการพักชาร์จแบตเตอรี่และยืดระยะเวลาการใช้งานของรถฟอร์คลิฟท์
3. สามารถนำไปเป็นอุปกรณ์ต้นแบบในการวางระบบชาร์จไร้สายในสถานที่ประกอบการต่างๆ
4. สามารถนำไปเป็นต้นแบบเพื่อประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการชาร์จไร้สายหรือระบบอัตโนมัติในอนาคต

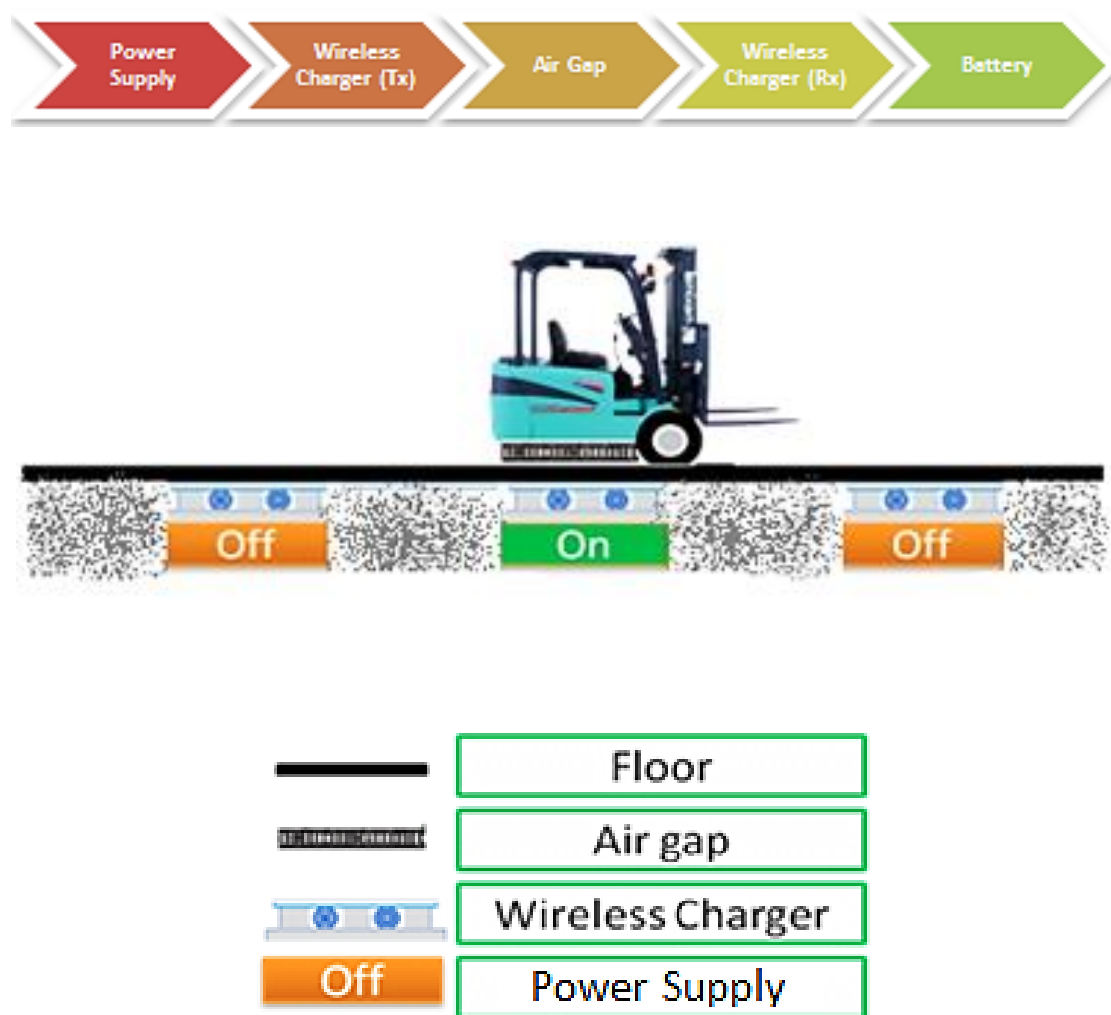
1.4 โครงสร้างของโครงการ

โครงสร้างของโครงการประกอบด้วยส่วนหลักๆสองส่วน คือ ชุดส่งพลังงานและชุดรับพลังงานแบบไร้สายดังภาพที่ 1.1



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างของโครงการ

ระบบการชาร์จที่ส่งพลังงานผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศ ซึ่งตามหลักการคือต้องมีขดลวด อยู่สองชุด ชุดตัวส่งพลังงานและชุดตัวรับพลังงาน โดยอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำ และนำพลังงานที่ได้รับ มาทำการชาร์จแบตเตอรี่ ดังแสดงในภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 ระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายภายในคลังสินค้า

1.5 ขอบเขตของโครงการ

1. สร้างวงจรชุดชาร์จแบบไร้สาย พิกัด 6V 12W
2. ทดสอบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายในโมเดลรถฟอร์คลิฟท์ขนาด $25 \times 25 \times 20 \text{ cm}^3$
3. เปรียบเทียบประสิทธิภาพชุดชาร์จแบตเตอรี่ระหว่างระบบที่ไม่มีการชาร์จและระบบที่มีการชาร์จแบบไร้สาย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 รถฟอร์คลิฟท์ (Forklift) [1]

รถฟอร์คลิฟท์ คือ รถที่ใช้เคลื่อนย้ายสินค้าภายใน คลังสินค้า (warehouse) หรือโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ แบ่งตามลักษณะภายนอก แบ่งได้ 3 ประเภท

- รถยกแบบเดินตาม (Pedestrian Stacker) เป็นรถยกกระดับสูงที่ใช้พื้นที่น้อยที่สุด รถชนิดนี้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ มีมอเตอร์ในการผ่อนแรงในการยกน้ำ-หนักและการเคลื่อนที่ ในขณะที่รถเคลื่อนที่ผู้ปฏิบัติงานสามารถยืนบนที่วางเท้าเพื่อความสะดวกมากขึ้น ระบบความปลอดภัยก็จัดให้มีที่ป้องกันเท้าเพื่อไม่ให้เท้าสอดเข้าไปในล้อรถ และป้องกันปัญหาการทับเท้า จุดศูนย์กลางของรถได้ถูกออกแบบให้อยู่ภายในตัวรถทำให้รถไม่คว่ำขณะยกของสูง รถประเภทนี้เหมาะกับการเคลื่อนที่ในระยะใกล้ๆ และยกน้ำ-หนักไม่มากนัก โดยปกติผู้ผลิตจะออกแบบมาให้สามารถบรรทุกได้ 1.2 ตัน ยกได้สูง 5 เมตร ในขณะที่ยกของจะมีความเร็วประมาณ 6-8 กม./ชม.
- รถยกแบบยืน (Stand on Stacker) ถูกออกแบบมาใช้ในพื้นที่ที่วางของไม่เป็นระเบียบเพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน การบังคับให้รถหยุดสามารถบังคับได้จากเท้าเหยียบและคันยกด้วยมือ รถประเภทนี้จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความปลอดภัย และมีการยกของขึ้นลงบ่อยๆ และเคลื่อนที่ไม่ไกลมาก
- รถยกแบบนั่ง (Rider Seated Stacker) ใช้ในกรณีที่ต้องการมีการเคลื่อนที่ในระยะไกล หรือในกรณีที่ต้องการทำงานตลอดทั้งวัน โดยรถประเภทนี้จะมีลักษณะเหมือนรถยนต์ทั่วไป ความเร็วในการเคลื่อนที่ประมาณ 8-12 กม./ชม. ตัวรถมีน้ำหนักมากกว่าสองแบบแรกจึงทำให้ถ่วงและยกได้น้ำหนักที่มากกว่า นอกจากนั้นรถแบบนี้ยังถูกออกแบบให้มีหลายลักษณะ เพื่อให้เหมาะสมกับสถานที่และการใช้งาน

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งตามลักษณะเครื่องยนต์ ได้ 3 ประเภทด้วยเช่นกัน คือ

- เครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง รถประเภทนี้เครื่องยนต์ทำงานเหมือนรถยนต์ทั่วไป และมีต้นทุนด้านเชื้อเพลิงค่อนข้างสูง และมีการปล่อยมลพิษออกสู่ภายนอกมาก
- เครื่องยนต์ที่ใช้แก๊สLPGเป็นเชื้อเพลิง แม้เชื้อเพลิงถูกกว่าน้ำมันแต่ความสะอาดของเชื้อเพลิงมีน้อยอาจจะส่งผลโดยตรงกับอายุการใช้งานของเครื่องยนต์ที่จะลดลง
- เครื่องยนต์ที่ใช้ไฟฟ้า รถประเภทนี้ใช้เชื้อเพลิงในรูปของแบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่ที่เลือกใช้คือแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด (Lead acid) แบบ ดีพไซเคิล (Deep Cycle) การใช้พลังงานไฟฟ้านั้นจะไม่ปล่อยมลพิษออกมาจึงส่งผลดีและสามารถนำไปใช้ในพื้นที่ปิดได้สะดวก

2.2 การชาร์จรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย [2]

ปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าคือเรื่องของระยะทางที่วิ่งได้ต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง ทีมวิจัยที่นำโดย Shanhui Fan แห่งมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดเสนอวิธีการชาร์จพลังงานแบบไร้สายระหว่างรถยนต์กำลังทำงานให้กับรถยนต์ซึ่งอาจจะช่วยแก้ไขปัญหานี้ลงไปได้

คณะผู้วิจัยเสนอว่า หากเราฝังขดลวดแม่เหล็กไว้ในถนนทางลาด เมื่อรถยนต์พลังงานไฟฟ้าวิ่งผ่าน ก็จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จากการทดลองเบื้องต้นกับแบตเตอรี่รถที่ปรับแต่งอย่างเหมาะสม ประสิทธิภาพของการชาร์จสูงสุดอยู่ที่ 97% สำหรับการชาร์จไฟฟ้า 10 กิโลวัตต์ ในเวลา 7 ไมโครวินาที

ข้อจำกัดของวิธีการชาร์จไร้สายนี้ คือ ตัวแบตเตอรี่รถยนต์และขดลวดแม่เหล็กในถนนจะต้องปรับแต่งให้เข้ากันอย่างพอเหมาะพอเจาะจึงจะเกิด magnetic resonance ที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าได้ นอกจากนี้การควบคุมความร้อนระหว่างการชาร์จเนื่องจากกระแสที่สูง ก็เป็นข้อจำกัดหลักด้วยเช่นกัน

2.3 เทคนิคการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย [3] [4]

2.3.1 หม้อแปลงและการเหนี่ยวนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ จากวงจรหนึ่งไปยังอีกวงจรหนึ่ง โดยวิธีทางวงจรแม่เหล็กซึ่งไม่มีจุดต่อไฟฟ้าถึงกัน และไม่มี

ชิ้นส่วนทางกลเคลื่อนที่ โดยทั่วไปเราใช้หม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแปลงแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้มีขนาดลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากเดิม โดยมีความถี่ไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง หม้อแปลงไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยโครงสร้างที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ขดลวด และแกนเหล็ก ขดลวดจะมีสองขดหรือมากกว่าขึ้นอยู่กับชนิดของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยขดที่หนึ่งคือ ขดลวดรับไฟหรือขดลวดปฐมภูมิ ขดที่สองคือ ขดลวดจ่ายไฟหรือขดลวดทุติยภูมิ

การทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้านั้น อาศัยหลักการความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเส้นแรงแม่เหล็กในการสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้กับตัวนำ คือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านขดลวดตัวนำ ก็จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กรอบๆตัวนำนั้น และถ้ากระแสที่ป้อนมีขนาดและทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไปมา ก็จะทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ถ้าสนามแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวตัดผ่านตัวนำ ก็จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำขึ้นที่ตัวนำนั้น โดยขนาดของแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำจะสัมพันธ์กับ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก และความเร็วในการตัดผ่านตัวนำของสนามแม่เหล็ก

ในระบบการชาร์จเหนี่ยวนำแบบไร้สายนั้น ขดลวดปฐมภูมิจะอยู่ในอุปกรณ์การชาร์จที่ติดตั้งอยู่กับที่และขดลวดทุติยภูมิจะอยู่ในอุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะใช้หม้อแปลงแบบมีช่องว่างอากาศหรือหม้อแปลงที่มีการแยกแกนเหล็กที่มีช่องว่างอากาศระหว่างสองแกนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ เมื่อขดลวดทุติยภูมิถูกนำมาในบริเวณใกล้เคียงกับขดลวดปฐมภูมิ หม้อแปลงจะเกิดการถ่ายโอนพลังงานขึ้น วิธีการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายนี้จะมีประสิทธิภาพในขณะที่สนามแม่เหล็กจะอยู่ในแกนของหม้อแปลงเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นจึงมีการสูญเสียเนื่องจากการรั่วไหลของสนามแม่เหล็กในระดับที่ต่ำ ยกเว้นที่ช่องว่างอากาศระหว่างแกน

หม้อแปลงที่มีช่องว่างอากาศนั้นมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับหม้อแปลงแบบแกนแม่เหล็กเนื่องจากผลกระทบของสนามแม่เหล็กกับวัตถุอยู่ที่ใกล้เคียงจึงส่งผลให้เกิดการลดทอนพลังงานและทำให้ประสิทธิภาพด้อยลง ด้วยเหตุการนี้เหล่านี้จึงเป็นแหล่งที่มาที่ทำให้เกิดการกระจายของความร้อนที่เพิ่มขึ้นในแผงวงจรใกล้เคียงในขณะที่เกิดการเหนี่ยวนำกระแสอย่างหลีกเลี่ยงมิได้ และสามารถส่งผลกระทบต่อการศึกษาในการออกแบบระบบระบายความร้อน

เนื่องจากความต้องการของช่องว่างอากาศที่ขนาดเล็กของหม้อแปลงที่มีการแยกแกนเหล็ก ประสิทธิภาพของหม้อแปลงชนิดนี้จึงมีน้อยกว่าหม้อแปลงชนิดทั่วไป และในขณะที่ช่องว่างอากาศมีการเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำก็จะลดลงอย่างเป็นนัย ด้วยเหตุผลเหล่านี้ วิธีนี้จึงมีประโยชน์สำหรับการถ่ายโอนพลังงานในระยะทางสั้นๆ หม้อแปลงมีช่องว่างอากาศที่ไม่มีแกนแม่เหล็กจึงมีประสิทธิภาพมากกว่าในระยะทางไกล แต่จะมีประสิทธิภาพด้อยลงเมื่อขดลวดเกิดการแยกออกจากกันและเกิดการสูญเสียอันเนื่องมาจากผลกระทบของสนามแม่เหล็กกับวัตถุใกล้เคียง เนื่องจากหม้อแปลงชนิดนี้ไม่มีสนามแม่เหล็กรวมตัวกันอยู่ในแกน

ดังนั้นความเป็นไปได้ที่จะเกิดความร้อนแผงวงจรใกล้เคียงเพิ่มขึ้น จึงมีความจำเป็นในการใช้ขดลวดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กที่บีบอัดพลังงาน แต่ต้องมีความแม่นยำของตำแหน่งในการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดทั้งสอง ในทางกลับกันขดลวดที่มีขนาดใหญ่สามารถถ่ายโอนพลังงานได้ แม้ว่าจะไม่จัดอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด แต่จะประสบกับปัญหาที่กล่าวไว้ข้างต้นเพิ่มขึ้นที่เกิดผลกระทบจากอุปกรณ์และวัตถุอื่นๆ ใกล้เคียง

2.3.2 การเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบไดนามิก

การเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบไดนามิกนั้นเป็นรูปแบบในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ขดลวดเรโซแนนซ์จำเพาะหรือขดลวดเทสลาในการถ่ายโอนพลังงานจากขดลวดปฐมภูมิไปยังขดลวดทุติยภูมิที่มีประสิทธิภาพสูงในระยะทางสั้น ๆ โดยจะมีความถี่เข้ามาเกี่ยวข้อง ตัวเก็บประจุจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้าง oscillator LRC ที่สอดคล้องกับความถี่ที่ใช้ เมื่อขดลวดปฐมภูมิมีการขับเคลื่อน พลังงานจำนวนมากที่ถูกเก็บไว้ในตัวเก็บประจุและขดลวดนั้นจะกระจายตัวอย่างช้าๆ เนื่องจากขดลวดทั้งสองนั้นมีการเรโซแนนซ์ที่ความถี่เดียวกัน ประสิทธิภาพของการเหนี่ยวนำระหว่างขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิจึงสูง และพลังงานจำนวนมากก็ยังสามารถถ่ายโอนได้ในขณะที่การสูญเสียจากระยะทางที่เกิดขึ้น การเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบไดนามิกจึงเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานพลังงานที่สูงในขณะที่เดียวกันก็ต้องการกระแสในการชาร์จที่สูงด้วยเช่นกัน

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมในการพัฒนาการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากขนาดของระบบที่มีขนาดใหญ่และความร้อนที่สูงขึ้นอันเนื่องมาจากพลังงานสูญเสียของระบบเมื่อ

เทียบกับสินค้าอุปโภคบริโภค ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นตามระยะที่มากขึ้น หรือการจัดตำแหน่งที่ไม่ดีนั้นจะต้องถูกพิจารณาและแก้ไขเพื่อให้เหมาะสำหรับการชาร์จยานพาหนะ

แต่ด้วยข้อจำกัดด้านขนาดของขดลวดที่มีขนาดใหญ่และการออกแบบวงจรเรโซแนนซ์จำเพาะที่ต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงจึงนำมาประยุกต์ใช้ไม่มากนักในภาคการณปัจจุบัน

ถึงแม้ว่าอุปกรณ์นั้นจะทำงานได้อย่างดี เมื่อคำนึงถึงสินค้ากลุ่มผู้บริโภคแล้ว โครงสร้างพื้นฐานที่ชาร์จต้องสามารถทำงานร่วมกันระหว่างหลายๆระบบและยานพาหนะต่างๆ ดังนั้นการยอมรับของการชาร์จแบบไร้สายจะต้องพึงพาการเลือกและมาตรฐานของวิธีการอย่างใดอย่างหนึ่งของการถ่ายโอนพลังงาน

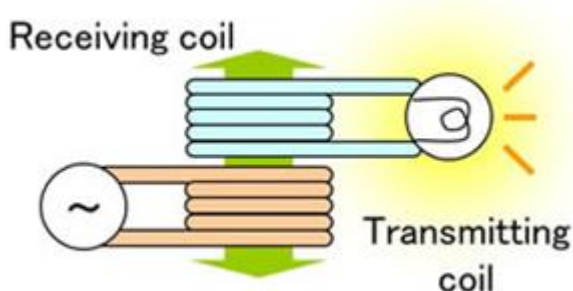
2.3.3 การรับสัญญาณวิทยุ

การสื่อสารโดยใช้คลื่นวิทยุนั้นเป็นการถ่ายโอนพลังงานในการส่งข้อมูลข่าวสาร โดยการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่เฉพาะและถูกมอดูเลตให้อยู่ในลักษณะที่เหมาะสม ซึ่งมีการแพร่กระจายสัญญาณออกมาจากตัวส่งและก่อให้เกิดการหมุนเวียนของคลื่นเหนี่ยวนำกับเสาอากาศที่ได้รับในบริเวณใกล้เคียง กระแสเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำมาใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่หรือสามารถนำมาผลิตพลังงานให้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีกำลังงานที่มีขนาดเล็กได้ ในทางทฤษฎี หลักการของตัวรับคือการนำคลื่นวิทยุที่รับได้แปลงเป็นไฟฟ้ากระแสตรงแล้วนำไปทำการปรับสภาพให้เหมาะสมจึงทำการจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์

การเหนี่ยวนำโดยใช้คลื่นวิทยุนี้ประสบกับปัญหาด้านการด้อยประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อเทียบหม้อแปลง เนื่องจากความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณที่ลดลงจากตัวส่งตามระยะทาง แต่เนื่องด้วยความสะดวกของการนำมาใช้เมื่อเทียบกับระยะทางที่ไกลและคลื่นวิทยุที่มีกระจายอยู่ในอากาศซึ่งสามารถหาได้มากมาย การชาร์จชนิดนี้จึงมีประโยชน์ในหลายๆด้าน แต่ข้อจำกัดด้านพลังงานที่สามารถสร้างขึ้นที่ไม่สูงมากนัก จึงอาจไม่เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานการชาร์จรถฟอร์คลิฟท์

2.3.4 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าแบบธรรมดา

การเหนี่ยวนำ (Induction) เป็นวิธีการส่งผ่านพลังงานแบบไร้สายในรูปแบบที่ วงจรตัวส่งจะมีขดลวดปฐมภูมิอยู่ในอุปกรณ์การชาร์จที่ติดตั้งอยู่กับที่ และวงจรตัวรับจะมีขดลวดทุติยภูมิอยู่ในอุปกรณ์ที่ต้องเคลื่อนที่ การส่งผ่านพลังงานนั้นเกิดขึ้นได้โดยเมื่อ อุปกรณ์ตัวส่งได้รับกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวด ทำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และเข้าเหนี่ยวนำขดลวดที่อยู่ภายในอุปกรณ์ตัวรับพลังงาน จึงเกิดเป็นพลังงานไฟฟ้า การเหนี่ยวนำของอุปกรณ์ทั้งคู่ทำให้สามารถโอนถ่ายพลังงานแบบไร้สายได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 แต่ข้อเสียของระบบเหนี่ยวนำ (induction) คือ ความสามารถในการทำงานเพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีนั้น มีระยะทางการใช้งานที่สั้น เพราะตัวรับนั้นต้องอยู่ใกล้กับตัวส่ง เพื่อให้การเหนี่ยวนำเกิดขึ้นได้

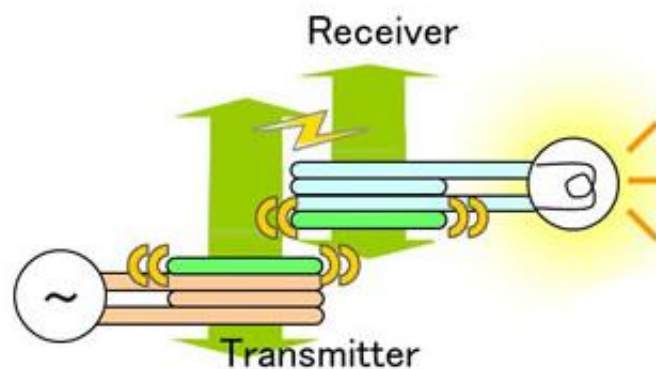


ภาพที่ 2.1 การส่งพลังงานไร้สายชนิดเหนี่ยวนำแบบธรรมดา [5]

2.3.5 การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าแบบเรโซแนนซ์

การเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ (Resonant induction) เป็นการพัฒนาต่อออกจากแนวคิดเหนี่ยวนำแบบธรรมดา (Induction) โดยเมื่ออุปกรณ์รับส่งสัญญาณทั้งคู่ถูกปรับให้สนามแม่เหล็กมีความถี่พ้อง (Resonance) ควบคู่กับการปรับคลื่นที่ส่งสัญญาณออกมาให้เป็นสภาพของคลื่นที่ไม่ใช่รูปไซน์ (Non-sinusoidal wave) จะทำให้พลังงานจากสนามแม่เหล็กเกิดการส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่ไกลขึ้น ซึ่งอุปกรณ์รับสัญญาณเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ (Resonant induction) จะมีอุปกรณ์ปรับความถี่ในย่านที่

สัญญาณรับได้ และโดยแนวคิดนี้มีข้อดีคือการสร้างเงื่อนไขการสั่นพ้องขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.2 ทำให้ช่วยส่งสัญญาณได้ไกลขึ้นกว่าแนวคิดแบบเหนี่ยวนำแบบธรรมดา (Induction) ที่จะเกิดการเหนี่ยวนำเฉพาะระยะใกล้มากๆ เท่านั้น นอกจากนี้ยังสามารถเลือกส่งพลังงานไปให้กับอุปกรณ์รับที่มีขนาดที่เลือกรับเฉพาะความถี่ที่ตั้งไว้ได้หลายอุปกรณ์พร้อมกัน



ภาพที่ 2.2 การส่งพลังงานไร้สายชนิดเหนี่ยวนำแบบเรโซแนนซ์ [5]

2.4 กฎของฟาราเดย์ [6]

กฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) กล่าวว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็ก ผ่านวงรอบปิดใดๆ ต่อเวลา จะก่อให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น โดยค่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force) จะมีค่าเท่ากับ อัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านวงรอบปิดนั้น เขียนเป็นสมการดังสมการที่ (2.1) และ (2.2) ได้ดังนี้

$$\varepsilon = -N \frac{d(\Phi_B)}{dt} = -\frac{Ldi}{dt} \quad (2.1)$$

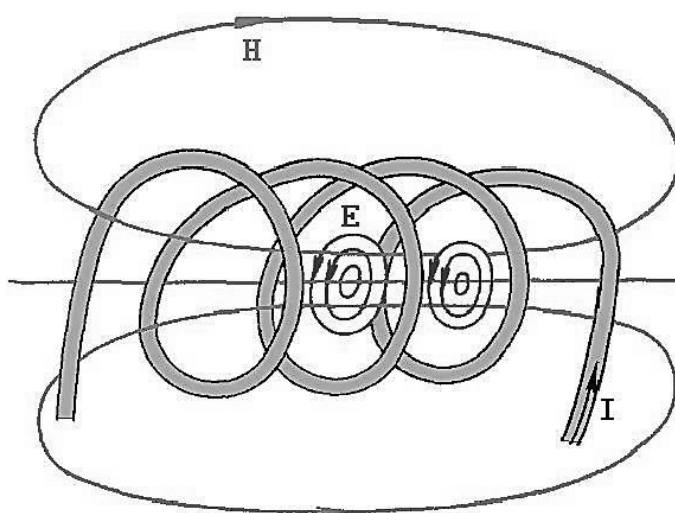
$$\Phi_B = \frac{Li}{N} \quad (2.2)$$

แรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (\mathcal{E}) ที่เกิดขึ้นในขดลวดนี้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Counter Electromotive Force, Counter EMF หรือ Back EMF) ซึ่งจะทำหน้าที่ต้านทานแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแบตเตอรี่และความสามารถของขดลวดหรือตัวเหนี่ยวนำที่ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำย้อนกลับ (Counter EMF) ขึ้นภายในซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าเรียกว่าการเหนี่ยวนำตัวเอง (Self-Inductance) หรือที่นิยมเรียก คือ ความเหนี่ยวนำ (Inductance, L) และมีหน่วยเป็น เฮนรี่ (H)

2.5 ขดลวดทองแดง [7]

2.5.1 การเหนี่ยวนำของขดลวด

ตัวเหนี่ยวนำเป็นเส้นลวดตัวนำจำพวกทองแดงขดลวดเป็นวงเรียงกันหลายๆ รอบ เรียกว่าขดลวดหรือคอยล์ (Coil) เมื่อนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขด จะส่งผลให้เส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นรอบเส้นลวดตัวนำเกิดการเสริมแรงกัน เกิดเป็นสนามแม่เหล็กขึ้น และสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีความเข้มเพิ่มมากขึ้น ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 ลักษณะการเกิดสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในขดลวด [7]

2.5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าความเหนี่ยวนำ

ค่าความเหนี่ยวนำและสนามแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะแปรผันหรือแปรผกผันตามปรากฏการณ์ต่างๆซึ่งถูกกำหนดโดย 5 ปัจจัยหลักๆดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ปริมาณของกระแสภายในขดลวด

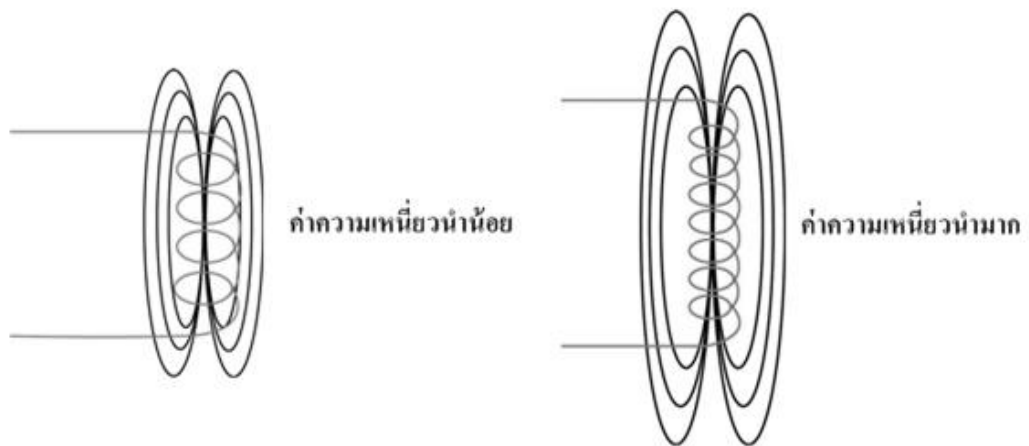
จากความสัมพันธ์ของสมการฟาราเดย์ดังสมการที่ (2.2) แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์แม่เหล็กและกระแสซึ่งแปรผันตามกันตามสมการที่ (2.3) สามารถสรุปได้ว่าถ้าปริมาณการไหลของกระแสผ่านเส้นลวดตัวนำ กระแสไหลน้อย สนามแม่เหล็กเกิดน้อยกระแสไหลมากสนามแม่เหล็กเกิดมาก

$$\Phi \propto i \quad (2.3)$$

2.5.2.2 จำนวนรอบของขดลวด

ถ้าตัวเหนี่ยวนำมีจำนวนรอบของขดลวดมากขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.4 สนามแม่เหล็กที่เกิดจากการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าในขดลวดก็จะเกิดขึ้นมากด้วย สนามแม่เหล็กปริมาณมากนี้ จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นในตัวเหนี่ยวนำที่เรียกว่า Counter EMF หรือ Back EMF และจากการที่มีเส้นแรงแม่เหล็กจำนวนมากตัดกับขดลวด จึงส่งผลให้ค่าความเหนี่ยวนำมากตามไปด้วย ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนรอบของขดลวด (N) ดังสมการที่ (2.4)

$$L \propto N \quad (2.4)$$

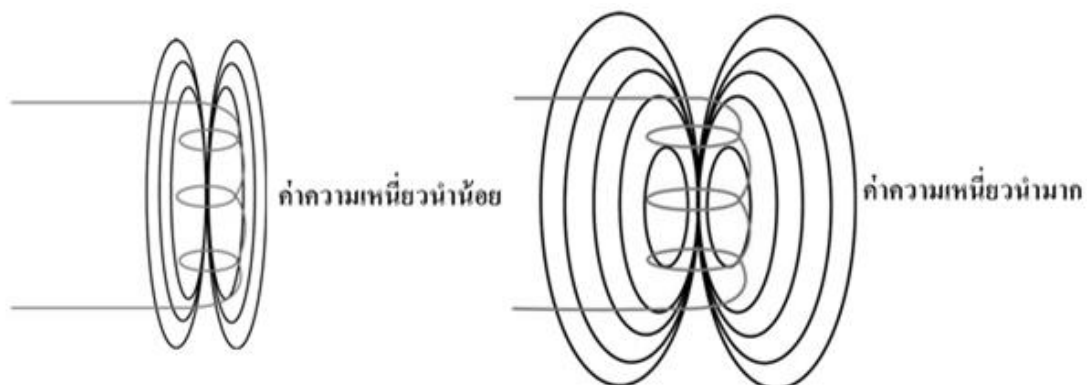


ภาพที่ 2.4 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อจำนวนรอบของขดลวด [7]

2.5.2.3 พื้นที่ของขดลวด

ถ้าพื้นที่ของขดลวดเพิ่มขึ้นสำหรับขดลวดที่มีจำนวนรอบใดๆ ดังแสดงในภาพที่ 2.5 จะทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีจำนวนมากขึ้นด้วย และการมีสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้น ค่าความเหนี่ยวนำ (L) จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ของขดลวด (A) ดังสมการที่ (2.5)

$$L \propto A \quad (2.5)$$

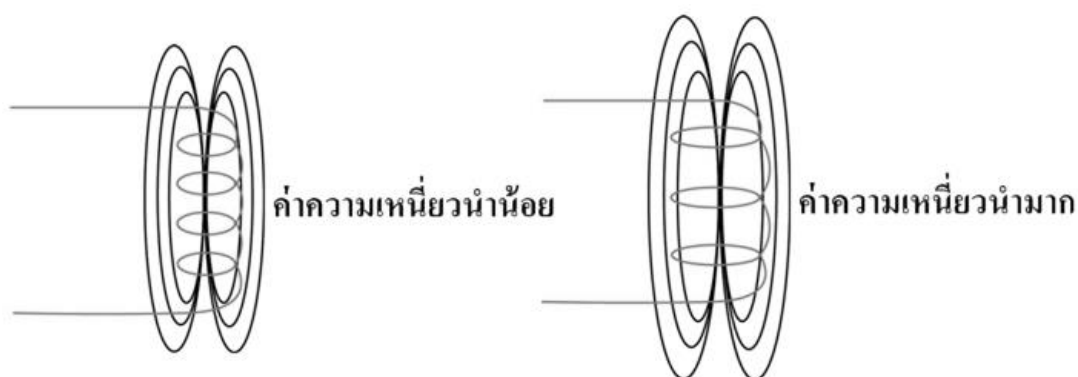


ภาพที่ 2.5 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อพื้นที่ของขดลวด [7]

2.5.2.4 ความยาวของขดลวด

ความยาวของขดลวดถ้าทำให้ขดลวดจำนวน 4 รอบ ขยายพื้นที่ออก (นั่นคือความยาวของขดลวดเพิ่มขึ้น) ดังแสดงภาพที่ 2.6 ผลรวมของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากขดลวดแต่ละขดจะมีปริมาณลดลง ในทางกลับกันถ้าขดลวดที่มีจำนวนเท่าเดิมนำมาพันให้อยู่ชิดกันมากขึ้น (ความยาวของขดลวดสั้นลง) สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดในแต่ละขดจะเสริมซึ่งกันและกัน ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่มีปริมาณมากขึ้น ทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำจึงเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวของขดลวด ดังสมการที่ (2.6)

$$L \propto \frac{1}{l} \quad (2.6)$$

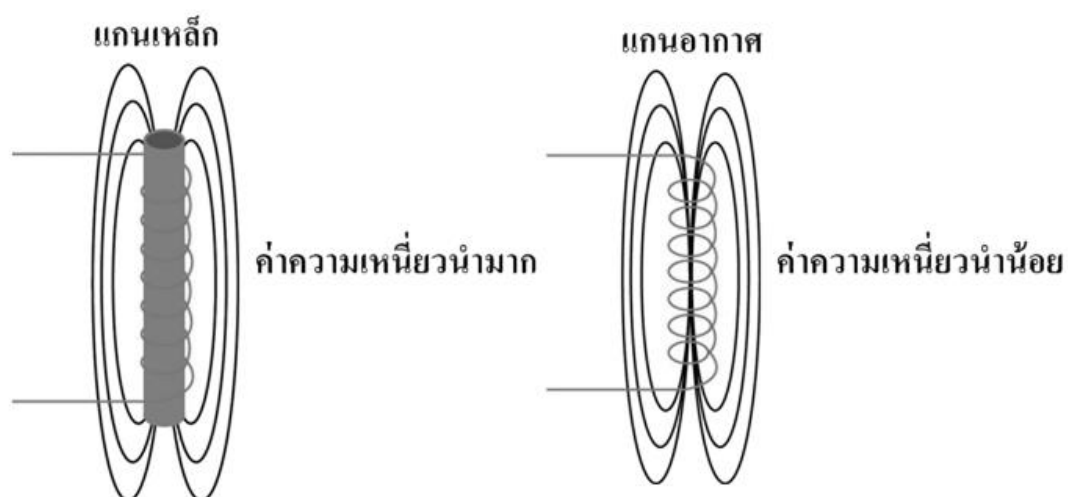


ภาพที่ 2.6 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อความยาวของขดลวด [7]

2.5.2.5 วัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด

ตัวเหนี่ยวนำส่วนมากมีแกนที่ทำจากวัสดุจำพวกนิกเกิล โคบอลต์ เหล็ก เฟอร์ไรต์ หรืออัลลอย ซึ่งแกนเหล่านี้มีคุณสมบัติที่จะช่วยรวมหรือเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ดังนั้น ค่าความซาบซึมได้ (Permeability, μ) จึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำ โดยถ้าค่าความซาบซึมได้ของวัสดุที่ใช้ทำแกนมีค่ามาก ก็จะทำให้ค่าความเหนี่ยวนำมีค่ามากตามไปด้วย ดังสมการที่ (2.7) และดังแสดงในภาพที่ 2.7 และตารางที่ 2.1 ซึ่งแสดงตัวอย่างของวัสดุหลายชนิดที่นำมาใช้ทำแกน

$$L \propto \mu \quad (2.7)$$



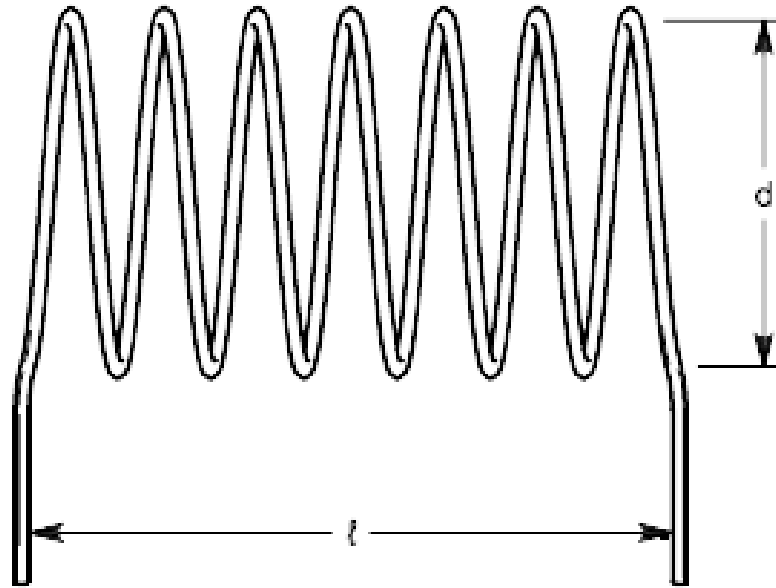
ภาพที่ 2.7 ผลของค่าความเหนี่ยวนำต่อวัสดุที่นำมาทำแกนภายในขดลวด [7]

ตารางที่ 2.1 ค่าความซาบซึมของวัสดุชนิดต่างๆ [7]

ค่าความซาบซึมได้ของวัสดุชนิดต่างๆ	
วัสดุ	ค่าความซาบซึมได้ (μ)
อากาศ หรือสุญญากาศ	1.26×10^{-5}
นิกเกิล	6.26×10^{-5}
เคบอลด์	7.56×10^{-5}
เหล็กหล่อ	1.1×10^{-4}
เหล็กแท่ง	5.56×10^{-4}
แกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า	5.3×10^{-3}
เหล็กซิลิกอน	8.8×10^{-3}
เฟอร์รมาลอย	0.128
ซูเปอร์เฟอร์รมาลอย	1.26

2.5.3 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศ [8]

การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศ ดังแสดงในภาพที่ 2.8 สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ (2.8)



ภาพที่ 2.8 ขดลวดแกนอากาศ [8]

$$L(\mu H) = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l} \quad (2.8)$$

โดยที่

L = ค่าความเหนี่ยวนำมีหน่วยเป็น microhenrys

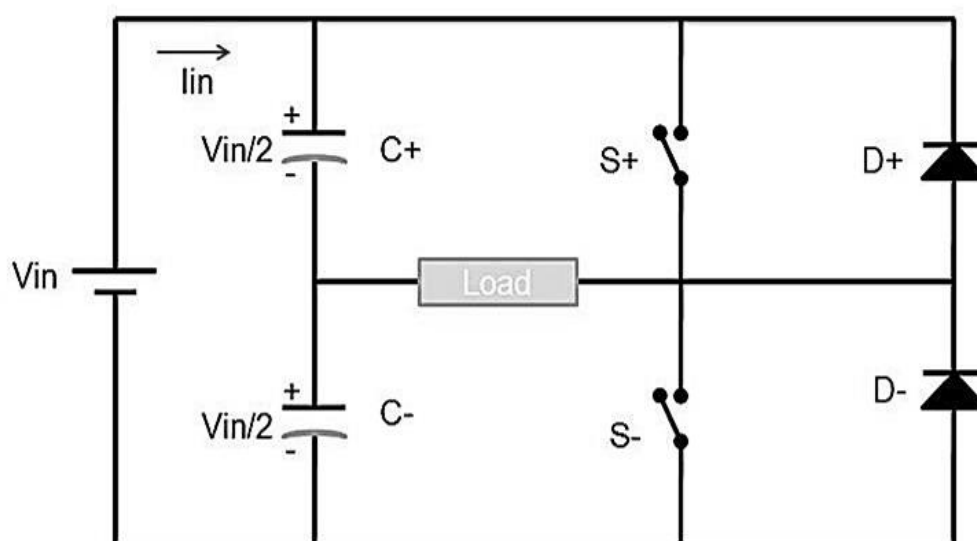
d = เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด (จากตรงกลางสุด ถึงตรงกลางลวดอีกด้าน)

l = ความยาวของขดลวด มีหน่วยเป็น นิ้ว

n = จำนวนรอบของขดลวด

2.6 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ (Half-Bridge Inverter) [10]

วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นวงจรแปลงผันชนิดที่เรียกว่า DC-AC Converter โดยทั่วไปจะ ออกแบบวงจรภายในโดยใช้วงจรสวิตช์ซึ่งเป็นการแปลงไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ จากภาพที่ 2.9 แสดงโครงสร้างของอินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ โดยปกติจะใช้อุปกรณ์สวิตช์เป็น ทรานซิสเตอร์กำลังสวิตช์สองตัวที่อยู่ในรูปจะสลับการทำงานในแต่ละขาของวงจร ซึ่งเมื่อ S+ ทำงานที่เวลา $0T$ ถึง $T/2$ แรงดันที่โหลดจะเท่ากับครึ่งหนึ่งของแรงดันอินพุต และถ้า S- ทำงานที่เวลา $T/2$ ถึง T แรงดันที่โหลดจะกลับขั้วเป็นลบ ทำให้เกิดแรงดันคลื่นสี่เหลี่ยมที่โหลด ตามรูปไดโอด และตัวเก็บประจุใหญ่ๆสองตัวถูกนำมาใช้ทำหน้าที่ Free-wheeling diode ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวคืน พลังงานในกรณีที่โหลดเป็นตัวเหนี่ยวนำและเป็นตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นภายในตัว อินเวอร์เตอร์ตามลำดับ



ภาพที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ Half-Bridge [11]

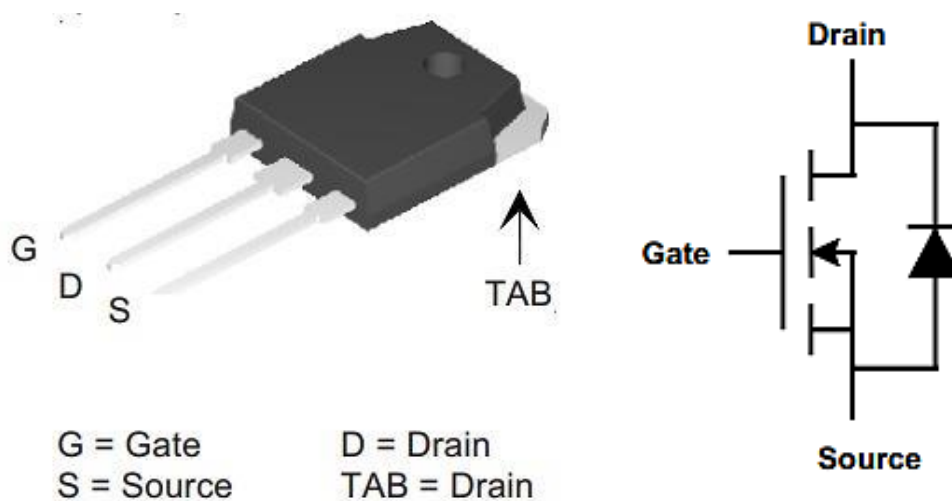
2.7 ทรานซิสเตอร์กำลัง (Power Transistors) [10]

การใช้ทรานซิสเตอร์ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังมักจะเป็นการเปิดปิดวงจรด้วยความเร็ว สูง เพื่อใช้ในตัวแปลงผันหรือคอนเวอร์เตอร์และตัวผกผันหรืออินเวอร์เตอร์ เหตุผลของการใช้ ทรานซิสเตอร์ เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อการเปิดปิดความเร็วสูงได้เป็นอย่างดี ซึ่งย่านความถี่ใน

การเปิดปิดสวิทช์จะอยู่ระหว่าง 5 kHz ถึง 200 kHz ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวแปลงผันและชนิดของทรานซิสเตอร์กำลังที่นำมาใช้งาน

2.7.1 มอสเฟตกำลัง (Power MOSFET)

มอสเฟตกำลัง หรือ Power MOSFET ดังแสดงในภาพที่ 2.10 เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ทดแทนทรานซิสเตอร์ ในการใช้งานย่านความถี่สูงถูกนำมาใช้ทำสวิทช์ในการเปิดปิดวงจรสวิทช์ต่างๆ โดยเฉพาะวงจรชอปเปอร์หรือวงจรตัวแปลงผันที่ไม่ต้องการการส่งผ่านกำลังที่สูงมากนัก แต่จุดเด่นอยู่ที่ความสามารถในการเปิดปิดวงจรที่ความถี่สูง มีกำลังสูญเสียขณะเปิดปิดต่ำมากต่างจากทรานซิสเตอร์หรือ BJT (Bipolar Junction Transistor) ที่ใช้ควบคุมด้วยกระแสเบส จึงเกิดกำลังสูญเสียสูงมาก ความเร็วในการเปิดปิดวงจรของมอสเฟตจะสูงอยู่ในย่านนาโนวินาที



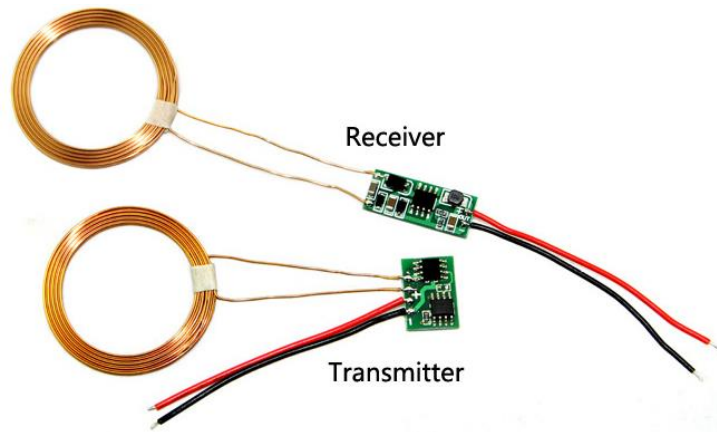
ภาพที่ 2.10 โครงสร้างและวงจรภายในมอสเฟตกำลังชนิด N-channel [12]

บทที่ 3

การศึกษาและการออกแบบระบบจำลองการชาร์จไร้สายในรถฟอร์คลิฟท์

3.1 การศึกษาจากโมดูลชาร์จไร้สาย [13]

โมดูลชาร์จไร้สายดังแสดงในภาพที่ 3.1 เป็นโมดูลของบริษัท ELEC Freaks โมเดล PW-WCG-01 โดยสามารถหาได้จากเว็บไซต์ <http://www.elec Freaks.com/> โมดูลดังกล่าวมีคุณสมบัติตามตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 โมดูลชาร์จไร้สาย [13]

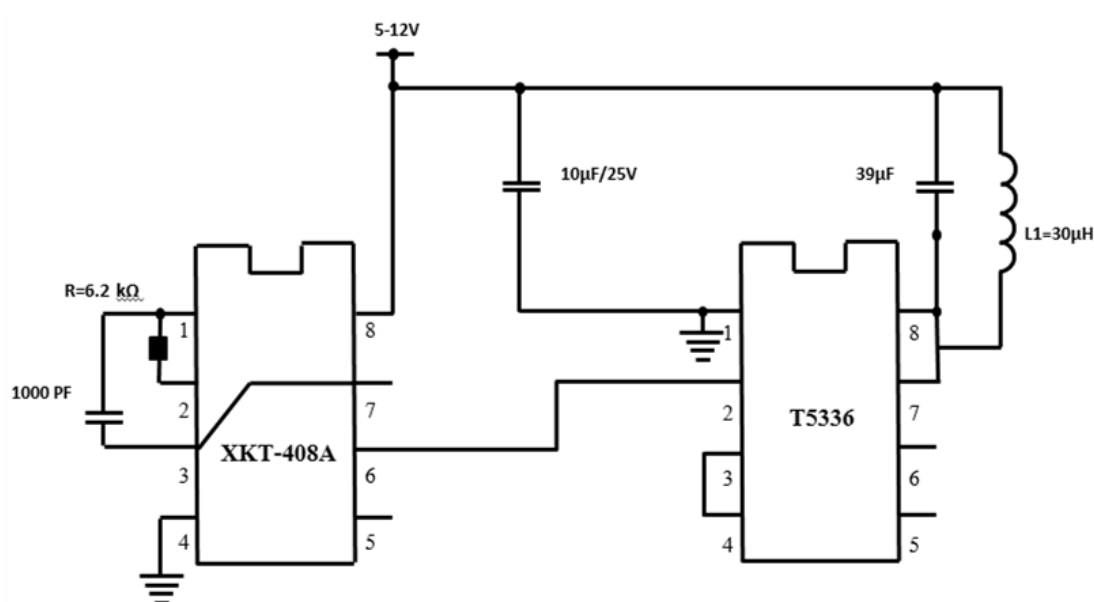
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของโมดูลชาร์จไร้สาย

(Transmitter Input Voltage)	+12V
Maximum Transmitter Input Voltage	+13.5V
Receiver Output Voltage	+5V DC regulated fixed
Maximum Receiver Current Capacity	600mA (Based on distance)
Coil Inductance	30uH
Transmit Receive Distance	1-20mm
Coil Dimensions	38mm Diameter x 2mm Height

เมื่อทำการศึกษาการทำงานและวงจรที่อยู่ในโมดูล สามารถแยกการทำงานแต่ละส่วนได้ ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

3.1.1 วงจรฝั่งส่ง

จากวงจร ดังแสดงในภาพที่ 3.2 จะพบว่าโมดูลของวงจรฝั่งส่งนั้นมีไอซีอยู่ 2 ตัว คือ T5336 และ XKT-408A ซึ่งเป็นไอซีที่ไม่มีการเปิดเผย datasheet และจากการวัดค่าต่างๆเพื่อศึกษาพฤติกรรมทั้งหมดของวงจรมัน พบว่าไอซี T5336 นั้นเป็นไอซีที่ทำการสร้างสัญญาณรูปคลื่นไซน์ และไอซี XKT-408A นั้นเป็นไอซีที่ทำหน้าที่ขยายแรงดัน คล้ายกับ MOSFET แล้วจึงส่งไปยังขดลวด ขั้นตอนการทำงานของวงจรมันคือการแปลงแรงดันกระแสตรงจากแหล่งจ่ายให้เป็นแรงดันกระแสสลับที่มีความถี่สอดคล้องกับขนาดของขดลวดที่ใช้งาน (ในกรณีวงจรมันนี้ใช้ความถี่ประมาณ 80 kHz) แล้วจึงส่งต่อไปยังขดลวดเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขึ้น

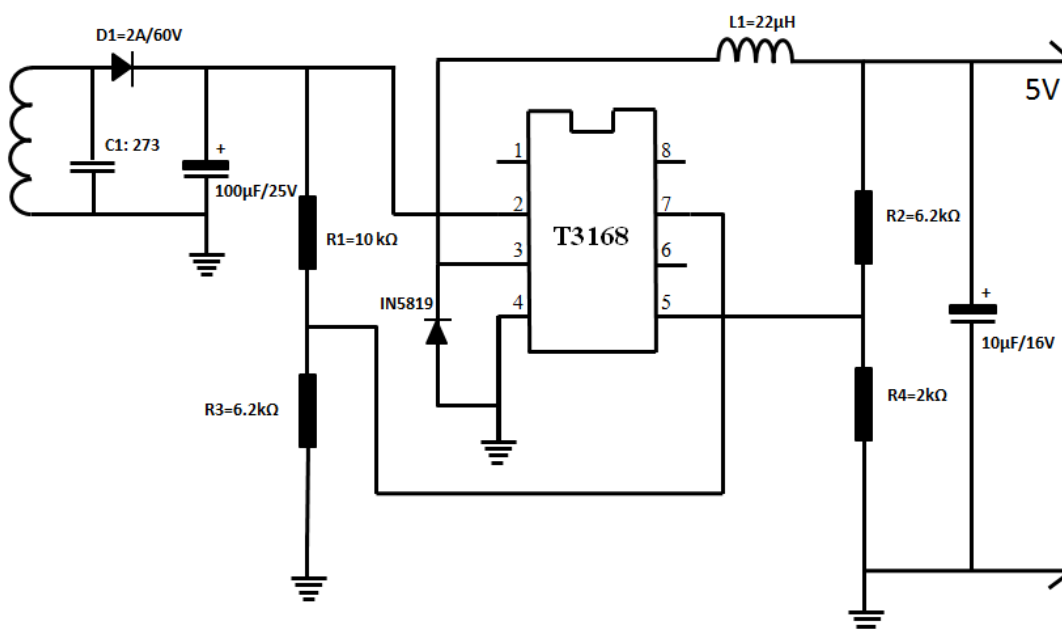


ภาพที่ 3.2 วงจรฝั่งส่งของโมดูลชาร์จไร้สาย [13]

3.1.2 วงจรฝั่งรับ

จากวงจร ดังแสดงในภาพที่ 3.3 จะพบว่าโมดูลของวงจรฝั่งส่งนั้นมีไอซีอยู่ 1 ตัว คือ T3168 ซึ่งเป็นไอซีที่ไม่มีการเปิดเผย datasheet และจากการวัดค่าต่างๆเพื่อศึกษา

พฤติกรรมทั้งหมดของวงจรนั้น พบว่าไอซี T3168 เป็นไอซีที่ทำหน้าที่เป็นตัวปรับปรุงสัญญาณ (signal conditioning) หรือ power regulation แต่มีประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างดี หลักการทำงานของวงจรก็คือ เมื่อรับสัญญาณที่เป็นแรงดันกระแสสลับเข้ามา นั้นจะทำการ rectify เพื่อให้เป็นแรงดันกระแสตรงจากนั้นจึงผ่านไอซี T3168 ผ่านกระบวนการต่างๆจากนั้นจึงนำไปจ่ายให้กับอุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน

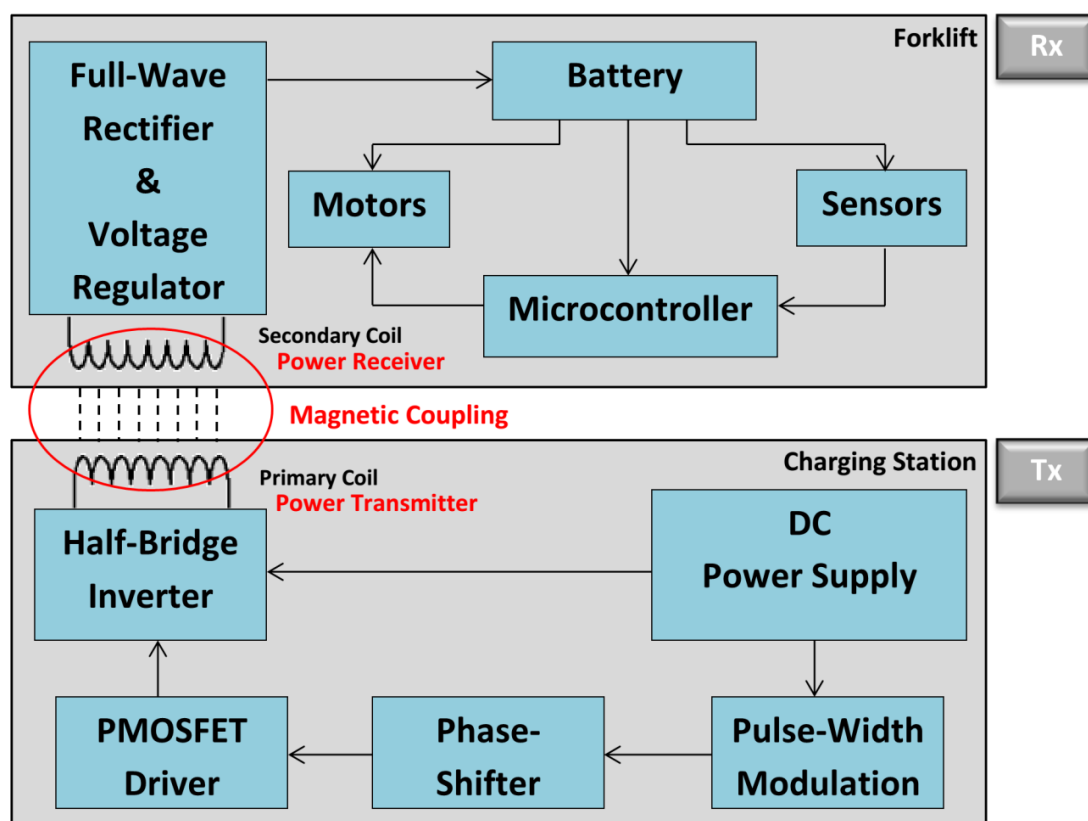


ภาพที่ 3.3 วงจรฝั่งรับของโมดูลชาร์จไร้สาย [13]

3.2 โครงสร้างของระบบการชาร์จไร้สายในรถฟอร์คลิฟท์

โครงสร้างของระบบการชาร์จไร้สายดังแสดงในภาพที่ 3.4 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ ดังนี้

1. ชุดตัวส่งพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง วงจรสวิตชิงแบบ Half-Bridge Inverter และวงจรควบคุมการสวิตชิง
2. ชุดตัวรับพลังงาน ซึ่งประกอบไปด้วยโมดูลรถฟอร์คลิฟท์ แบตเตอรี่ วงจร Full-Wave Rectifier และวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ที่เป็นวงจรเรกูเลตแรงดัน เซ็นเซอร์ต่างๆและไมโครคอนโทรลเลอร์



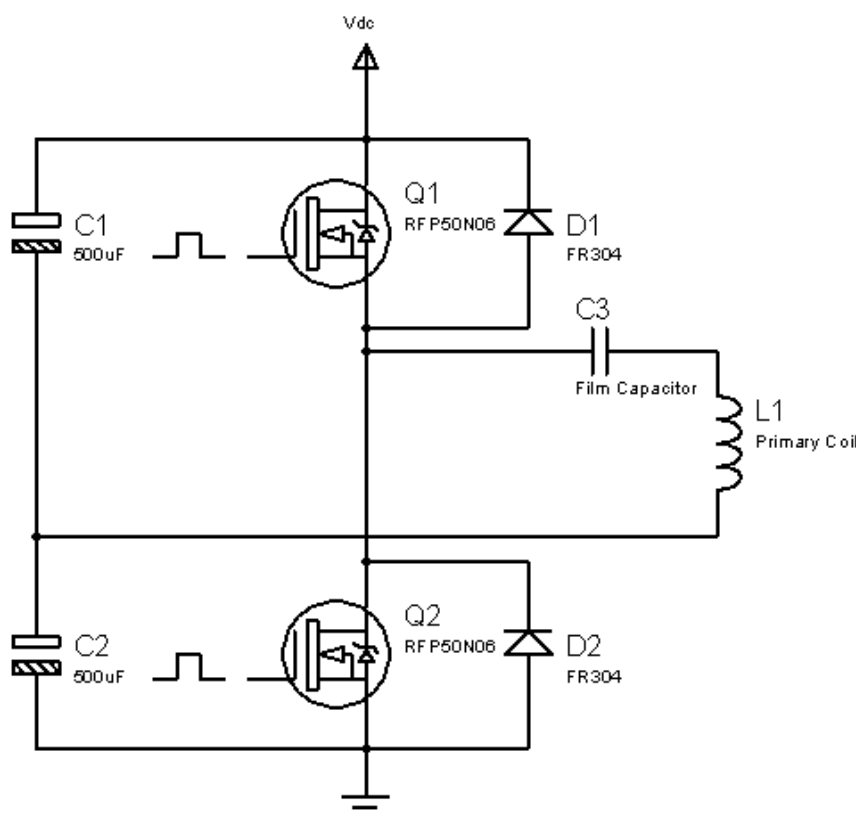
ภาพที่ 3.4 โครงสร้างของระบบการชาร์จไร้สายในรถฟอร์คลิฟท์

3.3 ชุดตัวส่งพลังงาน

3.3.1 วงจรสวิตช์แบบ Half-Bridge Inverter

จากการศึกษาจากโมดูลพบว่า ชนิดสัญญาณของแรงดันที่ถูกส่งผ่านไปยังขดลวดนั้นเป็นแรงดันกระแสสลับ เนื่องจากว่าวงจรที่ใช้ไอซีในโมดูลชาร์จไร้สายนั้นมีกระแสที่น้อยและไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานกับโครงงาน ดังนั้นจึงทำการออกแบบวงจร Half Bridge Inverter ดังภาพที่ 3.5 เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่อยู่ในรูปแบบพัลส์สี่เหลี่ยมจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยใช้ PMOSFET (Power MOSFET หรือมอสเฟต-กำลัง) เบอร์ RFP50N06 (N-channel) [14] ซึ่งรับแรงดันและกระแสได้สูงสุดที่ 60V 50A ทำหน้าที่เป็นตัวสวิตช์ซึ่งมีวงจรควบคุมการเปิดปิดสวิตช์และความถี่ของการสวิตช์ในวงจร และมีการต่อตัวเก็บประจุอนุกรมกับขดลวดเพื่อสร้างสภาวะเรโซแนนซ์ระหว่างขดลวดซึ่งเป็น L และ ตัวเก็บประจุซึ่งเป็น C ทำให้มีกระแสที่สูง

เนื่องจากไม่มีค่าความต้านทานรีแอคแตนส์และค่าความต้านทานภายในวงจรน้อยที่สุด ด้วยเหตุนี้จึงสามารถส่งกำลังงานได้สูงสุด แรงดันกระแสลับที่สร้างมาได้นั้นจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่ไม่คงที่และมีการเปลี่ยนแปลงต่อเวลาเพื่อสร้างแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นตามสมการที่ (2.1) ซึ่งแรงดันเอาต์พุตมีค่าแค่ครึ่งหนึ่งของอินพุต



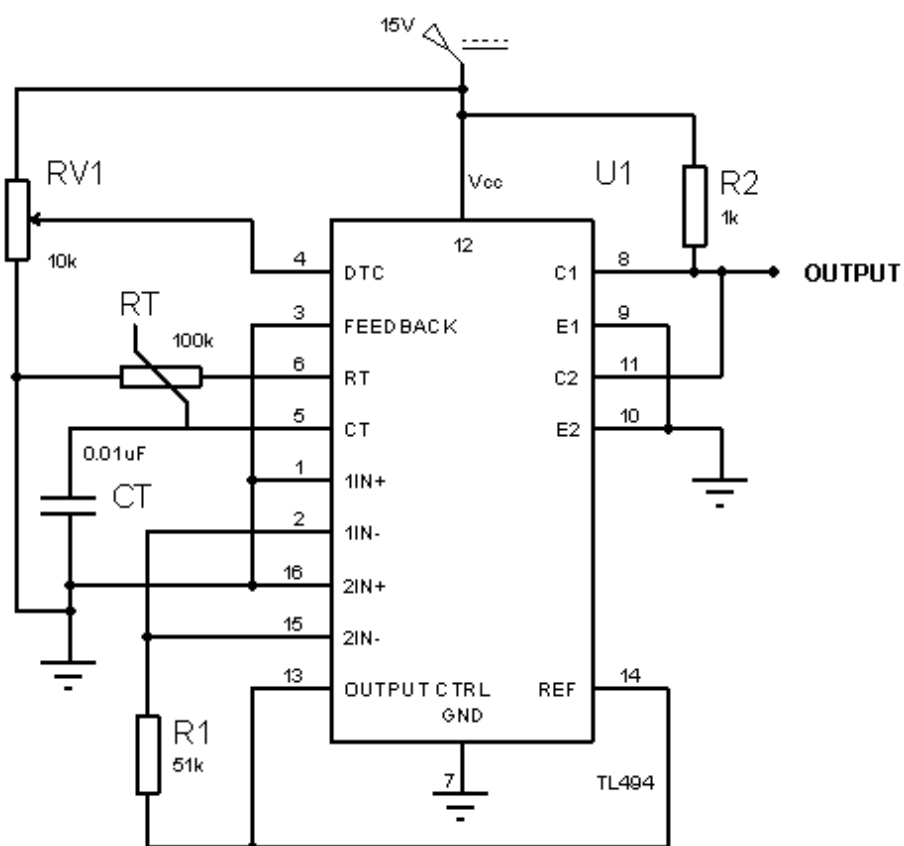
ภาพที่ 3.5 วงจรสวิทชิงฝั่งส่งพลังงานแบบ Half-Bridge Inverter

3.3.2 วงจรควบคุมการสวิทชิงของ PMOSFET ในวงจร Half-Bridge Inverter

การสวิทชิงของ PMOSFET ในวงจร Half-Bridge Inverter จำเป็นต้องมีสัญญาณควบคุมขาเกตของ PMOSFET เพื่อให้ PMOSFET ทำงานตามความถี่ที่ต้องการ และมีความถูกต้องตามหลักของวงจร Inverter โดยวงจรควบคุมการสวิทชิงของ PMOSFET ในวงจร Half-Bridge Inverter ประกอบไปด้วย 3 วงจรหลักๆดังนี้

3.3.2.1 วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM (Pulse-Width Modulation)

วงจรกำเนิดสัญญาณ PWM เป็นวงจรที่ทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมโดยการสร้างสัญญาณรูปฟันเลื่อยตามความถี่ที่ตั้งไว้โดยการกำหนดค่า R และ C ภายในวงจรและนำสัญญาณฟันเลื่อยที่ได้นั้นไปเปรียบเทียบกับแรงดันอินพุตที่เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยทำการต่อใช้งานไอซี TL494 [15] แบบ Single-ended ดังภาพที่ 3.6 โดยสามารถกำหนดค่า Duty Cycle ได้ตั้งแต่ 0-100% โดยการปรับแรงดันที่ขา Dead-Time Control (DTC) และสามารถปรับความถี่ของสัญญาณ PWM ได้โดยการกำหนดค่า R_T และ C_T ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

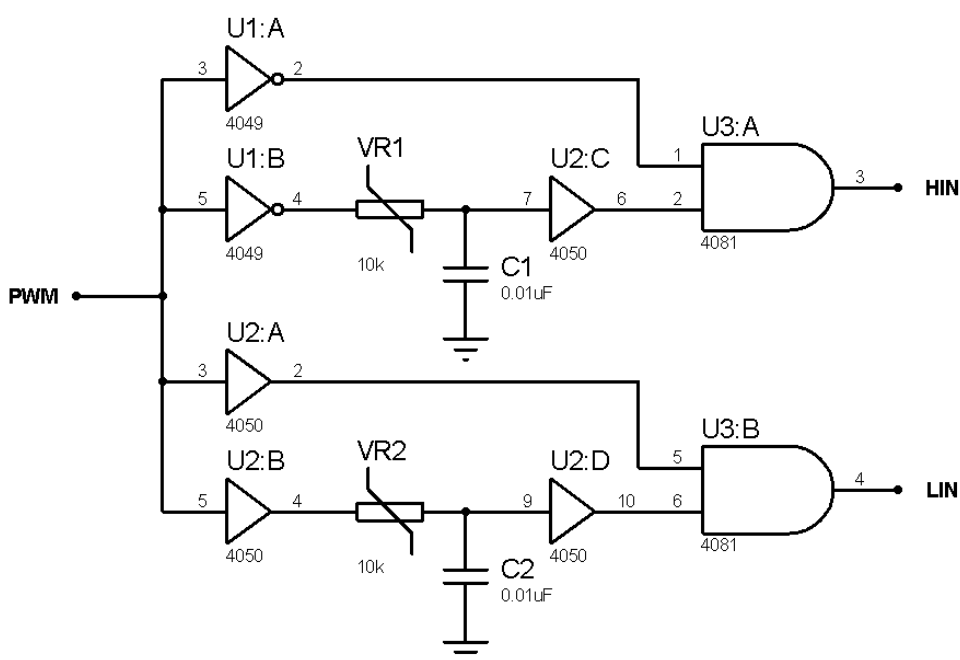


ภาพที่ 3.6 การต่อใช้งานไอซีกำเนิดสัญญาณ PWM TL494 แบบ Single-ended [15]

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T \times C_T} \quad (3.1)$$

3.3.2.2 วงจรควบคุมการเลื่อนเฟสสัญญาณ PWM (Phase-Shifter)

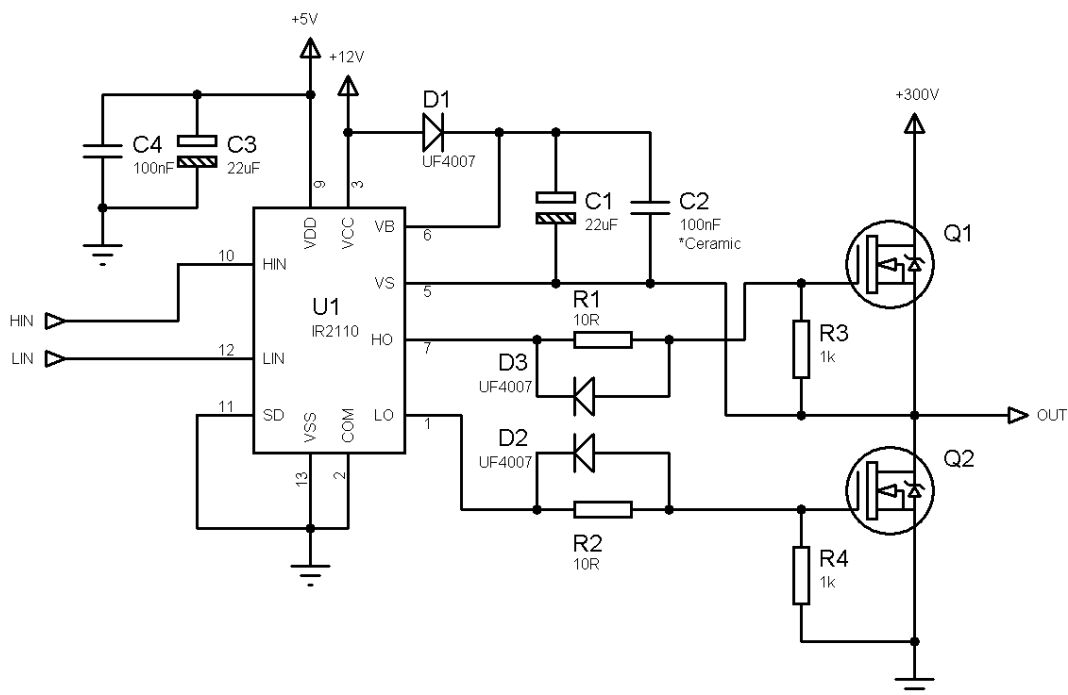
วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ PWM เป็นวงจรที่แปลงสัญญาณ PWM ให้เหมาะสมกับการขับขาเกตของ PMOSFET เพื่อขับขาเกตฝั่ง High side และ Low side ให้ทำงานเป็น Inverter และเพื่อป้องกันไม่ให้ PMOSFET ในวงจร Half-Bridge Inverter ทำงานพร้อมกัน หาก PMOSFET ทำงานพร้อมกันชั่วขณะอาจทำให้เกิดการลัดวงจรซึ่งก่อให้เกิดอันตรายได้ โดยสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้อิซีเบอร์ HEF4049, HEF4050 และ HEF4081 ซึ่งเป็นอิซี NOT gate, Buffer และ AND gate ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ตามลำดับ โดยมีหลักการการทำงานโดยแบ่งเป็นเอาต์พุตสองฝั่ง เอาต์พุตแรกที่เป็นสัญญาณขับขาเกตฝั่ง Low-side จะทำการผ่านอิซี 4050 ชนิด buffer โดยการคงรูปสัญญาณไว้แต่สามารถปรับ Pulse-width ของสัญญาณได้อีกทีเมื่อผ่านอิซี 4081 ชนิด AND gate โดยอาศัยหลักการของสัญญาณตัวเดิม AND กับ สัญญาณ PWM ที่ผ่าน Low-pass filter ซึ่งเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณขับขาเกตฝั่ง High-side มีหลักการการทำงานเหมือนกันแตกต่างกันแค่สัญญาณที่ออกมาจะมีเฟสตรงกันข้ามหรือห่างกัน 90 องศา กับสัญญาณอินพุตอันเนื่องมาจากการผ่านอิซี 4049 ที่เป็นอิซีชนิด NOT gate แทนอิซี 4050 ที่เป็น buffer



ภาพที่ 3.7 วงจรเลื่อนเฟสสัญญาณ PWM [16]

3.3.2.3 วงจรขับขาเกต PMOSFET [17]

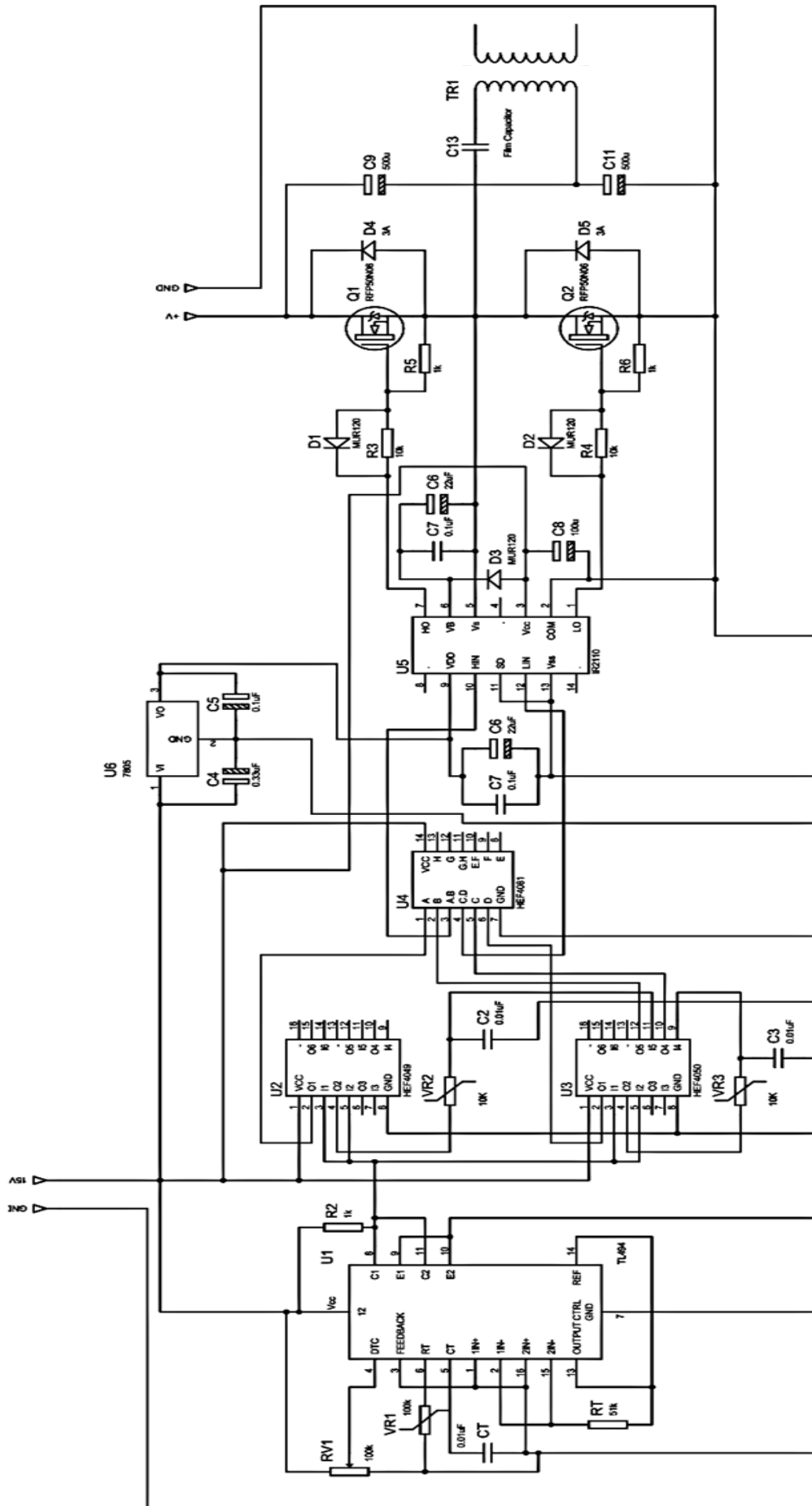
วงจรขับขาเกต PMOSFET เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ PWM ฝั่ง High-side และ Low-side เพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของ PMOSFET ในวงจร Half-Bridge Inverter โดยสามารถใช้ไอซีเบอร์ IR2110 (HIGH AND LOW SIDE DRIVER) [18] ตัวอย่างดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 วงจรขับขาเกต Power MOSFET โดยใช้ IR2110 [17]

3.3.3 วงจรชุดส่งพลังงาน

รูปการต่อวงจรรวมกันทั้งหมดของชุดส่งพลังงานแสดงดังภาพที่ 3.9



ภาพที่ 3.9 ภาพรวมวงจรชุดส่งพลังงาน

3.4 ชุดตัวรับพลังงาน

3.4.1 โมเดลรถฟอร์คลิฟท์

ทำการนำโมเดลรถฟอร์คลิฟท์ขนาด $25 \times 25 \times 20 \text{ cm}^3$ ดังแสดงในภาพที่ 3.10 ซึ่งเป็นรถวิทยุบังคับมาดัดแปลงเพื่อให้เหมาะสมกับการนำวงจรต่างๆและบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ลงตัวรถเพื่อนำมาใช้ในการควบคุมการสาธิตชุดจำลองและทดสอบระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายให้ตรงตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้



ภาพที่ 3.10 โมเดลรถฟอร์คลิฟท์

3.4.2 แบตเตอรี่ตะกั่วกรด

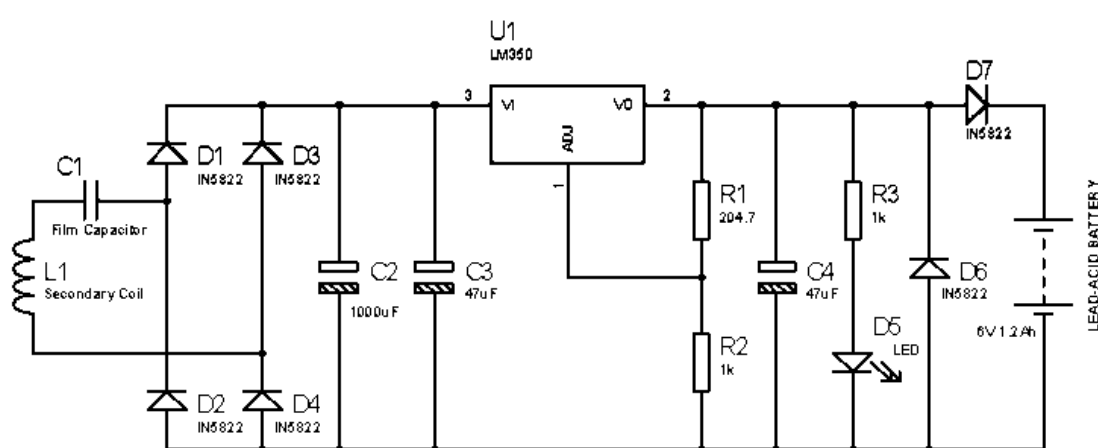
เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดขนาด $6\text{V } 1.2\text{Ah}$ [19] ดังภาพที่ 3.11 มาใช้ในการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สาย โดยคุณสมบัติของแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดนั้นเหมาะสมกับการนำมาชาร์จแล้วใช้งานไปเรื่อยๆ ซึ่งไซเคิลการใช้งานของแบตเตอรี่แต่ละอันนั้นอาจมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับผู้ผลิต สาเหตุที่นำแบตเตอรี่ชนิดนี้มาใช้งานเพราะแบตเตอรี่ชนิดนี้ทนทานต่อการชาร์จ อีกทั้งแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นชนิดเดียวกับที่ใช้งานในรถฟอร์คลิฟท์จริงด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 3.11 แบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรดขนาด 6V 1.2Ah [19]

3.4.3 วงจรชุดรับพลังงาน

วงจรชุดรับพลังงานดังแสดงในภาพที่ 3.12 นั้นประกอบไปด้วยขดลวดฟุ้งรับ
 วงจร AC-DC Bridge แบบ Full-Wave Rectifier และวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่ด้วย
 ไอซีเรกูเลตแรงดัน



ภาพที่ 3.12 วงจรชุดรับพลังงานและชาร์จแบตเตอรี่

ในการออกแบบวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่นั้น หลังจากทำการแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงด้วยวงจร Full-Wave Rectifier ทำการใช้ไอซีเบอร์ LM350 [20] ที่เป็นไอซีเรกูเลเตอร์รักษาแรงดัน ซึ่งสามารถจ่ายแรงดันได้ 1.25-30V กระแสไม่เกิน 3A เพื่อเป็นตัวรักษาแรงดันและกระแสขณะทำการชาร์จภายในวงจรมีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อลดค่าริบเบิลแรงดันของแรงดันที่รับมาก่อนเข้าวงจรชาร์จและเพื่อเพิ่มการตอบสนองในสภาวะชั่วขณะ อีกทั้งมีหลอดไฟ LED เพื่อแสดงผลถึงการทำงานของวงจร และสุดท้ายทำการต่อไดโอดเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสจากแบตเตอรี่ไหลกลับไปยังวงจรขณะทำการชาร์จ

สำหรับแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 6V ค่าแรงดันที่เหมาะสมสำหรับการชาร์จแบบอัดประจุโดยไม่ทำให้แบตเตอรี่เสื่อมนั้น ควรมีค่าไม่เกิน 7.35V หรือ 2.45V/cell และเพื่อให้ไอซี LM350 ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพแรงดันอินพุตควรมากกว่าแรงดันเอาต์พุตที่ต้องการประมาณ 3V จากสมการที่ (3.2) ซึ่งเป็นสมการการคำนวณหาแรงดันเอาต์พุตของไอซี LM350 สามารถสรุปได้ว่าค่า R1 และ R2 เป็นตัวที่มีผลต่อแรงดัน และพบว่าค่า R1 ที่เหมาะสมในการนำมาชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 6V นั้นเท่ากับ 204.7 Ohm และ ค่า R2 ที่เหมาะสมนั้นเท่ากับ 1000 Ohm

$$V_{out} = 1.25 \times (R2/R1 + 1) \quad (3.2)$$

$$V_{out} = 1.25 \times (1000/204.7 + 1) = 7.36 V$$

3.4.4 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

STM32F4 DISCOVERY [21] ดังแสดงในภาพที่ 3.13 เป็นชุดพัฒนา MICROCONTROLLER ขนาด 32 BIT ของบริษัท ST ในตระกูลใหม่ STM32 ARM CORTEX-M4F โดยในบอร์ดจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ชุด ST-LINK/V2 ใช้ในการ DOWNLOAD และ DEBUG ไปยัง MCU STM32F407VGT6 ที่อยู่ในบอร์ดผ่านทาง PORT USB



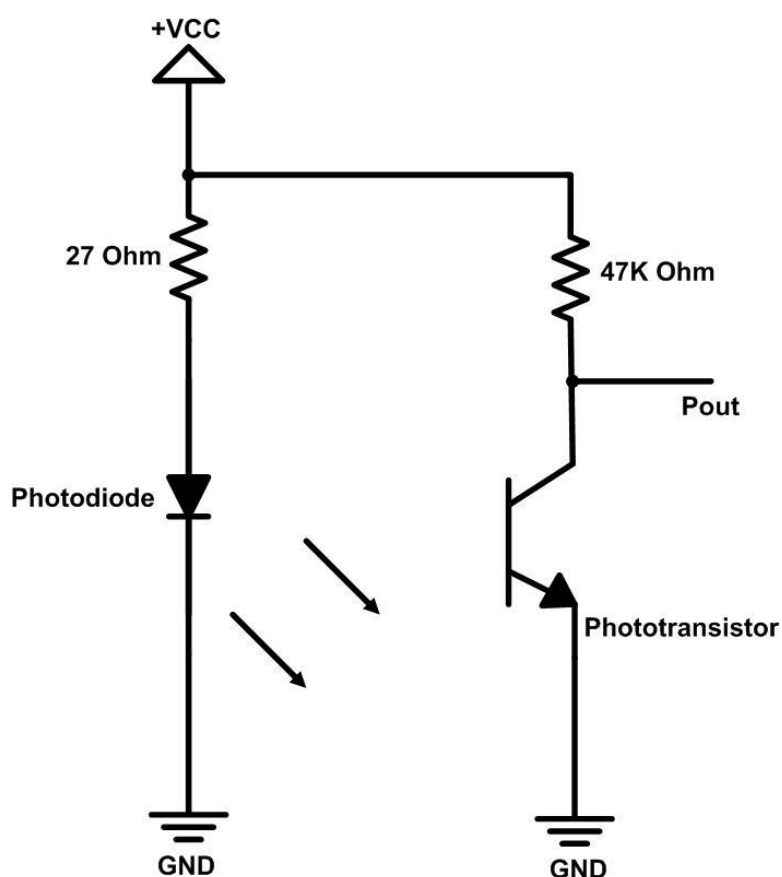
ภาพที่ 3.13 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 [21]

ในบอร์ดจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

1. ส่วน ST-LINK/V2 ใช้ MCU เบอร์ STM32F103 มาเป็นตัวเชื่อมการทำงานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ PC ผ่านทาง USB PORT (สายต่อ CABLE USB TYPE A TO B MINI-B ไม่มีให้ในชุด ต้องแยกซื้อถ้ายังไม่มี) สามารถทำการ IN-CIRCUIT DEBUG และ PROGRAM กับตัว MCU STM32F4 ที่อยู่บนบอร์ดได้ ขั้วต่อ 6 PIN SWD ต่อออกใช้งาน DEBUG และ PRGRAM ได้นอกบอร์ด
2. ส่วนบอร์ดใช้งาน STM32F4 ใช้ MCU เบอร์ STM32F407VGT6, 32 BIT ARM CORTEX-M4F 1MB FLASH, 192KB RAM, LQFP100 TYPE ตัวบอร์ดสามารถใช้ไฟ +5V จากขั้วต่อ USB หรือจาก POWER 5V ภายนอกได้ในการใช้งาน มีส่วน 3-AXIS ACCELEROMETER เบอร์ LIS302DL อยู่บนบอร์ด มีส่วน DIGITAL MICROPHONE เบอร์ MP45DT02 อยู่บนบอร์ด USB OTG FS พร้อมขั้วต่อ MICRO-AB ตัวบอร์ดทำเป็นขั้วต่อแบบ PIN HEADER ได้ PCB 25 x 2 จำนวน 2 ชุด

3.4.5 วงจรเซ็นเซอร์ชนิดอินฟราเรด

ในการออกแบบวงจรเซ็นเซอร์ เลือกใช้เซ็นเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared Sensor) ดังภาพที่ 3.14 เนื่องจากอินฟราเรดเป็นแสงที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าและตรวจจับเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นที่อยู่ในช่วงเดียวกันเท่านั้น ทำให้ปัญหาการรบกวนของสัญญาณแสงอื่นๆมีน้อย อีกทั้งการออกแบบวงจรที่ใช้เซ็นเซอร์ชนิดอินฟราเรด (Infrared Sensor) ไม่มีความซับซ้อนมากนัก จึงเป็นที่นิยมที่จะนำมาใช้ในการสื่อสาร โดยการใช้งานเซ็นเซอร์อินฟราเรด (Infrared Sensor) จะต้องมีฝั่งส่งและฝั่งรับ ซึ่งทั้ง2ฝั่งจะต้องมีความถี่เท่ากัน เพราะหากความถี่ไม่เท่ากันจะทำให้การตรวจจับสัญญาณได้ไม่ตรง



ภาพที่ 3.14 วงจรเซ็นเซอร์ชนิดอินฟราเรด

ซึ่งภายในวงจรมอเตอร์นั้น ฝั่งส่งจะใช้ IR LED เป็นตัวขับแสงอินฟราเรด และฝั่งรับจะใช้ โฟโตไดโอด (Photodiode) หรือ โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor) โดย IR LED จะทำงานที่แรงดัน 1.25-1.5V, 60mA ในการออกแบบค่าตัวต้านทานภายในวงจร จากสมการที่ (3.3) และ โฟโตไดโอด (Photodiode) จะทำงานที่แรงดัน 0.4V, 10mA ในการออกแบบค่าตัวต้านทานภายในวงจร จากสมการที่ (3.4)

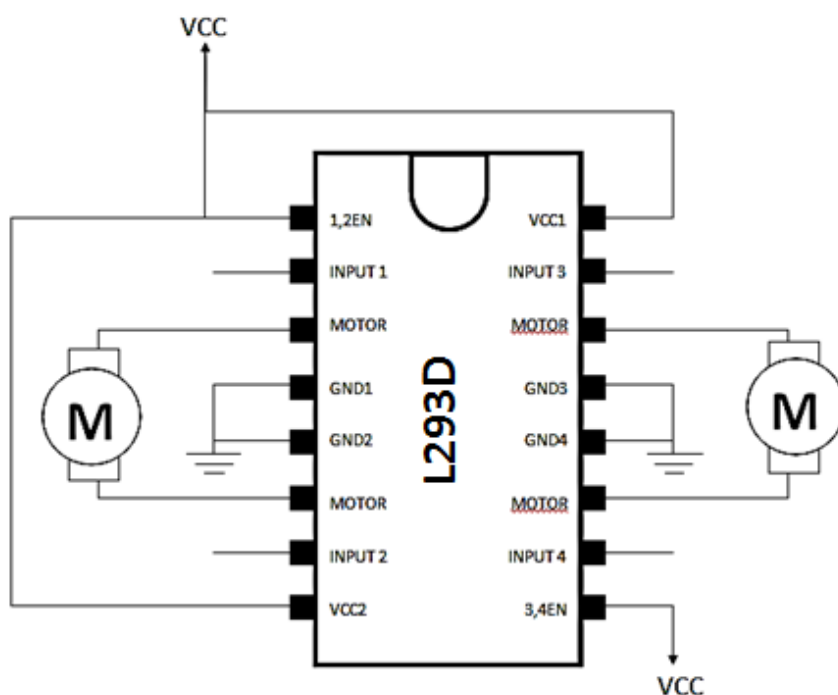
$$R = \frac{V_{CC} - V_{IR LED}}{I_{IR LED}} \quad (3.3)$$

$$R = \frac{V_{Photodiode}}{I_{Photodiode}} \quad (3.4)$$

3.4.6 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง

ในการออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ (Drive Motor) นั้น ทำการเลือกใช้อิซีเบอร์ L293D [21] ดังแสดงในภาพที่ 3.15 ซึ่งเป็นไอซีที่มีคุณสมบัติขับมอเตอร์ DC ได้ 2 ตัวพร้อมกัน (เหมาะสำหรับขับล้อซ้ายและล้อขวา) ซึ่งรองรับแรงดันไฟจ่ายมอเตอร์ 4.5 – 36V โดยทำการจ่ายแรงดันเข้าที่ขา 9 ของไอซี และจ่ายกระแสได้สูงถึง 1.2A สำหรับการต่อมอเตอร์ตัวเดียวและ 600mA สำหรับการต่อมอเตอร์ 2 ตัว

โดยภายในวงจรที่ออกแบบนั้น INPUT 1 ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ฝั่งซ้าย, INPUT 2 ใช้ต่อเข้ากับบอร์ด Microcontroller (STM32F4) เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนและความเร็วของมอเตอร์ฝั่งซ้าย, INPUT 3 ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ฝั่งขวา, INPUT 4 ใช้ต่อเข้ากับบอร์ด Microcontroller (STM32F4) เพื่อควบคุมทิศทางการหมุนและความเร็วของมอเตอร์ฝั่งขวา เพื่อที่จะให้วิ่งตามเงื่อนไขที่จะใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 3.15 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ไอซีเบอร์ L293D [21]

3.5 การออกแบบขดลวดและการพันขดลวด

การออกแบบขดลวดที่นำมาใช้งานกับระบบการชาร์จไร้สายนั้น จำเป็นต้องออกแบบขดลวดเป็นแกนอากาศ เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเดินทางในอากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจำนวนรอบ ความยาวและขนาดของขดลวดมีผลต่อค่าความเหนี่ยวนำดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.6 ทั้งสิ้น ในการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดนั้น สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

- การคำนวณจากสมการ
- การวัดด้วยเครื่องวัด LCR Meter

3.5.1 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำจากสมการ

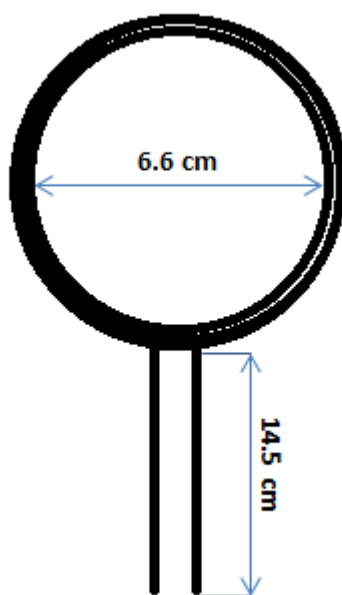
หากเลือกใช้ขดลวดชนิด AWG เบอร์ 21 ดังแสดงในภาพที่ 3.16 เป็นขดลวดตันแบบ ซึ่งสามารถรองรับกระแสได้สูงสุด 1.2 A ความยาวหน้าตัด 0.0285 นิ้ว ค่าความต้านทาน 41.984 Ω/km และมีความถี่การใช้งานสูงสุดที่ 33 kHz ทำการพันขดลวดจำนวน

รอบ 20 รอบ 2 ชุด โดยสามารถหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดได้จากสมการที่ (2.8)

$$L(\mu H) = \frac{d^2 n^2}{18d + 40l} \quad (2.8)$$

$$L(\mu H) = \frac{(0.0285)^2 (20)^2}{18(0.0285) + 40l}$$

การประมาณความยาวของขดลวดที่พันแล้วดังภาพที่ 3.16 โดย $x = 14.5 \text{ cm}$, $d = 6.6 \text{ cm}$ และจำนวนรอบการพัน 20 รอบ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (3.5) ดังต่อไปนี้



ภาพที่ 3.16 ขดลวดทองแดงแกนอากาศ

$$l = \pi dN + 2x \quad (3.5)$$

$$l = \pi(6.6)(20) + 2(14.5)$$

$$l = 443.69 \text{ cm} = 4.4369 \times 10^{-3} \text{ km} \approx 174.68 \text{ in}$$

แทนค่า l เข้าในสมการที่ (2.8)

$$L(\mu H) = \frac{(0.0285 \text{ in})^2 (20)^2}{18(0.0285 \text{ in}) + 40(174.68 \text{ in})}$$

$$L(\mu H) = 46.4956 \mu H$$

หาค่าความต้านทานของขดลวดได้จากสมการที่ (3.6) ($R_l = 41.984 \Omega/km$)

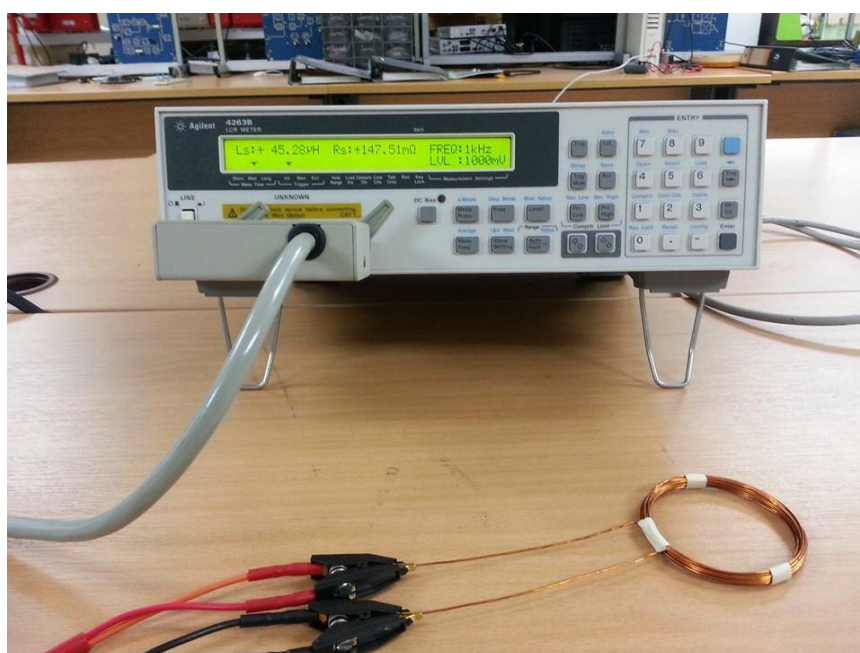
$$R_{cu} = R_l \times l \quad (3.6)$$

$$R_{cu} = 41.984 \Omega/km \times 4.4369 \times 10^{-3} km$$

$$R_{cu} = 186.28 m \Omega$$

3.5.2 การวัดค่าความเหนี่ยวนำด้วยเครื่องวัด LCR Meter

อีกหนึ่งวิธีที่สามารถหาค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศได้คือการวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ด้วย LCR Meter รุ่น 4263B ยี่ห้อ Agilent ดังแสดงในภาพที่ 3.17 ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดตามตารางที่ 3.1



ภาพที่ 3.17 การวัดค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ด้วย 4263B LCR Meter (Agilent)

ตารางที่ 3.2 ค่าความเหนี่ยวนำและค่าความต้านทานของขดลวดแกนอากาศ

Frequency	L_s	R_s
100 Hz	45.7 μ H	146.49 m Ω
1 kHz	45.6 μ H	146.65 m Ω
10 kHz	45.538 μ H	169.35 m Ω
100 kHz	44.026 μ H	847.44 m Ω

จากตารางที่ 3.2 จะเห็นว่าเครื่องวัด LCR Meter นั้นสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่นความถี่และแรงดันได้ เพื่อดูการตอบสนองของขดลวด ณ ความถี่ที่แตกต่างกัน

3.6 การออกแบบวงจร LC Resonance

ในการส่งพลังงานไร้สายแบบ Resonant Coupling จำเป็นต้องมีการออกแบบค่า L, C และความถี่ที่เหมาะสมในการสร้างสถานะเรโซแนนซ์ ซึ่งในสถานะนี้ค่า X_L (Inductive Reactance) และค่า X_C (Capacitive Reactance) นั้นจะมีค่าเท่ากัน ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ในวงจรเหลือแค่ค่าความต้านทานของขดลวดตามสมการกฎของโอห์มที่ว่าไปดังแสดงในสมการที่ (3.7)

$$V = IZ \quad (3.7)$$

$$V = IR + I \cdot j(X_L - X_C); X_L \approx X_C$$

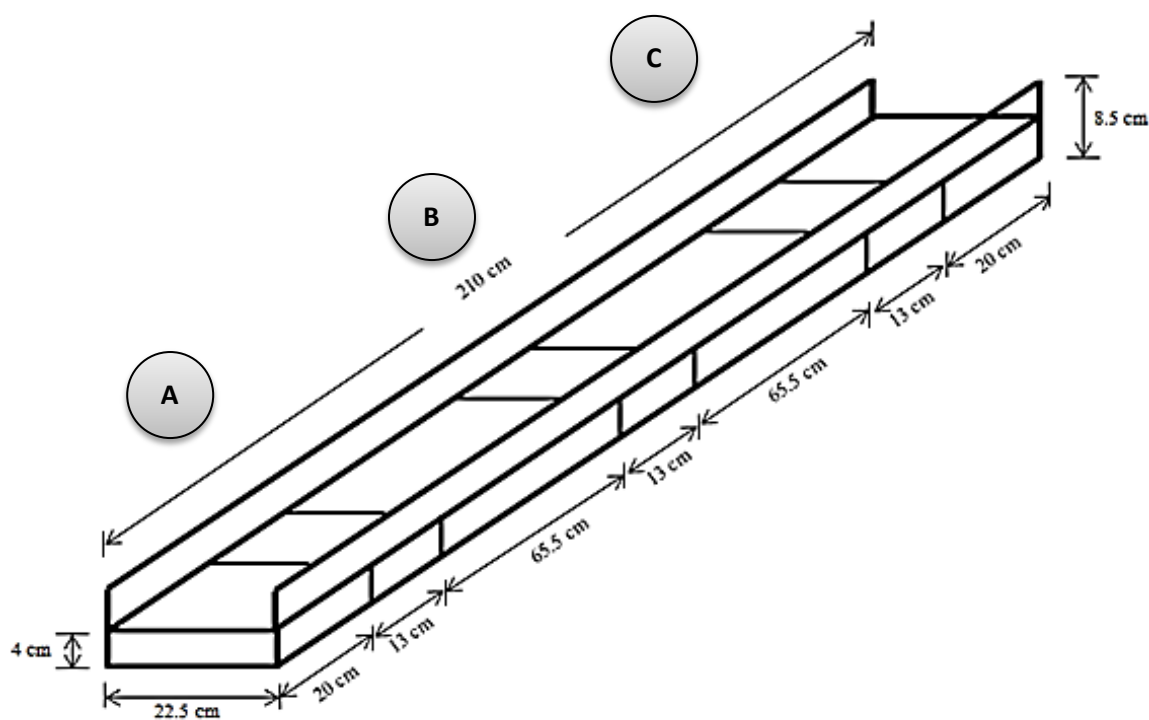
$$V = IR$$

ในกรณีนี้ควรพิจารณาความถี่เรโซแนนซ์ตามความเหมาะสมของความถี่ที่ใช้งานของขดลวดแต่ละเบอร์ซึ่งดูได้จากภาคผนวก ก และคำนวณหาค่า C หรือความถี่เรโซแนนซ์ได้ตามสมการที่ (3.8)

$$f_{resonant} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.8)$$

3.7 การออกแบบรางที่ใช้ในการจำลองระบบชาร์จ

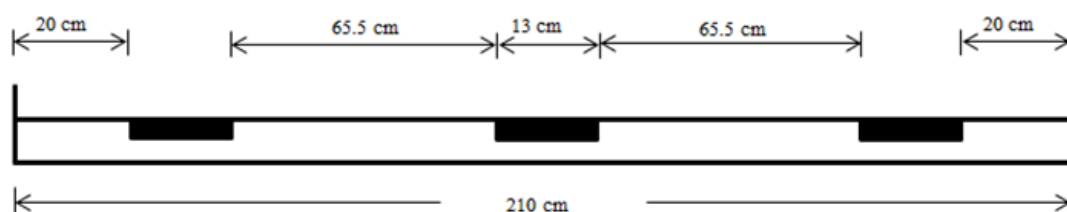
ทำการออกแบบรางที่ใช้ในการจำลองการวิ่งของโมเดลรถฟอร์คลิฟท์ในระบบชาร์จแบตเตอรี่ไร้สาย โดยรางที่ใช้ในการทดสอบนั้น มีขนาด 22.5 cm x 210 cm ดังแสดงในภาพที่ 3.18 ใช้วัสดุในการประกอบเป็นอะคริลิกทั้งหมด เพื่อความทนทานและมีน้ำหนักที่เบา ง่ายต่อการเคลื่อนย้าย และสาเหตุสำคัญคือเพื่อไม่ให้มีผลต่อสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสนามแม่เหล็กเหนี่ยวนำขณะทำการทดสอบการชาร์จ



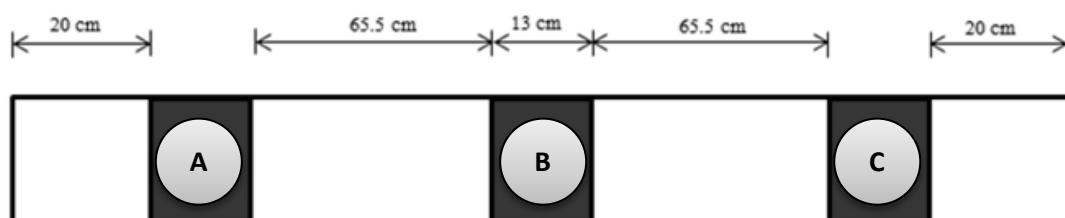
ภาพที่ 3.18 รางอะคริลิกขนาด 22.5 cm x 210 cm

โดยการติดตั้งชุดชาร์จจะติดตั้งทั้งหมด 3 จุด ซึ่งกำหนดให้เป็น จุด A, B และ C ตามลำดับ และจะทำการติดตั้งวงจรฝั่งรับไว้ที่พื้นดังแสดงในภาพที่ 3.19 และ 3.20 ให้รถฟอร์คลิฟท์เพื่อจำลองการทำงานในหลายๆลักษณะที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์จริงได้ โดยจะเริ่มจากให้รถฟอร์คลิฟท์เคลื่อนที่ออกจากจุด A ซึ่งเปรียบเสมือนลานจอดรถที่มีชุดชาร์จติดตั้งอยู่เมื่อไม่มีการใช้งาน ในระหว่างทางนั้นก็จะมีการใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ไปเรื่อยๆจากนั้นให้

รถเคลื่อนที่ต่อไปเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดชาร์จุด B ให้รถเคลื่อนที่ช้าลง ลักษณะการชาร์จุดในจุด B เปรียบเสมือนรถต้องชะลอความเร็วภายในคลังสินค้า จากนั้นให้รถเคลื่อนที่ต่อไปเรื่อยๆจนถึงจุด C เมื่อรถเคลื่อนที่ไปถึงจุดที่ C ก็จะให้รถหยุดเป็นระยะเวลาหนึ่งเพื่อทำการชาร์จแบตเตอรี่ สำหรับลักษณะการชาร์จุดในจุด C นั้นจะเปรียบเสมือนกับรถหยุดเพื่อเคลื่อนย้ายสินค้าภายในคลังสินค้า หรือจอดในอาคารเก็บรถ ให้รถหยุดเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงวิ่งกลับมาจากจุด C มายังจุด A เสมือนการที่รถวิ่งกลับจอด ณ จุดเก็บรถ หรือจุดพักชาร์จแบตเตอรี่ โดยจะทำการติดสติ๊กเกอร์จำลองการเคลื่อนที่ดังแสดงในภาพที่ 3.21 และใช้เซ็นเซอร์อินฟราเรดวัดค่าและส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลให้รถฟอร์คลิฟที่วิ่งตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้



ภาพที่ 3.19 การติดตั้งชุดชาร์จบนรางอะคริลิก (มุมด้านข้าง)



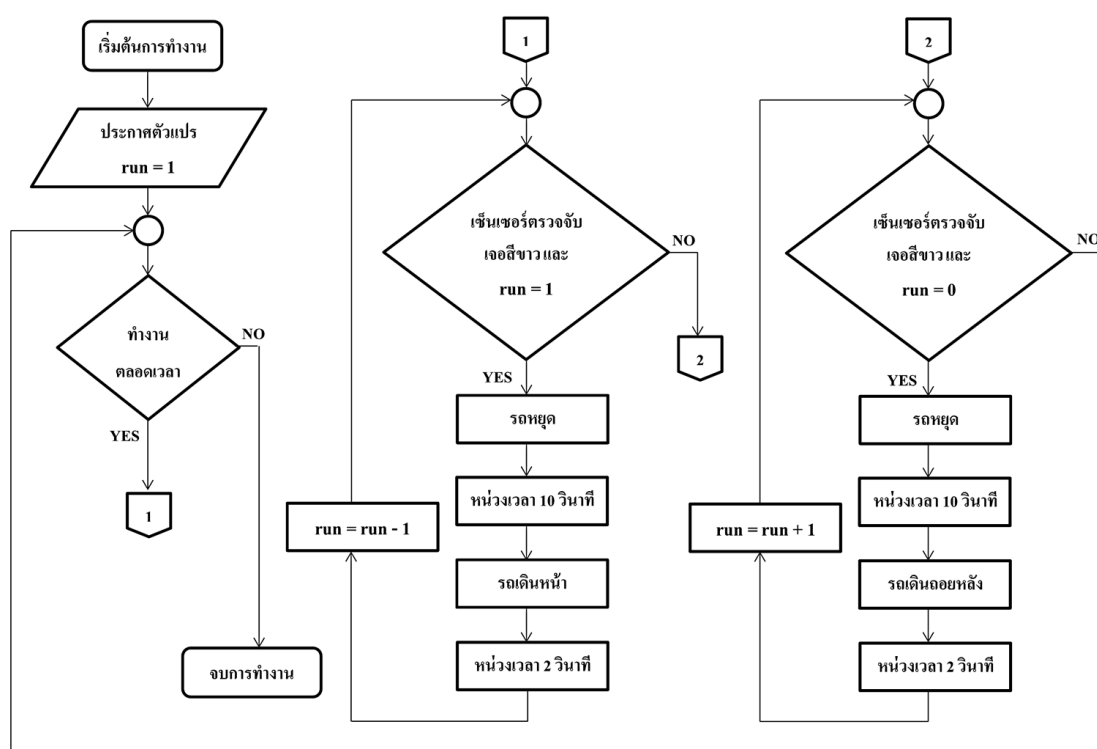
ภาพที่ 3.20 การติดตั้งชุดชาร์จบนรางอะคริลิก (มุมด้านบน)



ภาพที่ 3.21 การติดสติ๊กเกอร์สีบนรางอะคริลิก (มุมด้านบน)

3.8 การออกแบบและควบคุมการวิ่งของรถฟอร์คลิฟท์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

Flow Chart อธิบายถึงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในภาพที่ 3.22 ซึ่งสามารถหา code การทำงานด้วยภาษาซีได้ที่ภาคผนวก ข



ภาพที่ 3.22 โฟลว์ชาร์ตควบคุมการวิ่งของโมเดลรถฟอร์คลิฟท์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองขั้นที่ 1: การทดสอบการส่งพลังงานแบบไร้สายจากโมดูล

การทดสอบการส่งพลังงานแบบไร้สายบนอุปกรณ์ที่ออกแบบได้ทำการทดสอบโดยละเอียดเป็นจำนวนหลายรูปแบบ ตารางผลการทดสอบแสดงโดยละเอียดในภาคผนวก ก

ในส่วนของประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงาน ($\% \eta$) สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ (4.1)

$$\% \eta = \frac{Power_{out}}{Power_{in}} \quad (4.1)$$

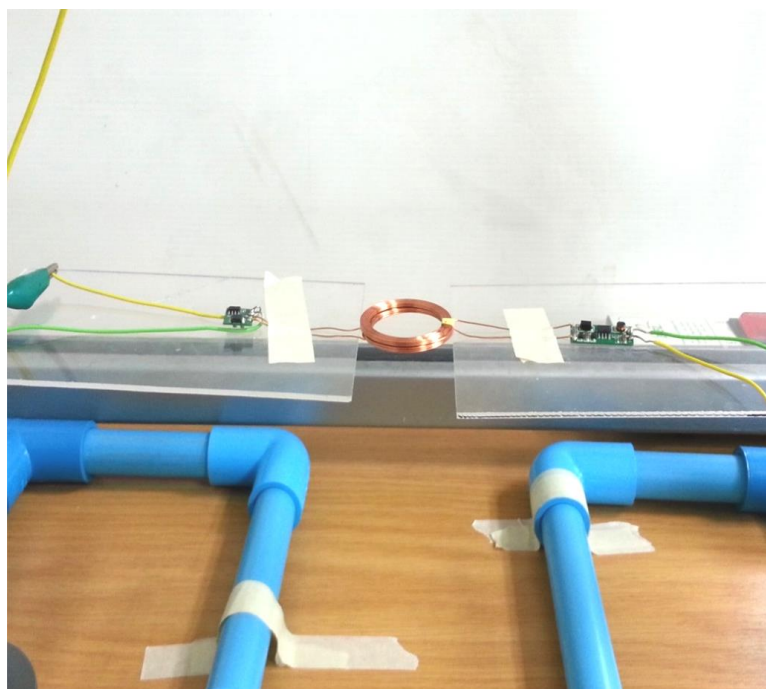
4.1.1 การทดลองที่ 1 ทำการวัดโดยแนวขดลวดตรงกัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด 40 mm
- แรงดันพิกัด Input (rated) 12V
- แรงดันพิกัด Output (rated) 5V, กระแสพิกัด Output (rated) 600 mA
- โหลดความต้านทาน 8.3 Ohm , 10 W (คำนวณจากค่าแรงดันและกระแสพิกัดด้านเอาต์พุต)
- จำนวนรอบของขดลวด 20 รอบ
- ขนาดของเส้นลวด 25 AWG



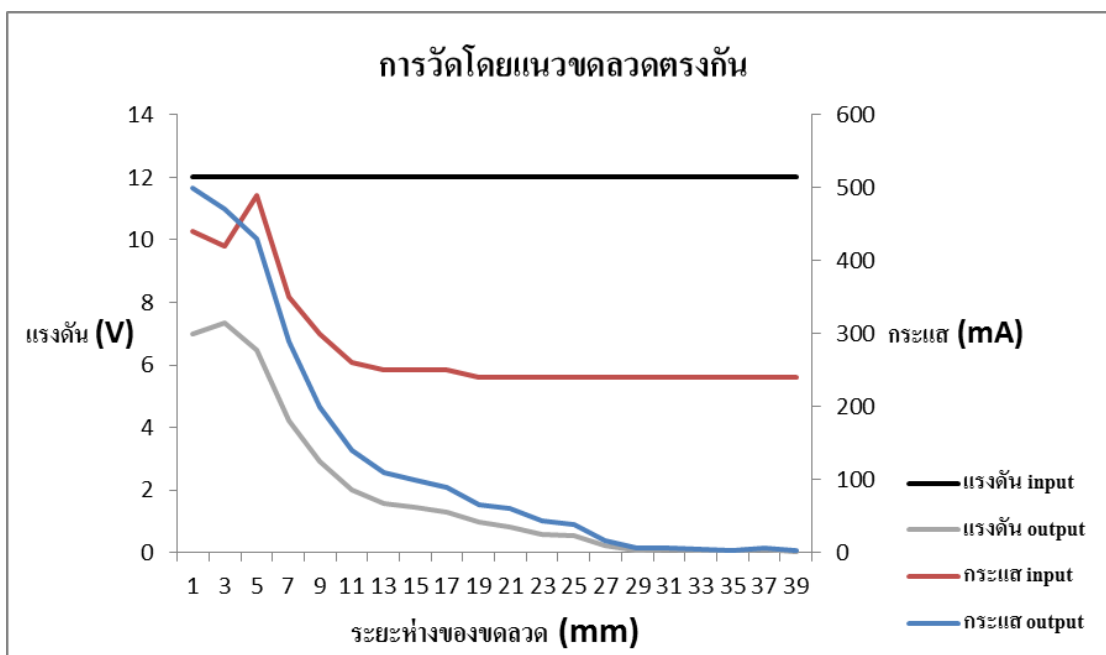
ภาพที่ 4.1 การทดลองที่ 1 วัดค่าแรงดันและกระแส



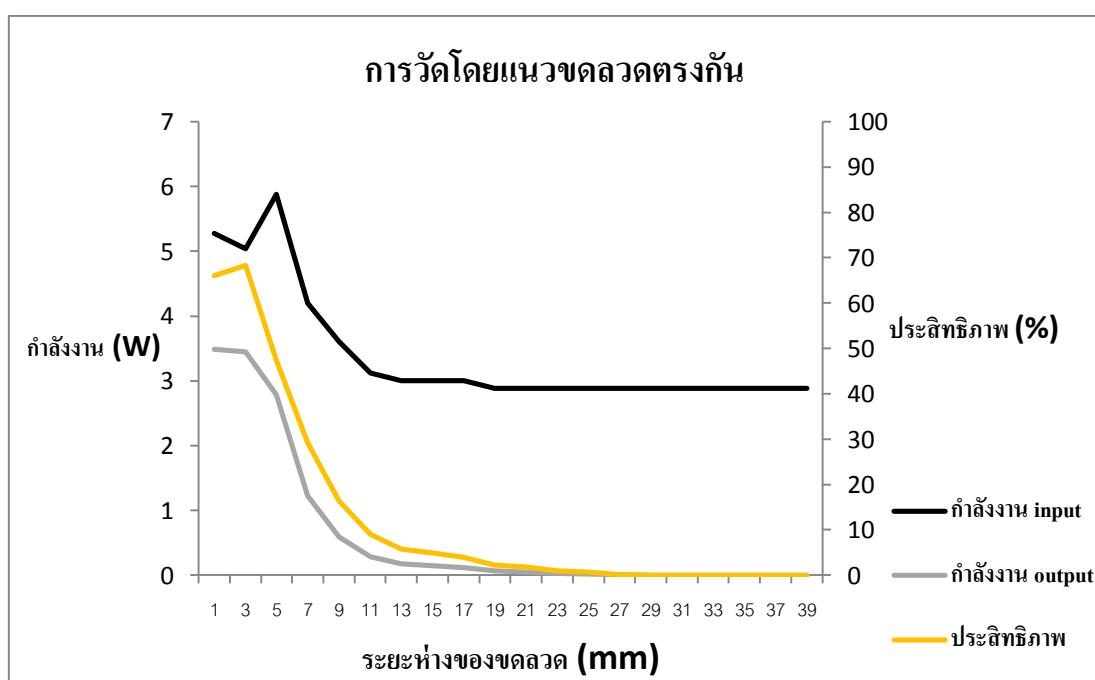
ภาพที่ 4.2 การทดลองที่ 1 โดยแนวขดลวดตรงกัน ระยะห่าง 1 mm

4.1.1.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวขดลวดตรงกัน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.3 ถึง 4.4



ภาพที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

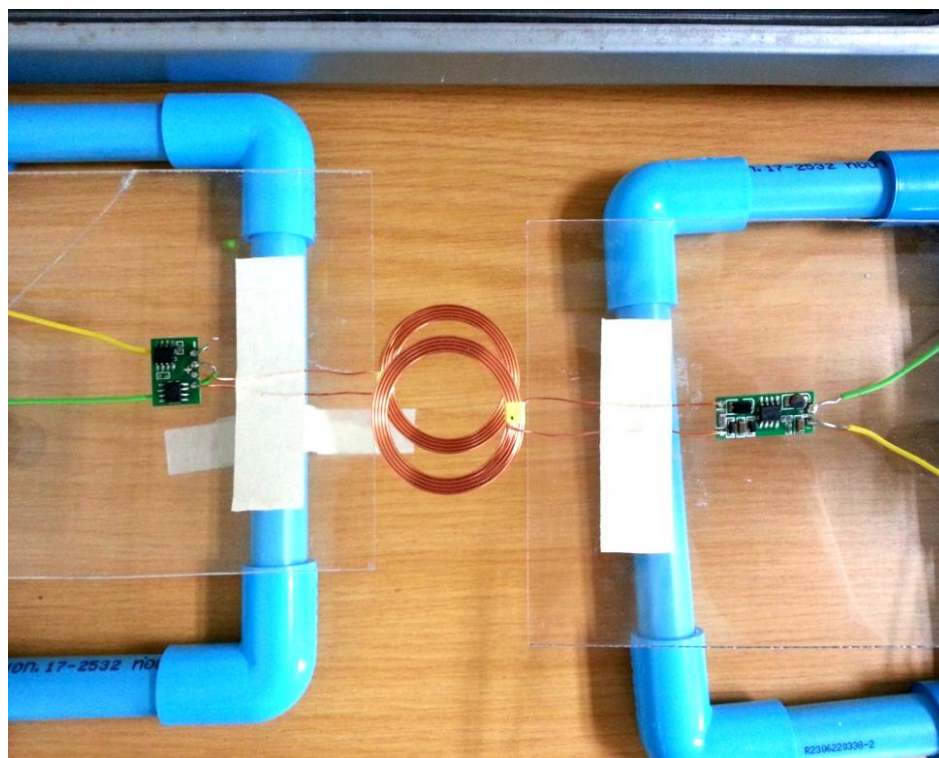


ภาพที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2 การทดลองที่ 2 ทำการวัดโดยแนวหลอดเชื่อมกัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด 40 mm
- แรงดันพิกัด Input (rated) 12V
- แรงดันพิกัด Output (rated) 5V, กระแสพิกัด Output (rated) 600 mA
- โหลดความต้านทาน 8.3 Ohm , 10 W (คำนวณจากค่าแรงดันและกระแสพิกัด.
- ด้านเอาต์พุต)
- จำนวนรอบของขดลวด 20 รอบ
- ขนาดของเส้นลวด 25 AWG

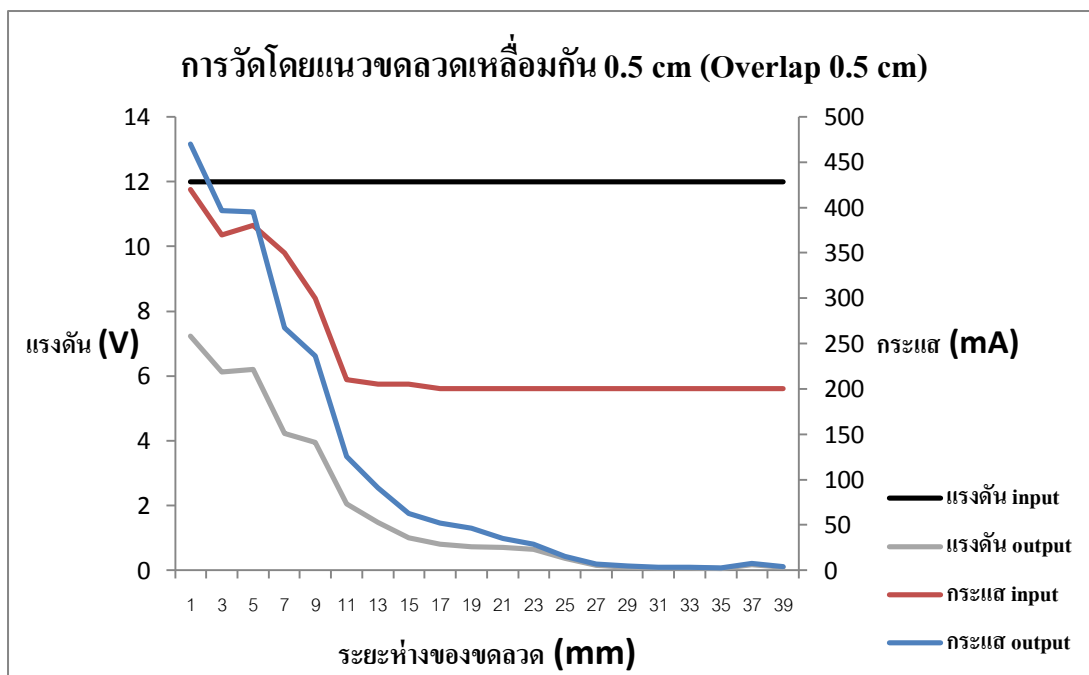


ภาพที่ 4.5 การทดลองที่ 2 โดยแนวหลอดเชื่อมกัน

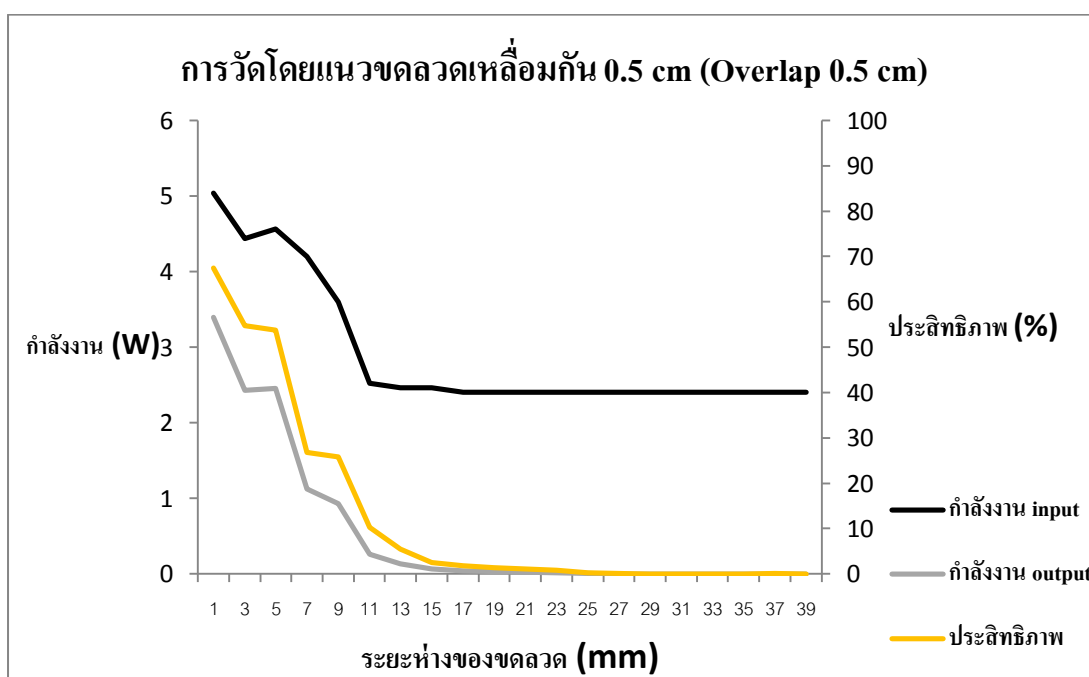
4.1.2.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.6 ถึง 4.19

4.1.2.1.1 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 0.5 cm (Overlap 0.5 cm)

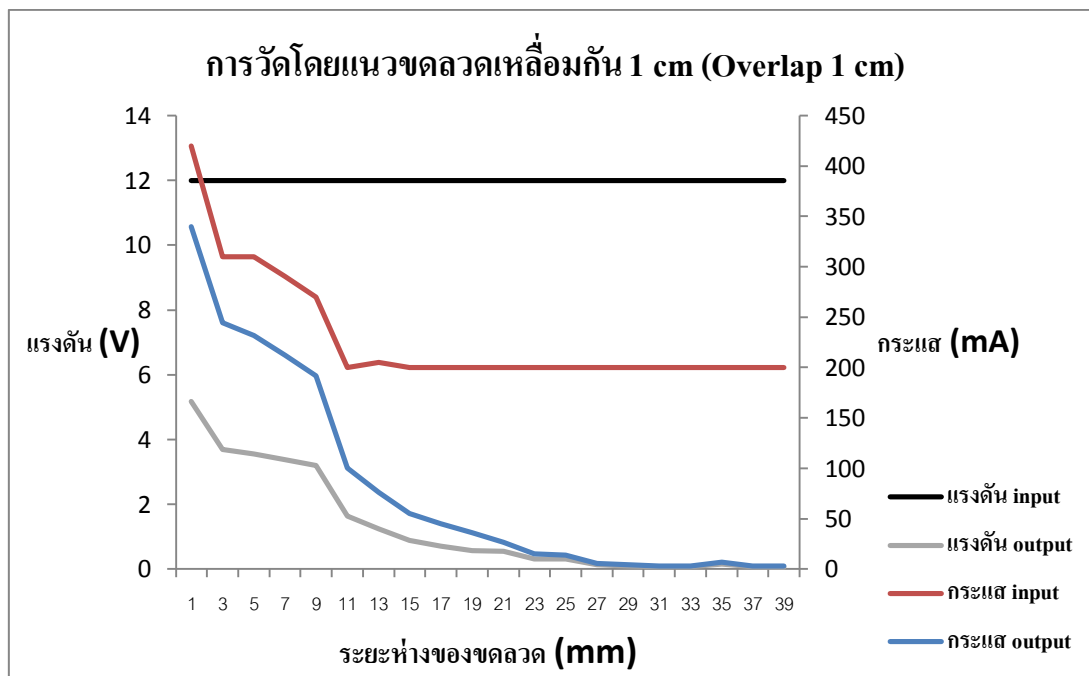


ภาพที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

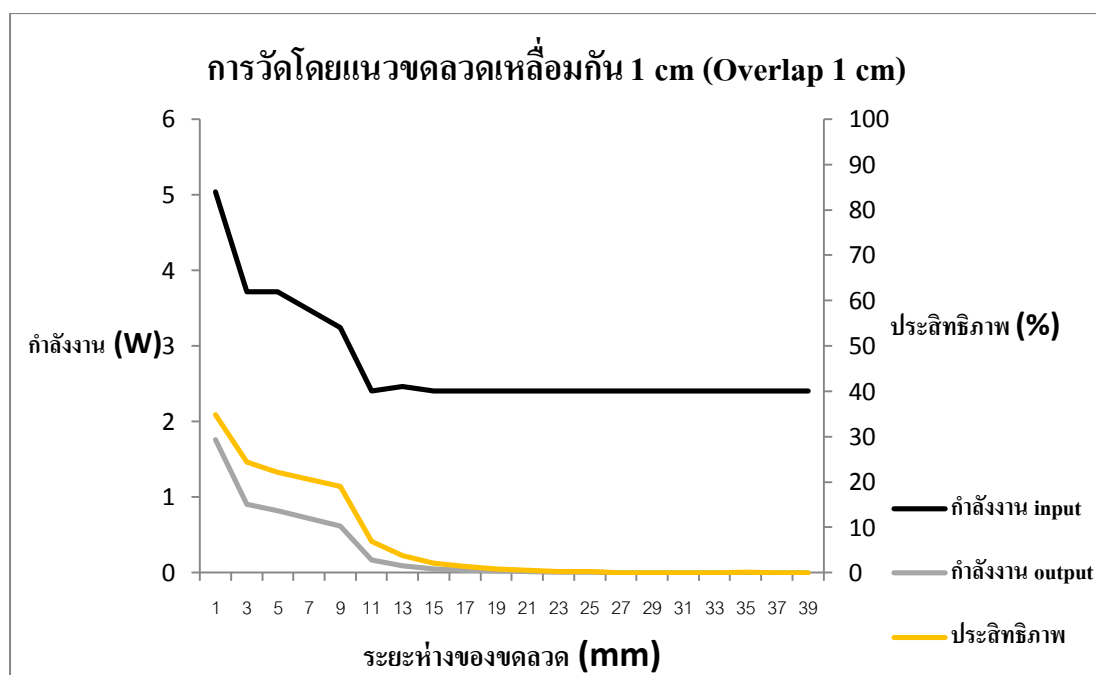


ภาพที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2.1.2 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 1 cm (Overlap 1 c.m)

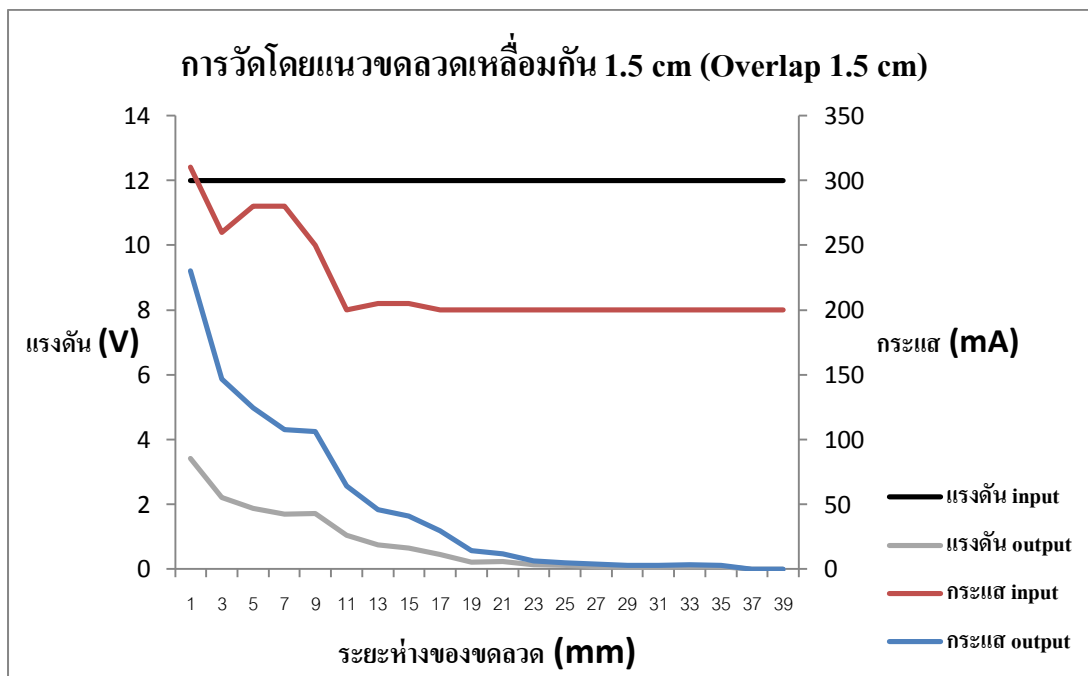


ภาพที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

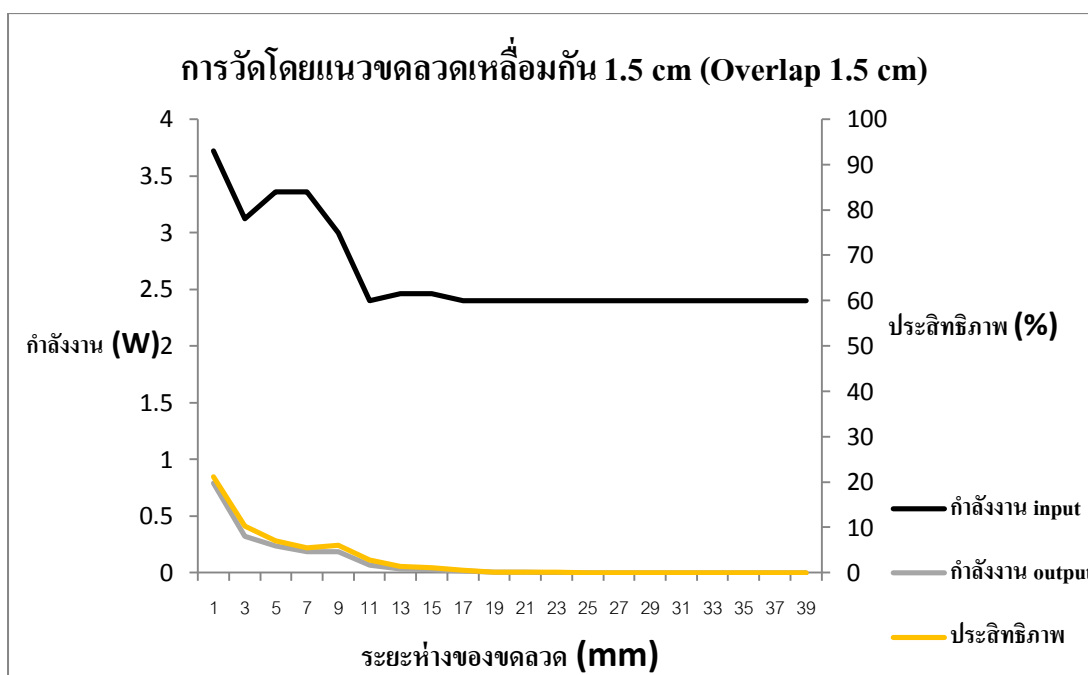


ภาพที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2.1.3 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 1.5 cm (Overlap 1.5 cm)

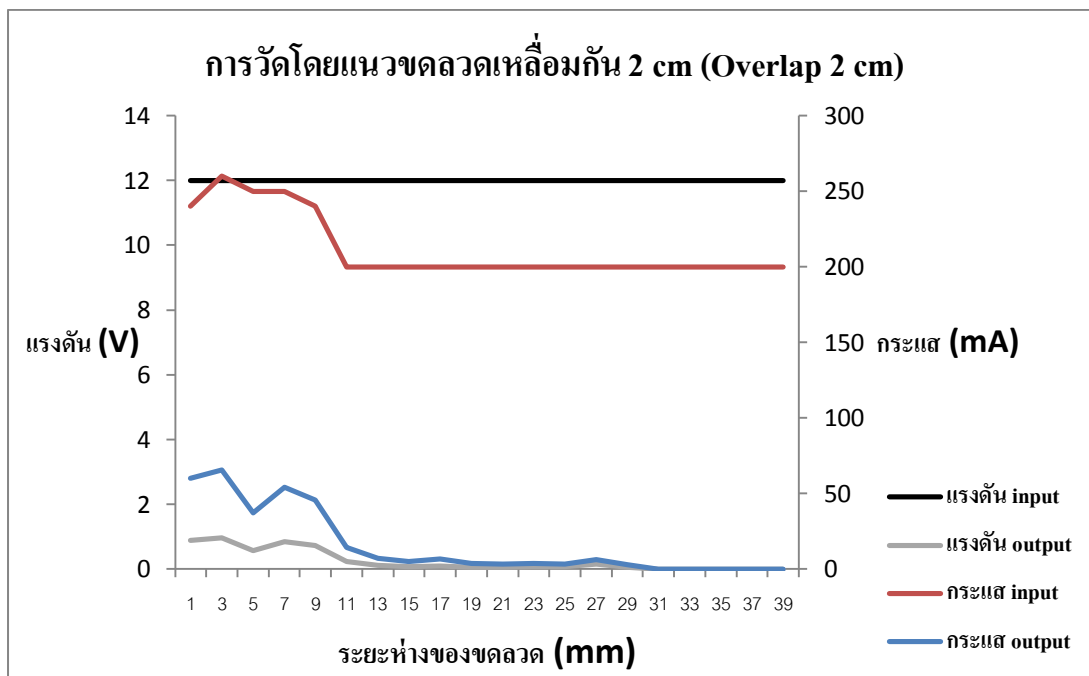


ภาพที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

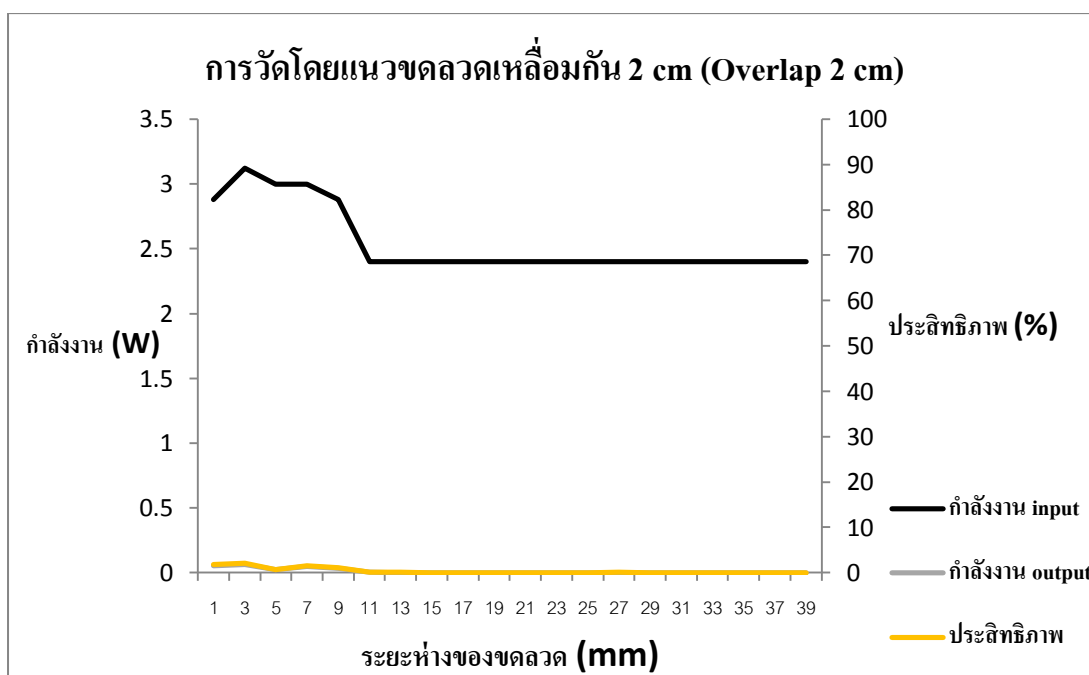


ภาพที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2.1.4 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 2 cm (Overlap 2 cm)

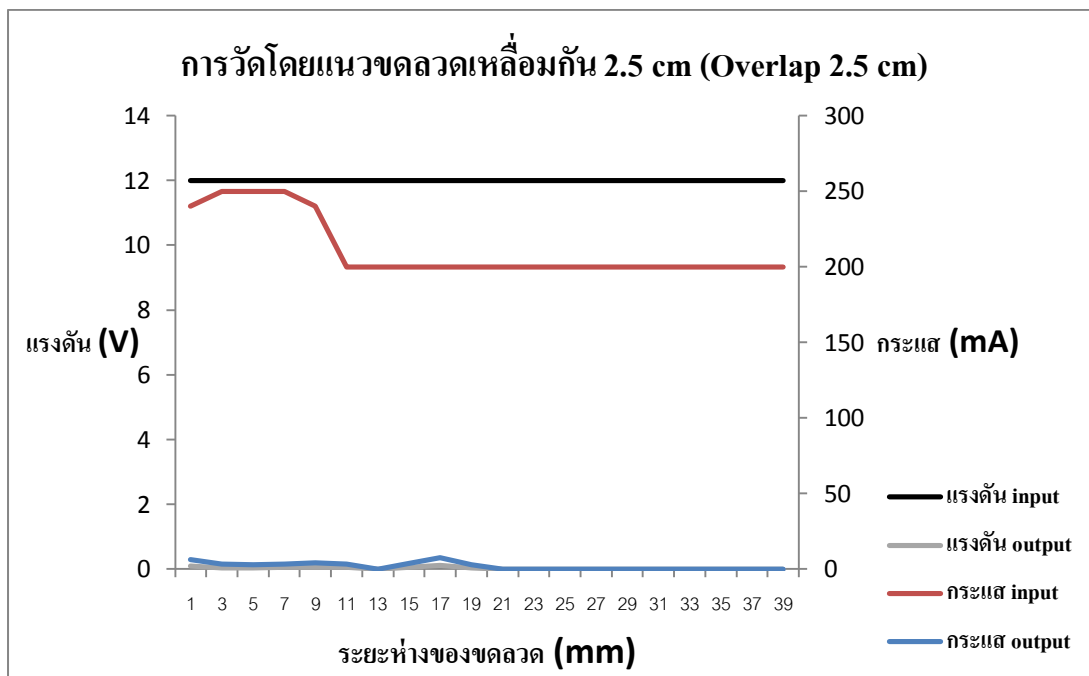


ภาพที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

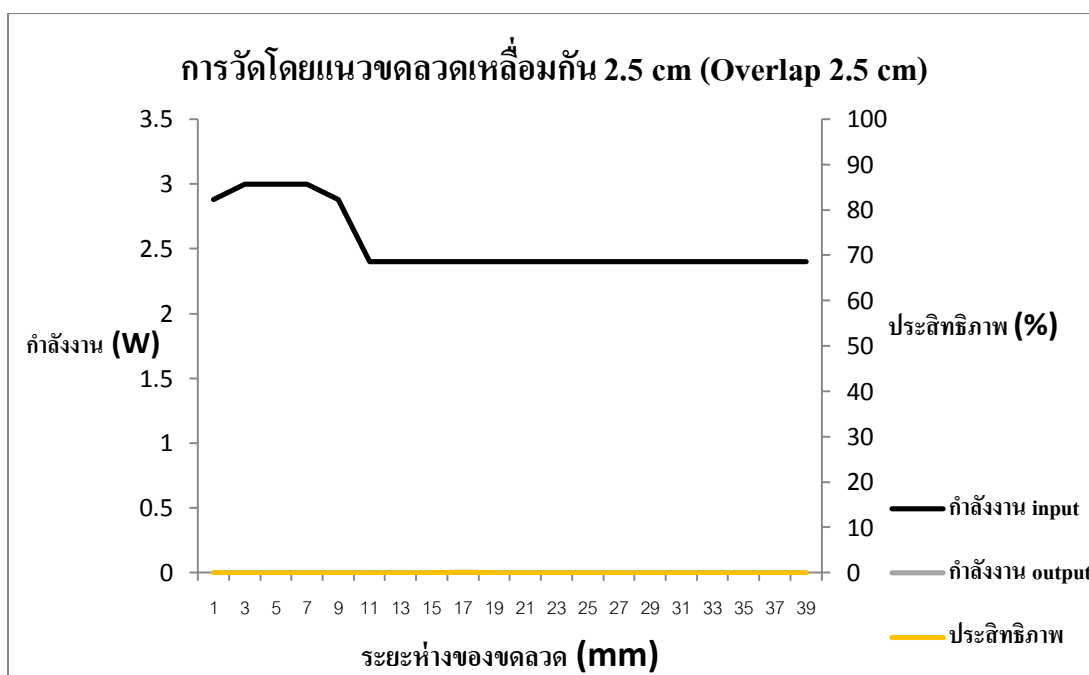


ภาพที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2.1.5 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 2.5 cm (Overlap 2.5 cm)

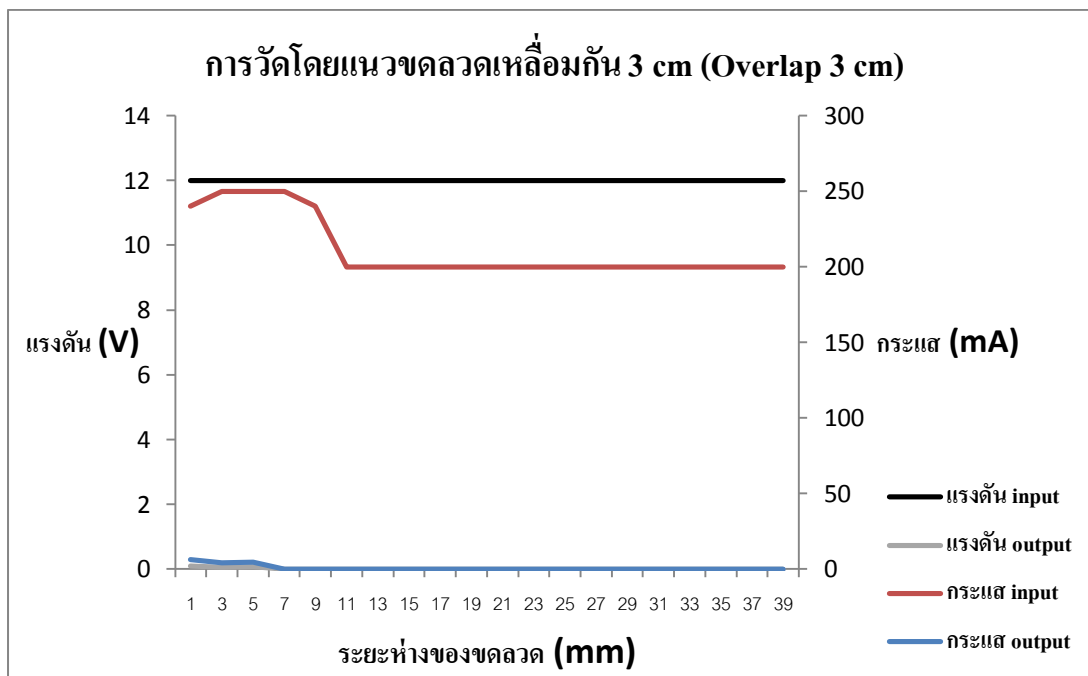


ภาพที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

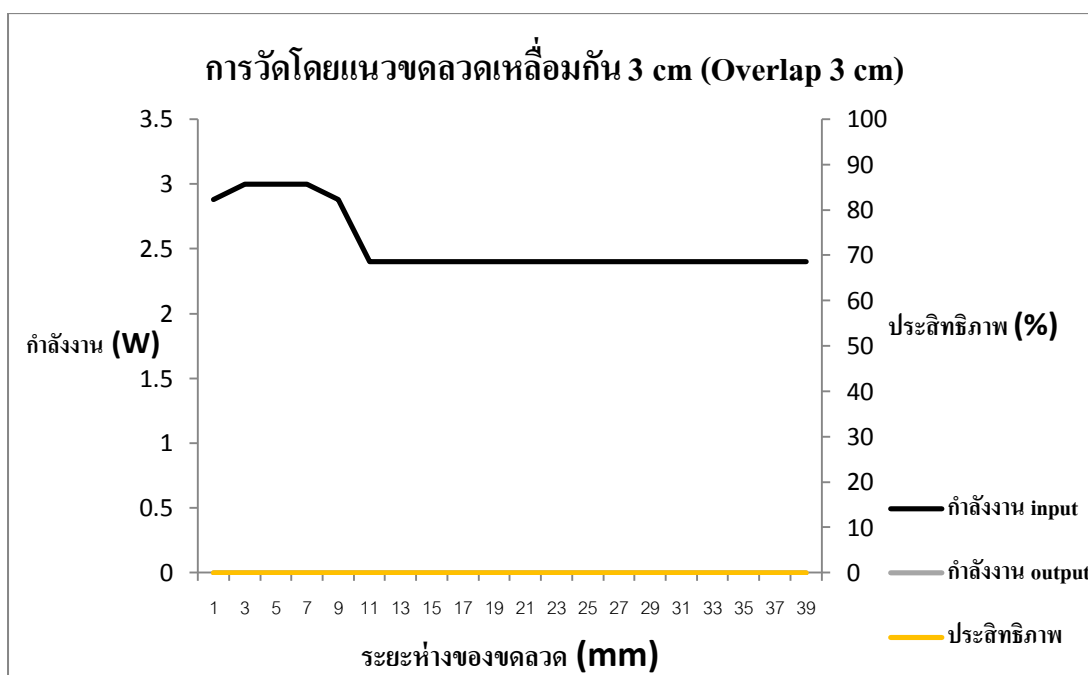


ภาพที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2.1.6 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 3 cm (Overlap 3 cm)

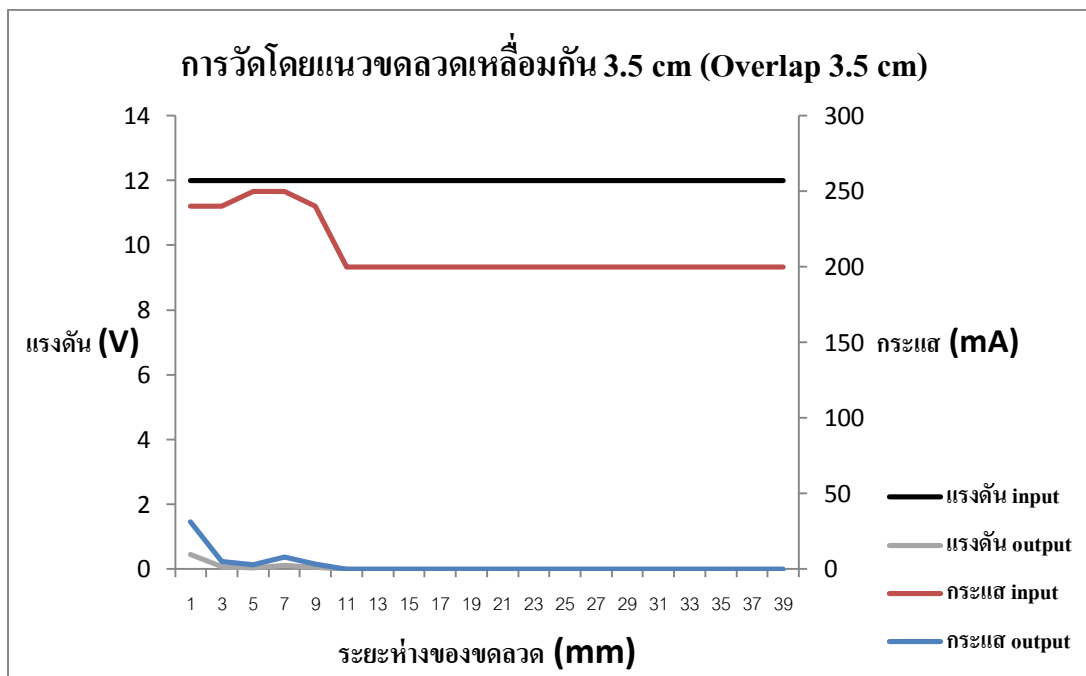


ภาพที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

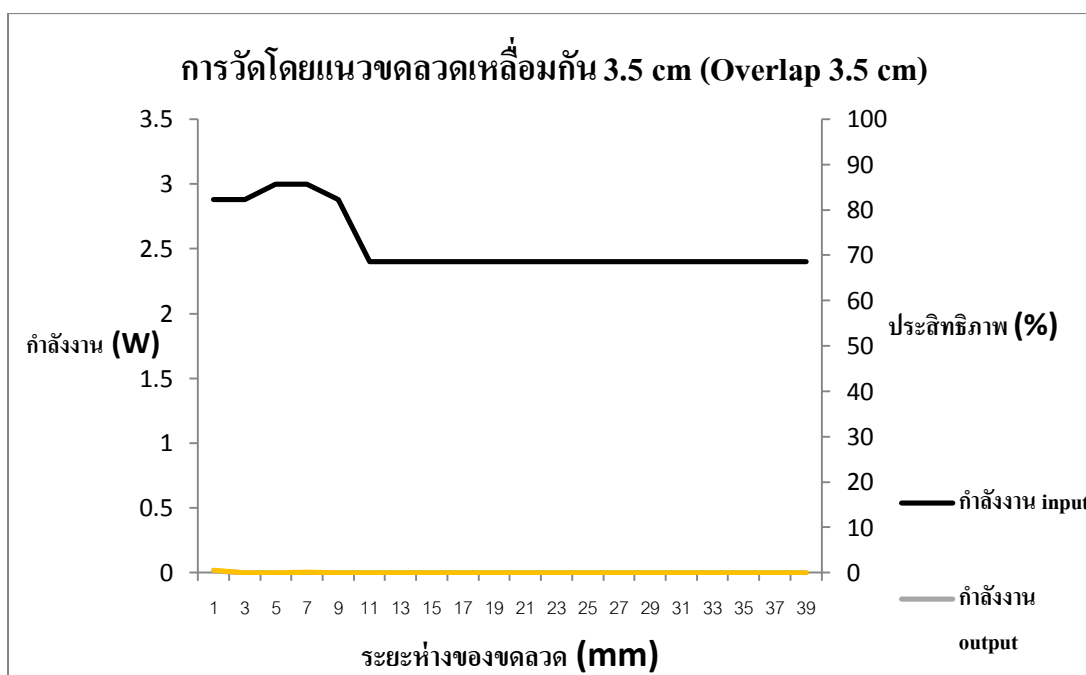


ภาพที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.2.1.7 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 3.5 cm (Overlap 3.5 cm)



ภาพที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

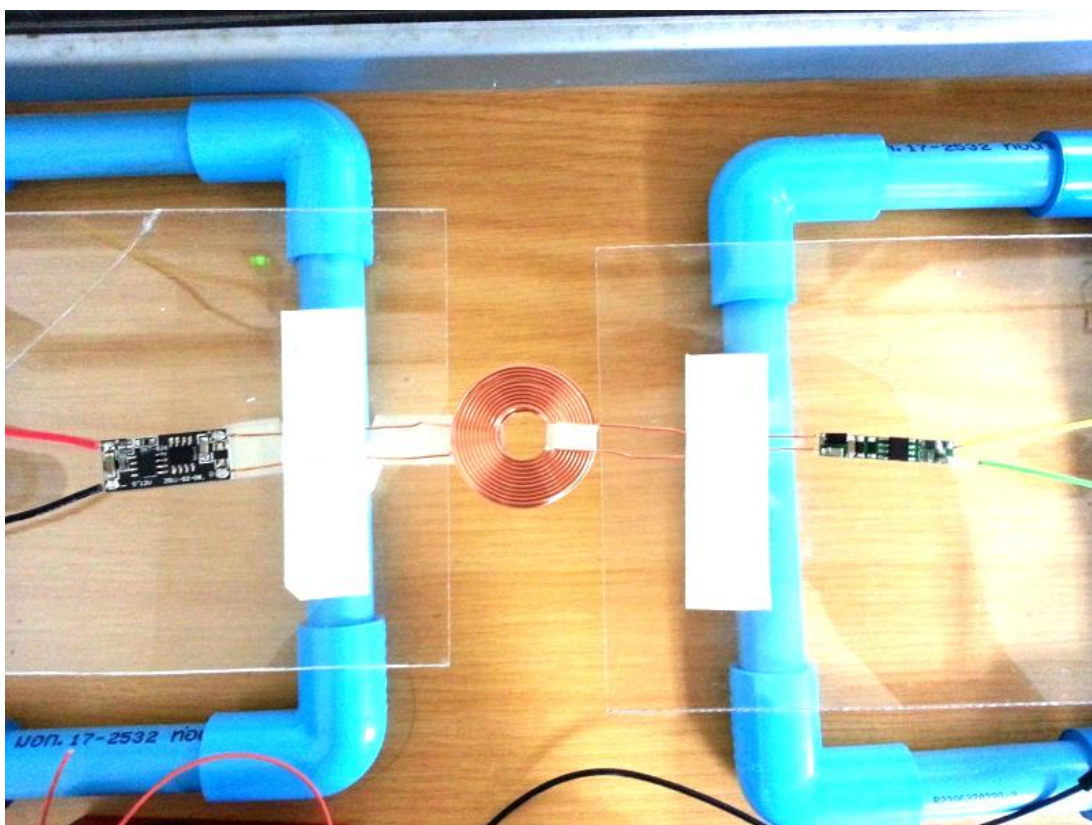


ภาพที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.3 ทดลองที่ 3 ขนาดของขดลวดเล็กลง วัดแนวขดลวดตรงกัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

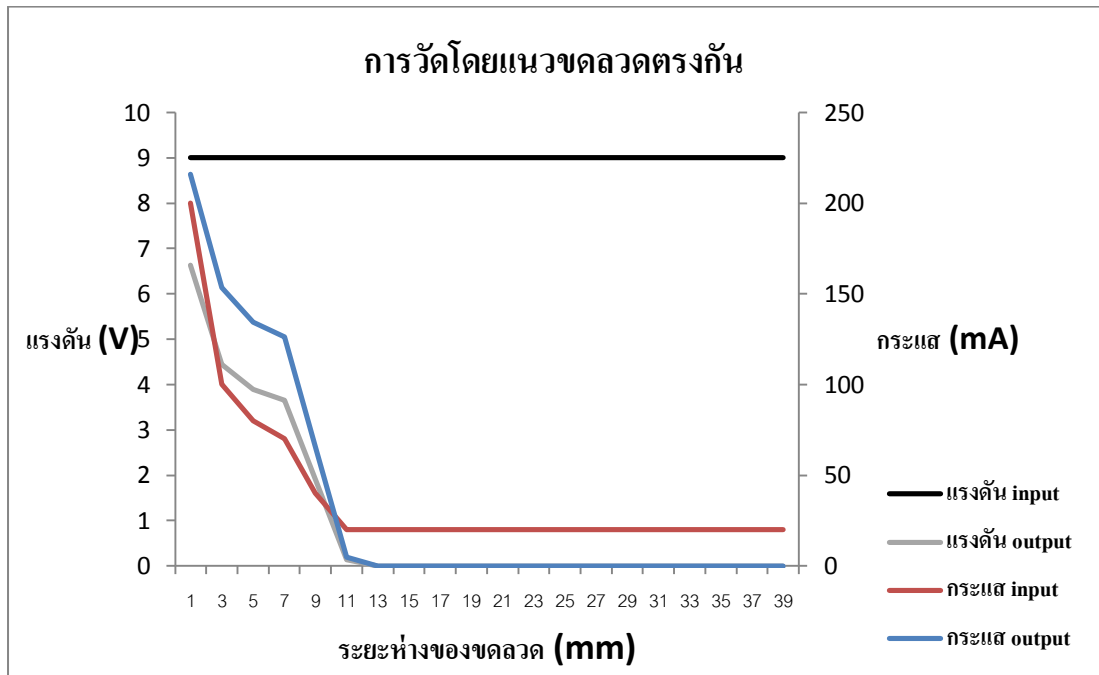
- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด 30 mm
- จำนวนรอบของขดลวด ≤ 10 รอบ
- แรงดันพิกัด Input (rated) 9V
- แรงดันพิกัด Output (rated) 5V, กระแสพิกัด Output (rated) 100-300mA
- โหลด 16.67 Ohm , 10 W (คำนวณจากค่าแรงดันและกระแสพิกัดด้านเอาต์พุต)



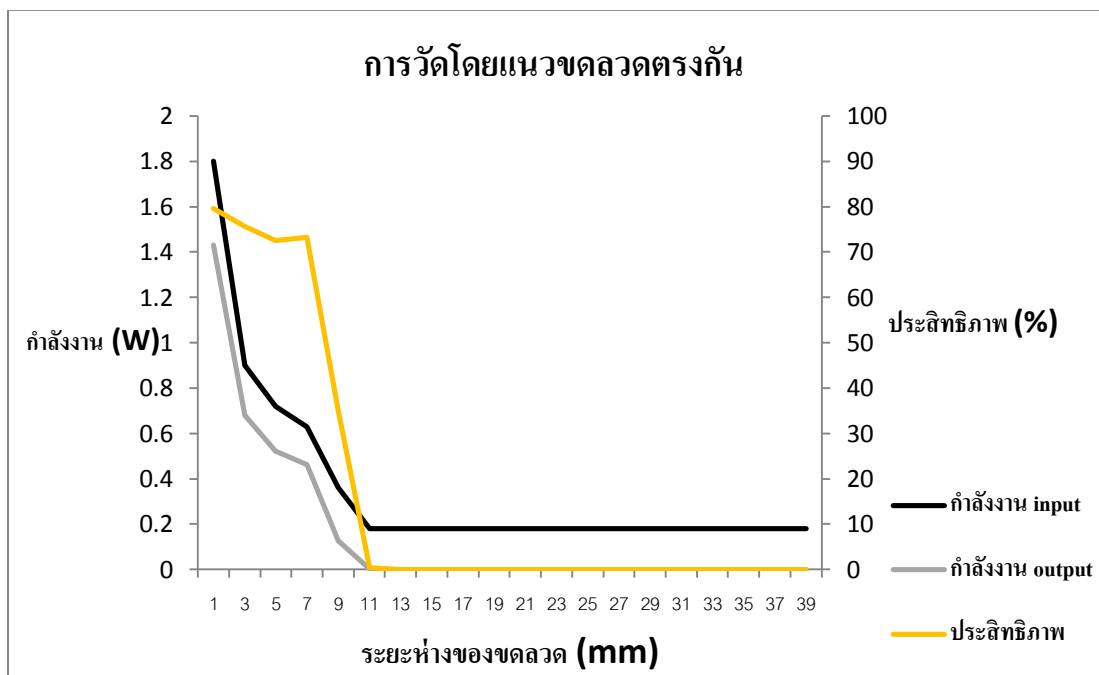
ภาพที่ 4.20 การทดลองที่ 3 โดยแนวขดลวดตรงกัน

4.1.3.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวขดลวดตรงกัน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.21 ถึง 4.22



ภาพที่ 4.21 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

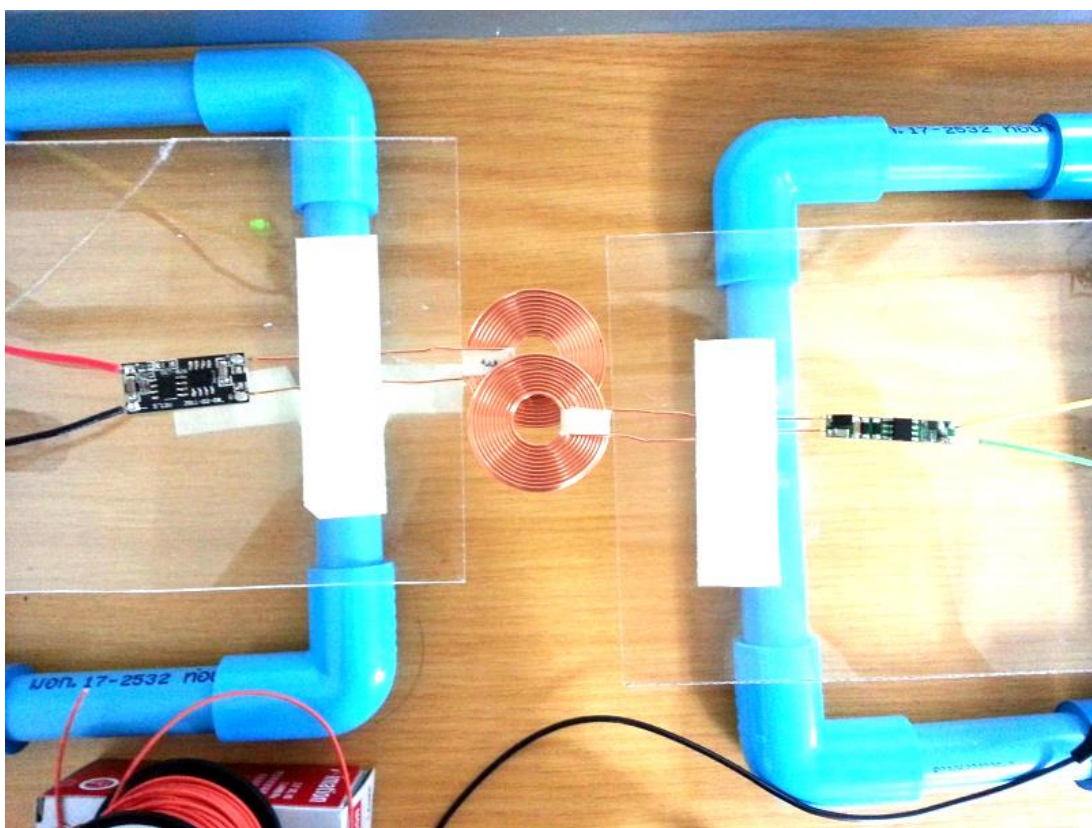


ภาพที่ 4.22 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.4 รูปแบบการทดลองที่ 4 ขนาดของขดลวดเล็กลง วัดแนวขดลวดเหมือนกัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวด 30 mm
- จำนวนรอบของขดลวด ≤ 10 รอบ
- แรงดันพิกัด Input (rated) 9V
- แรงดันพิกัด Output (rated) 5V, กระแสพิกัด Output (rated) 100-300mA
- โหลด 16.67 Ohm , 10 W (คำนวณจากค่าแรงดันและกระแสพิกัดด้านเอาต์พุต)

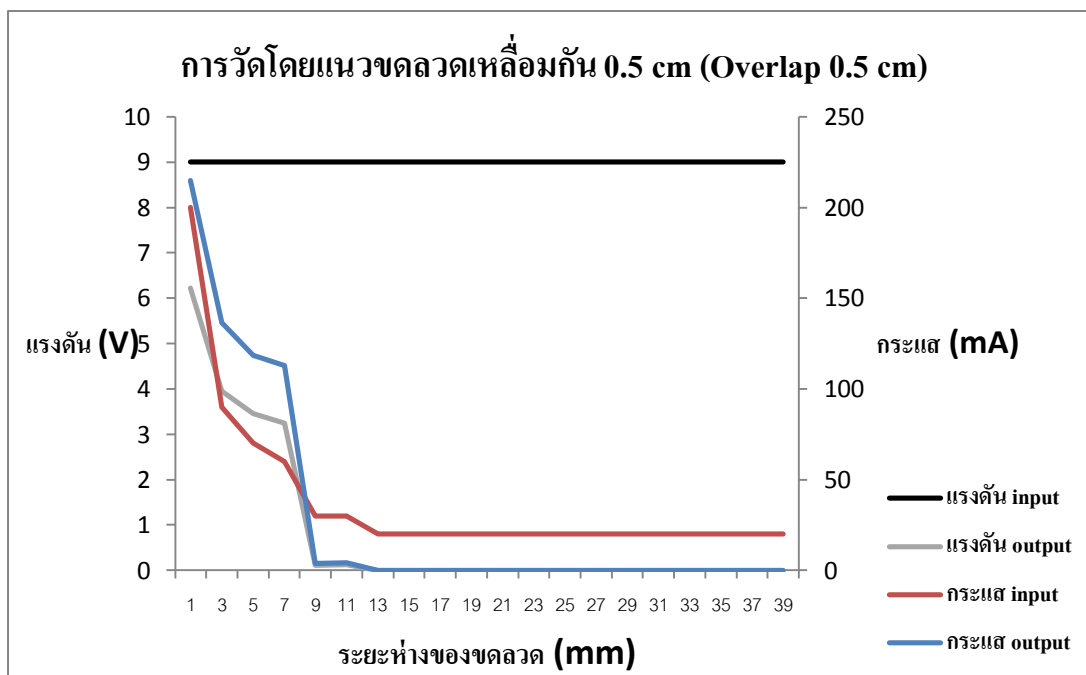


ภาพที่ 4.23 การทดลองที่ 3 โดยแนวขดลวดเหมือนกัน

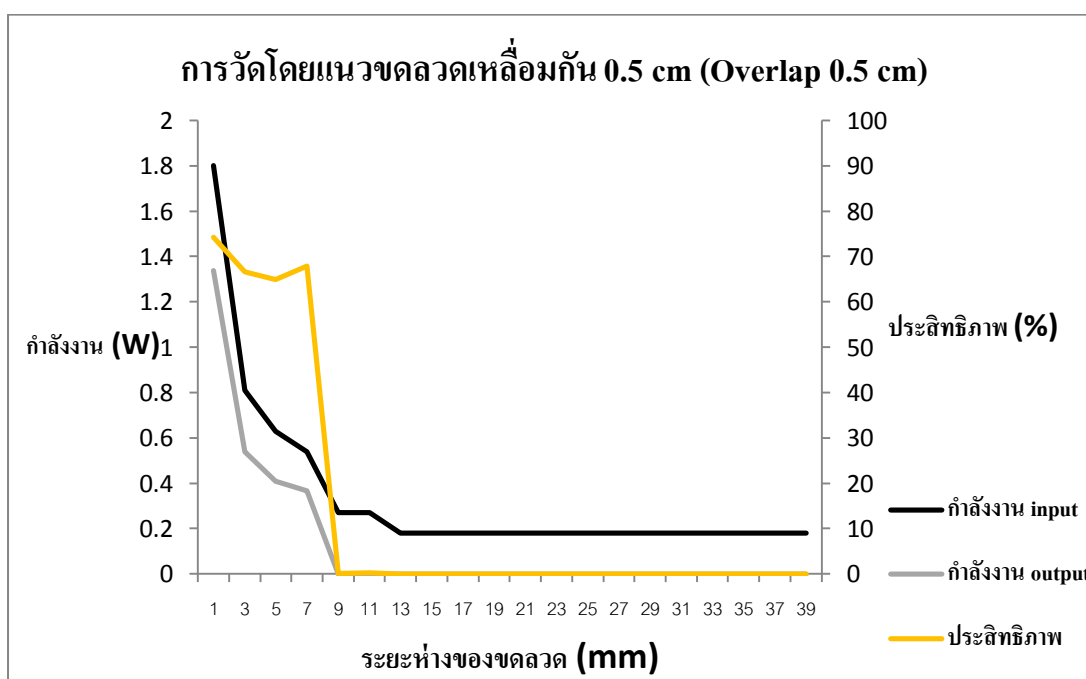
4.1.4.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.24 ถึง 4.31

4.1.4.1.1 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 0.5 cm (Overlap 0.5 cm)

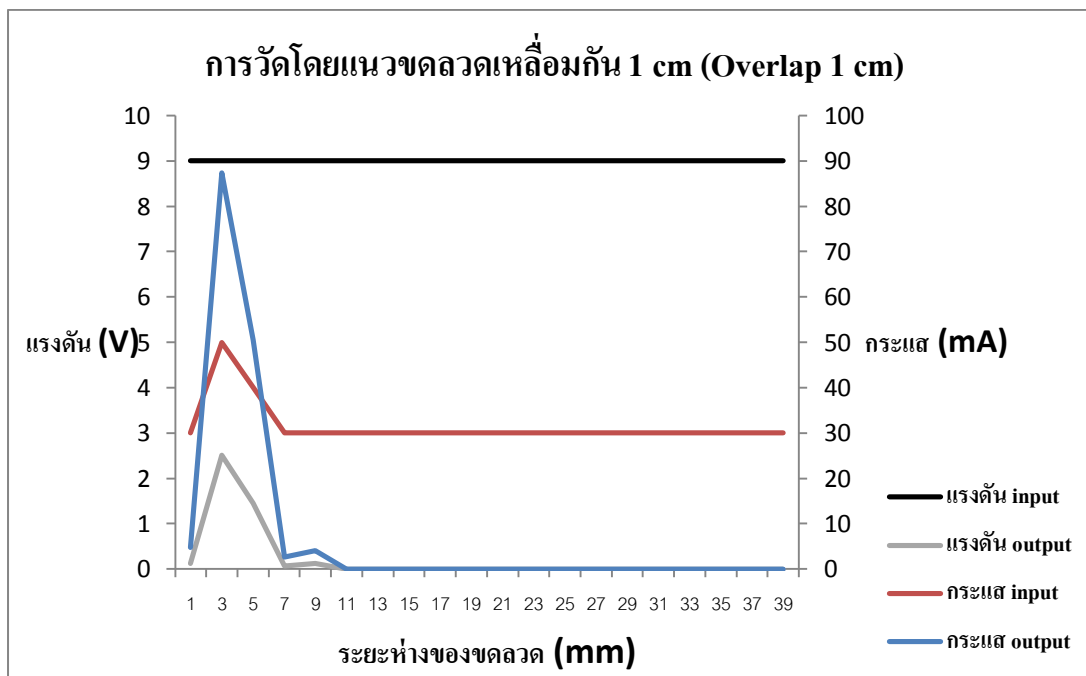


ภาพที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

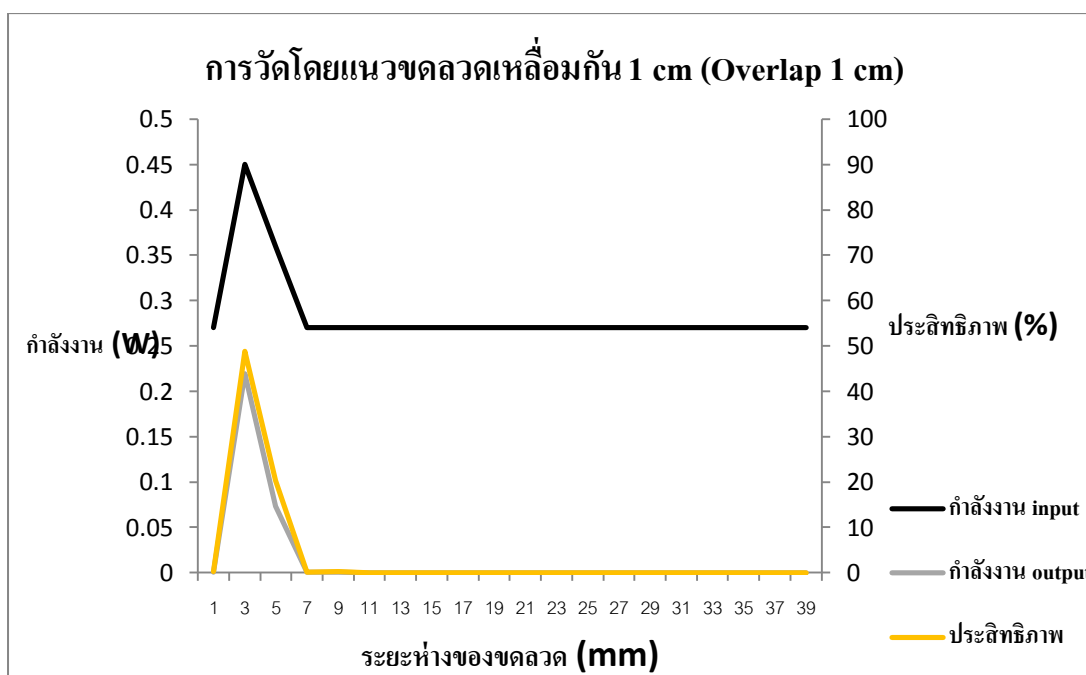


ภาพที่ 4.25 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.4.1.2 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 1 cm (Overlap 1 cm)

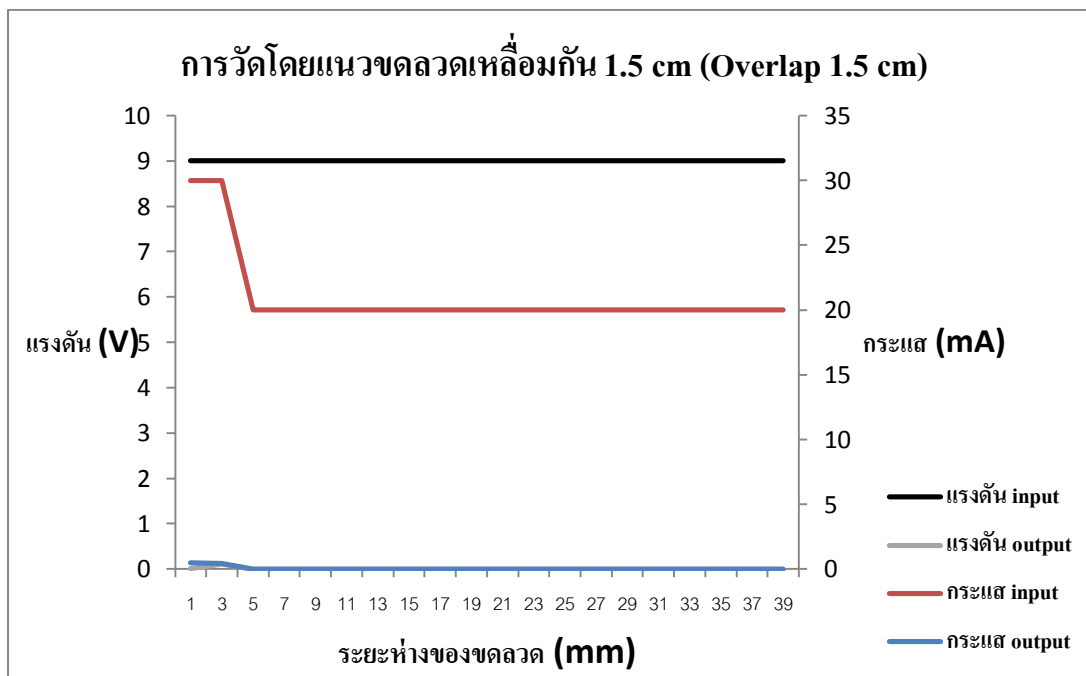


ภาพที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

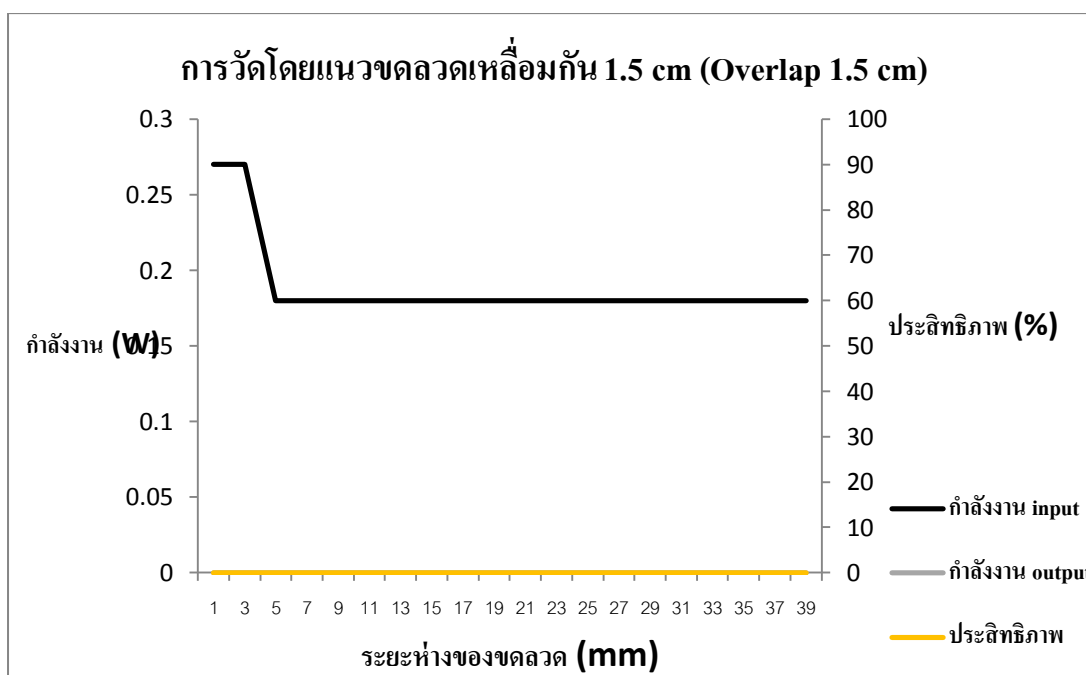


ภาพที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.4.1.3 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 1.5 cm (Overlap 1.5 cm)

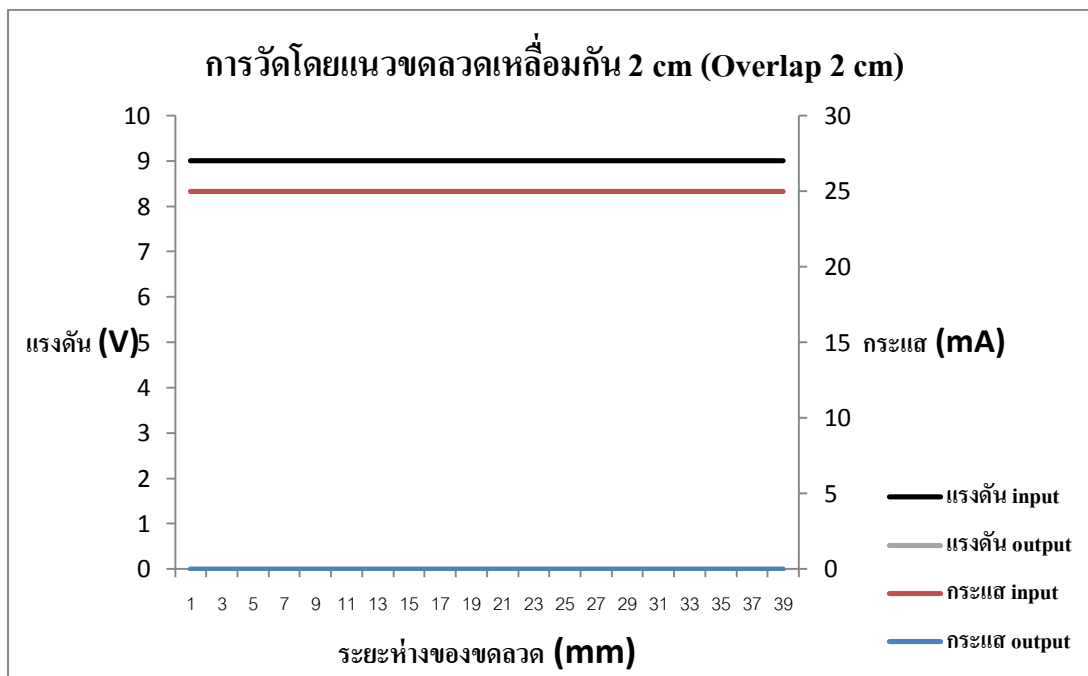


ภาพที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

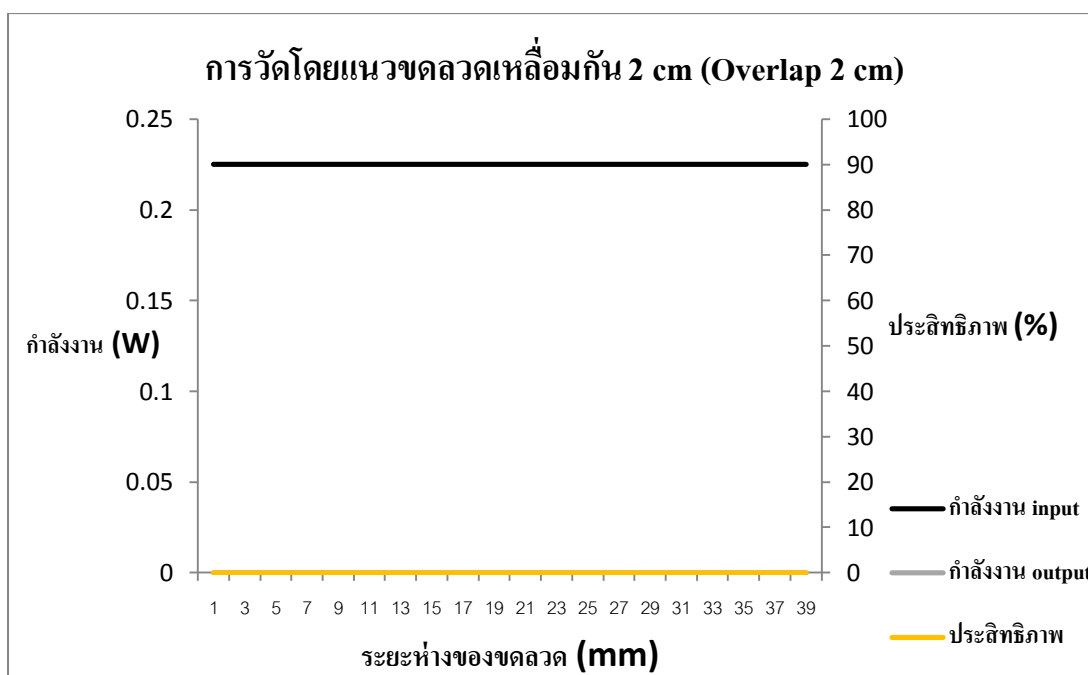


ภาพที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.4.1.4 การวัดโดยแนวขดลวดเหลื่อมกัน 2 cm (Overlap 2 cm)



ภาพที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

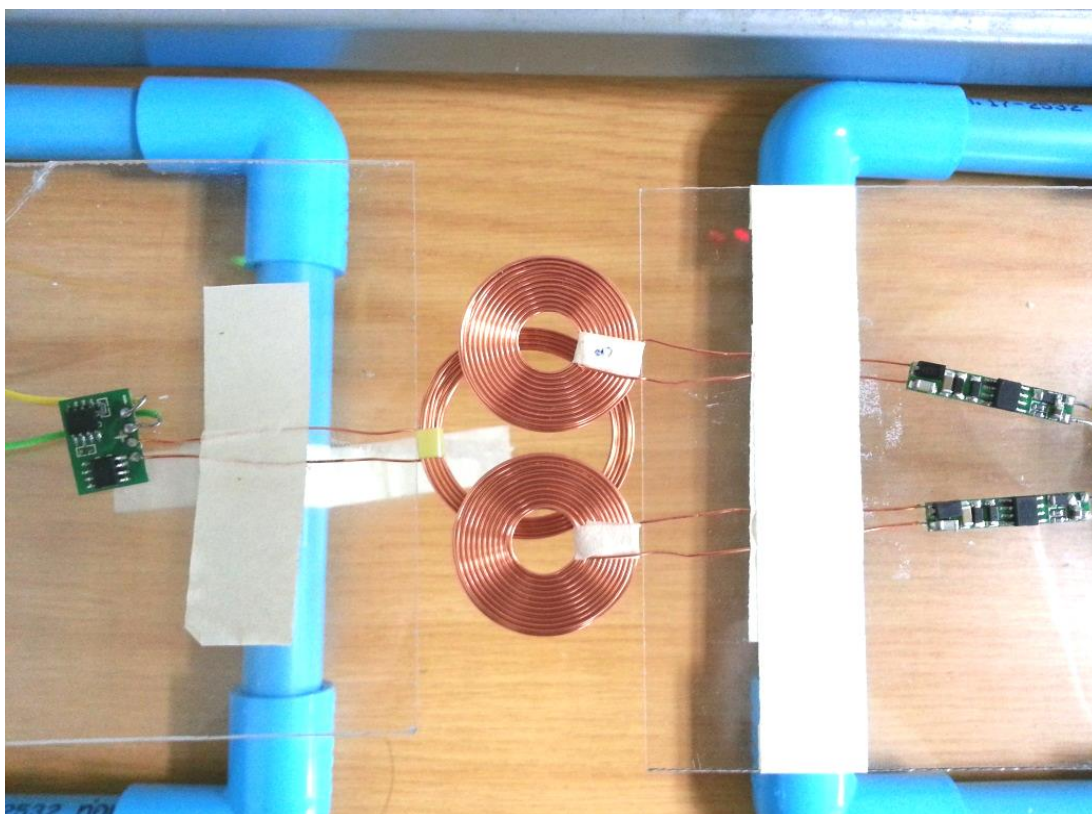


ภาพที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.5 การทดลองที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทั้งสองฝั่งมีขนาดไม่เท่ากัน

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

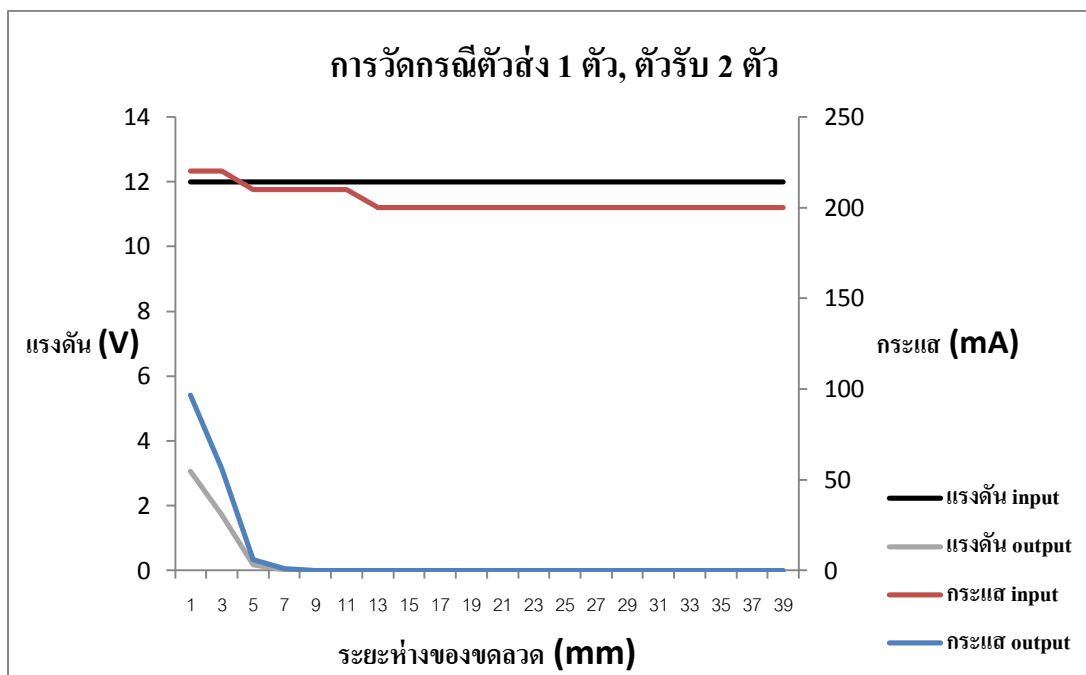
- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดฝั่งส่ง 40 mm
- เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดฝั่งรับ 30 mm (x2)
- แรงดันพิกัด Input (rated) 12V (ฝั่งส่ง)
- แรงดันพิกัด Output (rated) 5V, กระแสพิกัด Output (rated) 100-300mA (ฝั่งรับ)
- โหลด 16.67 Ohm , 10 W
- ระยะห่างระหว่างตัวรับ 2 ตัว 0.5 mm
- ทำการวัดโดยแนวขดลวดไม่ตรงกัน



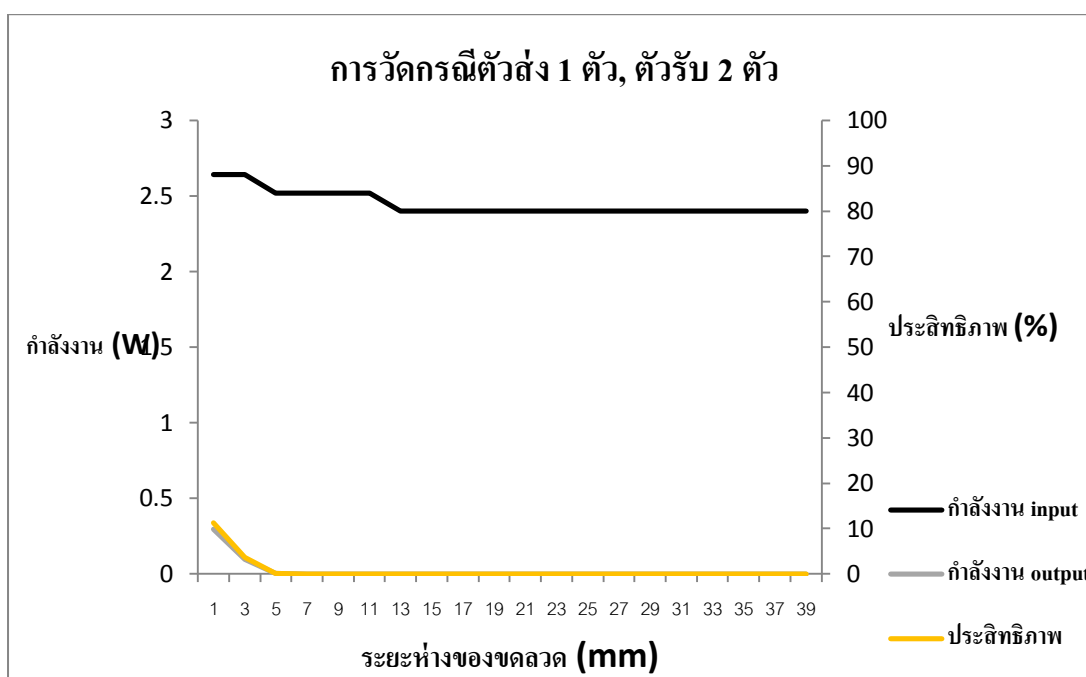
ภาพที่ 4.32 การทดลองที่ 5 เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดทั้งสองฝั่งมีขนาดไม่เท่ากัน

4.1.5.1 ผลที่ได้จากการวัดกรณีตัวส่ง 1 ตัว, ตัวรับ 2 ตัวโดยแนวขดลวดไม่ตรงกัน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.33 ถึง 4.34



ภาพที่ 4.33 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด



ภาพที่ 4.34 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.1.6 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดสอบโมดูลการชาร์จไร้สายที่นำมาเป็นต้นแบบ พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาในการพันขดลวดมีผลต่อการส่งผ่านพลังงาน หากขดลวดมีจำนวนรอบที่มาก ก็จะได้ไกลกว่า แต่อาจจะไม่ได้ประสิทธิภาพที่ดี และจากการทดสอบการพันขดลวดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกว้างๆ นั้น จะสามารถส่งผ่านพลังงานได้ดีกว่าการพันขดลวดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางแคบๆ ในด้านระยะทางการเชื่อมต่อ เนื่องจากการชาร์จเหนี่ยวนำแบบธรรมดาจำเป็นต้องมีช่องว่างอากาศระหว่างแกนเพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กสามารถเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดได้

4.1.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบโมดูลที่ใช้การชาร์จแบบเหนี่ยวนำนั้น สรุปได้ว่าการชาร์จแบบนี้จำเป็นต้องอยู่กับที่และตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อต้องการประสิทธิภาพที่เพียงพอหรือดีพอสำหรับการใช้งาน

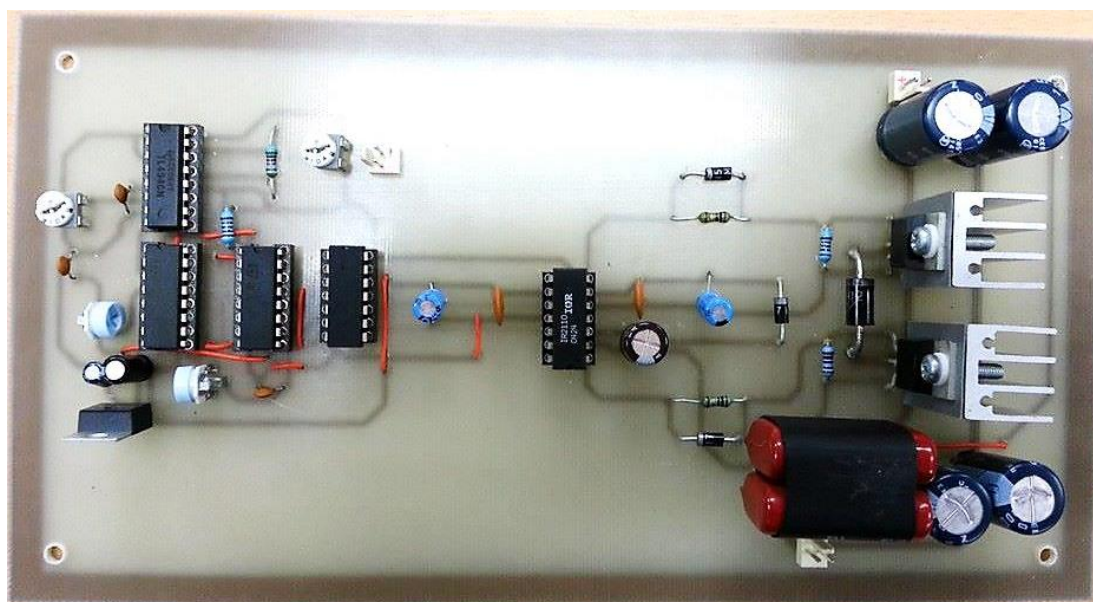
ด้วยเหตุนี้จึงต้องออกแบบและพัฒนาให้เหมาะสมที่จะนำมาใช้กับโครงการ เนื่องจากเงื่อนไขการชาร์จนั้นมีการเคลื่อนที่ระหว่างการชาร์จเป็นส่วนใหญ่ จึงต้องมีการกำหนดจุดชาร์จและตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่ดี โดยที่แนวช่องว่างอากาศของขดลวดนั้นควรมีตำแหน่งเหลื่อมกันไม่เกิน 1 cm และระยะห่างระหว่างขดลวดฝั่งรับและส่งนั้นควรไม่เกิน 10 mm เมื่อต้องการการชาร์จที่มีประสิทธิภาพเกินครึ่ง อาจต้องมีการออกแบบขนาดพื้นที่ของขดลวดให้กว้างขึ้น เพื่อให้เกิดการเหลื่อมกันน้อยที่สุด และการปรับพารามิเตอร์อื่นๆ เพื่อเพิ่มปัจจัยการเหนี่ยวนำ

4.2 การทดลองขั้นที่ 2: การทดสอบวงจรชาร์จไร้สายจากการออกแบบ

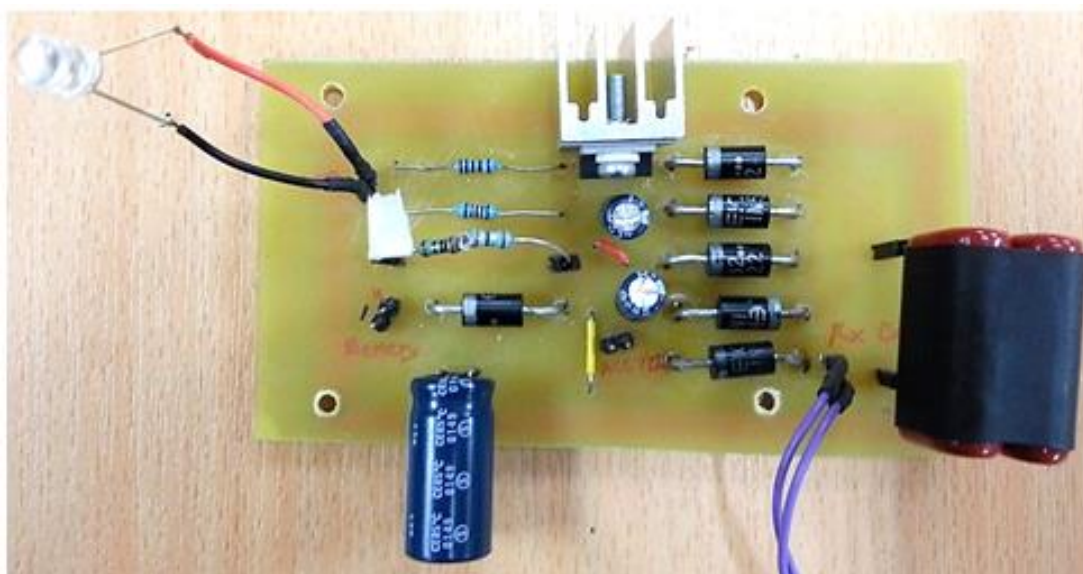
ในวงจรชุดรับ-ส่งพลังงานไร้สายนั้น ได้มีการเลือกค่า C ที่เหมาะสมซึ่งนำมาใช้กับขดลวดที่ได้ทำการออกแบบเพื่อให้เกิดสถานะ LC Resonance ซึ่งในการทดลองนั้นจะเป็นการทดลองที่สภาวะของวงจรเพื่อดูการส่งผ่านพลังงานที่สูงที่สุดและนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพตามสมการที่ (4.1) โดยสามารถดูตารางผลการทดสอบแสดงโดยละเอียดในภาคผนวก

วงจรที่ได้ทำการออกแบบมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆมีดังนี้

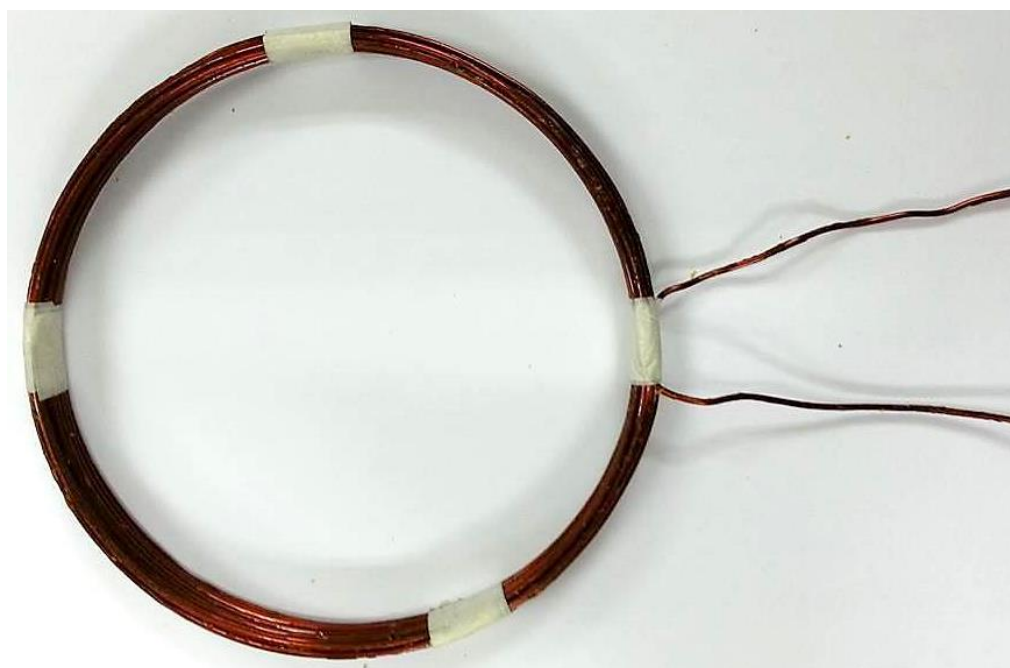
- เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของขดลวด 11.5 cm
- จำนวนรอบของขดลวด 20 รอบ
- ขนาดของเส้นลวด 18 AWG
- ค่า $L = 78.71 \mu\text{H}$ (ขดลวดวงกลม), $C = 1360 \text{ nF}$, $f_{\text{resonance}} = 15.4 \text{ kHz}$
- ค่า $L = 53.15 \mu\text{H}$ (ขดลวดสี่เหลี่ยม), $C = 1360 \text{ nF}$, $f_{\text{resonance}} = 18.7 \text{ kHz}$



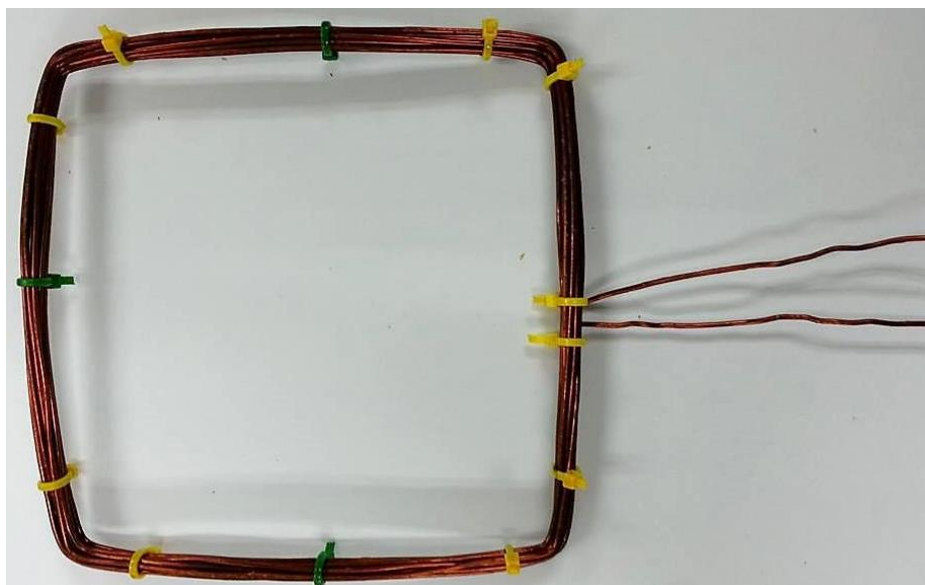
ภาพที่ 4.35 วงจรออกแบบส่ง



ภาพที่ 4.36 วงจรออกแบบฝั่งรับ



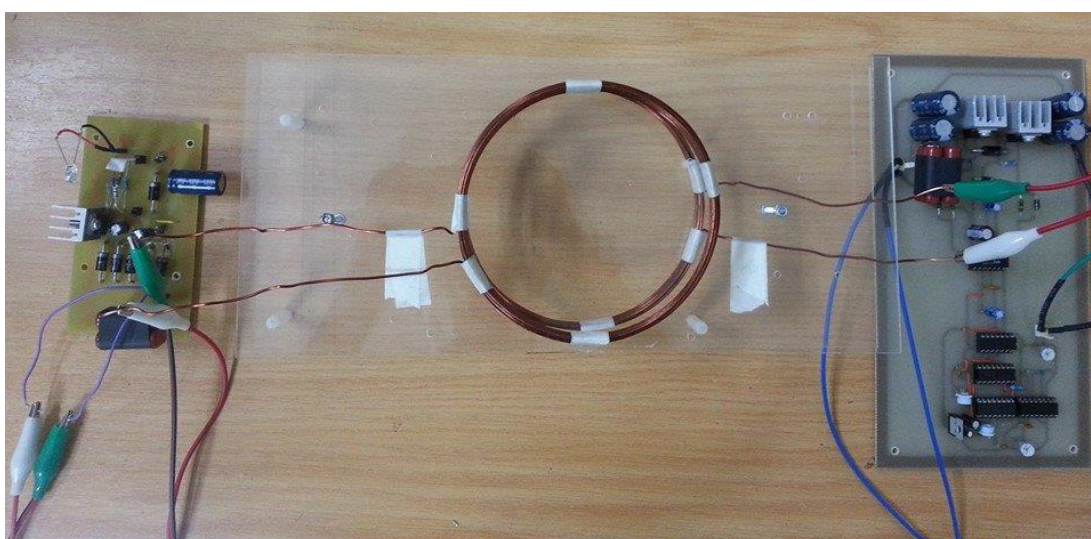
ภาพที่ 4.37 ขดลวดทองแดงชนิดวงกลมเบอร์ 18 AWG จำนวน 20 รอบ



ภาพที่ 4.38 ขดลวดทองแดงชนิดสี่เหลี่ยมเบอร์ 18 AWG จำนวน 20 รอบ

4.2.1 การทดลองโดยแนวขดลวดตรงกันโดยนำไปชาร์จแบตเตอรี่

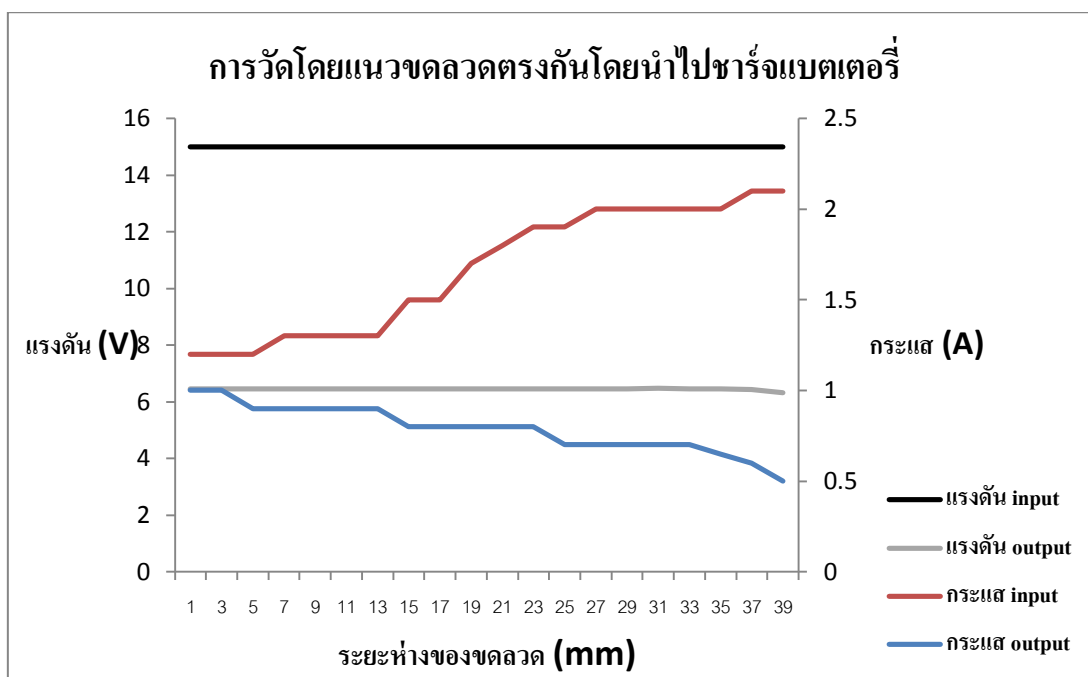
- แบตเตอรี่ตะกั่วกรดขนาด 6V 1.2Ah (ขดลวดวงกลม)



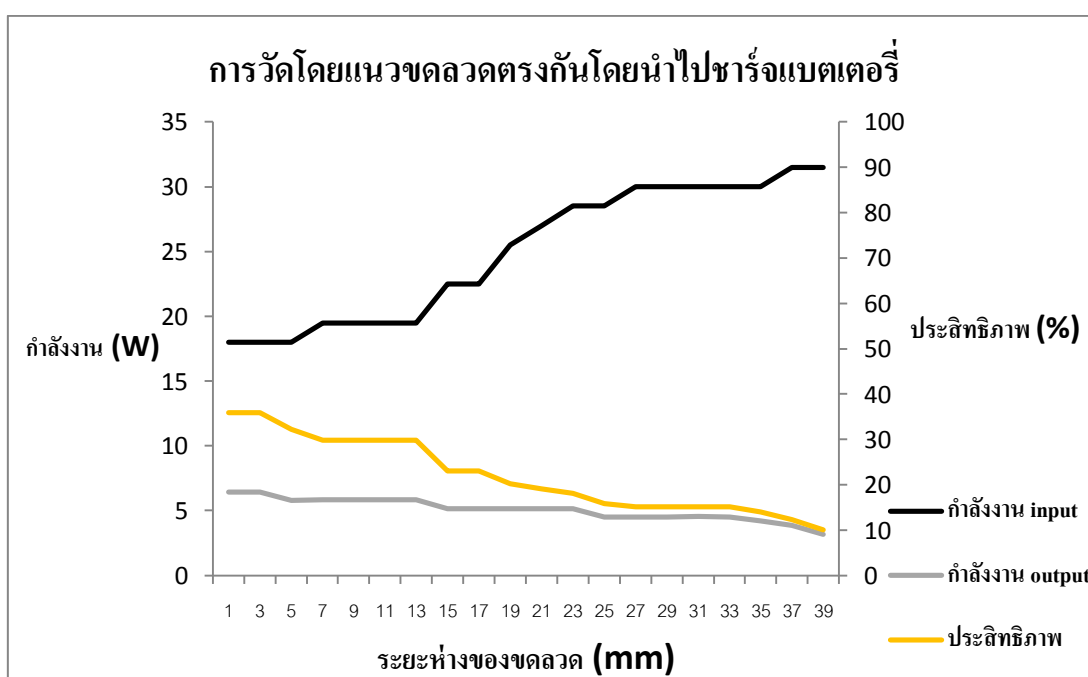
ภาพที่ 4.39 รูปแบบการทดลองวงจรชาร์จโดยแนวขดลวดตรงกัน

4.2.1.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวคดลวดตรงกันโดยนำไปชาร์จแบตเตอรี่

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.40 ถึง 4.41



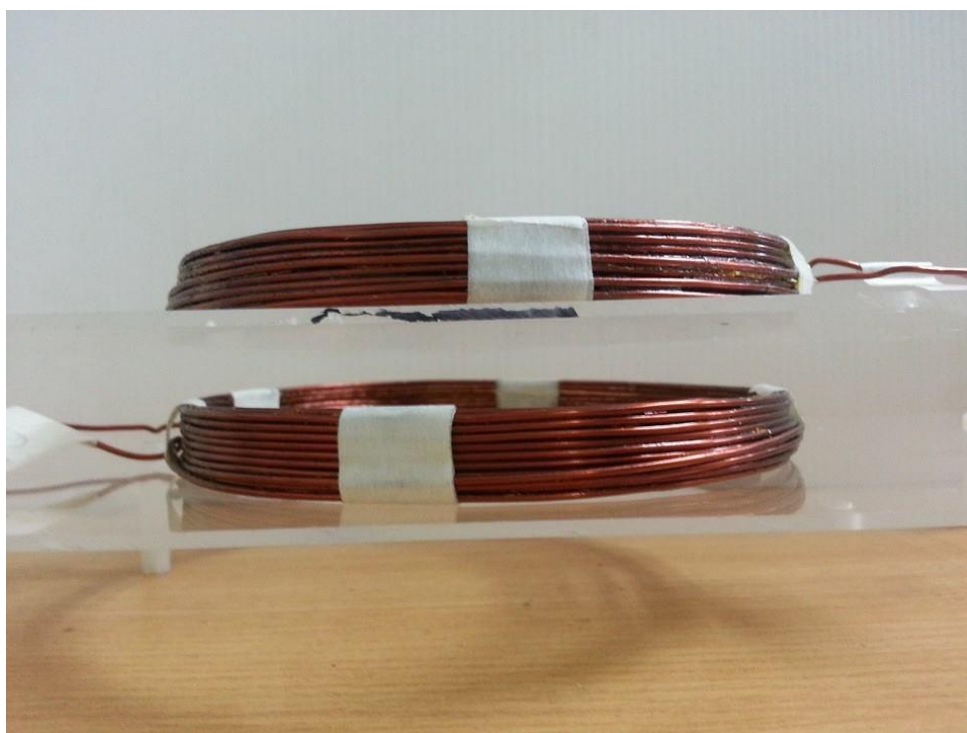
ภาพที่ 4.40 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด



ภาพที่ 4.41 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.2.2 การทดลองโดยแนวขดลวดตรงกันที่ระยะห่างเท่าๆกันโดยนำไปจ่ายโหลดความต้านทานเพื่อหาการส่งผ่านกำลังงานสูงสุด

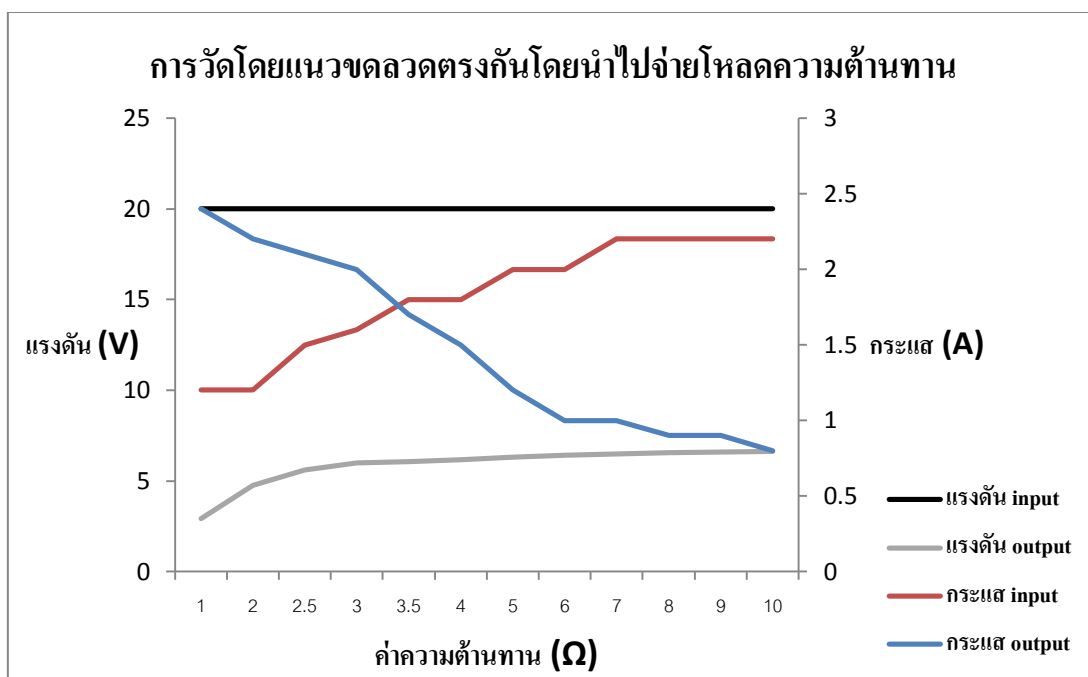
เนื่องจากว่าแบตเตอรี่นั้นมีค่าความต้านทานภายในไม่คงที่ซึ่งหากแบตเตอรี่ใกล้เต็มค่าความต้านทานก็จะมากจึงทำให้เกิดกระแสขณะทำการชาร์จนั้นมีค่าน้อย จึงทำให้ไม่สามารถรู้ถึงค่ากำลังงานสูงสุดที่สามารถส่งผ่านของวงจรชุดชาร์จที่ออกแบบมาได้ ดังนั้นจึงต้องทำการนำชุดชาร์จไปจ่ายโหลดค่าความต้านทานต่างๆที่เหมาะสม เพื่อดูค่ากระแสและกำลังงานสูงสุดที่สามารถส่งผ่านมาได้เพื่อให้เข้าใกล้ขอบเขตที่ตั้งไว้มากที่สุด ซึ่งโหลดค่าความต้านทานที่นำมาใช้ทดสอบนั้นเป็นโหลดชนิด 10 W ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ 1 Ω , 2 Ω , 2.5 Ω , 3 Ω , 3.5 Ω , 4 Ω , 5 Ω , 6 Ω , 7 Ω , 8 Ω , 9 Ω และ 10 Ω ตามลำดับ และระยะห่างของขดลวดที่ใช้ทดสอบนั้นเท่ากับ 10 mm ซึ่งเป็นระยะความห่างที่มีประสิทธิภาพการส่งผ่านพลังงานสูงสุดจากการทดลองที่ผ่านมา



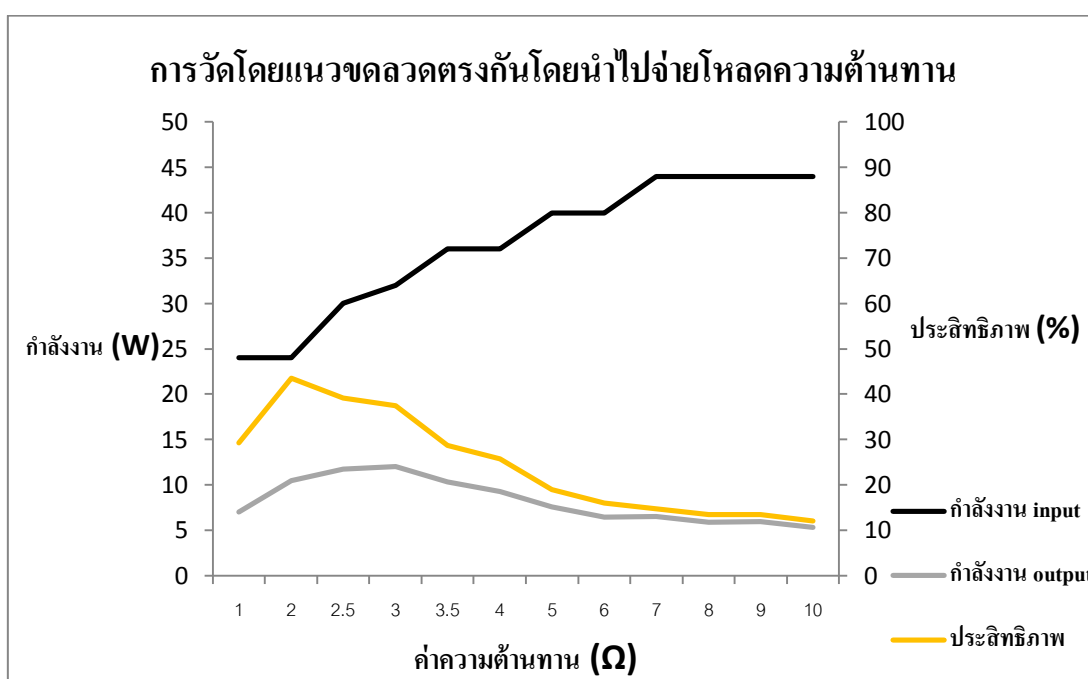
ภาพที่ 4.42 รูปแบบการทดลองวงจรชาร์จโดยแนวขดลวดตรงกันที่ระยะห่าง 10 mm

4.2.2.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวคลดตรงกันที่ระยะห่างเท่ากัน นำไปจ่ายโหลดความต้านทาน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.43 ถึง 4.44



ภาพที่ 4.43 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อค่าความต้านทานต่างๆ



ภาพที่ 4.44 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อค่าความต้านทานต่างๆ

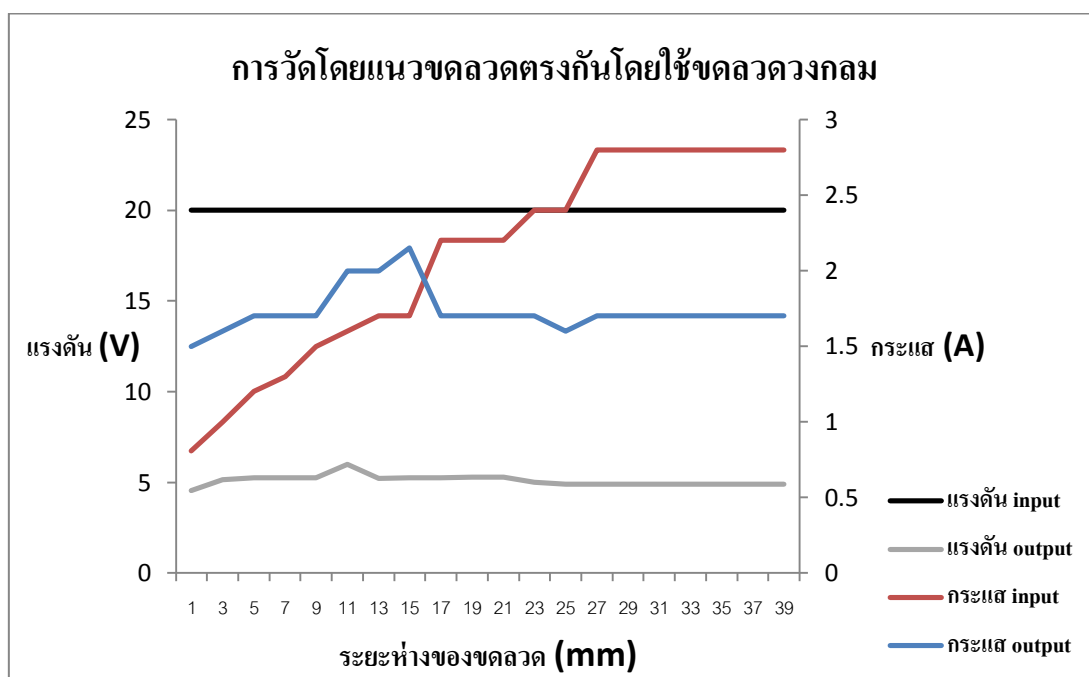
4.2.3 การทดลองประสิทธิภาพระหว่างขดลวดวงกลมกับขดลวดสี่เหลี่ยมที่มีจำนวนรอบเท่ากัน

ทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างขดลวดลักษณะที่เป็นวงกลมกับขดลวดลักษณะที่เป็นสี่เหลี่ยมที่มีจำนวนรอบเท่าๆกัน โดยนำโหนดค่าความต้านทานที่สามารถส่งผ่านกำลังงานได้สูงสุดจากการทดลองที่ 4.2.2 มาใช้ในการทดลอง

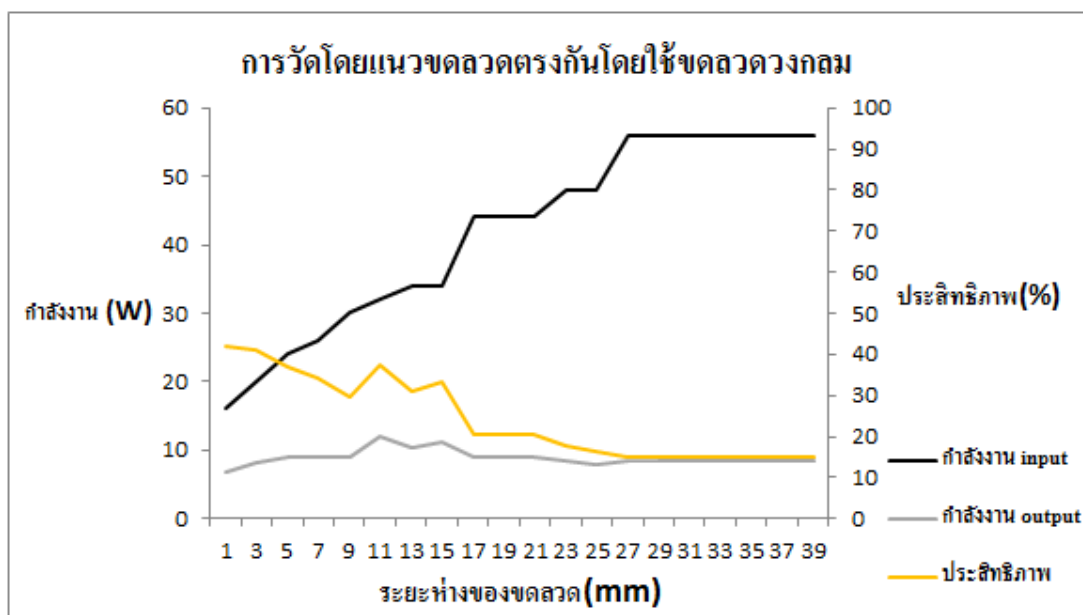
4.2.3.1 การทดลองโดยใช้ขดลวดวงกลม ขนาดโหนดค่าความต้านทาน 3 Ω

4.2.3.1.1 ผลที่ได้การทดลองโดยใช้ขดลวดวงกลม ขนาดโหนดค่าความต้านทาน 3 Ω

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.45 ถึง 4.46



ภาพที่ 4.45 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด

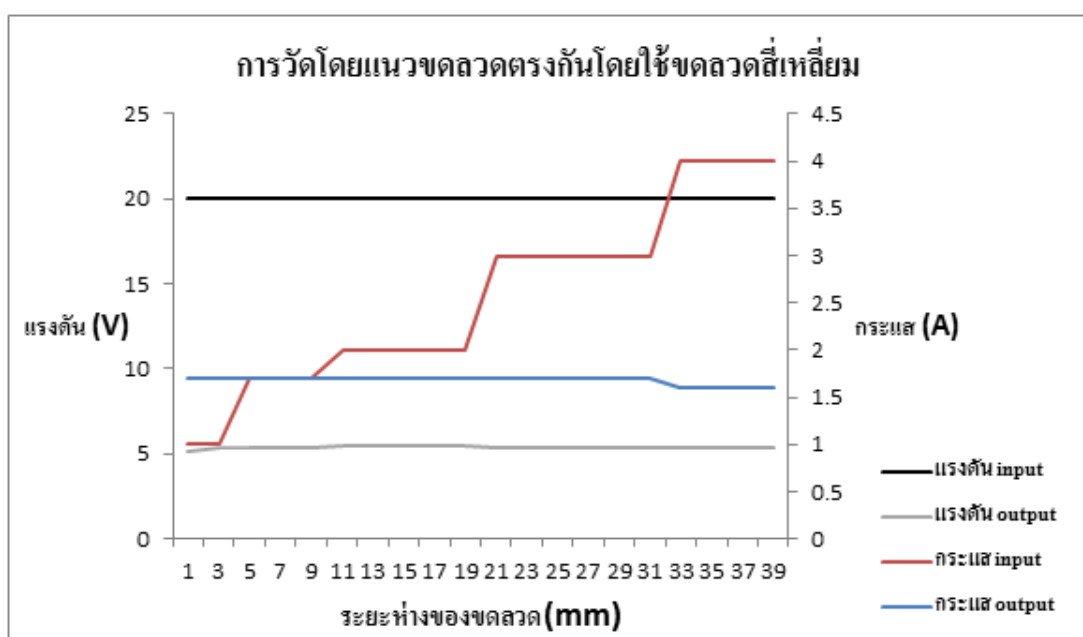


ภาพที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

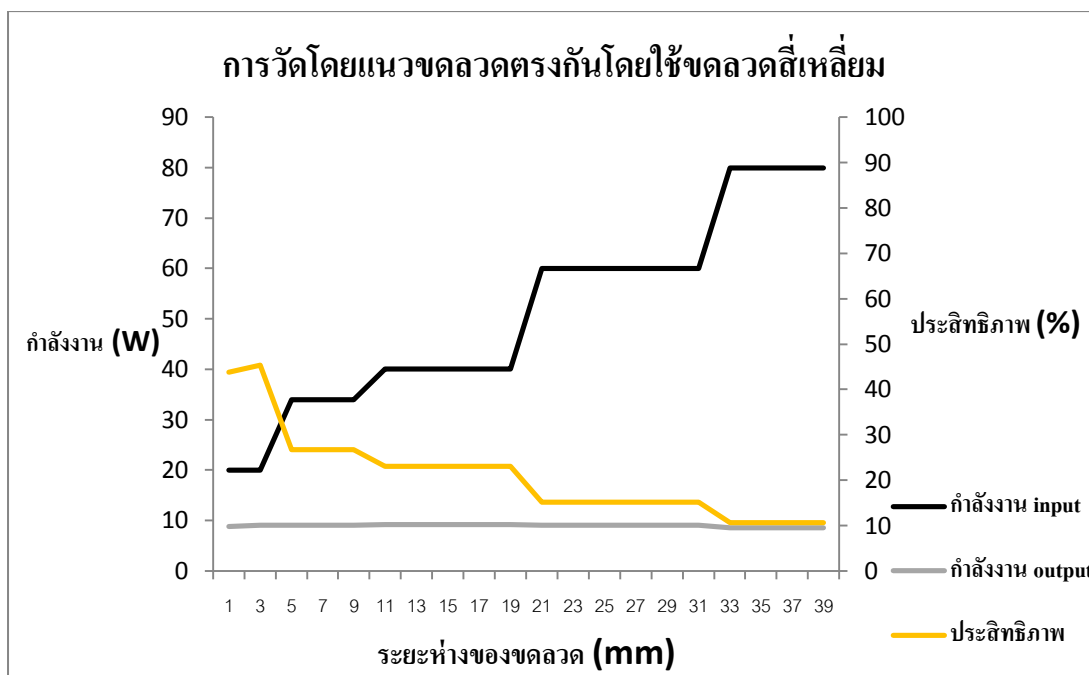
4.2.3.2 การทดลองโดยใช้ขดลวดสี่เหลี่ยม ขนาดโหลดค่าความต้านทาน 3 Ω

4.2.3.2.1 ผลที่ได้การทดลองโดยใช้ขดลวดสี่เหลี่ยม ขนาดโหลดค่าความต้านทาน 3 Ω

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.47 ถึง 4.48



ภาพที่ 4.47 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสต่อระยะห่างของขดลวด



ภาพที่ 4.48 กราฟความสัมพันธ์ของกำลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อระยะห่างของขดลวด

4.2.4 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดสอบโมดูลการชาร์จไร้สายที่ออกแบบนั้น พบว่า กำลังงานที่สามารถส่งผ่านได้สูงสุดนั้นมีค่าเท่ากับ 12W เมื่อทำการจ่ายโหลดขนาด 3 Ω ซึ่งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 37.5 % และเมื่อทดสอบการพันขดลวดลักษณะที่แตกต่างกัน พบว่าการพันขดลวดวงกลมนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการพันแบบสี่เหลี่ยม

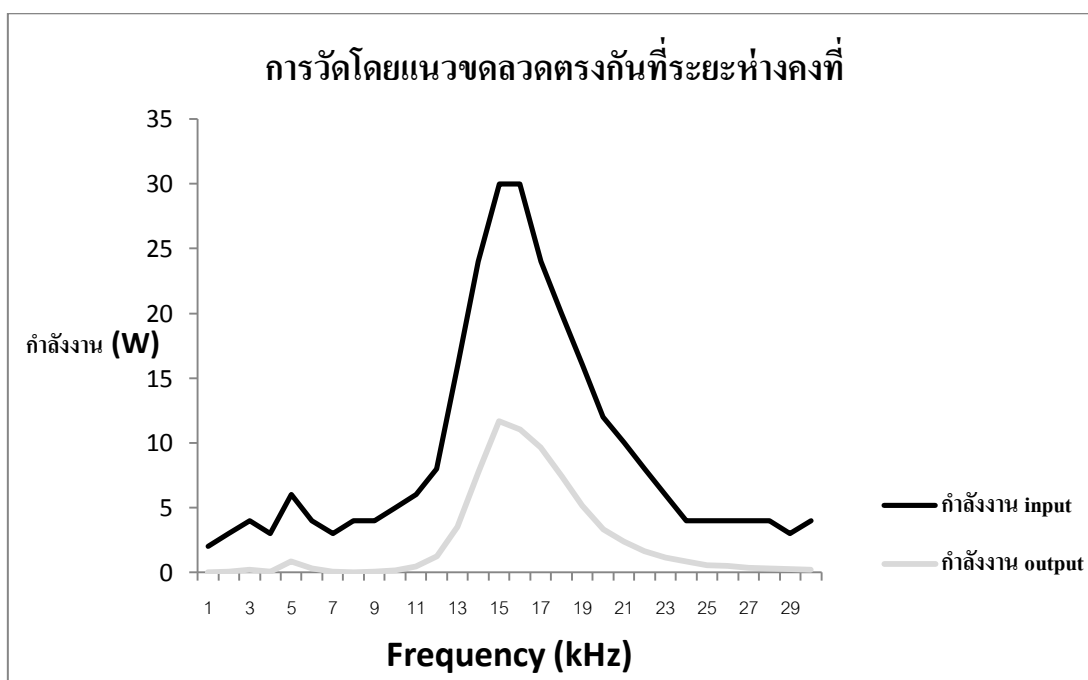
4.3 การทดสอบวงจรชาร์จไร้สายเพื่อนำไปพัฒนาต่อยอด

4.3.1 การทดสอบการปรับกำลังงานไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ตัวสวิทชิงฝั่งส่ง

ทำการทดสอบวงจรชาร์จโดยการปรับความถี่ ณ สถานะต่างๆที่ตัววงจรสวิทชิงของฝั่งส่งให้หลุดจากสถานะเรโซแนนซ์เพื่อนำไปใช้ในการควบคุมกำลังงานไฟฟ้าของชุดชาร์จ โดยนำเอาค่าโพลด์ที่จ่ายกำลังงานได้สูงสุดของการทดลองที่ 4.2.2 มาใช้ในการทดสอบ โดยใช้ขดลวดวงกลมซึ่งมี ค่า $L = 78.71 \mu\text{H}$ (ขดลวดวงกลม), $C = 1360 \text{ nF}$, $f_{\text{resonance}} = 15.4 \text{ kHz}$

4.3.1.1 ผลที่ได้จากการวัดโดยแนวขดลวดตรงกัน

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.49



ภาพที่ 4.49 กราฟความสัมพันธ์ของความถี่และกำลังงานไฟฟ้าที่ได้รับ

4.3.2 การทดสอบการเหนี่ยวนำของอุปกรณ์มีโลหะภายในสำนักงานและวงจรร่างไร้สายฝั่งส่ง

การทดสอบนี้เพื่อแสดงสถานะหากมีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่วงจรร่างไร้สายฝั่งรับปรากฏอยู่ในบริเวณวงจรร่างส่งซึ่งอาจส่งผลต่อการเหนี่ยวนำ โดยตั้งเงื่อนไขให้วงจรร่างส่งไม่ได้อยู่ในสถานะเรโซแนนซ์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ อาทิเช่น กรรไกร คลิปหนีบกระดาษ ไม้บรรทัดเหล็ก คัตเตอร์ ตู้อเหล็กตั้งโต๊ะ มือถือ Samsung Galaxy S3 โน้ตบุ๊ก Acer Tablet และ iPad Mini

รูปแบบในการทดสอบมีดังนี้

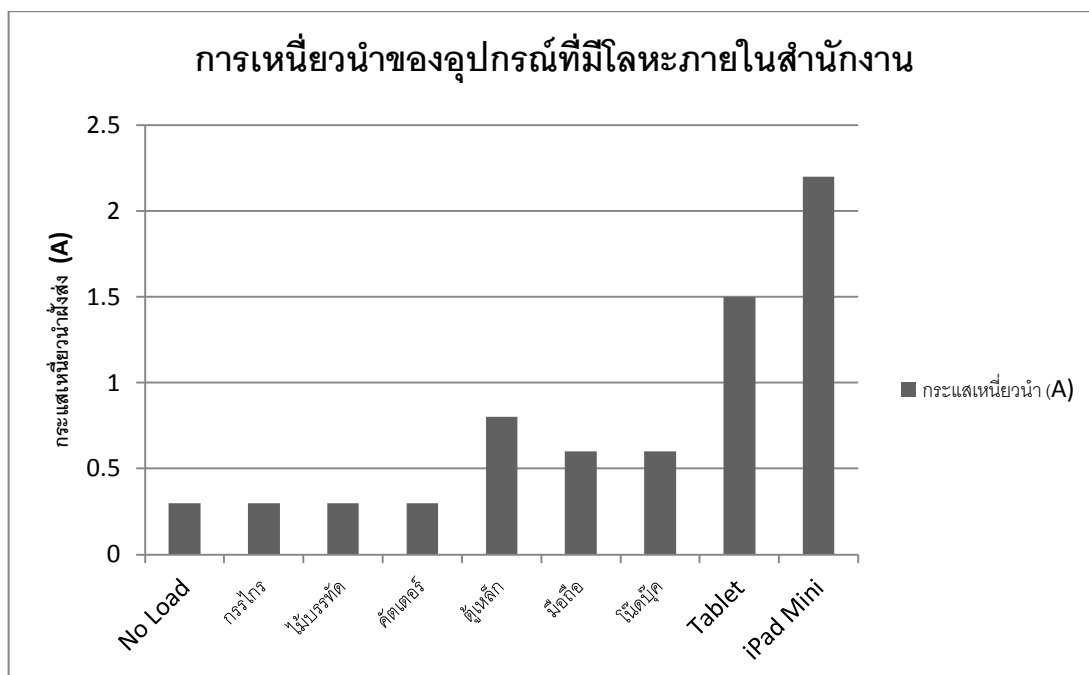
- ขดลวดชนิดวงกลม
- เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด 11.5 cm
- จำนวนรอบของขดลวด 20 รอบ
- ขนาดของเส้นลวด 18 AWG
- ค่า $L = 78.71 \mu\text{H}$ (ขดลวดวงกลม), $C = 1360 \text{ nF}$, $f = 19\text{kHz}$
- จ่ายแรงดันคงที่ 15V



ภาพที่ 4.50 อุปกรณ์ประจำวันที่มีอยู่ภายในสำนักงาน

4.3.2.1 ผลที่ได้จากการทดสอบการเหนี่ยวนำ

ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.51



ภาพที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ของอุปกรณ์แต่ละชนิดต่อการเหนี่ยวนำของวงจรส่ง

4.3.3 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดสอบการปรับความถี่วงจรสวิทช์ส่งนั้น พบว่าสามารถควบคุมพลังงานในการส่งออกได้จริงตามที่คาดไว้ และจะมีค่ากำลังงานสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์

จากการทดสอบการเหนี่ยวนำของอุปกรณ์มีโลหะภายในสำนักงานและวงจรชาร์จไร้สายส่งพบว่า เมื่อมีสิ่งแปลกปลอมที่ไม่ใช่วงจรชาร์จรับปรากฏอยู่ในบริเวณวงจรส่ง อุปกรณ์แต่ละชนิดมีผลต่อการเหนี่ยวนำแตกต่างกัน ซึ่งกระแสเหนี่ยวนำเหล่านี้อาจสร้างความร้อนและเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์นั้นๆ ได้ หากไม่มีการควบคุมหรือสื่อสารระหว่างตัวส่งและตัวรับ

4.4 การทดสอบระบบชาร์จไร้สายในโมเดลรถฟอร์คลิฟท์

— แรงดันขณะแบตเตอรี่เต็ม: 6.78V

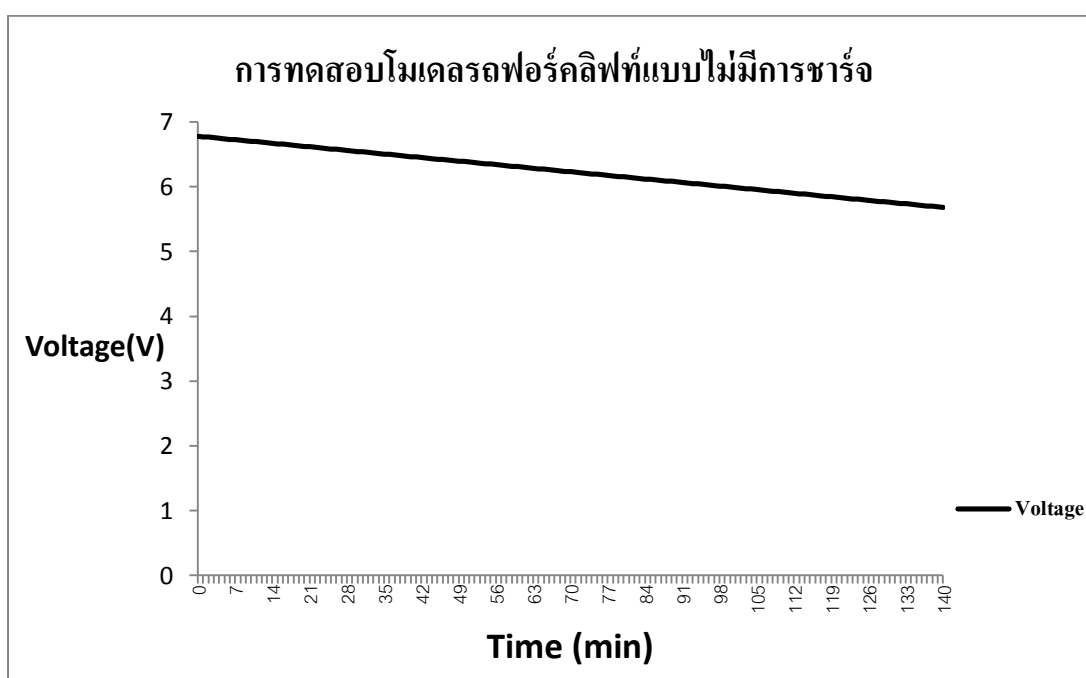
4.4.1 การทดสอบโมเดลรถฟอร์คลิฟท์แบบไม่มีการชาร์จ

เวลาเริ่มต้น (Start time): 3:30 PM

เวลาสิ้นสุด (End time): 5:50 PM

เวลาทั้งหมด (Total time): 140 min (2h 20 min)

แรงดันคงเหลือ (Remaining Voltage): 5.65V



ภาพที่ 4.52 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเริ่มต้นและสิ้นสุดในแบตเตอรี่ต่อเวลาเมื่อไม่มีการชาร์จ

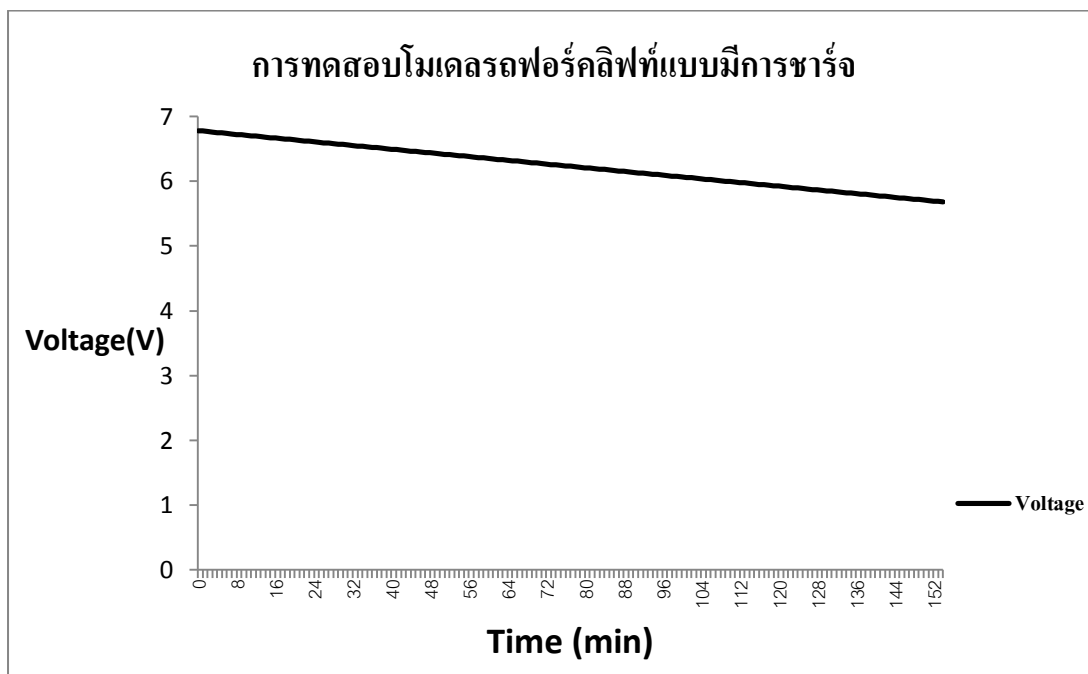
4.4.2 การทดสอบโมเดลรถฟอร์คลิฟท์แบบมีการชาร์จ

เวลาเริ่มต้น (Start time): 1:50 PM

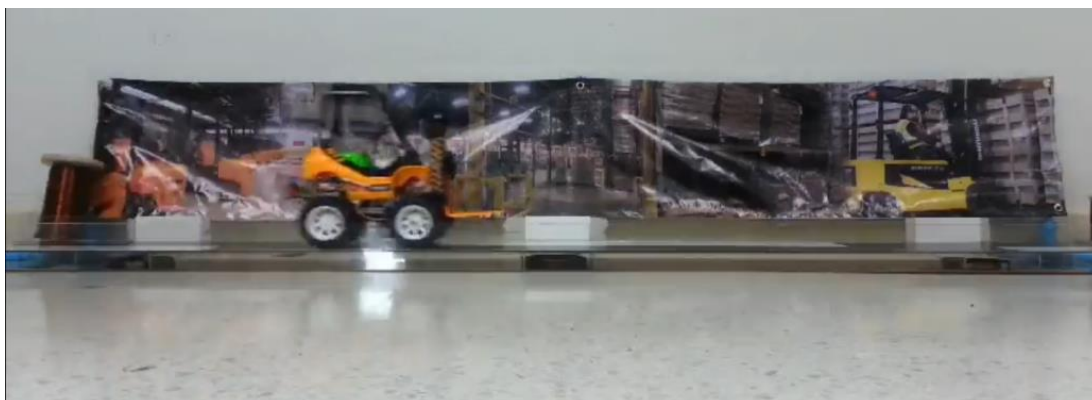
เวลาสิ้นสุด (End time): 4:24 PM

เวลาทั้งหมด (Total time): 154 min (2h 34 min)

แรงดันคงเหลือ (Remaining Voltage): 5.65V



ภาพที่ 4.53 กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันเริ่มต้นและสิ้นสุดในแบตเตอรี่ต่อเวลาเมื่อมีการชาร์จ



ภาพที่ 4.54 การทดลองวิ่งบนราง

4.4.3 สรุปผลและวิเคราะห์การทดลอง

จากการทดลองนำโมเดลรถฟอร์คลิฟท์มาใช้กับระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายนั้นพบว่าสามารถยืดระยะเวลาการทำงานของรถฟอร์คลิฟท์ได้จากเดิม 10 %

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองนำโมเดลรถฟอร์คลิฟท์มาใช้กับระบบการชาร์จแบตเตอรี่แบบไร้สายนั้นพบว่าสามารถยืดระยะเวลาการทำงานของรถฟอร์คลิฟท์ได้จากเดิม 10 % และหากมีผู้สนใจนำโครงการนี้ไปพัฒนาต่อยอด ควรศึกษาวิธีการและหลักการเกี่ยวกับการส่งพลังงานไร้สายหรือ Know how ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และควรมีพื้นฐานด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังจึงจะเป็นการดี ซึ่งแนวทางหรือหัวข้อในการแก้ปัญหาต่อมิดังนี้

5.1 การพัฒนาการออกแบบขดลวด

ควรศึกษาและหาข้อมูลเกี่ยวกับเบอร์ขดลวดที่เหมาะสมและสาเหตุที่นำมาใช้งาน ซึ่งสามารถพัฒนาออกแบบลักษณะหรือวิธีการพันขดลวดแบบต่างๆ เพื่อให้ฟลักซ์แม่เหล็กเดินทางผ่านอากาศได้ดียิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชุดรับ-ส่งพลังงานแบบไร้สาย

5.2 การเลือกย่านความถี่

การเลือกใช้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ใช้ในการส่งนั้นมีผลต่อการส่งผ่านพลังงานอย่างแน่นอน ควรเลือกย่านความถี่ที่เหมาะสมกับขดลวดที่ออกแบบหรือควรเลือกใช้ขดลวดที่เหมาะสมกับย่านความถี่นั้นๆที่ต้องการจะใช้งาน การเลือกใช้งานในย่านความถี่ใดๆอาจมีการเกี่ยวข้องกับกระบวนการการสื่อสารระหว่างตัวรับและตัวส่งหรือเป็นกระบวนการๆควบคุมพลังงาน ซึ่งก็มีมาตรฐานในการรับส่งสัญญาณที่แตกต่างกันในแต่ละมาตรฐาน

5.3 การพัฒนางจรฝั่งส่งพลังงาน

เนื่องจากเอาต์พุตที่เป็นแรงดันกระแสสลับของวงจร Half-Bridge Inverter นั้นมีค่าแค่ครึ่งหนึ่งของอินพุตแรงดันกระแสตรง จึงมีความจำเป็นต้องจ่ายแรงดันกระแสตรงค่อนข้างสูง เพียงแต่ต้องการแรงดันในการใช้งานที่ไม่มากนัก ด้วยเหตุนี้จึงแนะนำให้ใช้วงจร Full-Bridge Inverter แทนการใช้ Half-Bridge เนื่องจากแรงดันเอาต์พุตของวงจรแบบ Full-Bridge นั้นมีค่าเท่า

กันกับแรงดันอินพุต และเป็นไปได้ว่าหากเปลี่ยนมาใช้วงจร Full-Bridge Inverter แล้วจะมีกำลังงานสูญเสียน้อยกว่าและประสิทธิภาพดีกว่าวงจรแบบ Half-Bridge ก็เป็นไปได้

5.4 การพัฒนาวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่

หากต้องการนำวงจรควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่แบบเดิมมาใช้งาน ควรเลือกใช้ไอซีประเภทเรกูเลเตอร์ที่มีแรงดันสูญเสียต่ำกว่านี้ซึ่งเป็นอาจเป็นไอซีประเภท LDO (Low Drop-Out) เพื่อจะได้ไม่ต้องจ่ายแรงดันจากวงจรฝั่งส่งพลังงานให้สูงมากนัก

ข้อแนะนำคือควรออกแบบตัวควบคุมการชาร์จที่ละเอียดอ่อนและมีการตรวจสอบสถานะขณะชาร์จให้ลาดยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลให้แบตเตอรี่นั้นมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมากขึ้น หรือพัฒนาชุดควบคุมการชาร์จที่สามารถใช้กับแบตเตอรี่ได้ทุกชนิด

5.5 การพัฒนาโปรโตคอลการสื่อสารระหว่างตัวรับและตัวส่งตามมาตรฐาน Qi

เนื่องจากวงจรฝั่งส่งและวงจรฝั่งรับไม่สามารถสื่อสารถึงกันได้ โครงการนี้จึงทำงานเป็นระบบแบบ Open-loop ซึ่งไม่สามารถควบคุมอะไรได้มากนักเนื่องจากไม่มีการ feedback บางส่วนในวงจรที่ออกแบบไว้ โดยอาจทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานเกิดขึ้นทางด้านฝั่งส่งเมื่อเปิดอยู่เฉยๆ โดยไม่มีวงจรฝั่งรับอยู่ในบริเวณ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีการสื่อสารเพื่อให้รู้ว่ามียูปรณ์ตัวรับอยู่ในบริเวณ อีกทั้งยังสามารถสื่อสารให้ตัวส่งได้รับทราบถึงความแตกต่างของอุปกรณ์แต่ละประเภทซึ่งมีกำลังงานการชาร์จที่ไม่เท่ากันและทำการส่งพลังงานที่เหมาะสมในการชาร์จอุปกรณ์นั้นๆ

5.6 การควบคุมพลังงานของชุดชาร์จด้วยการสื่อสารโดยใช้ microcontroller ในการควบคุมการสวิทช์ของวงจรฝั่งส่ง

หัวข้อในการพัฒนานี้คล้ายกับข้อ 5.5 ซึ่งเมื่อวงจรตัวรับและตัวส่งสื่อสารกันได้แล้ว ควรพัฒนาการควบคุมพลังงานของวงจรฝั่งส่งโดยอาจใช้ microcontroller ทำหน้าที่เป็นตัวจ่ายสัญญาณควบคุมขาเกตของตัวสวิทช์ โดยสามารถปรับค่า Duty Cycle และความถี่ของวงจรได้ โดยอาจเป็นการควบคุมโดยการสื่อสารกับวงจรฝั่งรับแบบ close-loop

เอกสารอ้างอิง

- [1] FORKLIFT CENTER CO., LTD. “Forklift” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.forklift.co.th/>
- [2] Terminus. (2011) “การชาร์จรถยนต์พลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<https://jusc.net/node/2228>
- [3] Nicholas Abbondante. “Intertek - Wireless Power - Cutting the Cord on Electric Vehicles” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://automotivedigest.com/wp-content/uploads/2012/08/Intertek-Wireless-Power-white-paper.pdf>
- [4] วรฐ ทรงฤกษ์ และชารินทร์ ชนเรืองศักดิ์. (2554) “Wireless Power” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://msmisthammasat.blogspot.com/2011/02/wireless-power.html>
- [5] Bobby Schweizer. “Fujitsu Develops a Truly Wireless Charging Solution” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.tested.com/tech/pcs/947-fujitsu-develops-a-truly-wireless-charging-solution/>
- [6] วิชัย อนุรักษ์ถุฑานนท์. “ฟิสิกส์ 2 สำหรับวิศวกร: กฎของฟาราเดย์และการเหนี่ยวนำ” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.rmutphysics.com/charud/scibook/vichaipage/chap4.pdf>
- [7] ไม่ระบุผู้แต่ง. “สูตรตัวเหนี่ยวนำไฟฟ้า” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://www.bkk.in.th/Attachment/17678/53265_large_%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%E0%B9%91%E0%B9%91_%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.doc

- [8] MY HF QSO. “การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดแกนอากาศ” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://www.hs8jyx.com/html/calculating_practical_inductors.ht
- [9] Learn-about-electronics.com. “ตารางขนาดขดลวดทองแดงมาตรฐาน AWG” (ออนไลน์)
สืบค้นจาก: <http://www.learn-about-electronics.com/images/awg-table1.gif>
- [10] Rashid, M. H. (2004). “Power Electronics: Circuit Devices and Applications”
New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc.
- [11] Wikipedia, Roonie.02. (2013) “Single Phase Half Bridge Inverter” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
http://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C:Single_Phase_Half_Bridge_Inverter.JPG
- [12] Power Electronics A to Z. “Power MOSFET” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.completepowerelectronics.com/power-devices/power-mosfet/>
- [13] SUNROM TECHNOLOGIES. “Wireless Power Transfer Modules” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.sunrom.com/288>
- [14] Fairchild Semiconductor. (2013). “RFP50N06, Data Sheet” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<https://www.fairchildsemi.com/ds/RF/RFP50N06.pdf>
- [15] Texas Instruments. (2014). “TL494, Data Sheet” (ออนไลน์) สืบค้นจาก:
<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
- [16] วุฒิพันธ์ ทองสวี วรพงษ์ สุวรรณไทร จักรพันธ์ อัจฉริยตระกูล และชาคริต โรจนกิตติภักดี
(2552) “มอเตอร์กระแสตรงควบคุมโดยตัวควบคุมแบบอนาล็อก” วิทยานิพนธ์บัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

- [17] Tahmid, S. M. (2013). “Using the high-low side driver IR2110 - explanation and plenty of example circuits” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://tahmidmc.blogspot.com/2013/01/using-high-low-side-driver-ir2110-with.html>
- [18] International Rectifier. “IR2110, Data Sheet” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>
- [19] RS Components Co., Ltd. “6V Lead Acid Rechargeable Battery” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://thailand.rs-online.com/web/p/lead-acid-rechargeable-batteries/7270388/>
- [20] Fairchild Semiconductor. (2011) “LM350, Data Sheet” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.fairchildsemi.com/ds/LM/LM350.pdf>
- [21] บริษัท อีทีที จำกัด. “STM32F4 DISCOVERY” (ออนไลน์) สืบค้นจาก: <http://www.etteam.com/prod2012/stm32/STM32F4-DISCOVERY.html>

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

ตารางขดลวดทองแดงมาตรฐาน AWG

AWG	Diameter (inches)	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Resistance (Ohms / 1000ft)	Resistance (Ohms / km)	Max Current (Amperes)	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.45	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64516	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	105	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0007	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 kHz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 kHz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.6	41.904	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40088	0.129	40.81	133.8508	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz
28	0.0126	0.32004	0.081	64.9	212.872	0.226	170 kHz
29	0.0113	0.28702	0.0642	81.83	268.4024	0.182	210 kHz
30	0.01	0.254	0.0509	103.2	338.496	0.142	270 kHz
31	0.0089	0.22508	0.0404	130.1	426.728	0.113	340 kHz
32	0.008	0.2032	0.032	164.1	538.248	0.091	430 kHz
33	0.0071	0.18034	0.0254	206.9	678.632	0.072	540 kHz
34	0.0063	0.16002	0.0201	260.9	855.752	0.056	690 kHz
35	0.0056	0.11224	0.016	329	1079.12	0.044	870 kHz
36	0.005	0.127	0.0127	414.8	1380	0.035	1100 kHz
37	0.0045	0.1143	0.01	523.1	1715	0.0289	1350 kHz
38	0.004	0.1016	0.00797	659.6	2163	0.0228	1750 kHz
39	0.0035	0.0889	0.00632	831.8	2728	0.0175	2250 kHz
40	0.0031	0.07874	0.00501	1049	3440	0.0137	2900 kHz

ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข

โปรแกรมควบคุมการวิ่งของโมเดลรถฟอร์คลิฟท์

```

#include "stm32f4xx.h"
#include "main.h"
#define ADC3_DR_ADDRESS    ((uint32_t)0x4001224C)
// #define Speed_Motor_Hi    70
#define Speed_Motor_Low    80
#define bit_L    160
#define bit_R    150
TIM_TimeBaseInitTypeDef    TIM_TimeBaseStructure;
TIM_OCInitTypeDef    TIM_OCInitStructure;
ADC_InitTypeDef    ADC_InitStructure;
ADC_CommonInitTypeDef    ADC_CommonInitStructure;
DMA_InitTypeDef    DMA_InitStructure;
GPIO_InitTypeDef    GPIO_InitStructure;
static __IO uint32_t TimingDelay;
uint16_t CCR1_Val = 333;
uint16_t CCR2_Val = 249;
uint16_t CCR3_Val = 166;
uint16_t CCR4_Val = 83;
uint16_t PrescalerValue = 0;
uint16_t PeriodValue = 665;
uint16_t ADC3ConvertedValue = 0;
uint16_t ADC2ConvertedValue = 0;
uint16_t sensor_L,sensor_R;
int Speed_Motor_Hi=75;
uint8_t Duty_Motor_Left=0;
uint8_t Duty_Motor_Right=0;
int Left = 0;
int Right = 0;
#ifdef __GNUC__
#define PUTCHAR_PROTOTYPE int __io_putchar(int ch)

```

```
#else
#define PUTCHAR_PROTOTYPE int fputc(int ch, FILE *f)
#endif /* __GNUC__ */
void SysTick_Setup(void);
void PWM_Output_Setup(void);
void ADC3_Setup(void);
void ADC2_Setup(void);
void TIM_Config(void);
static void USART_Config(void);
void Forward(void);
void Backward(void);
void Stop(void);
void Read_ADC(void);
void Delay(__IO uint32_t nTime);
void TimingDelay_Decrement(void);
int main(void)
{
    char ADC_2[40];
        int run=1,count=0;
    PWM_Output_Setup();
    SysTick_Setup();
    ADC2_Setup();
    ADC3_Setup();
    USART_Config();
    ADC_SoftwareStartConv(ADC2);
    ADC_SoftwareStartConv(ADC3);
    printf("\n\rUSART Printf Example: retarget the C library printf function to the USART\n\r");
    while (1)
    {
        Read_ADC();
```

```

sprintf(ADC_2,"ADC3 : %d ADC2 : %d L : %d R : %d", sensor_L, sensor_R, Left, Right);
printf("\r%s\r",ADC_2);
        Delay(5);
        while(Left==0&&Right==1)
        Delay(5);
        Read_ADC();
        sprintf(ADC_2,"ADC3 : %d ADC2 : %d L : %d R : %d", sensor_L,
sensor_R, Left, Right);
        printf("\r%s\r",ADC_2);
        while(Left==1&&Right==0&&run==0)
        {
                Stop();
                Delay(10000); //timer
                Speed_Motor_Hi=100;
                Backward();
                Delay(2000);
                run++;
        }
        Delay(5);
        Read_ADC();
        sprintf(ADC_2,"ADC3 : %d ADC2 : %d L : %d R : %d", sensor_L,
sensor_R, Left, Right);
        printf("\r%s\r",ADC_2);
        while(Left==1&&Right==0&&run==1)
        {
                Stop();
                Delay(10000); //timer
                Speed_Motor_Hi=100; //set Hi speed
                Forward();
                Delay(2000);

```

```

        run--;
    }
}
}
void SysTick_Setup(void)
{
    if (SysTick_Config(SystemCoreClock / 1000))
    {
        while (1);
    }
}
void Delay(__IO uint32_t nTime)
{
    TimingDelay = nTime;
    while(TimingDelay != 0);
}
void TimingDelay_Decrement(void)
{
    if (TimingDelay != 0x00)
    {
        TimingDelay--;
    }
}
void PWM_Output_Setup(void)
{
    TIM_Config();
    PrescalerValue = (uint16_t) ((SystemCoreClock / 2) / 28000000) - 1;
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_Period = 665;
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_Prescaler = PrescalerValue;
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_ClockDivision = 0;
}

```

```

TIM_TimeBaseStructure.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up;
TIM_TimeBaseInit(TIM3, &TIM_TimeBaseStructure);
TIM_OCInitStructure.TIM_OCMode = TIM_OCMode_PWM1;
TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;
TIM_OCInitStructure.TIM_OCPolarity = TIM_OCPolarity_High;
TIM_OC1Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OC1PreloadConfig(TIM3, TIM_OCPreload_Enable);
TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR2_Val;
TIM_OC2Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OC2PreloadConfig(TIM3, TIM_OCPreload_Enable);
TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR3_Val;
TIM_OC3Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OC3PreloadConfig(TIM3, TIM_OCPreload_Enable);
TIM_OCInitStructure.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR4_Val;
TIM_OC4Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OC4PreloadConfig(TIM3, TIM_OCPreload_Enable);
TIM_ARRPreloadConfig(TIM3, ENABLE);
TIM_Cmd(TIM3, ENABLE);
}

void ADC2_Setup(void)
{
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC, ENABLE);
RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC2, ENABLE);
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_1;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL ;
}

```

```

GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
ADC_InitStructure.ADC_Resolution = ADC_Resolution_12b;
ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = ENABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConvEdge = ADC_ExternalTrigConvEdge_None;
ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
ADC_InitStructure.ADC_NbrOfConversion = 1;
ADC_Init(ADC2, &ADC_InitStructure);
ADC_RegularChannelConfig(ADC2, ADC_Channel_11, 1, ADC_SampleTime_480Cycles);
ADC_Cmd(ADC2, ENABLE);
}
void ADC3_Setup(void)
{
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC, ENABLE);
RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC3, ENABLE);
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_2;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL ;
GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
ADC_InitStructure.ADC_Resolution = ADC_Resolution_12b;
ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = ENABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConvEdge = ADC_ExternalTrigConvEdge_None;
ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
ADC_InitStructure.ADC_NbrOfConversion = 1;
ADC_Init(ADC3, &ADC_InitStructure);
ADC_RegularChannelConfig(ADC3, ADC_Channel_12, 1, ADC_SampleTime_480Cycles);
ADC_Cmd(ADC3, ENABLE);
}
void TIM_Config(void)

```



```

{
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM3, ENABLE);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC | RCC_AHB1Periph_GPIOB,
ENABLE);
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 ;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP ;
    GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_0 | GPIO_Pin_1;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_100MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP ;
    GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);
    GPIO_PinAFConfig(GPIOC, GPIO_PinSource6, GPIO_AF_TIM3);
    GPIO_PinAFConfig(GPIOC, GPIO_PinSource7, GPIO_AF_TIM3);
    GPIO_PinAFConfig(GPIOB, GPIO_PinSource0, GPIO_AF_TIM3);
    GPIO_PinAFConfig(GPIOB, GPIO_PinSource1, GPIO_AF_TIM3);
}
static void USART_Config(void)
{
    USART_InitTypeDef USART_InitStructure;
    USART_InitStructure.USART_BaudRate = 115200;
    USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
    USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1;
    USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No;
    USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None;
    USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx;

```

```

    STM_EVAL_COMInit(COM1, &USART_InitStructure);
}
void Forward(void)
{
    Duty_Motor_Left = Speed_Motor_Hi;
    Duty_Motor_Right = Speed_Motor_Hi;
    CCR1_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Left/100)*PeriodValue);
    CCR2_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Right/100)*PeriodValue);
    CCR3_Val = 0;
    CCR4_Val = 0;
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;
    TIM_OC1Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR2_Val;
    TIM_OC2Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR3_Val;
    TIM_OC3Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR4_Val;
    TIM_OC4Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
}
void Backward(void)
{
    Duty_Motor_Left = Speed_Motor_Hi;
    Duty_Motor_Right = Speed_Motor_Hi;
    CCR1_Val = 0;
    CCR2_Val = 0;
    CCR3_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Left/100)*PeriodValue);
    CCR4_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Right/100)*PeriodValue);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;
    TIM_OC1Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
}

```

```

TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR2_Val;
TIM_OC2Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR3_Val;
TIM_OC3Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR4_Val;
TIM_OC4Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
}

void Stop(void)
{
    Duty_Motor_Left = Speed_Motor_Hi;
    Duty_Motor_Right = Speed_Motor_Hi;
    CCR1_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Left/100)*PeriodValue);
    CCR2_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Right/100)*PeriodValue);
    CCR3_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Left/100)*PeriodValue);
    CCR4_Val = (uint16_t)(((float)Duty_Motor_Right/100)*PeriodValue);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR1_Val;
    TIM_OC1Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR2_Val;
    TIM_OC2Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR3_Val;
    TIM_OC3Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
    TIM_OCInitStructure.TIM_Pulse = CCR4_Val;
    TIM_OC4Init(TIM3, &TIM_OCInitStructure);
}

void Read_ADC(void)
{
    while(ADC_GetFlagStatus(ADC2, ADC_FLAG_EOC) == RESET);
    ADC2ConvertedValue = ADC_GetConversionValue(ADC2);
    while(ADC_GetFlagStatus(ADC3, ADC_FLAG_EOC) == RESET);
    ADC3ConvertedValue = ADC_GetConversionValue(ADC3);
}

```

```
        sensor_L=ADC3ConvertedValue;
        sensor_R=ADC2ConvertedValue;
    if(ADC3ConvertedValue<bit_L) Left=0;
    else if(ADC3ConvertedValue>bit_L) Left=1;
    if(ADC2ConvertedValue<bit_R) Right=0;
    else if(ADC2ConvertedValue>bit_R) Right=1;
}

PUTCHAR_PROTOTYPE
{
    USART_SendData(EVAL_COM1, (uint8_t) ch);
    while (USART_GetFlagStatus(EVAL_COM1, USART_FLAG_TC) == RESET)
    {}
    return ch;
}

#ifdef USE_FULL_ASSERT
void assert_failed(uint8_t* file, uint32_t line)
{
    while (1)
    {}
}
#endif
```

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค
ตารางผลการทดสอบการทดลองขั้นที่ 1

การทดลองที่ 1 และ 2

ตรงกัน ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency
	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	440	5.28	6.98	500	3.49	66.10
3 mm	12	420	5.04	7.33	470	3.45	68.36
5 mm	12	490	5.88	6.48	430	2.79	47.39
7 mm	12	350	4.20	4.22	290	1.22	29.14
9 mm	12	300	3.60	2.93	200	0.59	16.28
11 mm	12	260	3.12	2.00	140	0.28	8.97
13 mm	12	250	3.00	1.58	110	0.17	5.79
15 mm	12	250	3.00	1.47	100	0.15	4.90
17 mm	12	250	3.00	1.30	90	0.12	3.90
19 mm	12	240	2.88	0.98	65	0.06	2.22
21 mm	12	240	2.88	0.84	60	0.05	1.75
23 mm	12	240	2.88	0.60	43	0.03	0.90
25 mm	12	240	2.88	0.54	39	0.02	0.74
27 mm	12	240	2.88	0.24	17	0.00	0.14
29 mm	12	240	2.88	0.09	7	0.00	0.02
31 mm	12	240	2.88	0.10	7	0.00	0.02
33 mm	12	240	2.88	0.07	5	0.00	0.01
35 mm	12	240	2.88	0.06	3	0.00	0.01
37 mm	12	240	2.88	0.11	6	0.00	0.02
39 mm	12	240	2.88	0.04	3	0.00	0.00

เหลี่ยม 0.5 cm ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency
	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	420	5.04	7.23	470	3.40	67.42
3 mm	12	370	4.44	6.12	397	2.43	54.71
5 mm	12	380	4.56	6.20	396	2.45	53.77
7 mm	12	350	4.20	4.22	267	1.13	26.84
9 mm	12	300	3.60	3.94	236	0.93	25.85
11 mm	12	210	2.52	2.05	126	0.26	10.23
13 mm	12	205	2.46	1.48	91	0.13	5.45
15 mm	12	205	2.46	1.00	63	0.06	2.55
17 mm	12	200	2.40	0.81	52	0.04	1.76
19 mm	12	200	2.40	0.73	46	0.03	1.41
21 mm	12	200	2.40	0.70	35	0.02	1.03
23 mm	12	200	2.40	0.64	28	0.02	0.76
25 mm	12	200	2.40	0.37	16	0.01	0.24
27 mm	12	200	2.40	0.16	7	0.00	0.05
29 mm	12	200	2.40	0.10	5	0.00	0.02
31 mm	12	200	2.40	0.08	4	0.00	0.01
33 mm	12	200	2.40	0.07	3	0.00	0.01
35 mm	12	200	2.40	0.06	3	0.00	0.01
37 mm	12	200	2.40	0.18	8	0.00	0.06
39 mm	12	200	2.40	0.09	4	0.00	0.02

หลอด 1 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	420	5.04	5.17	340	1.76	34.88
3 mm	12	310	3.72	3.70	245	0.91	24.33
5 mm	12	310	3.72	3.55	232	0.82	22.14
7 mm	12	290	3.48	3.37	212	0.71	20.53
9 mm	12	270	3.24	3.20	192	0.61	18.95
11 mm	12	200	2.40	1.64	101	0.16	6.87
13 mm	12	205	2.46	1.24	76	0.09	3.84
15 mm	12	200	2.40	0.88	55	0.05	2.01
17 mm	12	200	2.40	0.70	45	0.03	1.31
19 mm	12	200	2.40	0.57	36	0.02	0.86
21 mm	12	200	2.40	0.54	27	0.01	0.60
23 mm	12	200	2.40	0.31	15	0.00	0.20
25 mm	12	200	2.40	0.32	14	0.00	0.18
27 mm	12	200	2.40	0.13	6	0.00	0.03
29 mm	12	200	2.40	0.09	4	0.00	0.02
31 mm	12	200	2.40	0.07	3	0.00	0.01
33 mm	12	200	2.40	0.07	3	0.00	0.01
35 mm	12	200	2.40	0.15	7	0.00	0.04
37 mm	12	200	2.40	0.08	3	0.00	0.01
39 mm	12	200	2.40	0.05	3	0.00	0.01

หลอด 1.5 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	310	3.72	3.42	230	0.79	21.15
3 mm	12	260	3.12	2.20	147	0.32	10.33
5 mm	12	280	3.36	1.88	124	0.23	6.95
7 mm	12	280	3.36	1.69	108	0.18	5.42
9 mm	12	250	3.00	1.72	106	0.18	6.07
11 mm	12	200	2.40	1.04	64	0.07	2.77
13 mm	12	205	2.46	0.74	46	0.03	1.38
15 mm	12	205	2.46	0.65	41	0.03	1.08
17 mm	12	200	2.40	0.45	29	0.01	0.55
19 mm	12	200	2.40	0.22	14	0.00	0.13
21 mm	12	200	2.40	0.23	12	0.00	0.11
23 mm	12	200	2.40	0.13	7	0.00	0.04
25 mm	12	200	2.40	0.12	5	0.00	0.03
27 mm	12	200	2.40	0.08	4	0.00	0.01
29 mm	12	200	2.40	0.06	3	0.00	0.01
31 mm	12	200	2.40	0.06	3	0.00	0.01
33 mm	12	200	2.40	0.08	4	0.00	0.01
35 mm	12	200	2.40	0.08	3	0.00	0.01
37 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 2 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	240	2.88	0.89	60	0.05	1.85
3 mm	12	260	3.12	0.97	66	0.06	2.04
5 mm	12	250	3.00	0.56	37	0.02	0.70
7 mm	12	250	3.00	0.84	54	0.05	1.52
9 mm	12	240	2.88	0.73	46	0.03	1.16
11 mm	12	200	2.40	0.23	14	0.00	0.14
13 mm	12	200	2.40	0.11	7	0.00	0.03
15 mm	12	200	2.40	0.08	5	0.00	0.02
17 mm	12	200	2.40	0.10	7	0.00	0.03
19 mm	12	200	2.40	0.06	4	0.00	0.01
21 mm	12	200	2.40	0.06	3	0.00	0.01
23 mm	12	200	2.40	0.07	4	0.00	0.01
25 mm	12	200	2.40	0.07	3	0.00	0.01
27 mm	12	200	2.40	0.15	6	0.00	0.04
29 mm	12	200	2.40	0.06	3	0.00	0.01
31 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 2.5 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	240	2.88	0.09	6	0.00	0.02
3 mm	12	250	3.00	0.04	3	0.00	0.00
5 mm	12	250	3.00	0.04	3	0.00	0.00
7 mm	12	250	3.00	0.05	3	0.00	0.01
9 mm	12	240	2.88	0.06	4	0.00	0.01
11 mm	12	200	2.40	0.05	3	0.00	0.01
13 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	12	200	2.40	0.06	4	0.00	0.01
17 mm	12	200	2.40	0.12	8	0.00	0.04
19 mm	12	200	2.40	0.04	3	0.00	0.00
21 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 3 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	240	2.88	0.09	6	0.00	0.02
3 mm	12	250	3.00	0.06	4	0.00	0.01
5 mm	12	250	3.00	0.07	5	0.00	0.01
7 mm	12	250	3.00	0.00	0	0.00	0.00
9 mm	12	240	2.88	0.00	0	0.00	0.00
11 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
13 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 3.5 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	240	2.88	0.45	31	0.01	0.49
3 mm	12	240	2.88	0.07	5	0.00	0.01
5 mm	12	250	3.00	0.04	3	0.00	0.00
7 mm	12	250	3.00	0.12	8	0.00	0.03
9 mm	12	240	2.88	0.05	3	0.00	0.01
11 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
13 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	12	200	2.40	0.00	0	0.00	0.00

การทดลองที่ 3 และ 4

ตรงกัน ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency η (%)
	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	
1 mm	9	200	1.80	6.63	216	1.43	79.56
3 mm	9	100	0.90	4.44	153	0.68	75.63
5 mm	9	80	0.72	3.89	134	0.52	72.56
7 mm	9	70	0.63	3.65	126	0.46	73.17
9 mm	9	40	0.36	1.91	66	0.13	34.96
11 mm	9	20	0.18	0.14	5	0.00	0.37
13 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00

เหลี่ยม 0.5 cm ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency η (%)
	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	
1 mm	9	200	1.80	6.22	215	1.34	74.29
3 mm	9	90	0.81	3.95	137	0.54	66.61
5 mm	9	70	0.63	3.45	119	0.41	64.95
7 mm	9	60	0.54	3.25	113	0.37	67.89
9 mm	9	30	0.27	0.11	4	0.00	0.16
11 mm	9	30	0.27	0.12	4	0.00	0.18
13 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 1 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	9	30	0.27	0.13	5	0.00	0.23
3 mm	9	50	0.45	2.51	87	0.22	48.75
5 mm	9	40	0.36	1.45	51	0.07	20.34
7 mm	9	30	0.27	0.07	3	0.00	0.07
9 mm	9	30	0.27	0.12	4	0.00	0.18
11 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
13 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	9	30	0.27	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 1.5 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	9	30	0.27	0.01	1	0.00	0.00
3 mm	9	30	0.27	0.11	0	0.00	0.02
5 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
7 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
9 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
11 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
13 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	9	20	0.18	0.00	0	0.00	0.00

หลอด 2 cm	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
3 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
5 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
7 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
9 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
11 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
13 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
15 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
17 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
19 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
21 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
23 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
25 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
27 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
29 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
31 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
33 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
35 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
37 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00
39 mm	9	25	0.23	0.00	0	0.00	0.00

การทดลองที่ 5

ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency
ระยะห่าง (mm)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (mA)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	12	220	2.64	3.06	96.60	0.30	11.20
3 mm	12	220	2.64	1.72	56.10	0.10	3.66
5 mm	12	210	2.52	0.18	5.90	0.00	0.04
7 mm	12	210	2.52	0.02	0.80	0.00	0.00
9 mm	12	210	2.52	0	0	0.00	0.00
11 mm	12	210	2.52	0	0	0.00	0.00
13 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
15 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
17 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
19 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
21 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
23 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
25 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
27 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
29 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
31 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
33 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
35 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
37 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00
39 mm	12	200	2.40	0	0	0.00	0.00

ภาคผนวก ง

ภาคผนวก ง
ตารางผลการทดสอบการทดลองขั้นที่ 2

การทดลองโดยแนวคลดตรงกันโดยนำไปขารังเบตเตอร์

ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	η (%)
1 mm	15	1.2	18	6.45	1	6.45	35.83
3 mm	15	1.2	18	6.45	1	6.45	35.83
5 mm	15	1.2	18	6.45	0.9	5.805	32.25
7 mm	15	1.3	19.5	6.46	0.9	5.814	29.82
9 mm	15	1.3	19.5	6.46	0.9	5.814	29.82
11 mm	15	1.3	19.5	6.46	0.9	5.814	29.82
13 mm	15	1.3	19.5	6.46	0.9	5.814	29.82
15 mm	15	1.5	22.5	6.46	0.8	5.168	22.97
17 mm	15	1.5	22.5	6.46	0.8	5.168	22.97
19 mm	15	1.7	25.5	6.46	0.8	5.168	20.27
21 mm	15	1.8	27	6.46	0.8	5.168	19.14
23 mm	15	1.9	28.5	6.46	0.8	5.168	18.13
25 mm	15	1.9	28.5	6.46	0.7	4.522	15.87
27 mm	15	2	30	6.46	0.7	4.522	15.07
29 mm	15	2	30	6.46	0.7	4.522	15.07
31 mm	15	2	30	6.47	0.7	4.529	15.10
33 mm	15	2	30	6.46	0.7	4.522	15.07
35 mm	15	2	30	6.46	0.65	4.199	14.00
37 mm	15	2.1	31.5	6.43	0.6	3.858	12.25
39 mm	15	2.1	31.5	6.33	0	3.165	10.05

การทดลองโดยแนวคลดตรงกันที่ระยะห่างเท่าๆกันเพื่อหาการส่งผ่านกำลังงานสูงสุด

ค่าความต้านทาน (Ω)	Input			Output			Efficiency
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	η (%)
1	20	1.2	24	2.93	2.4	7.03	29.30
2	20	1.2	24	4.75	2.2	10.45	43.54
2.5	20	1.5	30	5.6	2.1	11.76	39.20
3	20	1.6	32	6	2	12.00	37.50
3.5	20	1.8	36	6.06	1.7	10.30	28.62
4	20	1.8	36	6.16	1.5	9.24	25.67
5	20	2	40	6.3	1.2	7.56	18.90
6	20	2	40	6.41	1	6.41	16.03
7	20	2.2	44	6.48	1	6.48	14.73
8	20	2.2	44	6.55	0.9	5.90	13.40
9	20	2.2	44	6.59	0.9	5.93	13.48
10	20	2.2	44	6.63	0.8	5.30	12.05

การทดลองประสิทธิภาพระหว่างขดลวดวงกลมกับขดลวดสี่เหลี่ยมที่มีจำนวนรอบเท่ากัน

วงกลม ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency η (%)
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	
1 mm	20	0.81	16	4.55	1.5	6.83	42.13
3 mm	20	1	20	5.15	1.6	8.24	41.20
5 mm	20	1.2	24	5.24	1.7	8.91	37.12
7 mm	20	1.3	26	5.24	1.7	8.91	34.26
9 mm	20	1.5	30	5.24	1.7	8.91	29.69
11 mm	20	1.6	32	6	2.0	12.00	37.50
13 mm	20	1.7	34	5.23	2.0	10.46	30.76
15 mm	20	1.7	34	5.26	2.2	11.31	33.26
17 mm	20	2.2	44	5.26	1.7	8.94	20.32
19 mm	20	2.2	44	5.27	1.7	8.96	20.36
21 mm	20	2.2	44	5.27	1.7	8.96	20.36
23 mm	20	2.4	48	5	1.7	8.50	17.71
25 mm	20	2.4	48	4.9	1.6	7.84	16.33
27 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88
29 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88
31 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88
33 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88
35 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88
37 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88
39 mm	20	2.8	56	4.9	1.7	8.33	14.88

สี่เหลี่ยม ระยะห่าง (mm)	Input			Output			Efficiency η (%)
	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	Power (Watt)	
1 mm	20	1	20	5.15	1.7	8.76	43.78
3 mm	20	1	20	5.33	1.7	9.06	45.31
5 mm	20	1.7	34	5.33	1.7	9.06	26.65
7 mm	20	1.7	34	5.33	1.7	9.06	26.65
9 mm	20	1.7	34	5.33	1.7	9.06	26.65
11 mm	20	2	40	5.42	1.7	9.21	23.04
13 mm	20	2	40	5.42	1.7	9.21	23.04
15 mm	20	2	40	5.42	1.7	9.21	23.04
17 mm	20	2	40	5.42	1.7	9.21	23.04
19 mm	20	2	40	5.42	1.7	9.21	23.04
21 mm	20	3	60	5.32	1.7	9.04	15.07
23 mm	20	3	60	5.32	1.7	9.04	15.07
25 mm	20	3	60	5.32	1.7	9.04	15.07
27 mm	20	3	60	5.32	1.7	9.04	15.07
29 mm	20	3	60	5.32	1.7	9.04	15.07
31 mm	20	3	60	5.32	1.7	9.04	15.07
33 mm	20	4	80	5.33	1.6	8.53	10.66
35 mm	20	4	80	5.32	1.6	8.51	10.64
37 mm	20	4	80	5.32	1.6	8.51	10.64
39 mm	20	4	80	5.32	1.6	8.51	10.64

การทดสอบการปรับกำลังงานไฟฟ้าด้วยการปรับความถี่ตัวสวิทชิงฝั่งส่ง

Frequency (kHz)	Input Power (W)	Output Power (W)	Frequency (kHz)	Input Power (W)	Output Power (W)
1	2	0.01	16	30	11.02
2	3	0.06	17	24	9.66
3	4	0.23	18	20	7.41
4	3	0.04	19	16	5.15
5	6	0.85	20	12	3.30
6	4	0.32	21	10	2.39
7	3	0.04	22	8	1.63
8	4	0.03	23	6	1.15
9	4	0.04	24	4	0.83
10	5	0.14	25	4	0.58
11	6	0.48	26	4	0.51
12	8	1.27	27	4	0.34
13	16	3.54	28	4	0.30
14	24	7.77	29	3	0.28
15	30	11.66	30	4	0.21

การทดสอบการเหนี่ยวนำของอุปกรณ์มีโลหะภายในสำนักงานและวงจรถาร์จไร้สายฝั่งส่ง

อุปกรณ์	No Load	กรรไกร	ไม้บรรทัด	คัตเตอร์	ตู้เหล็ก	มือถือ	โน้ตบุ๊ก	Tablet	iPad Mini
กระแสเหนี่ยวนำ (A)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.8	0.6	0.6	1.5	2.2

การทดสอบระบบชาร์จไร้สายในโมเดลรถฟอร์คลิฟท์

ไม่มีการชาร์จ	
เวลา (min)	แรงดัน (V)
0	6.78
10	6.70
20	6.62
30	6.54
40	6.47
50	6.39
60	6.31
70	6.23
80	6.15
90	6.07
100	5.99
110	5.92
120	5.84
130	5.76
140	5.68

มีการชาร์จ	
เวลา (min)	แรงดัน (V)
0	6.78
10	6.71
20	6.64
30	6.57
40	6.49
50	6.42
60	6.35
70	6.28
80	6.21
90	6.14
100	6.07
110	5.99
120	5.92
130	5.85
140	5.78
150	5.71
154	5.68

รางวัลและเกียรติบัตร

โครงการนี้ได้รับรางวัลชมเชยลำดับที่สี่จากเวทีการแข่งขัน Go Green in the City 2013 ของบริษัท Schneider Electric ณ โรงแรมแกรนด์ เมอร์เคียว ฟอรั่ม ร่วมกับมหาวิทยาลัยต่างๆทั่วประเทศ เพื่อค้นหาตัวแทนไปแข่งขันที่ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งเป็นการแข่งขันการนำเสนอและสร้างสรรค์ไอเดียหรือแนวคิดด้านนวัตกรรมในการบริหารจัดการพลังงานอย่างอัจฉริยะเพื่อเมืองสีเขียว โดยผ่านรอบคัดเลือกเข้ารอบ 16 ทีม และผ่านเข้ารอบที่สองที่คัดเหลือเพียง 5 ทีมสุดท้าย

