

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เรื่อง

พลวัตของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าไร้สายขนาดเล็กในเชิงวิศวกรรมไฟฟ้า
The Dynamic of Mini Wireless Electric Energy Car
in Electrical Engineering

โดย

กรวิชัย	รังสาคร	6310551400
ศุภกร	ธัญญาหาญ	6310551884
ศุภกร	พงษ์ธีระพล	6310551892

พ.ศ. 2566

พลวัตของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าไร้สายขนาดเล็กในเชิงวิศวกรรมไฟฟ้า
The Dynamic of Mini Wireless Electric Energy Car in Electrical Engineering

โดย

กรวิษฐ์ รังสาคร 6310551400

ศุภกร ฉัญญาหาญ 6310551884

ศุภกร พงษ์ธีระพล 6310551892

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้า

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ.....วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

(ผศ.ดร.เด่นชัย วรเสวต)

อาจารย์กรรมการ.....วันที่ 5 เดือน เมษายน พ.ศ. 2567

(ผศ.ดร.ธนากร ฮ่องเดช)

กรวิษฐ์ รังสาคร ปีการศึกษา 2566

ศุภกร ธัญญาญ ปีการศึกษา 2566

ศุภกร พงษ์ธีระพล ปีการศึกษา 2566

พลวัตของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าไร้สายขนาดเล็กในเชิงวิศวกรรมไฟฟ้า

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า) ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทคัดย่อ

โครงการวิศวกรรมไฟฟ้าฉบับนี้ กล่าวถึงการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกฎของแอมแปร์ผ่านขดลวดสองชุด โดยจะแสดงให้เห็นผ่านการเคลื่อนที่ของโมเดลรถ ซึ่งจะแบ่งวงจรเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกคือวงจรฝั่งส่งกำลังไฟฟ้า จะมีการใช้แรงดันขนาด 13 โวลต์เป็นกระแสสลับโดยใช้ความถี่ 13.56 MHz รวมถึงมีการขยายสัญญาณเพื่อเพิ่มขนาดกำลังไฟฟ้าไปยังขดลวดฝั่งส่งเพื่อให้เหมาะสมในการส่งกำลังไฟฟ้า ส่วนที่สองคือขดลวดทั้งฝั่งส่ง-ฝั่งรับกำลังไฟฟ้าเป็นส่วนที่สำคัญในการส่งกำลังไฟฟ้าโดยใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการส่งกำลังไฟฟ้า โดยขดลวดฝั่งส่งจะติดอยู่กับตัวราง และขดลวดฝั่งรับจะติดอยู่ใต้ท้องรถ ซึ่งใช้โปรแกรม Sonnet ในการออกแบบ โดยสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 4.16 วัตต์ และส่วนสุดท้ายวงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้าจะมีการใช้วงจรเรียงกระแสเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากกำลังที่ส่งมาเป็นกระแสสลับจึงต้องแปลงเป็นกระแสตรงเพื่อให้สามารถใช้กับมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ขับเคลื่อนล้อรถได้ โดยใช้มอเตอร์ 1 ตัวเพื่อขับเคลื่อนล้อหลังทางซ้าย และมีการใช้ตัวเก็บประจุเพื่อเป็นตัวเก็บพลังงานที่จะใช้จ่ายเข้ามอเตอร์ ซึ่งโครงการนี้เป็นการต่อยอดจากโครงการวิศวกรรมไฟฟ้าในหัวข้อ Demonstration of Resonant Wireless Power Transfer using Toy Racing Cars and Tracks (Tanit Wisessri and Chatpisut Promsatarporn, 2022) แต่เดิมนั้นตัวรถสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งทางตรงเท่านั้นและไม่เสถียรมากนักจึงนำโครงการดังกล่าวมาต่อยอดให้ตัวรถสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งทางตรงและทางโค้งหรือทิศทางใดก็ได้ตามทิศของรางและสามารถเคลื่อนได้อย่างราบรื่นและเสถียรและยังสามารถวัดคุณภาพของชิ้นงานได้จากการหาค่ากำลังไฟฟ้า

คำสำคัญ การส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย, ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, พลวัตของรถยนต์, ท่อนำคลื่นแบบเหนี่ยวนำแม่เหล็ก

Koravich Rungsakorn Academic Year 2023

Supakorn Tanyahan Academic Year 2023

Supakorn Phongtheeraphol Academic Year 2023

The Dynamic of Mini Wireless Electric Energy Car in Electrical Engineering

Bachelor's degree in electrical engineering Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering, Kasetsart University

Abstract

This senior project report presents wireless transfer power by using Electromagnetic Wave Theory in Ampere's Law to use the 2 sets of coils. It is shown by car model driving. There are 3 parts of this project. The first is a power transmitter circuit using 13 volts in alternating current and used frequency of 13.56 MHz. And increased power of a signal to the transmitter coil for suitability in wireless transfer power. The next is the 2 sets of coils, the transmitter coil and the receiver coil. They are very important things in wireless transfer power by using Electromagnetic Wave Theory. The transmitter coil dovetails with the track and the receiver coil dovetails with the car model. The software that used to design the 2 sets of the coils is Sonnet. And maximum power that can transfer in wireless is 4.16 watts. The last part is the receiver circuit, which uses a rectifier circuit to convert alternating current to direct current because the coils transfer the power in alternating current and have to convert it to direct current to combine with the direct current motor to drive the wheels by using the motor to drive the left rear wheel. This project developed from a graduated senior project on the topic of Demonstration of Resonant Wireless Power Transfer using Toy Racing Cars and Tracks (Tanit Wisessri and Chatpisut Promsatarporn,2022). At first, the car model can drive in a straight line only and it's not stable. This project improved the car model driving. It can drive along the track in both the straight line and the curved line or along the track in all directions and it can drive stably. And can check the quality of this work by electric power calculating.

Keywords: Wireless Power Transfer, Electromagnetic Wave Theory, The Dynamic of Car, Magneto-inductive waveguide

Department Reference No E5050-DCW-2-2566

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจาก ผศ.ดร.เด่นชัย วรเศวต ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ได้ให้ข้อเสนอ แนวคิดรวมถึงการ แก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธนากร ฮ่องเดช ที่ให้เกียรติมาเป็นอาจารย์กรรมการในการตรวจสอบโครงการเพื่อให้ฉันได้สนใจความรู้ต่างๆได้อย่างสมบูรณ์

ขอบพระคุณรุ่นพี่ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่างๆ ในการใช้ห้องปฏิบัติการรวมถึงข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการนี้รวมทั้งผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการให้คำปรึกษาชี้แนะในโครงการนี้

กรวิชญ์ รังสาคร

ศุภกร ธีญญาหาญ

ศุภกร พงษ์ธีระพล

ผู้จัดทำ

สารบัญ

สารบัญ.....	VI
สารบัญภาพ.....	VIII
สารบัญตาราง.....	X
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	XI
1 บทนำ.....	1
1.1. วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....	1
1.2. ขอบเขตของโครงงาน.....	1
2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1. ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	3
2.2. คุณสมบัติท่อนำคลื่น.....	3
2.3. SubMiniature version A (SMA) Connector.....	4
2.4. ขดลวด (Coil).....	4
2.5. คุณสมบัติทางวัสดุของ FR4 PCB	4
2.6. วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit).....	5
2.6.1. วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier Circuit).....	5
2.6.2. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full wave Rectifier Circuit).....	5
3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงงาน.....	7
3.1 ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทำโครงงาน.....	7
3.1.1. Oscillator.....	7
3.1.2. Amplifier	7
3.2 ซอฟต์แวร์ที่สำคัญที่ใช้ในการทำโครงงาน.....	9
3.2.1. Google Colab.....	9
3.2.2. Sonnet Software (Kasetsart University License).....	9
3.2.3. EasyEDA Std Edition (Free Version).....	10
3.2.4. Autodesk Fusion (Education License).....	10
3.2.5. Ultimaker Cura (Freeware).....	11
4 วิธีการดำเนินโครงงาน.....	12

5 ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์.....	13
5.1. ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย.....	13
5.2. วงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้า.....	29
5.3. ชิ้นงาน 3 มิติ.....	31
5.3.1. การออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ.....	31
5.3.2. การพิมพ์ 3 มิติ.....	34
6 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ.....	37
7 บรรณานุกรม.....	39
ประวัติנס.....	40

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้ในโครงงานนี้.....	2
ภาพที่ 2 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier Circuit).....	5
ภาพที่ 3 วงจรเรียงกระแสมีหม้อแปลงแทปกลาง (Full – Wave Rectifier with Tapping Transformer).....	6
ภาพที่ 4 วงจรบริดจ์ (Full – Wave Bridge Rectifier).....	6
ภาพที่ 5 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Oscillator).....	7
ภาพที่ 6 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier).....	8
ภาพที่ 7 Google Colab Icon.....	9
ภาพที่ 8 Sonnet Software Icon.....	10
ภาพที่ 9 EasyEDA Software Icon.....	10
ภาพที่ 10 Autodesk Fusion Icon.....	11
ภาพที่ 11 Ultimaker Cura Icon.....	11
ภาพที่ 12 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงงาน.....	12
ภาพที่ 13 ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเดี่ยว.....	13
ภาพที่ 14 ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบคู่.....	14
ภาพที่ 15 ตัวกลางทั้ง 3 ชั้นของขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย.....	14
ภาพที่ 16 คุณลักษณะของ Top Layer.....	15
ภาพที่ 17 คุณลักษณะของ Middle Layer.....	15
ภาพที่ 18 คุณลักษณะของ Bottom Layer.....	16
ภาพที่ 19 Reflection Coefficient – f of Wireless Electric Energy Transmitter – Receiver Single Coil Graph.....	16
ภาพที่ 20 Reflection Coefficient – f of Wireless Electric Energy Transmitter – Receiver Double Coil Graph.....	17
ภาพที่ 21 แบบขดลวดฝั่งส่ง TX Coil-Transmitter Coil.....	18
ภาพที่ 22 แบบขดลวดฝั่งรับ RX Coil-Receiver Coil.....	19
ภาพที่ 23 แบบขดลวดทดสอบ Test Coil.....	19
ภาพที่ 24 ชิ้นงานขดลวดฝั่งส่ง TX Coil-Transmitter Coil.....	20
ภาพที่ 25 ชิ้นงานขดลวดฝั่งรับ RX Coil-Receiver Coil.....	20

ภาพที่ 26	การคำนวณ Mutual Inductance ของ Test Coil ด้วยวิธี Coding.....	21
ภาพที่ 27	การคำนวณ Self Inductance ของ Test Coil ด้วยวิธี Coding.....	22
ภาพที่ 28	การคำนวณ Self Inductance ของ Rx Coil ด้วยวิธี Coding.....	22
ภาพที่ 29	วัดค่าความต้านทานของ RX Coil ด้วย Vector Network Analyzer.....	24
ภาพที่ 30	วัดค่าความต้านทานของ TX Coil ด้วย Vector Network Analyzer.....	25
ภาพที่ 31	การคำนวณ Impedance ด้วย Smith Chart.....	26
ภาพที่ 32	แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 13.0 V 0.34 A.....	26
ภาพที่ 33	เครื่องมือแสดงค่ามุมบน TX Coil.....	27
ภาพที่ 34	Spectrum Analyzer.....	27
ภาพที่ 35	กำลังไฟฟ้า ของ RX Coil เทียบกับมุมบน TX Coil.....	29
ภาพที่ 36	แบบวงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้าโดยใช้ Full Wave Bridge Rectifier Circuit.....	30
ภาพที่ 37	ชิ้นงาน Full Wave Bridge Rectifier Circuit.....	30
ภาพที่ 38	มอเตอร์แรงดัน 6V.....	30
ภาพที่ 39	โครงสร้างโมเดลรถ.....	31
ภาพที่ 40	ล้อที่สวมกับมอเตอร์.....	32
ภาพที่ 41	ล้ออื่นๆที่หมุนอิสระด้วยการสวมตลับลูกปืน (Ball Bearing).....	32
ภาพที่ 42	ล้อข้างที่หมุนอิสระด้วยการสวมตลับลูกปืน (Ball Bearing).....	33
ภาพที่ 43	ฐานรางที่ยึด TX Coil.....	33
ภาพที่ 44	ตัวรางที่เป็นเส้นทางให้รถขับเคลื่อน.....	34
ภาพที่ 45	การเตรียมความพร้อมก่อนพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ.....	35
ภาพที่ 46	โมเดลรถที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว.....	35
ภาพที่ 47	ตัวรางที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว.....	36

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้า ของ RX Coil เทียบกับมุมบน TX Coil.....	28
--------------------------------------------------------------	----

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

m	แสดงถึง	milli คือ ค่าอุปสรรคที่มีค่า 10^{-3}
μ	แสดงถึง	micro คือ ค่าอุปสรรคที่มีค่า 10^{-6}
p	แสดงถึง	pico คือ ค่าอุปสรรคที่มีค่า 10^{-12}
M	แสดงถึง	Mega คือ ค่าอุปสรรคที่มีค่า 10^6
V	แสดงถึง	Volt หรือ Voltage
Hz	แสดงถึง	Hertz
W	แสดงถึง	Watt
A	แสดงถึง	Ampere
Ω	แสดงถึง	Ohms
H	แสดงถึง	Henry
F	แสดงถึง	Farad
f	แสดงถึง	Frequency
X_C	แสดงถึง	Capacitive Reactance
X_L	แสดงถึง	Inductive Reactance
GND	ย่อมาจาก	Ground
PCB	ย่อมาจาก	Printed Circuit Board
AC หรือ ac	ย่อมาจาก	Alternating Current
DC หรือ dc	ย่อมาจาก	Direct Current
TX Coil	ย่อมาจาก	Transmitter Coil หรือ ขดลวดฝั่งส่ง
RX Coil	ย่อมาจาก	Receiver Coil หรือ ขดลวดฝั่งรับ

1 บทนำ

เนื่องจากปัญหาขาดแคลนน้ำมัน และปัญหาสภาวะโลกร้อน สาเหตุหนึ่งเกิดมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง เช่น น้ำมัน ทำให้เกิดควันไอเสียออกมาจากท่อของรถยนต์สันดาป จึงมีการคิดค้นรถยนต์พลังงานไฟฟ้าขึ้นมา เพื่อมาแก้ไขปัญหานี้ ซึ่งการกักเก็บพลังงานของรถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบัน จำเป็นต้องมีเครื่องชาร์จประจุไฟฟ้าซึ่งติดตั้งอยู่กับที่ และเชื่อมต่อเข้ากับรถยนต์พลังงานไฟฟ้าด้วยสายไฟฟ้า ซึ่งต้องใช้เวลามากพอสมควรในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเข้าแบตเตอรี่ของรถยนต์พลังงานไฟฟ้า โครงการวิศวกรรมไฟฟ้านี้ จึงได้ออกแบบระบบรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าแบบไร้สาย จึงทำให้ประหยัดเวลาในการชาร์จประจุไฟฟ้า ไม่จำเป็นต้องจอดรถยนต์พลังงานไฟฟ้าให้อยู่นิ่ง เพื่อเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องชาร์จประจุไฟฟ้า เหมือนอย่างเดิมอีกต่อไป โครงการวิศวกรรมไฟฟ้านี้ เป็นส่วนต่อยอดมาจากโครงการวิศวกรรมไฟฟ้า ชื่อเรื่อง Demonstration of Resonant Wireless Power Transfer using Toy Racing Cars and Tracks (Wisessri and Promsatarporn, 2022) ซึ่งมีข้อจำกัดที่ ความเสถียรและสมรรถนะในการขับเคลื่อนของรถยนต์พลังงานไฟฟ้าไร้สาย ยังไม่เพียงพอ และ สามารถขับเคลื่อนได้บนเส้นทางตรง แต่ยังไม่สามารถขับเคลื่อนบนเส้นทางโค้งได้ [1:62] โครงการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบคมนาคมขนส่ง โดยการติดตั้งขดลวดส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ใต้พื้นถนน และติดตั้งขดลวดรับพลังงานไฟฟ้าไร้สาย บริเวณใต้ท้องรถยนต์พลังงานไฟฟ้าไร้สาย หรือนำขดลวดส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ไปติดตั้งใต้รางรถไฟฟ้ามขมและ นำขดลวดรับพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ไปติดตั้งบริเวณใต้ท้องรถไฟฟ้ามขมและ ทำให้สามารถชาร์จประจุไฟฟ้าให้แก่ยานพาหนะ ในขณะที่ยานพาหนะกำลังขับเคลื่อนอยู่ได้ โดยไม่ต้องจอดยานพาหนะหยุดนิ่ง และชาร์จประจุไฟฟ้าเข้ากับยานพาหนะ ซึ่งต้องใช้เวลาานาน ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากสำหรับยานพาหนะที่ต้องการใช้งานอย่างเร่งด่วน เช่น รถพยาบาล ซึ่งการใช้เวลาเดินทางที่น้อย มีความสำคัญมากต่อการรอดชีวิตของผู้ป่วย หรือ รถไฟฟ้ามขมและที่มีความต้องการใช้งานอย่างหนักและต่อเนื่องในช่วงเร่งด่วน เช่น ช่วงเวลาเช้า ที่มีผู้โดยสารจำนวนมาก เดินทางไปยังสถานที่ทำงาน และ ช่วงเวลาเย็นที่มีผู้โดยสารจำนวนมาก เดินทางกลับที่พัก

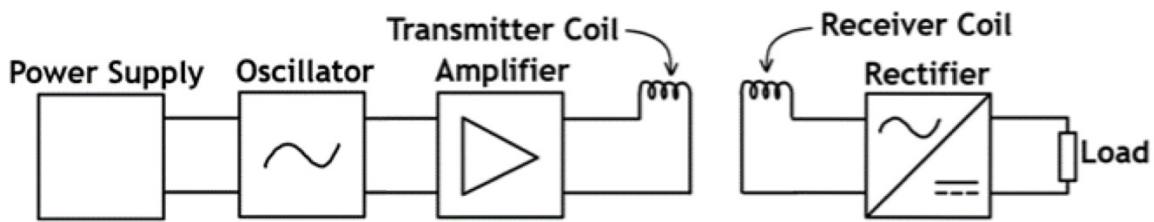
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- สามารถส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- โมเดลรถสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างเสถียรและสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางของรางได้
- สามารถออกแบบอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนต่างๆเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ระดับใหญ่ขึ้นได้

1.2 ขอบเขตของโครงการ

โครงการนี้จะแสดงให้เห็นว่าการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสามารถทำได้จริงและมีประสิทธิภาพ โดยใช้ขดลวดเป็นอุปกรณ์ในการรับ-ส่งกำลังไฟฟ้า ขดลวดฝั่งส่งจะติดที่รางของโมเดลรถและขดลวดฝั่งรับจะติดอยู่กับตัวโมเดลรถและ

เชื่อมต่อกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อรถ ซึ่งโมเดลรถจะเคลื่อนที่ได้อย่างเสถียรและสามารถเคลื่อนที่ตามทิศทางของรางได้ โดยตัววงจรของโครงงานครั้งนี้จะแสดงให้เห็นดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 วงจรส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้ในโครงงานนี้

จากภาพที่ 1 จะแบ่งวงจรเป็น 3 ส่วน ได้แก่

1) วงจรฝั่งส่ง ประกอบด้วย

- Power Supply คือแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งจะจ่ายแรงดัน 13V
- Oscillator คือเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งใช้ความถี่ 13.56MHz
- Amplifier คืออุปกรณ์ขยายสัญญาณ เพื่อให้มีกำลังไฟฟ้ามากพอที่จะส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายได้

2) ขดลวดฝั่งส่งและฝั่งรับ จากการออกแบบและจำลองในซอฟต์แวร์พบว่าสามารถส่งกำลังไฟฟ้าได้มากที่สุด 4.16 W

3) วงจรฝั่งรับ ประกอบด้วย

- วงจรเรียงกระแสประเภทเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Full Wave Bridge Rectifier Circuit) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อรถเป็นมอเตอร์กระแสตรง
- ตัวเก็บประจุ (Capacitor) ขนาด 2,200 μF 2 ตัว ต่อขนาดกัน
- โหลดที่ใช้คือมอเตอร์กระแสตรงขนาด 6V จำนวน 1 ตัวเพื่อขับเคลื่อน 1 ล้อหลัง

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในโครงงานนี้ได้ใช้ทฤษฎีต่างๆ ในการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายซึ่งใช้ขดลวดฝั่งส่งหรือ Transmitter Coil ส่งไปยังขดลวดฝั่งรับหรือ Receiver Coil แบบไร้สายที่ความถี่ 13.56MHz โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ ดังนี้

- 2.1. ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- 2.2. คุณสมบัติท่อนำคลื่น
- 2.3. SubMiniature version A (SMA) Connector
- 2.4. ขดลวด (Coil)
- 2.5. คุณสมบัติทางวัสดุของ FR4 PCB
- 2.6. วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

2.1. ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากกฎของแอมแปร์ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลในขดลวดจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นโดยรอบขดลวด และหากสนามแม่เหล็กนี้พุ่งผ่านพื้นที่หน้าตัดของขดลวดอีกชุดหนึ่ง จะทำให้เกิดการเปลี่ยนของฟลักซ์แม่เหล็ก (ฟลักซ์แม่เหล็ก คือ ปริมาณสนามแม่เหล็กในพื้นที่พื้นที่หนึ่ง) ซึ่งจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นในขดลวดชุดนั้นๆ ในขดลวดชุดดังกล่าวจะมีอิเล็กตรอนอยู่ เมื่อเกิดสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้ากระทำกับอิเล็กตรอนภายในขดลวด ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเกิดการเคลื่อนที่ไปตามขดลวด จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในขดลวดชุดนั้นๆ

2.2. คุณสมบัติท่อนำคลื่น

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย ได้จากสมการที่ 1

$$\text{สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

เมื่อ Z_L คือ ความต้านทานของขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย มีหน่วยเป็น ohms

Z_0 คือ Impedance ของสายส่ง มีค่าเท่ากับ 50 Ohms

คำนวณค่าความต้านทานของขดลวดเหนี่ยวนำ อันเนื่องมาจาก ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย มีคุณสมบัติเป็นขดลวดเหนี่ยวนำ ได้จากสมการที่ 2

$$Z_L = 2\pi fL \quad (2)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 13.56 MHz

L คือ Self Inductance มีหน่วยเป็น Henry [2:8847]

2.3. SubMiniature version A (SMA) Connector

SMA Connector หรือหัวต่อแบบ SMA ถูกประดิษฐ์ขึ้นเมื่อ ปี 1960 เป็นตัวเชื่อมต่ออุปกรณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่าน Radio Frequency ซึ่งสายที่เอามาต่อกับ Connector เป็นสาย Coaxial มี Impedance เท่ากับ 50 Ohms โดยทั่วไปเหมาะกับความถี่ใช้งาน 0 -18 GHz นิยมใช้กันในระบบไมโครเวฟ โดยที่ SMA Connector จะมี 5 ขาหรือ Pin ขาตรงกลางเชื่อมต่อกับสัญญาณ ส่วนอีก 4 ขาที่เหลือโดยรอบมีไว้เพื่อยึดเกาะกับ PCB เพื่อความแข็งแรง และทำหน้าที่เป็น GND โดย SMA จะใช้สาร polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นฉนวน

2.4. ขดลวด (Coil)

ขดลวดในโครงงานนี้ คือ ลายทองแดงต่อกันเป็นวงบน PCB ชนิด FR4 หนา 1.6 mm เปรียบเสมือนขดลวดเหนี่ยวนำอันหนึ่งที่ส่งผ่านสนามแม่เหล็กและเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าต่อไปเรื่อยๆจนครบวง ซึ่ง PCB นี้จะวางประกบกับรางวัลเพื่อทำหน้าที่ถ่ายโอนพลังงานไปยังตัวรถ ซึ่งมีการต่อ Capacitor เข้าไปอนุกรมกับ Coil เพื่อทำให้เกิด Resonance ได้กระแสไฟฟ้าในวงจรสูงที่สุด เนื่องจากไม่มี Reactance และไม่มี Imaginary Power จึงทำให้ได้ Real Power สูงที่สุด โดยลักษณะการเชื่อมต่อของ Coil มีทั้งแบบที่เชื่อมต่อบน Layer เดียวกัน และ เชื่อมต่อกันระหว่าง Layer

ตัวแปรที่มีผลในการออกแบบ Coil

- ขนาดพื้นที่ช่องว่างตรงกลาง Coil ยังมีพื้นที่มาก ยังมีประสิทธิภาพที่ดี เพราะมีบริเวณที่สามารถรับสนามแม่เหล็กได้มากขึ้นทำให้ Magnetic Flux เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ Induced EMF Voltage เพิ่มขึ้นและกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพิ่มขึ้น
- ความกว้างของลายทองแดง ยิ่งกว้างยิ่งดี เพราะความต้านทานจะน้อย ทนปริมาณกระแสไฟฟ้าได้สูง
- ระยะห่างระหว่างลายทองแดง
- ค่า Mutual Inductance
- ค่า Reflection Coefficient(S11) ซึ่งพิจารณาจาก Test Coil มีผลต่ออัตราส่วนกำลังไฟฟ้าขาออกเทียบกับกำลังไฟฟ้าขาเข้า

2.5. คุณสมบัติทางวัสดุของ FR4 PCB

PCB Board ทำมาจาก FR4 Material ซึ่งเป็นวัสดุทนไฟ เป็นฉนวนไฟฟ้า ประกอบขึ้นมาจาก Fiberglass และ Epoxy น้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรง มีค่าความหนาแน่น 1.850 g/(cm)^3 ไม่ดูดซับน้ำ มีค่า Relative permittivity เท่ากับ 4.4 มีค่า Dissipation factor = 0.017 มีค่า Dielectric Constant ประมาณ 3.9 – 4.7 มีค่า Loss Tangent ประมาณ 0.02 - 0.03 และเป็น Antiferromagnetic materials จึงไม่ใช้สารแม่เหล็ก ไม่ดูดหรือผลักกับขั้วแม่เหล็ก (สนามแม่เหล็ก) ดังนั้น Rx Coil จึงสามารถนำด้านใดก็ได้ของแผ่น PCB หันลงไปติดตั้งเพื่อรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

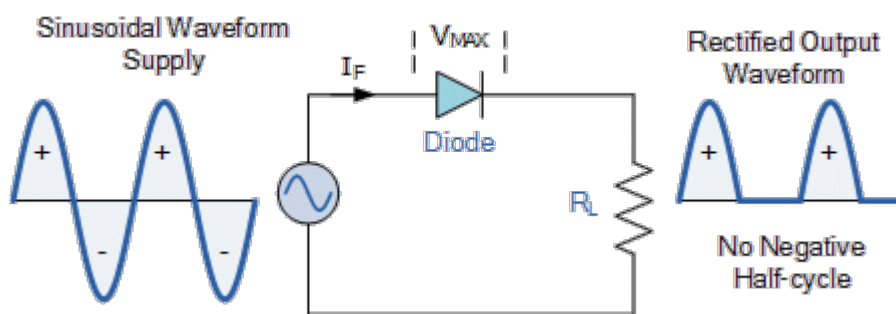
Antiferromagnetism เกี่ยวข้องกับการหมุนของอิเล็กตรอน (Spin ไม่ใช้การหมุนรอบตัวเอง) Magnetic Moment เกิดการจัดเรียงเป็นกลุ่มชี้ไปทิศทางตรงกันข้ามกับสนามแม่เหล็กจากภายนอก เมื่ออุณหภูมิสภาพแวดล้อม สูงเกินกว่า magnetic ordering temperature จะทำให้ Antiferromagnetism เปลี่ยนสภาพกลายเป็น Paramagnetism

2.6. วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

วงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) คือวงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงหรือมีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่งอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณได้แก่ ไดโอด (Diode) วงจรเรียงกระแสมี 2 ชนิด ได้แก่ วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier Circuit) และวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full wave Rectifier Circuit) [3]

2.6.1. วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier Circuit)

วงจรนี้จะใช้ไดโอด 1 ตัว ในการเปลี่ยนอินพุตจากไฟฟ้ากระแสสลับ (คลื่นไซน์) ให้กลายเป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยเปลี่ยนเฉพาะคลื่นด้านบวกของอินพุตเท่านั้นเพราะว่าไดโอดจะทำงานก็ต่อเมื่อได้รับคลื่นไซน์ด้านครึ่งด้านบวกเท่านั้น เนื่องจากในช่วงนั้นไดโอดจะเป็นไบอัสตรงจึงทำให้เกิดกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านไดโอดไปสู่โหลดแต่เมื่อคลื่นไซน์ อินพุตเป็นช่วงครึ่งของด้านลบเมื่อนั้นจะทำให้ไดโอดไม่ทำงานส่งผลให้ไม่มีกระแสไหลผ่านโหลด คลื่นในเอาต์พุตจึงปรากฏเฉพาะครึ่งด้านบวกเท่านั้น ดังภาพที่ 2

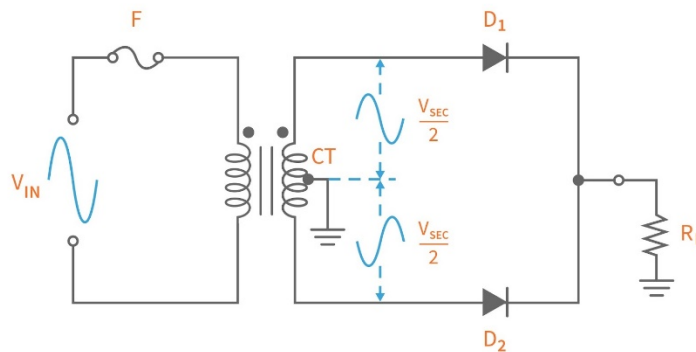


ภาพที่ 2 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-wave Rectifier Circuit)

2.6.2. วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full wave Rectifier Circuit) มี 2 ประเภท

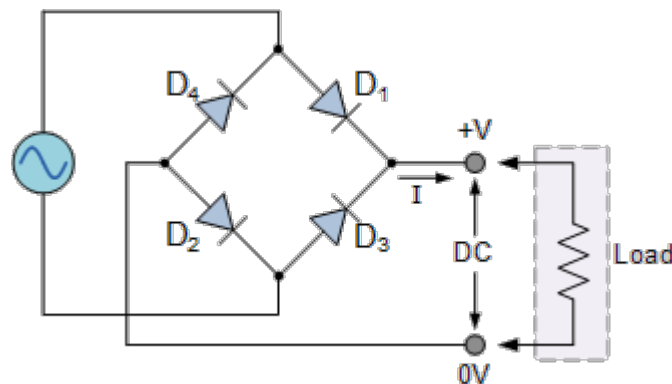
1) วงจรเรียงกระแสที่มีหม้อแปลงแทปกลาง (Full – Wave Rectifier with Tapping Transformer) เป็นวงจรที่มีการใช้ไดโอด 2 ตัว ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณไฟสลับให้กลายเป็นสัญญาณไฟตรงและใช้หม้อแปลงแทป กลาง 1 ตัว ในการแบ่งเฟสให้เกิดการต่างเฟสกัน 180 องศา ระหว่างสัญญาณที่ออกจากส่วนบนและส่วนล่างของขดลวดทุติยภูมิของ

หม้อแปลง เพื่อให้ไดโอดทั้ง 2 ตัวทำงานสลับกัน วงจรจึงสามารถจ่ายกระแสได้เรียบและสูงกว่าวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วงจรเรียงกระแสมีหม้อแปลงแทปกกลาง (Full – Wave Rectifier with Tapping Transformer)

2) วงจรบริดจ์ (Full – Wave Bridge Rectifier) เป็นวงจรที่มีการใช้ไดโอด 4 ตัว แต่จะไม่มีการใช้หม้อแปลง แทปกกลาง ซึ่งก็มีข้อดีมากกว่า เพราะหม้อแปลงแทปกกลางนั้นมีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากกว่าหม้อแปลงที่ไม่มีแทปกกลาง เนื่องจากหม้อแปลงแบบแทปกกลางจะมีขดลวดมากกว่า ดังนั้นการใช้วงจรบริดจ์จะเป็นการลดค่าใช้จ่าย และลดขนาดของวงจรได้มากกว่าแบบวงจรเรียงกระแสมีหม้อแปลงแทปกกลาง ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 วงจรบริดจ์ (Full – Wave Bridge Rectifier)

ในส่วนของ Capacitor ที่อยู่ใน Rectifier Circuit ตีความได้ว่า C คือปริมาณประจุไฟฟ้าที่เก็บสะสมไว้ได้ เมื่อเชื่อมต่อกับแรงดันไฟฟ้า 1 V แสดงดังสมการที่ 3

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

หมายความว่า หากเทียบในแรงดันไฟฟ้าที่เท่ากัน เมื่อปริมาณความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าสูงขึ้น จะทำให้มีพลังงานศักย์ไฟฟ้าในรูปแบบสนามไฟฟ้าสูงขึ้น

3 เครื่องมือที่ใช้ในการทำโครงงาน

3.1. ฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในการทำโครงงาน

3.1.1. Oscillator

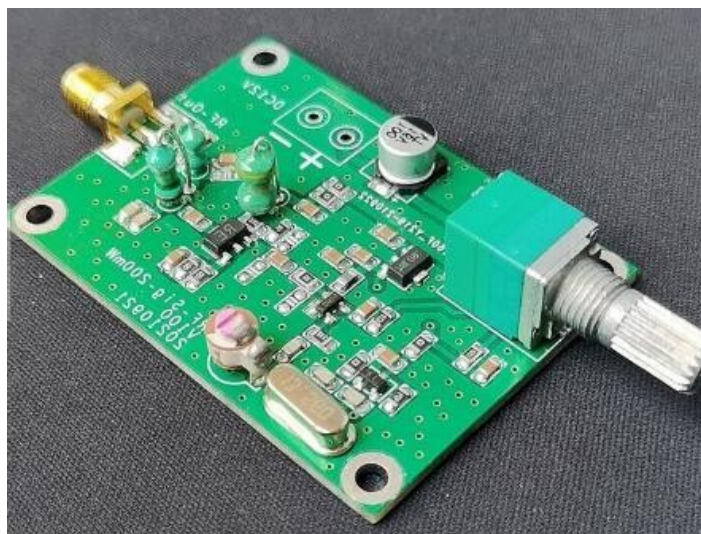
เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ มีลักษณะดังภาพที่ 5 โดยใช้ความถี่ 13.56MHz เนื่องจากเป็นข้อบังคับทางกฎหมายเพื่อไม่ให้รบกวนกับการทำงานของอุปกรณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ โดยจะใช้ Output คำนวณหาอัตรากำลัง ขยายใน Amplifier โดยมีข้อมูลจำเพาะ (Specification) ดังนี้

Operating Frequency: 13.56MHz RF

Output Power: 7dBm~23dBm (5~200mW)

Working Voltage: 12V

Working Current: 60mA



ภาพที่ 5 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Oscillator)

3.1.2. Amplifier

อุปกรณ์ขยายสัญญาณ ดังภาพที่ 6 เพื่อให้มีกำลังไฟฟ้ามกพอที่จะส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายได้โดยต้องคำนึงถึงสิ่งต่างๆ ดังนี้

- Maximum Output ค่านี้จะสัมพันธ์กับการส่งกำลังไฟฟ้าไปให้ตัวขดลวดฝั่งส่งเพื่อจะส่งต่อไปให้ขดลวดฝั่งรับจากนั้นจะส่งต่อกำลังไฟฟ้าไปจนถึงมอเตอร์เพื่อที่จะให้รถยนต์ขับเคลื่อน โดยยิ่งค่า Output สูงสุดยิ่งมากจะทำให้การทำงานของระบบนี้เสถียรยิ่งขึ้น

- ยานความถี่ที่อุปกรณ์ตัวนี้สามารถใช้งานได้
- ค่ากำลังขยายทั่วไปของ RF Power Amplifier โดยจะเป็นในส่วนกำลังขยายซึ่งจะสัมพันธ์ค่า Output สูงสุดของอุปกรณ์
- Impedance Input และ Output ต้องมีค่า 50 Ω เท่ากันเพราะจะได้ไม่เกิดคลื่นสะท้อนกลับเพราะตัวคลื่นสะท้อนกลับนั้นจะทำให้อุปกรณ์เสียหายได้

จากปัจจัยต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นจึงเลือกอุปกรณ์ที่มีลักษณะดังนี้

- เอาต์พุตสูงสุด 4.16 วัตต์
- แหล่งจ่ายไฟ 12V
- บรอดแบนด์ สามารถทำงานได้ในช่วง 2MHZ ถึง 700MHZ
- กำลังขยายทั่วไปของ RF Power Amplifier นี้คือ 35 dB

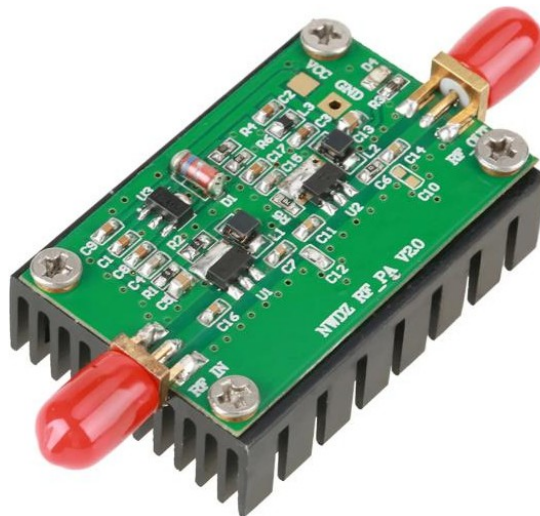
ข้อมูลจำเพาะ

แรงดันไฟ: DC+12-15V (ทั่วไป 15V@0.3-0.5A)

ความถี่ในการทำงาน: 2MHZ-700MHZ

อิมพีแดนซ์อินพุตและเอาต์พุต: 50 โอห์ม,

กำลังขับสูงสุด: 4.16 Watt



ภาพที่ 6 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier)

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์อื่นๆ ที่ได้มาจากการออกแบบและจัดหา ได้แก่

- ขดลวดฝั่งส่ง หรือ Transmitter Coil วงกลมที่ออกแบบจากโปรแกรม EasyEDA
- ขดลวดฝั่งรับ หรือ Receiver Coil ที่ออกแบบจากโปรแกรม EasyEDA
- SMA Cable ที่ใช้เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ
- วงจรเรียงกระแสประเภทเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Full Wave Bridge Rectifier Circuit) ซึ่งประกอบด้วย
 - Schottky Diode เบอร์ 1N5819 จำนวน 4 ตัว
 - Capacitor ขนาด 2200uF จำนวน 2 ตัว
- มอเตอร์กระแสตรงขนาด 6V จำนวน 1 ตัวเพื่อขับเคลื่อน 1 ล้อหลังด้านซ้าย
- เครื่องพิมพ์ 3 มิติ Creality Ender3 Max ที่ใช้พิมพ์ตัวรถ ล้อต่างๆ
- เครื่องพิมพ์ 3 มิติ Creality CR-10 Max ที่ใช้พิมพ์ตัวรางและฐานราง

3.2. ซอฟต์แวร์ที่สำคัญที่ใช้ในการทำโครงงาน

3.2.1. Google Colab

เว็บไซต์ที่สำคัญในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษา Python สำหรับโครงงานวิศวกรรมไฟฟ้านี้ จะเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายและขดลวดรับพลังงานไฟฟ้าไร้สาย โดยแสดงสัญลักษณ์ของโปรแกรมนี้ ในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 Google Colab Icon

3.2.2. Sonnet Software (Kasetsart University License)

โปรแกรมสำคัญในการออกแบบลักษณะทางกายภาพของขดลวดส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายและขดลวดรับพลังงานไฟฟ้าไร้สาย และสามารถ Simulation เพื่อแสดงกราฟของค่า Reflection Coefficient เทียบกับค่า Electromagnetic Wave Frequency โดยแสดงสัญลักษณ์ของโปรแกรมนี้ ในภาพที่ 8

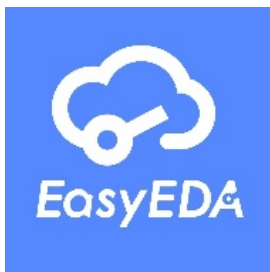


ภาพที่ 8 Sonnet Software Icon

3.2.3. EasyEDA Std Edition (Free Version)

โปรแกรมสำหรับออกแบบ PCB Board/PCB Circuit ซึ่งสามารถเลือกต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการให้กลายเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์และออกแบบวางลายทองแดงบน PCB Board พร้อมสั่งผลิตกับ JLCPCB ในการออกแบบ PCB ใช้ Copper Area กับ Rectifier ทั้งใน Top Layer และ Bottom Layer ใช้ Solid Region และ Rectangular ในการออกแบบ Coil โดยแสดงสัญลักษณ์ของโปรแกรมนี้นี้ ในภาพที่ 9 ซึ่งโปรแกรมนี้นี้มีประโยชน์มากมาย ดังนี้

- EasyEDA สามารถ Preview 3D ได้
- EasyEDA มีการเชื่อมต่อ Import DXF Files ที่มาจากโปรแกรม Sonnet ได้
- EasyEDA มี 2 โหมดการทำงานได้แก่ Schematic และ PCB โดยสามารถ Transfer จาก Schematic Mode ไปยัง PCB Mode ได้



ภาพที่ 9 EasyEDA Software Icon

3.2.4. Autodesk Fusion (Education License)

โปรแกรมที่ใช้ออกแบบภาพ 3 มิติ ที่ทำงานบนระบบ Cloud โดยสามารถออกแบบและสร้างผลิตภัณฑ์ได้ตามต้องการ พร้อมกับความสวยงาม รูปทรงพอเหมาะพอดี และคำนึงถึงการใช้งาน พร้อมทั้งครอบคลุมการออกแบบทางด้านวิศวกรรม ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 Autodesk Fusion Icon

3.2.5. Ultimaker Cura (Freeware)

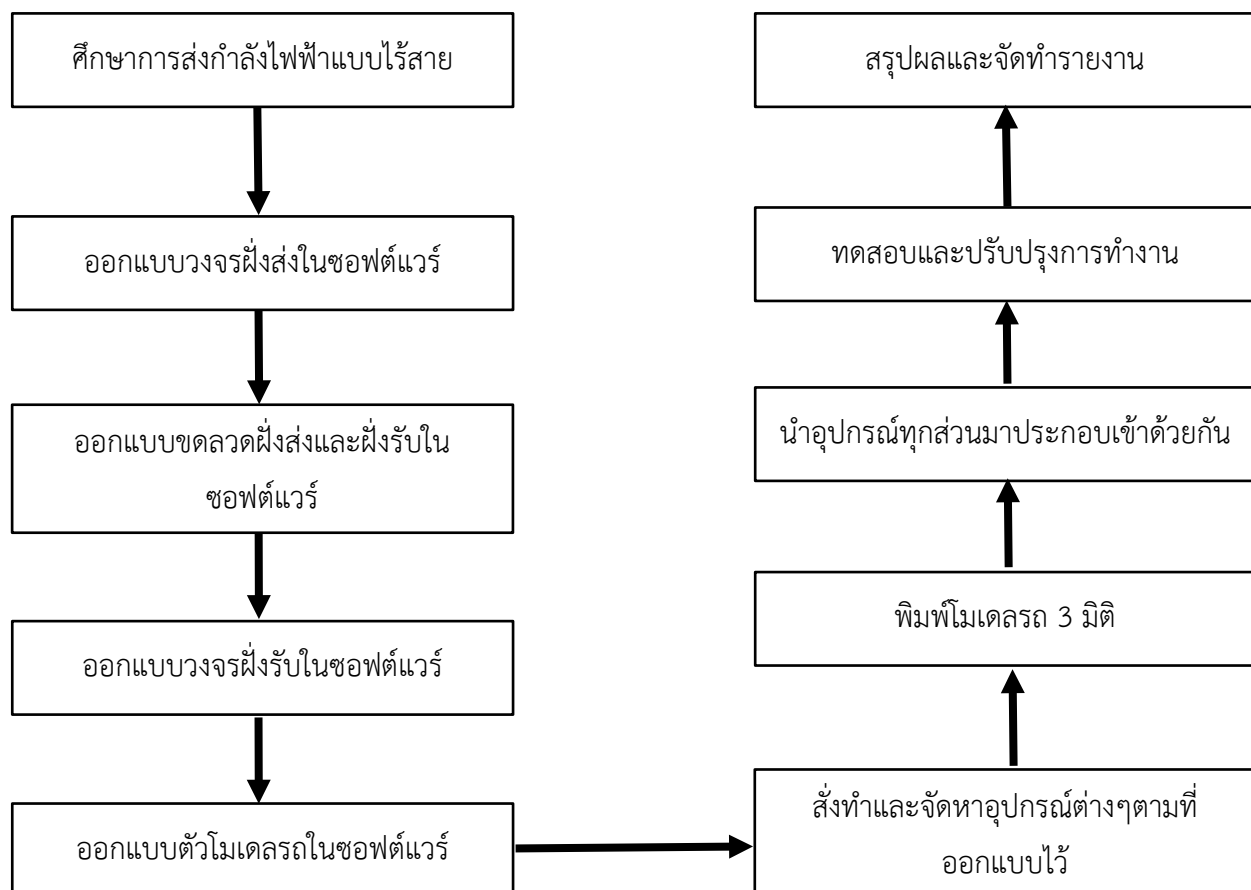
โปรแกรมที่ใช้แปลงไฟล์ที่มากจากการออกแบบ 3 มิติเป็นไฟล์ที่พร้อมพิมพ์ที่เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังภาพที่ 11 โดยจะบอกถึงระยะเวลาและความยาวของเส้นพลาสติกที่ใช้พิมพ์



ภาพที่ 11 Ultimaker Cura Icon

4 วิธีการดำเนินโครงการ

ในการทำโครงการนี้ ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายโดยใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อสร้างออกมาเป็นชิ้นงานให้เห็นภาพโดยการขับเคลื่อนมอเตอร์ของโมเดลรถขนาดเล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นดังภาพที่ 12

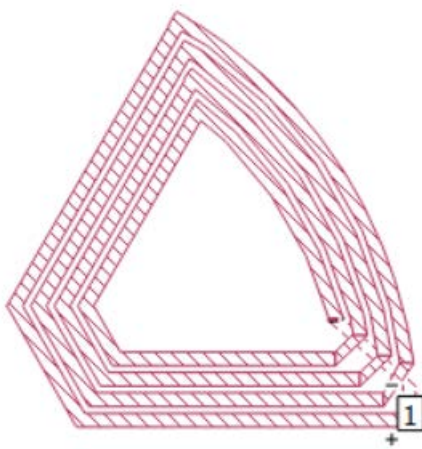


ภาพที่ 12 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงการ

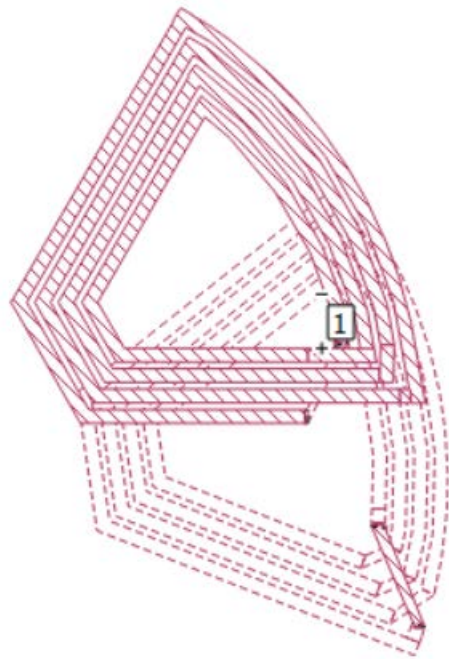
5 ผลการดำเนินโครงการและวิจารณ์

5.1. ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

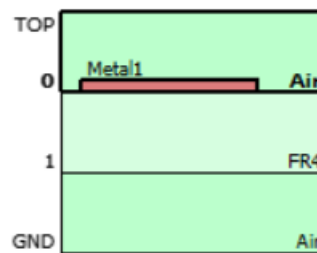
ในการออกแบบขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย จะแสดงภาพขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเดี่ยว และ ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบคู่ ในภาพที่ 13 และ 14 ตามลำดับ ซึ่งขดลวดรับส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย มีตัวกลาง 3 ชั้น แสดงในภาพที่ 15 (ภาพที่ 13 มีชื่อไฟล์ว่า donut_wire2 และภาพที่ 14 มีชื่อไฟล์ว่า donut_wire2-twin)



ภาพที่ 13 ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเดี่ยว



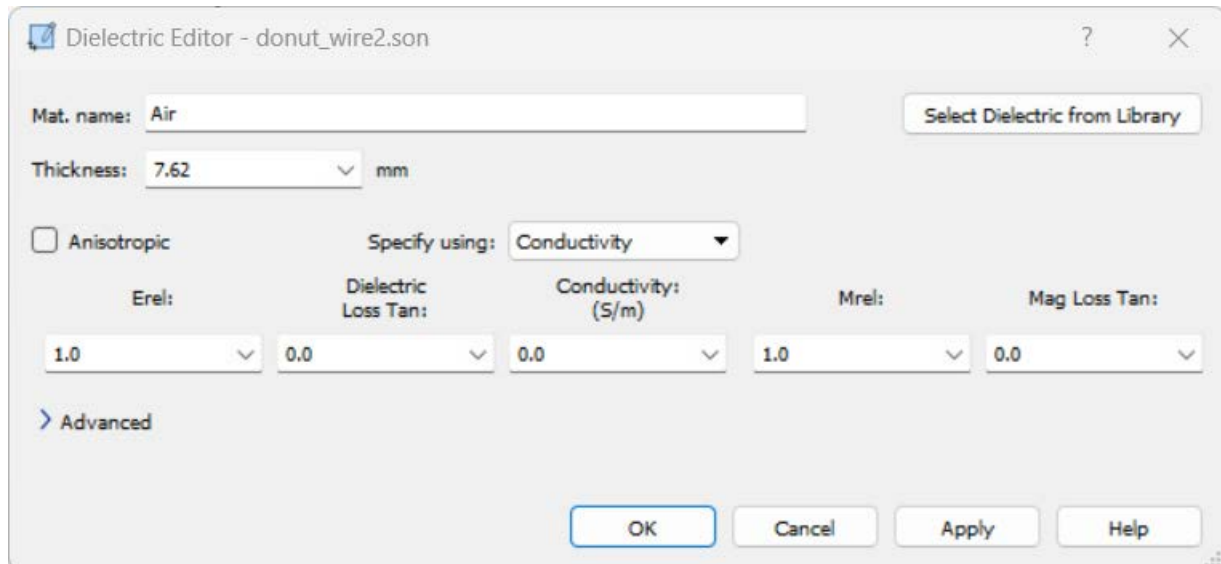
ภาพที่ 14 ขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบคู่



ภาพที่ 15 ตัวกลางทั้ง 3 ชั้นของขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สาย

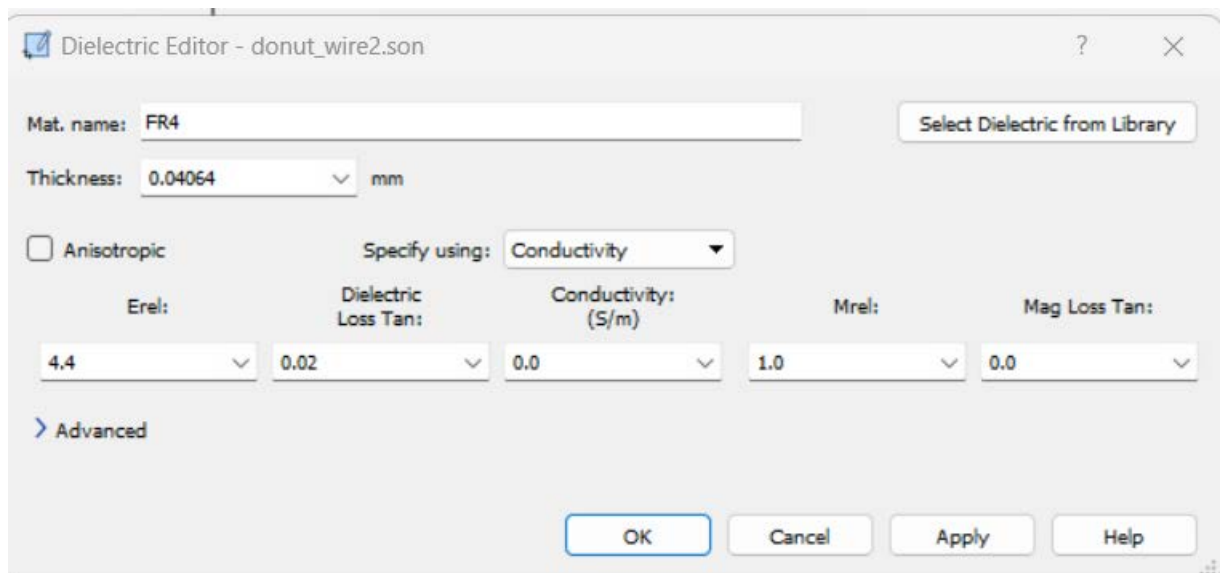
โดยมีคุณลักษณะของตัวกลางในแต่ละชั้นดังนี้

- Top Layer แสดงในภาพที่ 16



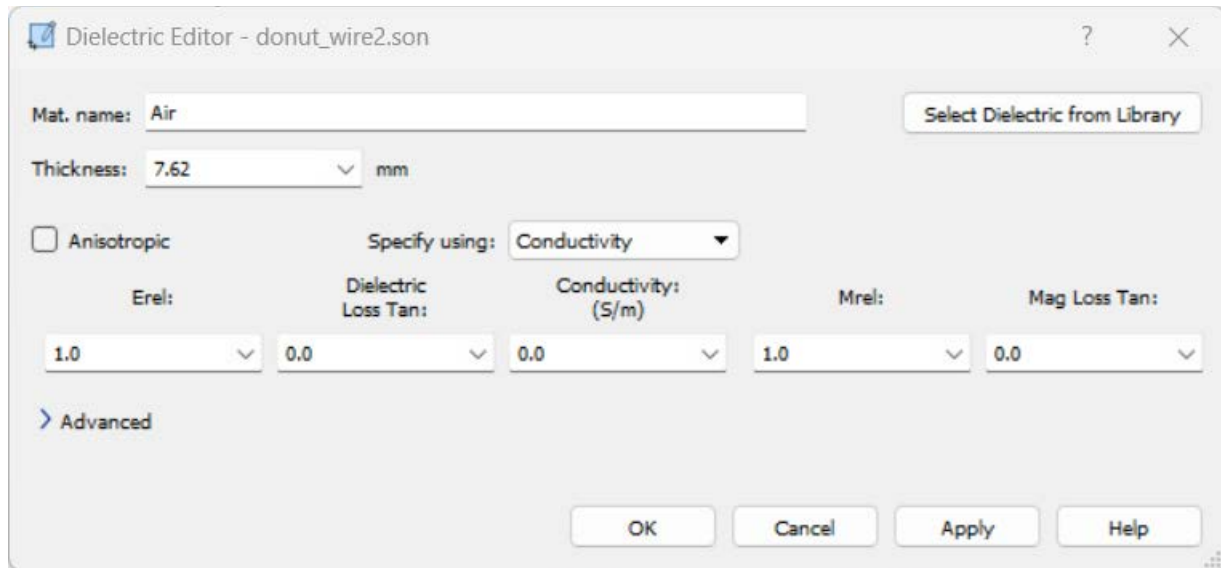
ภาพที่ 16 คุณลักษณะของ Top Layer

- Middle Layer ใช้วัสดุทนไฟ ที่เรียกว่า FR4 แสดงในภาพที่ 17



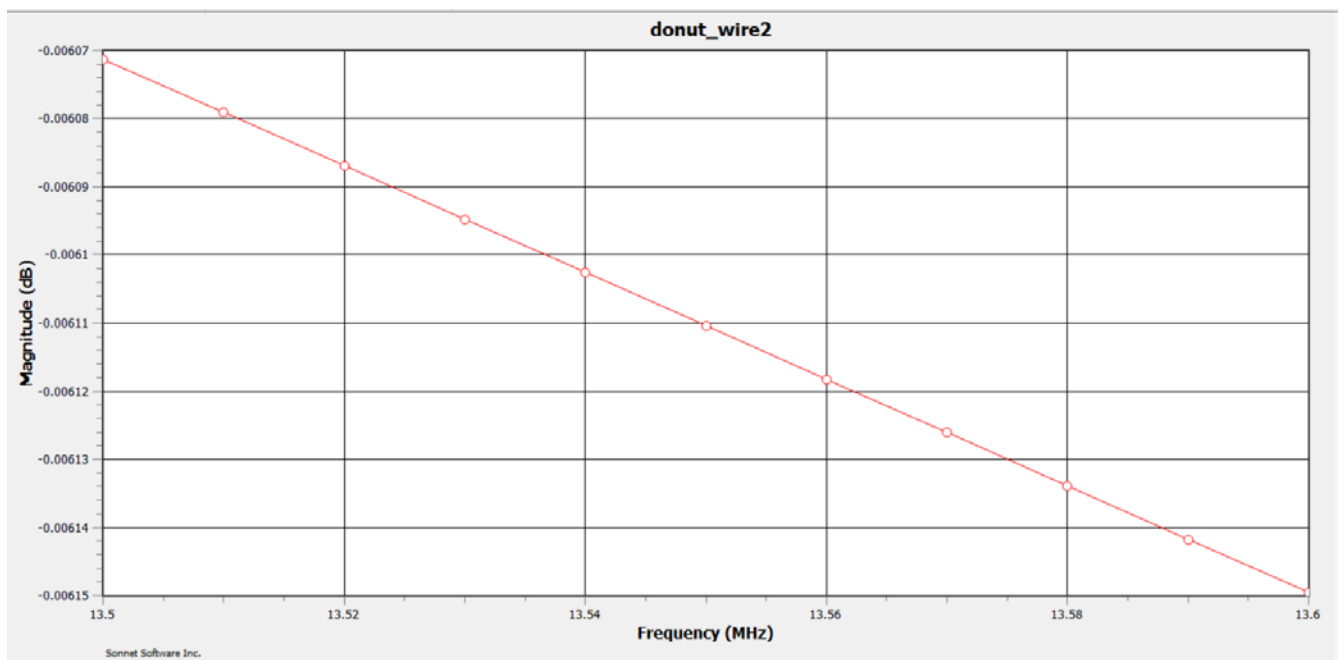
ภาพที่ 17 คุณลักษณะของ Middle Layer

- Bottom Layer ใช้เป็น Ground ทางไฟฟ้า แสดงในภาพที่ 18



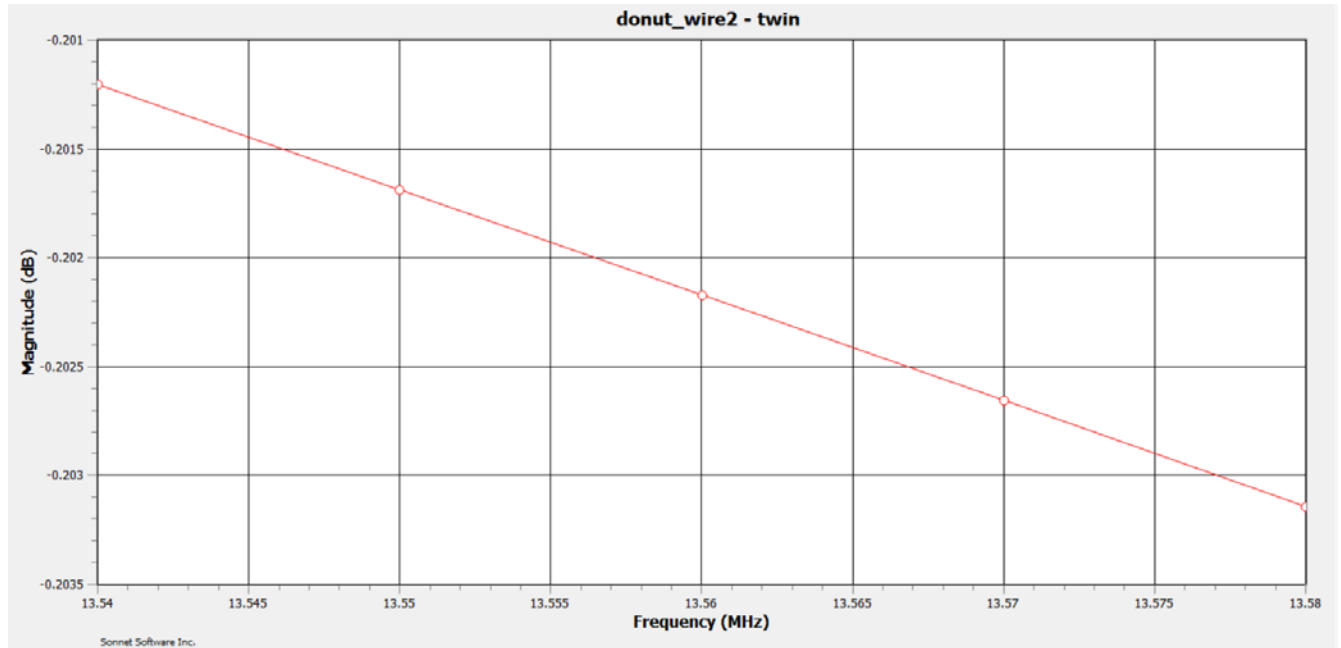
ภาพที่ 18 คุณสมบัติของ Bottom Layer

เมื่อจำลองการทำงานจากขดลวดในภาพที่ 13 แล้ว จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (f) เทียบกับ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบเดี่ยว แสดงในภาพที่ 19



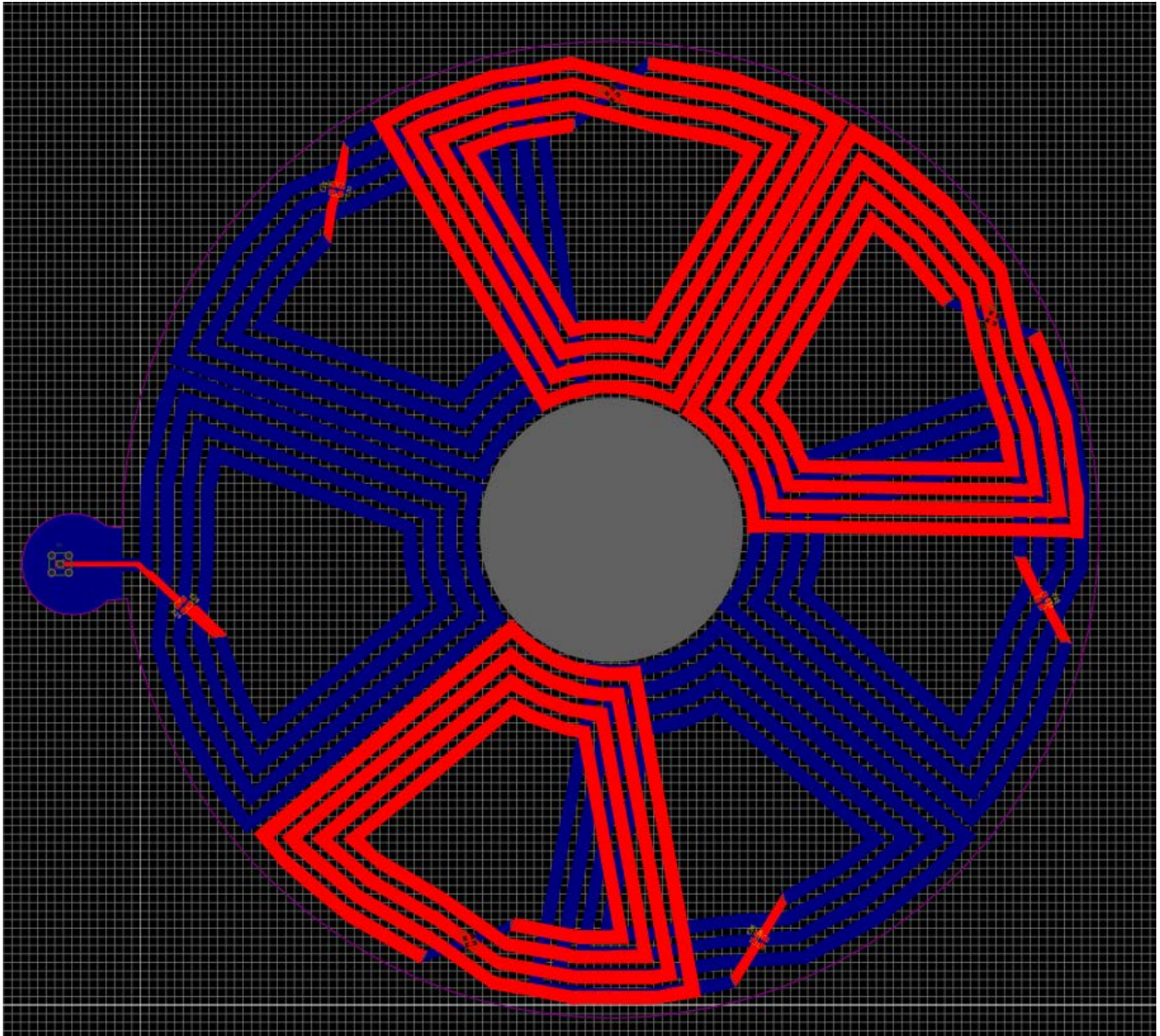
ภาพที่ 19 Reflection Coefficient – f of Wireless Electric Energy Transmitter – Receiver Single Coil Graph

เมื่อจำลองการทำงานจากขดลวดในภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า(f) เทียบกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของขดลวดรับ-ส่งพลังงานไฟฟ้าไร้สายแบบคู่ (เชื่อมต่อกันแบบ Overlap) แสดงในภาพที่ 20

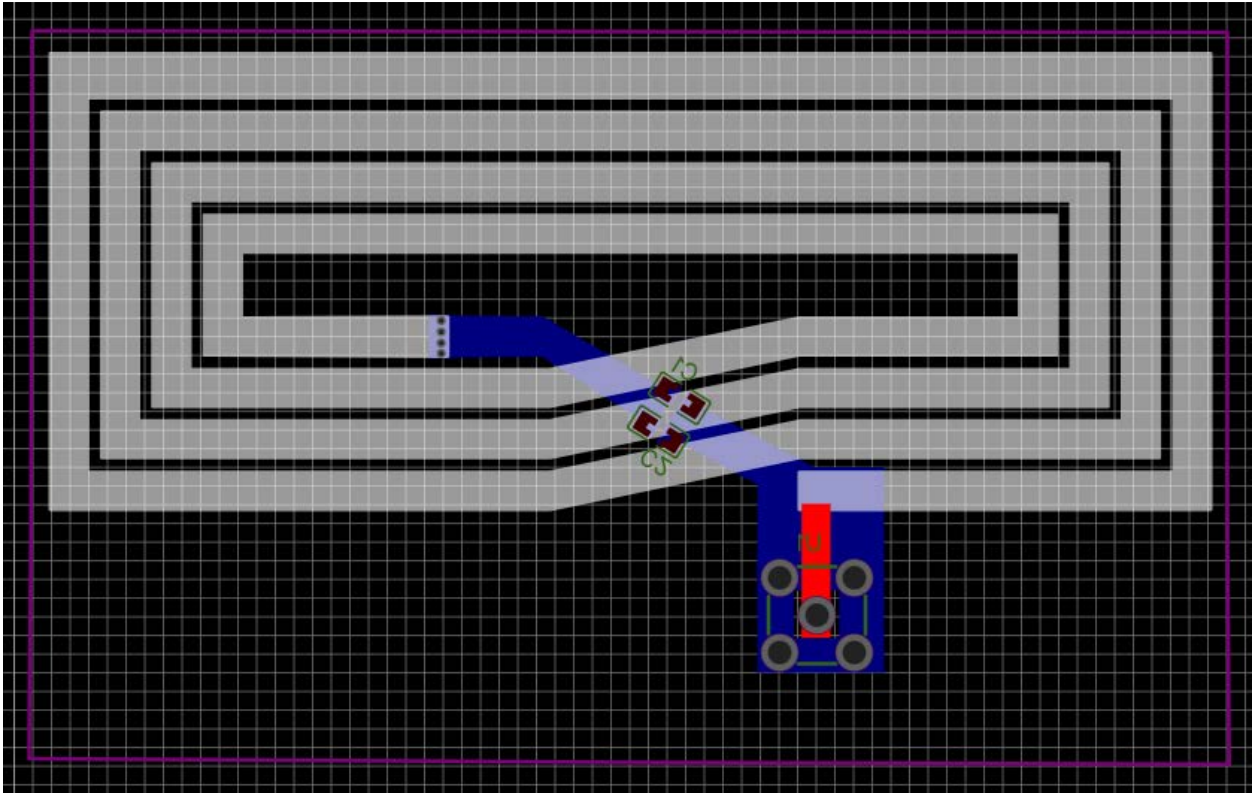


ภาพที่ 20 Reflection Coefficient – f of Wireless Electric Energy Transmitter – Receiver Double Coil Graph

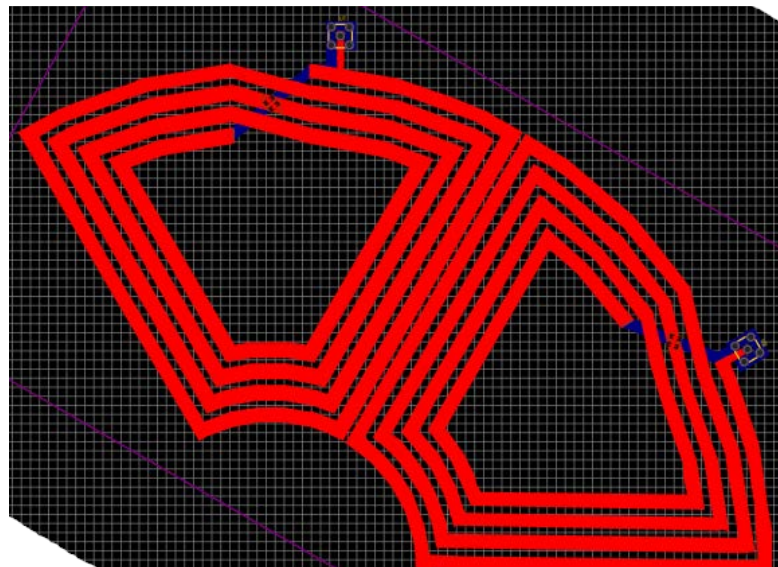
หลังจากการออกแบบขดลวดทั้ง 2 ผ่านโปรแกรม EasyEDA แล้ว จะได้ขดลวดฝั่งส่ง ขดลวดฝั่งรับ และขดลวดทดสอบ ดังภาพที่ 21, 22 และ 23 ตามลำดับ และเมื่อสั่งทำชิ้นงานแล้วจะได้ขดลวดฝั่งส่งและขดลวดฝั่งรับ ดังภาพที่ 24 และ 25 ตามลำดับ



ภาพที่ 21 แบบขดลวดฝั่งส่ง TX Coil-Transmitter Coil



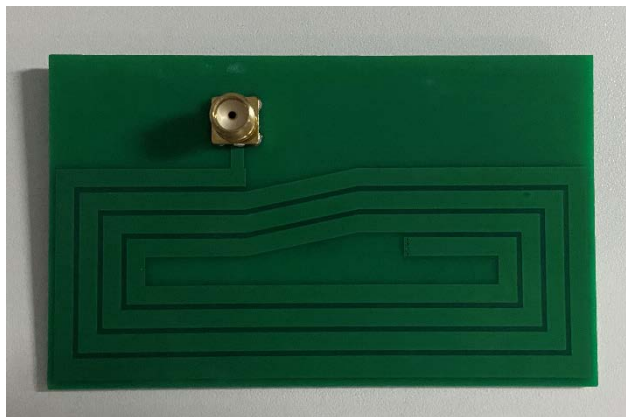
ภาพที่ 22 แบบขดลวดฝั่งรับ RX Coil-Receiver Coil



ภาพที่ 23 แบบขดลวดทดสอบ Test Coil



ภาพที่ 24 ชิ้นงานขดลวดฝั่งส่ง TX Coil-Transmitter Coil



ภาพที่ 25 ชิ้นงานขดลวดฝั่งรับ RX Coil-Receiver Coil

การทดสอบค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าและกำลังไฟฟ้าขาออก

วัดค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าจากขาออกของ Amplifier และวัดกำลังไฟฟ้าขาออกจากขาออกของ Rectifier Circuit โดยใช้ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 13.56MHz เนื่องจากข้อกำหนดทางกฎหมายสำหรับการทดลองอุปกรณ์ทางด้านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อจะได้ไม่ไปรบกวนอุปกรณ์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น

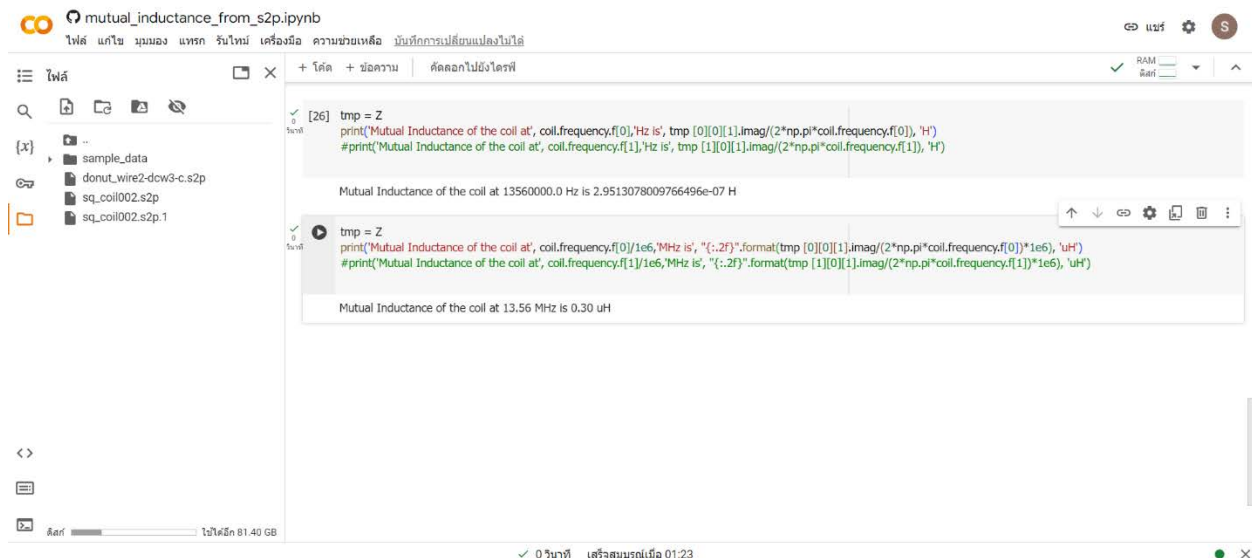
การคำนวณค่า Self Inductance (L) และ Mutual Inductance (M) ด้วยวิธี Coding ใน Google Colab

ค่าที่จะแสดงต่อไปนี้ ได้มาจากการ export file s1p s2p จาก โปรแกรม Sonnet แล้ว import เข้าไปใน Google Colab เพื่อใช้วิธี Coding

$M = 0.3 \mu\text{H}$ สำหรับ Test Coil กรณี Non-Overlap ดังภาพที่ 26

$L = 3.42 \mu\text{H}$ สำหรับ Test Coil กรณี Non-Overlap ดังภาพที่ 27

$L = 0.58 \mu\text{H}$ สำหรับ Rx Coil ดังภาพที่ 28



```
mutual_inductance_from_s2p.ipynb
ไฟล์ แก้ไข มุมมอง แทรก รับใหม่ เครื่องมือ ความช่วยเหลือ บันทึกการเปลี่ยนแปลงอัตโนมัติ

ไฟล์
{ }
sample_data
donut_wire2-dcw3-c.s2p
sq_coil002.s2p
sq_coil002.s2p.1

[26] tmp = Z
print("Mutual Inductance of the coil at", coil.frequency.f[0], 'Hz is', tmp [0][0][1].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[0]), 'H')
#print("Mutual Inductance of the coil at", coil.frequency.f[1], 'Hz is', tmp [1][0][1].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[1]), 'H')

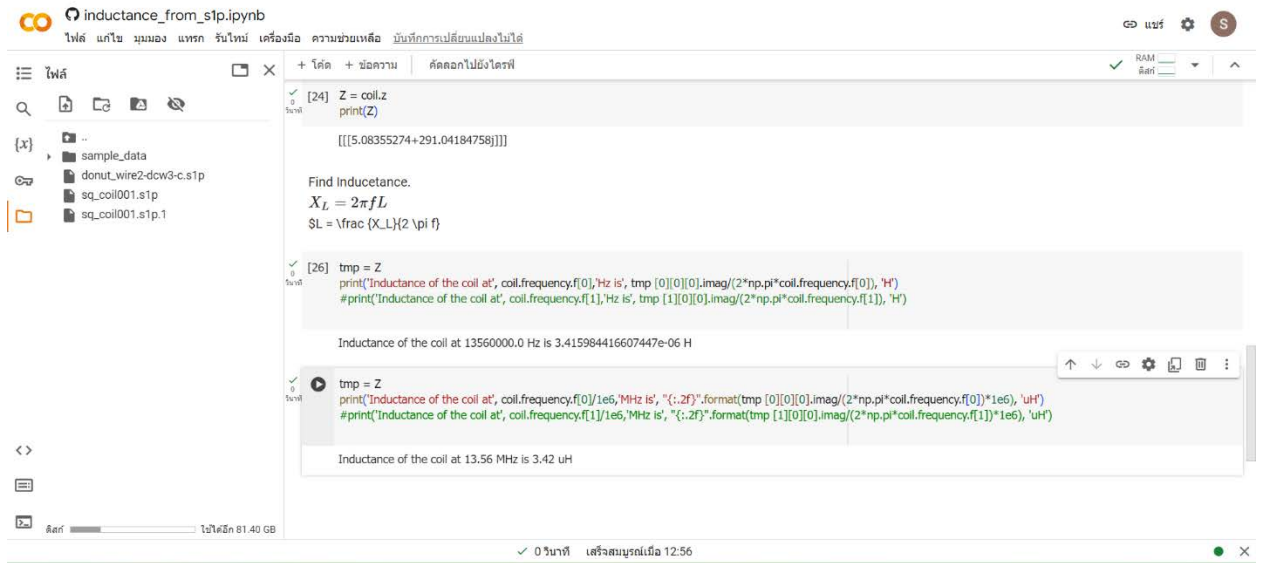
Mutual Inductance of the coil at 13560000.0 Hz is 2.9513078009766496e-07 H

tmp = Z
print("Mutual Inductance of the coil at", coil.frequency.f[0]/1e6, 'MHz is', "{:.2f}".format(tmp [0][0][1].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[0])*1e6), 'uH')
#print("Mutual Inductance of the coil at", coil.frequency.f[1]/1e6, 'MHz is', "{:.2f}".format(tmp [1][0][1].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[1])*1e6), 'uH')

Mutual Inductance of the coil at 13.56 MHz is 0.30 uH

0 รันที่ เสร็จสมบูรณ์เมื่อ 01:23
```

ภาพที่ 26 การคำนวณ Mutual Inductance ของ Test Coil ด้วยวิธี Coding



```

[24] Z = coil.z
      print(Z)

[[[5.08355274+291.04184758j]]]

Find Inductance.

$$X_L = 2\pi fL$$


$$L = \frac{X_L}{2\pi f}$$


[26] tmp = Z
      print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[0], 'Hz is', tmp[0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[0]), 'H')
      #print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[1], 'Hz is', tmp[1][0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[1]), 'H')

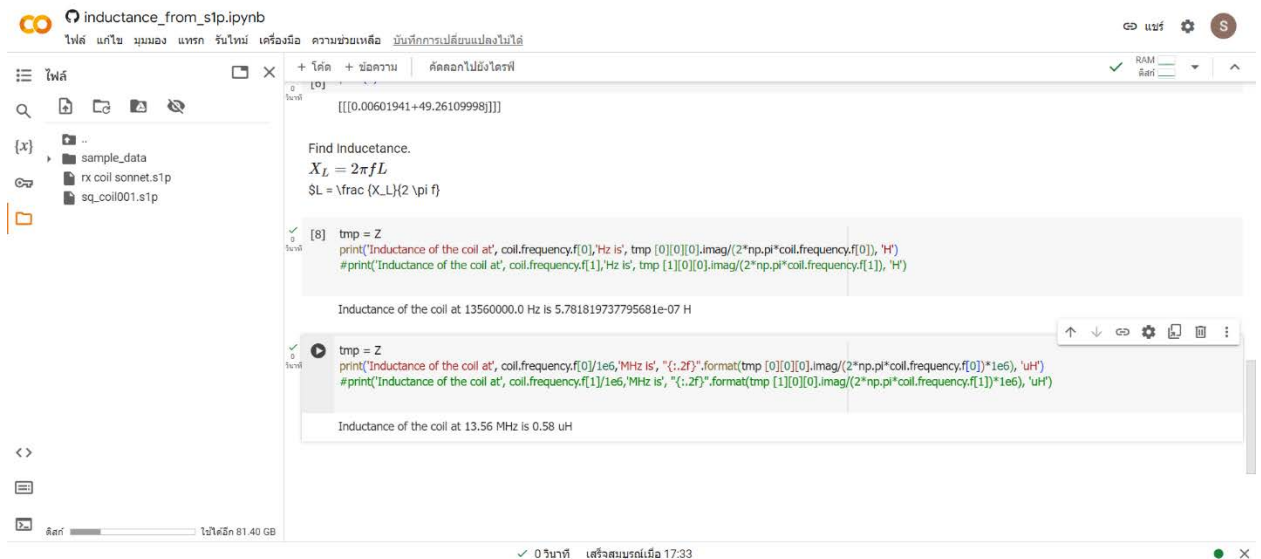
Inductance of the coil at 13560000.0 Hz is 3.415984416607447e-06 H

[27] tmp = Z
      print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[0]/1e6, 'MHz is', "{:.2f}".format(tmp[0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[0])*1e6), 'uH')
      #print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[1]/1e6, 'MHz is', "{:.2f}".format(tmp[1][0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[1])*1e6), 'uH')

Inductance of the coil at 13.56 MHz is 3.42 uH

```

ภาพที่ 27 การคำนวณ Self Inductance ของ Test Coil ด้วยวิธี Coding



```

[28] tmp = Z
      print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[0], 'Hz is', tmp[0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[0]), 'H')
      #print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[1], 'Hz is', tmp[1][0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[1]), 'H')

Inductance of the coil at 13560000.0 Hz is 5.781819737795681e-07 H

[29] tmp = Z
      print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[0]/1e6, 'MHz is', "{:.2f}".format(tmp[0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[0])*1e6), 'uH')
      #print("Inductance of the coil at", coil.frequency.f[1]/1e6, 'MHz is', "{:.2f}".format(tmp[1][0][0].imag/(2*np.pi*coil.frequency.f[1])*1e6), 'uH')

Inductance of the coil at 13.56 MHz is 0.58 uH

```

ภาพที่ 28 การคำนวณ Self Inductance ของ Rx Coil ด้วยวิธี Coding

วัดค่าอุปกรณ์จริง

มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าความต้านทานจินตภาพเหนี่ยวนำ เพราะ Coil มีคุณสมบัติเป็นขดลวดเหนี่ยวนำ เพื่อต้องการให้ได้กระแสไฟฟ้าในวงจรสูงสุด จึงต้องการปรับให้ค่าความต้านทานจินตภาพของอุปกรณ์เป็นศูนย์โดยการนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาต่ออนุกรมโดยที่ตัวเก็บประจุมีความต้านทานจินตภาพเป็นจำนวนจินตภาพลบ เรียกว่า Series Resonance Effect โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่า เรียกว่า Vector Network Analyzer ซึ่งจะแสดงผลให้เห็น ในรูปแบบ Smith Chart หากจุดไปแสดงที่ตำแหน่งซ้ายสุด คือ Short Circuit หากจุดไปแสดงที่ตำแหน่งขวาสุด คือ Open Circuit หากจุดอยู่ในซีกบนของกราฟ อุปกรณ์จะมีคุณสมบัติเป็นขดลวดเหนี่ยวนำ แต่หากจุดอยู่ในซีกล่างของกราฟ อุปกรณ์จะมีคุณสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า

L ของ Test Coil = 2.16 uH

ค่า S21 = -21dB phase 122.5 degrees

S11 ~ 0dB 30.5degrees

ต้องการค่า C ที่มีค่า $X_C = X_L$ ที่ 13.56 MHz

ต้องเลือกซื้อ Capacitor 0805 ที่มีคุณสมบัติ Ultra Low ESR + HighQ lowloss

และ Tx Coil มีคุณสมบัติดังนี้

L = 2.16 uH $X_L = 184 \text{ ohm}$ C = 63.8 pF

ต้องใช้ C = 62 pF 7 ชิ้น สำหรับ Tx Coil และ 2 ชิ้น สำหรับ Test Coil

L ของ Rx Coil = 0.763 uH

ต้องใช้ C = 180 pF 1 ชิ้น สำหรับ Rx Coil

การติดตั้งอุปกรณ์

การวัดค่าความต้านทานของ RX Coil ด้วย Vector Network Analyzer พบว่าเหมาะสมที่สุดกับการใช้งานที่ความถี่ 13.56 MHz แสดงดังภาพที่ 29



ภาพที่ 29 วัดค่าความต้านทานของ RX Coil ด้วย Vector Network Analyzer

จากการวัดค่าความต้านทานของ TX Coil ด้วย Vector Network Analyzer พบว่า เหมาะสมที่สุดกับการใช้งานที่ความถี่ 13.42 MHz โดยที่เป็นค่าจากการทดลองซึ่งแสดงดังภาพที่ 30

X_L ของ TX Coil มีค่า 184 Ω ซึ่งได้มาจากการวัด (ก่อนใส่ Capacitor) หรือเขียนเป็น Reactance Form ได้ว่า $X_L = j184 \Omega$ เมื่อใส่ Capacitor เข้าไปแล้ว วัดค่าได้ $-j19.3$ หากคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ TX Coil เหมือนกันกับ Test Coil แสดงดังภาพที่ 30 โดยที่ X_L (ก่อนใส่ Capacitor) + $X_C = X$ (หลังใส่ Capacitor) จะคำนวณได้ว่า $X_C = -j203.3 \Omega$ และนำมาคำนวณในสมการที่ 4 เพื่อหาค่า Capacitance ของ Capacitor ที่ต่อเข้าไปกับ Tx Coil

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (4)$$

เมื่อ X_C คือ Capacitive Reactance หลังผ่านการ Normalization ให้กลายเป็นจำนวนจริงบวก

f คือ ความถี่ของสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

C คือ ค่า Capacitance ของ Capacitor ที่ต่อเข้าไปกับ Tx Coil

เมื่อแทนค่า X_C และค่า f จะคำนวณได้ว่า $C = 57.7329 \text{ pF}$ หรือประมาณค่าได้เป็น $C = 58 \text{ pF}$



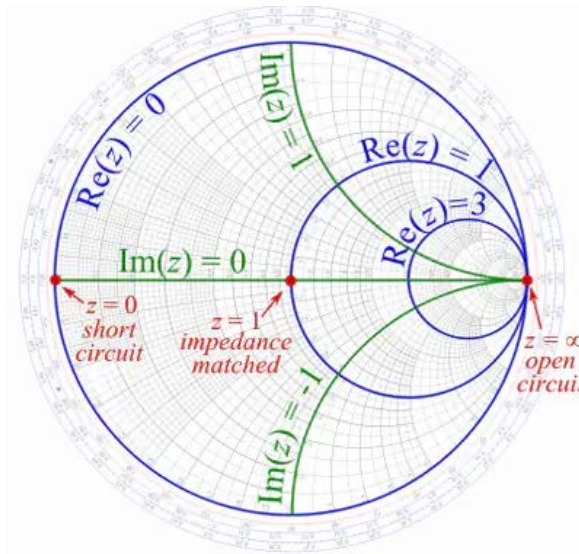
ภาพที่ 30 วัดค่าความต้านทานของ TX Coil ด้วย Vector Network Analyzer

โดยปกติแล้ว TX Coil (Non-Overlap Case) และ Test Coil ควรมีค่า Self Inductance เท่ากัน แต่ในการออกแบบนี้เกิดข้อผิดพลาดเล็กน้อย ได้แก่ Test Coil 2 ฝั่ง ไม่ได้มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกันทุกประการ ในฝั่งหนึ่งมีขดลวดส่วนที่ยื่นเกินออกไป และข้อผิดพลาดอีกประการหนึ่งคือ ลายทองแดง 7 ชั้น บน TX Coil ซึ่งระหว่างขดลวด 2 ขดลวด แบบ Non-Overlap คู่หนึ่ง มีระยะห่างไม่เท่ากันตลอดแนวรอยต่อ กล่าวคือ แนวรอยต่อมีความกว้างไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้ค่า Self Inductance ของ TX Coil(Non-Overlap Case) เมื่อเปรียบเทียบกับ Test Coil มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย

Smith chart ดังภาพที่ 31 เป็นเครื่องมือที่สำคัญเพื่อความสะดวกในการคำนวณ impedance ในอุปกรณ์ Radio Frequency ในทางปฏิบัติ นิยมนำมาใช้งานกับระบบวิศวกรรมไมโครเวฟ เครือข่ายสื่อสารและสายส่ง กล่าวคือ impedance เป็นตัวเลขจำนวนเชิงซ้อน โดยที่ ส่วนจริงคือความต้านทานไฟฟ้าจาก Resistor ส่วนจินตภาพ คือค่าความต้านทานไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณจาก Inductor และ Capacitor มีค่าได้ตั้งแต่ 0 no load short circuit มากไปจนถึง infinity open circuit ซึ่งถูกวาดลงบน กราฟ 2 มิติที่มีขอบเขต Smith chart ได้บรรจุตัวแปร scattering parameters ไว้ด้วย [4]

การออกแบบให้เกิดการ Impedance matching มีความสำคัญ เพราะ จะทำให้การส่งกำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพ loss น้อยลง อุปกรณ์จะไม่ร้อน ไม่เกิดคลื่นนิ่งในวงจร และไม่เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ บน Smith Chart ขอบเขตของแต่ละวงกลมแสดงถึงค่า VSWR ซึ่งคือตัวแปรที่แสดงถึง อัตราส่วนของแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุดของรูปคลื่นนิ่งบนสายนำสัญญาณ ในกรณีที่เกิดการ Impedance matching แล้ว VSWR จะมีค่าเท่ากับ 1 โดยที่รัศมีของกลมจะแปรผันตรงกันกับค่า VSWR

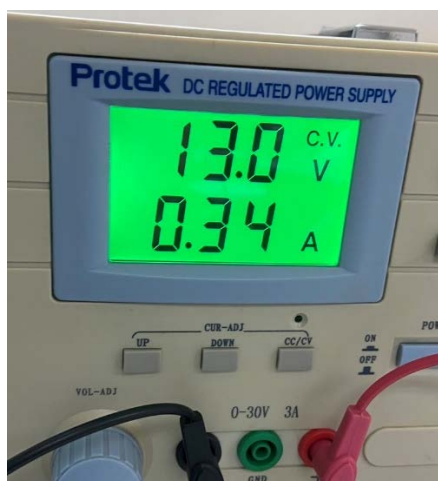
Smith Chart สามารถใช้เพื่อกำหนดค่า admittance คือปริมาณที่เป็นส่วนกลับของ impedance มีความสำคัญในการทำ stub tuning คือการนำสายไฟที่มีค่าความยาวของสายที่เหมาะสม มาต่อเข้ากับวงจรหลักเพื่อปรับค่า impedance



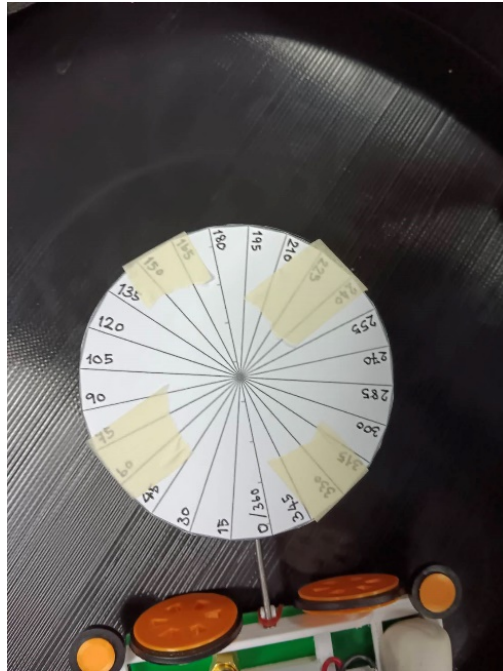
ภาพที่ 31 การคำนวณ Impedance ด้วย Smith Chart

การวัดค่ากำลังไฟฟ้าบน RX Coil โดยวัดเทียบจากผลต่างมุม 15 องศา บนขดลวด TX Coil

ในการวัดค่ากำลังไฟฟ้าบน RX Coil โดยวัดเทียบจากผลต่างมุม 15 องศา บนขดลวด TX Coil โดยต่อเข้ากับแหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 13.0 V 0.34 A ดังภาพที่ 32 และกำหนดจุดเริ่มต้น คือ ขดลวดที่อยู่ติดกันกับ Connector เป็นมุม 0 องศา แล้วเรียงลำดับการวัดแบบตามเข็มนาฬิกา แสดงวิธีการวัด ดังภาพที่ 33 โดยใช้ Spectrum Analyzer ดังภาพที่ 34 และแสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดค่า ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 32 แหล่งกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง 13.0 V 0.34 A



ภาพที่ 33 เครื่องมือแสดงค่ามูบน TX Coil

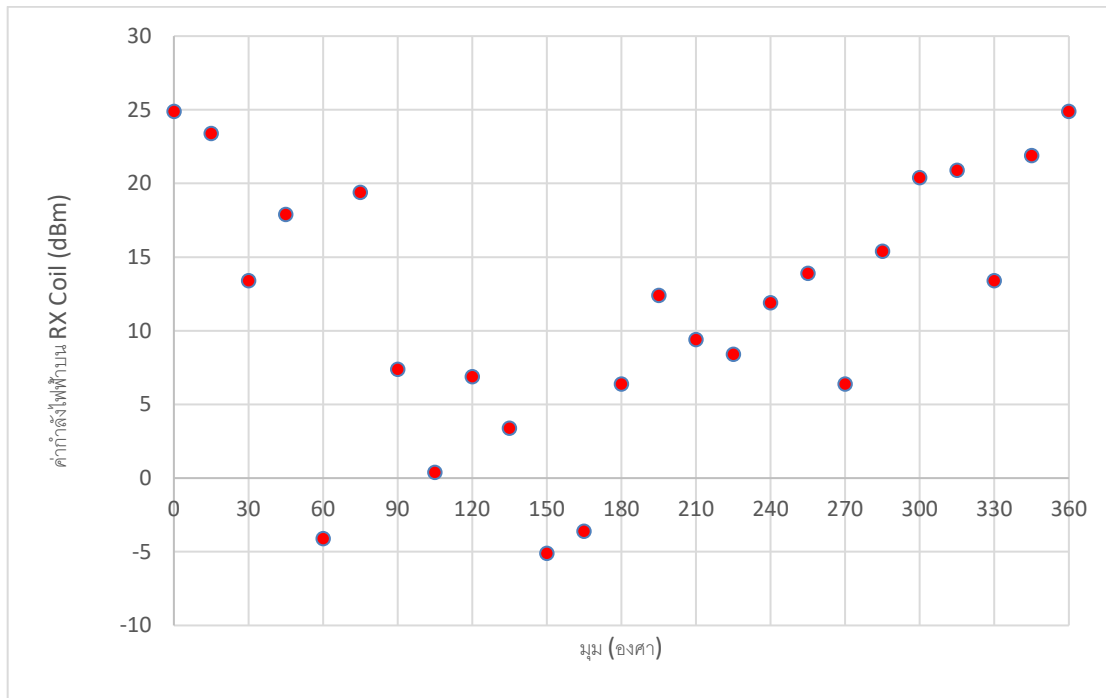


ภาพที่ 34 Spectrum Analyzer

ตารางที่ 1 กำลังไฟฟ้า ของ RX Coil เทียบกับมุมบน TX Coil

มุมบน TX Coil (องศา)	ค่ากำลังไฟฟ้าบน RX Coil (dBm)
0	24.9
15	23.4
30	13.4
45	17.9
60	-4.1
75	19.4
90	7.4
105	0.4
120	6.9
135	3.4
150	-5.1
165	-3.6
180	6.4
195	12.4
210	9.4
225	8.4
240	11.9
255	13.9
270	6.4
285	15.4
300	20.4
315	20.9
330	13.4
345	21.9

จากตารางที่ 1 เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าบน RX Coil ในหน่วย dBm มาเปรียบเทียบกับผลต่างของมุมของขดลวดบน TX Coil ที่ 15 องศา จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์เป็นกราฟ ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 35 กำลังไฟฟ้า ของ RX Coil เทียบกับมุมบน TX Coil

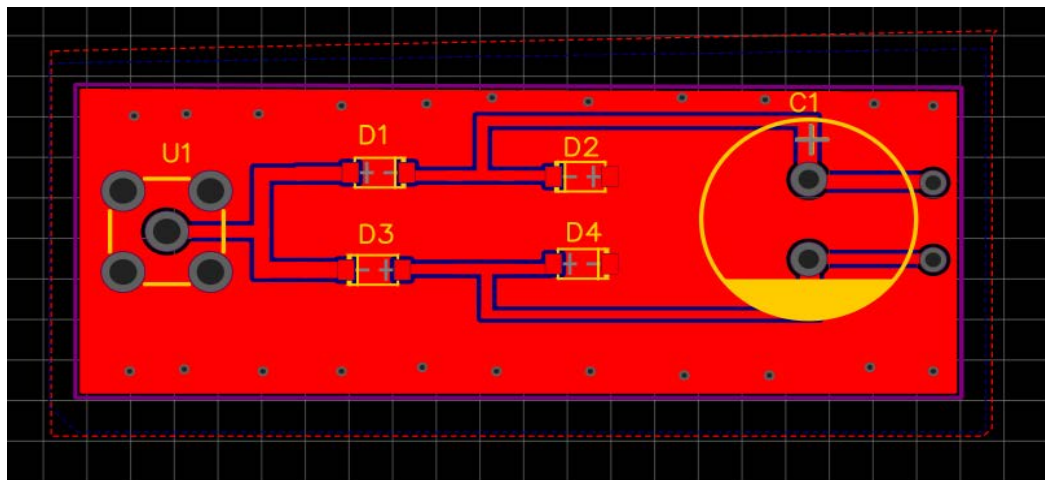
5.2. วงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้า

วงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้าจะใช้วงจรเรียงกระแสประเภทเต็มคลื่นแบบบริดจ์ (Full Wave Bridge Rectifier Circuit) เพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนล้อรถเป็นมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งออกแบบโดยใช้โปรแกรม EasyEDA ดังภาพที่ 36 ให้ Capacitor มีค่าความจุสูงสำหรับเก็บปริมาณประจุต่อ 1 หน่วยแรงดันไฟฟ้าได้มาก เพื่อที่จะจ่ายไฟตรงให้กับมอเตอร์ โดยต่อ Capacitor ขนานกับมอเตอร์เพื่อรักษาแรงดันที่ต้องการจ่ายให้กับมอเตอร์คงที่

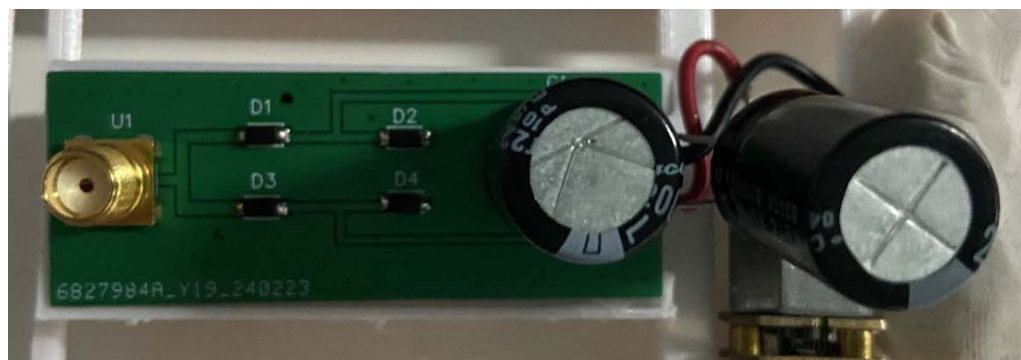
ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Current) นั้นควรจะมี แรงดันกระเพื่อม (Voltage Ripple) น้อย ได้แรงดันตามที่ต้องการเมื่อเข้าสู่ สภาวะคงที่ (Steady State) และควรจะมี Transient Time ต่ำ และมี Overshoot ต่ำในส่วน D1 D2 D3 D4 คือไดโอด U1 คือ SMA Connector ที่ใช้เชื่อมต่อกับ SMA Connector ของ RX Coil โดยไดโอดที่ใช้คือ 1N5819 ทนกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 1A และมี Breakdown Voltage อยู่ที่ 40V จึงทนกำลังไฟฟ้าได้ 40W ซึ่งการขยายกำลังไฟฟ้าจาก Amplifier ขยายได้มากที่สุดไม่เกิน 4.16W จึงสามารถใช้งานไดโอดนี้ได้

Capacitor รวมค่าความจุไฟฟ้าได้เป็น 4,400 uF และได้ใช้แรงดันจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่เชื่อมต่อกับ Oscillator Circuit 13 V เพื่อทำให้เก็บประจุไฟฟ้าได้มากขึ้น และเก็บพลังงานได้มากขึ้น

ในการออกแบบ ได้เคลือบพื้นที่ทองแดงเป็น GND ทั้ง TOP Layer และ Bottom Layer และได้ใช้ Via เชื่อม GND ของทั้งสองชั้นเข้าด้วยกัน เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน หลังจากสิ่งทำแล้วจะได้ชิ้นงานดังภาพที่ 37



ภาพที่ 36 แบบวงจรฝั่งรับกำลังไฟฟ้าโดยใช้ Full Wave Bridge Rectifier Circuit



ภาพที่ 37 ชิ้นงาน Full Wave Bridge Rectifier Circuit

ในส่วนของมอเตอร์ดังภาพที่ 38 ที่ขับเคลื่อนล้อรถนั้นจะใช้มอเตอร์แรงดัน 6 V_{dc} จำนวน 1 ตัวเพื่อขับเคลื่อนล้อ



ภาพที่ 38 มอเตอร์แรงดัน 6V

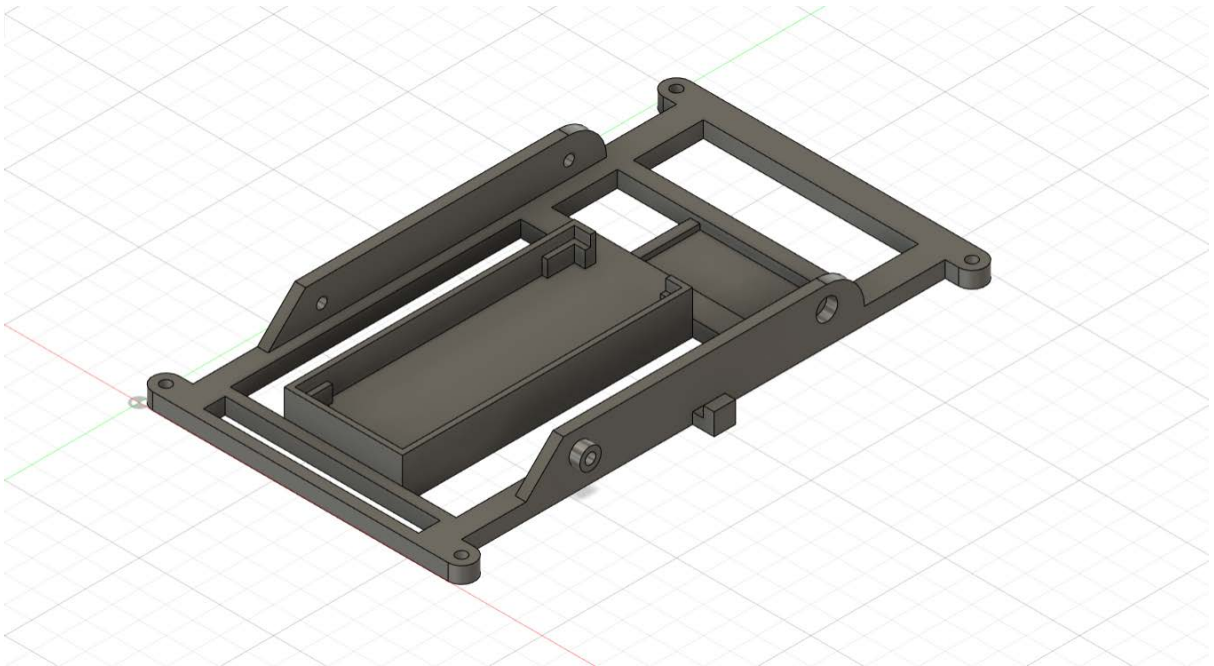
5.3. ชิ้นงาน 3 มิติ

5.3.1. การออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ

ในการออกแบบชิ้นงาน 3 มิติ ได้ใช้โปรแกรม Autodesk Fusion ในการออกแบบ ซึ่งชิ้นงานประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

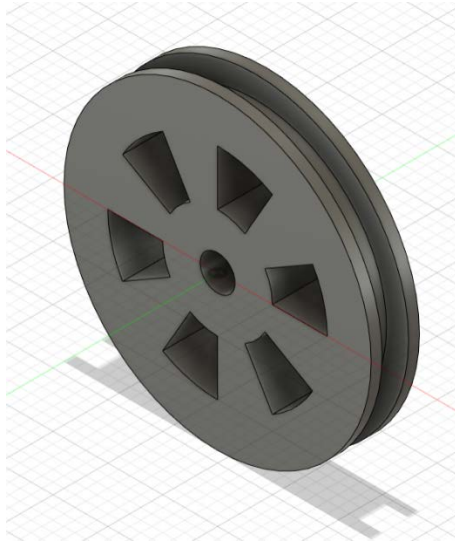
1. โมเดลรถ จะประกอบด้วย

- โครงสร้างโมเดลรถ จะมีลักษณะดังภาพที่ 39 โดยจะต้องออกแบบให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาเพื่อให้มอเตอร์สามารถขับเคลื่อนตัวรถได้ และยังสามารถประกอบ PCB ทั้ง RX Coil และ Rectifier ให้ติดกับตัวรถได้ รวมถึงมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วย

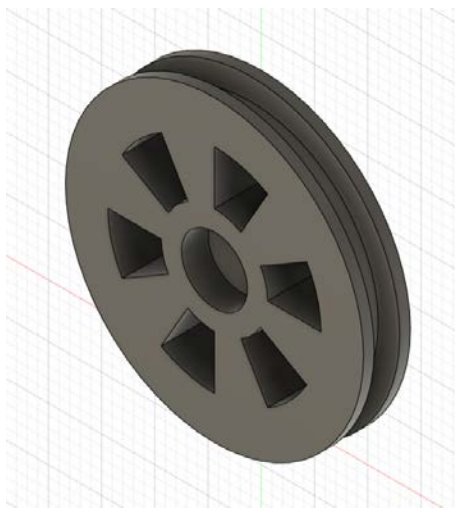


ภาพที่ 39 โครงสร้างโมเดลรถ

- ล้อขับเคลื่อน จะมี 2 ส่วนคือ ล้อที่สวมกับมอเตอร์จะมีรูที่ต้องแน่นพอดีกับเพลลาของมอเตอร์ดังภาพที่ 40 และล้ออื่นๆจะหมุนอิสระด้วยการสวมตลับลูกปืน (Ball Bearing) เข้าไปทางช่องวงกลมบริเวณแกนล้อ ดังภาพที่ 41

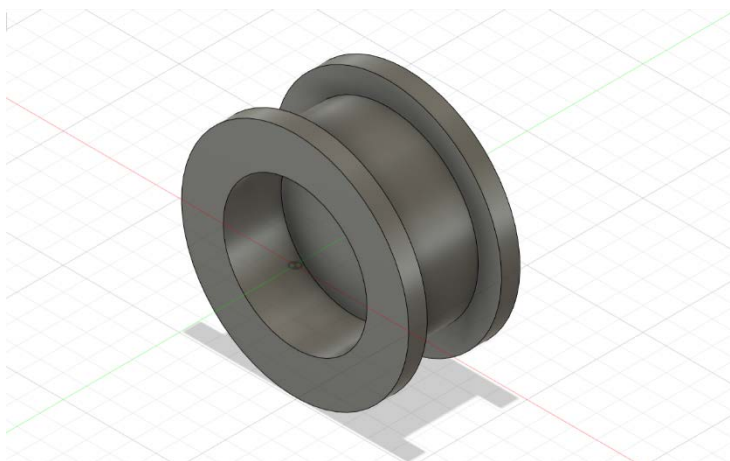


ภาพที่ 40 ล้อที่สวมกับมอเตอร์



ภาพที่ 41 ล้ออื่นๆที่หมุนอิสระด้วยการสวมตลับลูกปืน (Ball Bearing)

- ล้อข้าง จะมีลักษณะดังภาพที่ 42 โดยมีการหมุนอิสระด้วยการสวมตลับลูกปืน (Ball Bearing) เข้าไปทางช่องวงกลมบริเวณแกนล้อ ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมตัวรถให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางของรางได้

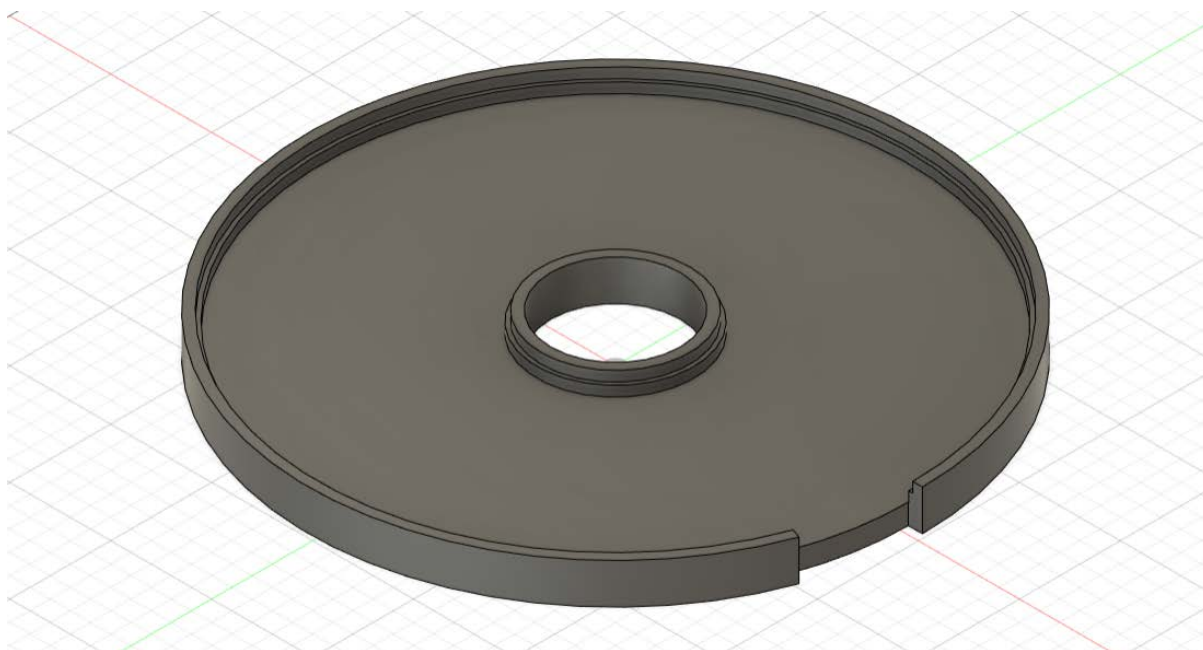


ภาพที่ 42 ล้อช้างที่หมุนอิสระด้วยการสวมตลับลูกปืน (Ball Bearing)

ในส่วนของตัวล้อจะมีการใส่ยางวงกลมหรือ O-Ring บริเวณร่องที่อยู่ตรงกลางล้อเพื่อการขับเคลื่อนยึดเกาะกับราง ในการประกอบรถกับล้อส่วนต่างๆ จะใช้ตะปูตอกไม้้นำมาตัดและเสียบเข้าไปในรูต่างๆ ตามภาพที่ 39 และนำถาวร่อนมายึดตะปูให้เข้ากับตลับลูกปืน (Ball Bearing) และนำล้อต่างๆสวมเข้าไป

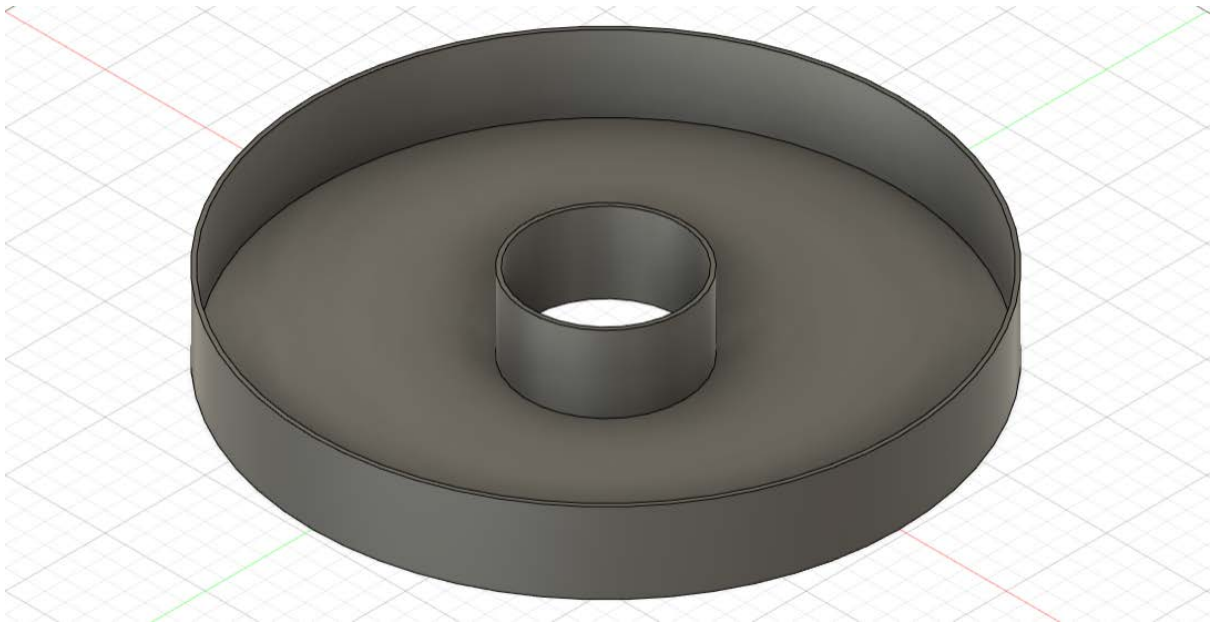
2. ราง จะประกอบด้วย

- ฐานราง จะมีลักษณะดังภาพที่ 43 โดยจะเป็นที่ยึด TX Coil เข้าไปในราง



ภาพที่ 43 ฐานรางที่ยึด TX Coil

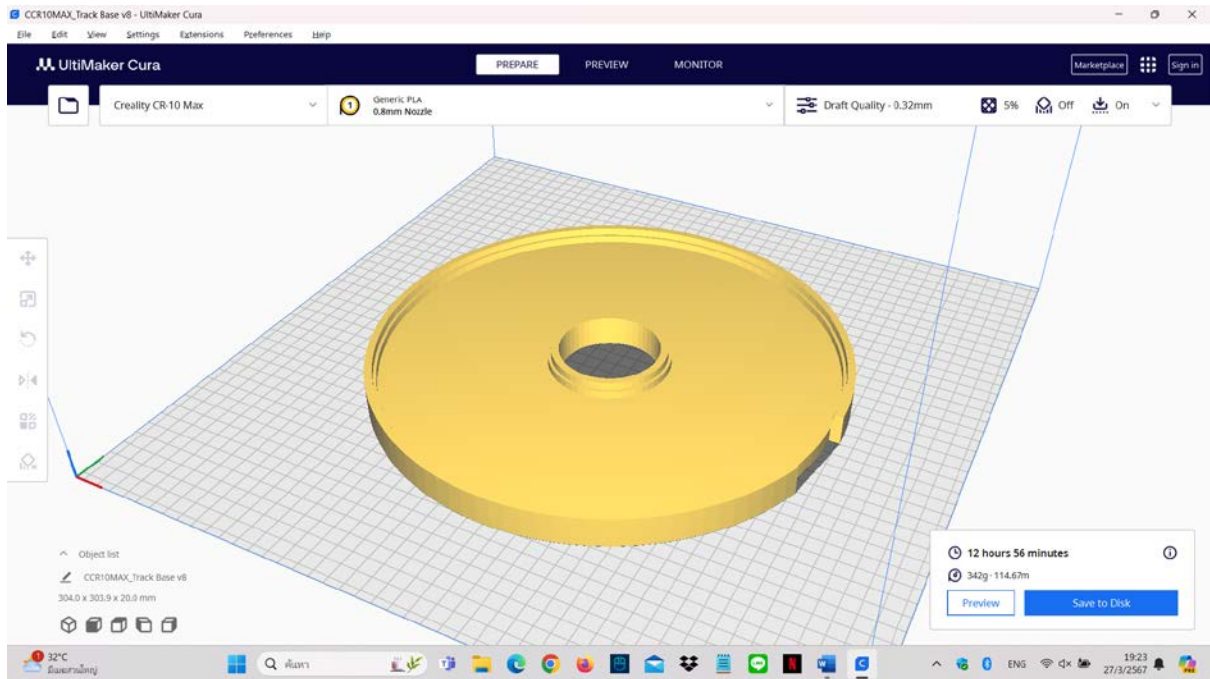
- ตัวราง จะมีลักษณะดังภาพที่ 44 โดยจะวางทับตัวฐานรางที่ยึด TX Coil อยู่ เพื่อเป็นเส้นทางให้รถขับเคลื่อน



ภาพที่ 44 ตัวรางที่เป็นเส้นทางให้รถขับเคลื่อน

5.3.2. การพิมพ์ 3 มิติ จะมีขั้นตอนดังนี้

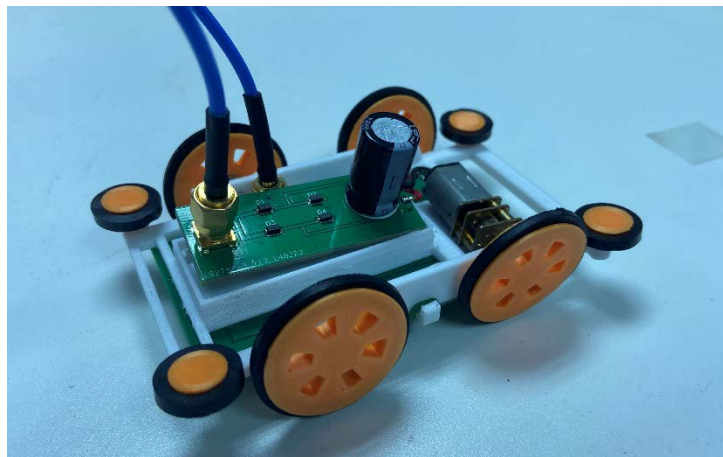
1. หลังจากออกแบบชิ้นงาน 3 มิติแล้ว จะดาวน์โหลดไฟล์จาก Autodesk Fusion เป็นไฟล์นามสกุล .3mf
2. นำไฟล์นามสกุล .3mf ไปเปิดในโปรแกรม Ultimaker Cura เพื่อจะเตรียมการพิมพ์ 3 มิติ โดยใน Cura จะต้องตั้งค่าต่างๆ เพื่อเตรียมความพร้อมในการพิมพ์ ซึ่งภายในซอฟต์แวร์นี้จะมีการบอกความยาวของเส้นพลาสติก PLA ที่ต้องใช้ และเวลาที่ต้องใช้ในการพิมพ์ ดังภาพที่ 45



ภาพที่ 45 การเตรียมความพร้อมก่อนพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ

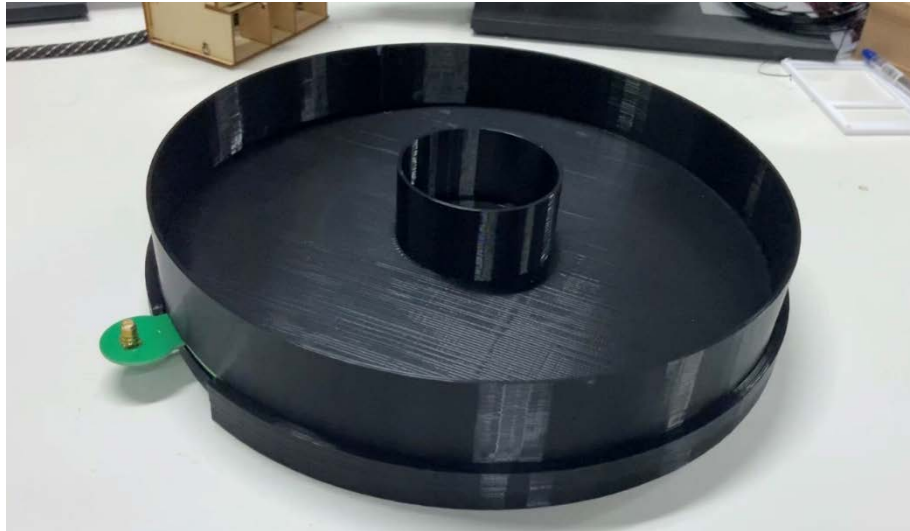
3. การประกอบชิ้นส่วนเข้าด้วยกัน

3.1. ตัวรถจะมีการประกอบ RX Coil, Rectifier, มอเตอร์, ล้อขับเคลื่อน, ล้อข้าง จะได้ดังภาพที่ 46 นอกจากนั้นในการขับเคลื่อนมีความไม่เสถียรเล็กน้อย จึงได้ทำการถ่วงน้ำหนักไปที่ส่วนท้ายของตัวรถด้วยดินน้ำมันเพื่อยึดเกาะที่ดีของตัวรถ



ภาพที่ 46 โมเดลรถที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว

3.2. ราง จะทำการประกอบเป็นชั้นๆ ได้แก่ ฐานราง, TX Coil, ตัวราง ตามลำดับ ดังภาพที่ 47



ภาพที่ 47 ตัวรางที่ประกอบสมบูรณ์แล้ว

6 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

DC Generator ทำงานที่ 13 V 0.34 A ได้เป็นอย่างดี Oscillator Circuit เมื่อปรับค่าจนได้กำลังไฟฟ้าขาออกสูงสุด และได้ความถี่ 13.56 MHz ตามที่ต้องการและทำงานได้เป็นอย่างดี Amplifier Circuit เมื่อเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 13 V พบว่า โดยเกิดความร้อนขึ้นมาแต่ยังคงสามารถเพิ่มกำลังไฟฟ้าได้ SMA Cable มีความยาวไม่มากเกินไป และเมื่อใช้งานกับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่ต่ำจึงเกิดการสูญเสียต่ำ โดยทำงานได้เป็นอย่างดี

SMA Connector มีการเชื่อมต่อเข้ากับ Coil และ Rectifier Circuit ได้เป็นอย่างดี ไม่หลุดหลวม การบัดกรีในส่วนต่างๆ ทำได้เป็นอย่างดี จุดเชื่อมต่อมีความแข็งแรง เชื่อมต่อทางไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ TX Coil ขดลวดที่อยู่ใกล้ SMA Connector มีการส่งกำลังไฟฟ้าที่มาก ส่วนขดลวดที่อยู่ไกลจาก SMA Connector มีการส่งกำลังไฟฟ้าลดลง

บริเวณรอยต่อระหว่างขดลวดบางส่วน มีการออกแบบระยะห่างไม่สม่ำเสมอ จึงทำให้มีการเหนี่ยวนำในบางบริเวณลดน้อยลง แต่ RX Coil, TX Coil, Rectifier Circuit ในภาพรวมทำงานได้ดี โดยที่มีแรงดันตกคร่อมที่ไดโอดในระดับที่ใช้ได้ ซึ่งไดโอดเกิดความผิดปกติเล็กน้อยเมื่อใช้งานกับไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง Capacitor ทำการเก็บประจุไฟฟ้าและส่งพลังงานให้แก่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ได้เป็นอย่างดี

DC Motor มีความเร็วในการหมุนสูง ซึ่งได้รับพลังงานไฟฟ้าและได้รับแรงดันไฟฟ้ามากเพียงพอที่จะใช้งานกับมอเตอร์ชนิดนี้ได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รถสามารถวิ่งบนรางได้ครบรอบวงกลมและสามารถวิ่งต่อไปได้เรื่อยๆ โดยไม่หยุด

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

1. Test Coil ควรจะออกแบบ Coil และ Connector ให้เหมือนกันทั้งฝั่งซ้ายและขวา
2. เพิ่มทางเลือกในการออกแบบคือ ออกแบบ Coil และ Connector ด้วย Copper Area โดยกำหนด Net = GND
3. ออกแบบให้ Copper Bottom Layer บริเวณรอบๆ PAD ที่มีสัญญาณ ล้อมรอบ PAD ในรูปแบบวงกลม
4. ได้มีการใช้ Footprint SMA Connector โดย 4 PAD รอบๆทำหน้าที่เป็น GND และ PAD ตรงกลางทำหน้าที่เป็นช่องทาง Signal
5. เพิ่มพื้นที่บัดกรีสำหรับ Capacitor ใน Test Coil และ Rx Coil
6. ทดสอบ Export Gerber File จาก EasyEDA แล้วนำมา Import Gerber File เข้าไปใน Sonnet เพื่อ Simulation สำหรับหาค่า L
7. ออกแบบ Rx Coil ใน Sonnet ให้มีขนาดแม่นยำมากที่สุดตามที่ต้องการ และเพิ่ม Connector เข้าไป
8. การระบายความร้อนของ Amplifier Circuit อาจจะไม่ดีมากพอ จึงต้องหาวิธีระบายความร้อนให้มีประสิทธิภาพ
9. นำวงจรฝั่ง TX Coil เข้ากล่องซึ่งมีการระบุ ขาที่ต้องต่อแรงดันไฟฟ้า และขาที่เป็น GND ได้อย่างชัดเจน

10. ในส่วนของการพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ ควรมีการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบสำหรับความคลาดเคลื่อนของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ (คลาดเคลื่อนประมาณ 0.2-0.4 มิลลิเมตร)
11. ในส่วนของตัวรถควรออกแบบโดยคำนึงถึงความสมดุลของตัวรถสำหรับการขับเคลื่อน ทั้งนี้ควรออกแบบและพิมพ์ให้สมบูรณ์ โดยไม่ต้องมีชิ้นส่วนเพิ่มเติม เช่น ดินน้ำมัน

7 บรรณานุกรม

- [1] T. Wisessri and C. Promsatarporn, "Demonstration of Resonant Wireless Power Transfer using Toy Racing Cars and Tracks," B.Eng. Senior Project, Kasetsart University, Thailand, 2022.
- [2] C. Rakluea, A. Worapishet, S. Chaimool, Y. Zhao, and P. Akkaraekthalin, "True nulls-free magnetoinductive waveguides using alternate coupling polarities for batteryless dynamic wireless power transfer applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 37, no. 8, pp. 8835–8854, 2022.
- [3] “วงจรเรียงกระแส คืออะไร?” ช่างไฟดอทคอม | ทีมงานช่างไฟฟ้าที่ดีที่สุดในประเทศไทย, 18-Nov-2021. [Online]. Available: <https://www.changfi.com/fix/2021/11/18/14296/>. [Accessed: 11-Oct-2023].
- [4] Digikey.co.th. [Online]. Available: <https://www.digikey.co.th/th/articles/the-smith-chart-an-ancient-graphical-tool-still-vital-in-rf-design>. [Accessed: 29-Mar -2024].

ประวัตินิสัย

1. ชื่อ-นามสกุล: นายกรวิชญ์ รังสาคร เลขประจำตัวนิต: 6310551400
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน: 27 ซอยเจริญพัฒนา1 รามอินทรา117 แขวงบางชั้น เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510
โทรศัพท์เคลื่อนที่: 083-2598722
E-mail: koravich.ru@ku.th

ระดับการศึกษา:

คุณวุฒิการศึกษา	โรงเรียน/สถาบัน	ปีการศึกษาที่จบ
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2	พ.ศ.2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2	พ.ศ.2559

2. ชื่อ-นามสกุล: นายศุภกร ธัญญาญ เลขประจำตัวนิต: 6310551884
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน: 12/125 หมู่บ้านพฤษภาวิลเลจ12 ถนนเรียบคลองสอง ตำบลคลองสอง อำเภอกองหลวง
จังหวัด ปทุมธานี 12120
โทรศัพท์เคลื่อนที่: 080-1496515
E-mail: supakorn.tany@ku.th

ระดับการศึกษา:

คุณวุฒิการศึกษา	โรงเรียน/สถาบัน	ปีการศึกษาที่จบ
มัธยมศึกษาตอนปลาย	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต	พ.ศ.2562
มัธยมศึกษาตอนต้น	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย รังสิต	พ.ศ.2559

3. ชื่อ-นามสกุล: ศุภกร พงษ์ธีระพล เลขประจำตัวนิสิต 6310551892
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 ที่อยู่ปัจจุบัน: 129 ม.กมลวรรณ ซ.คูบอน 20 ถ.รามอินทรา กม.8 แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230
 โทรศัพท์เคลื่อนที่: 091-0584775
 E-mail: Supakorn.phon@ku.th
 ระดับการศึกษา:
- | คุณวุฒิการศึกษา | โรงเรียน/สถาบัน | ปีการศึกษาที่จบ |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------|
| มัธยมศึกษาตอนปลาย | โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2 | พ.ศ.2562 |
| มัธยมศึกษาตอนต้น | โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) 2 | พ.ศ.2559 |