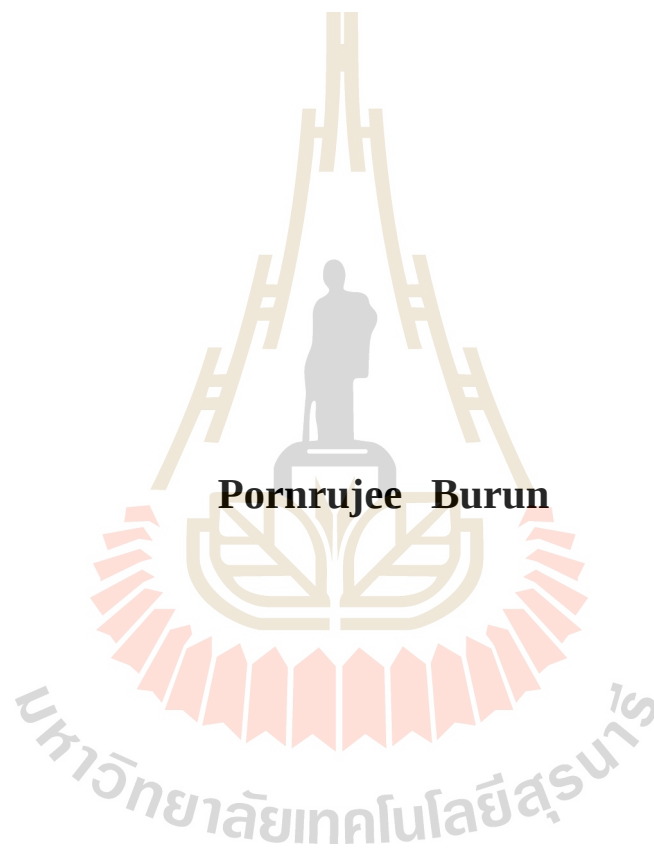


การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะ
การทำงานด้วยวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ 3 มิติ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**DESIGN OF THE OPTIMIZATION WIRELESS POWER
TRANSFER SYSTEM TO INCREASE PERFORMANCE
USING 3-D FINITE ELEMENT**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะ
การทำงานด้วยวิธีไฟต์ในดอิลเมนต์ 3 มิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ศ. ดร. วิจิตร กิณเรศ)

ประธานกรรมการ



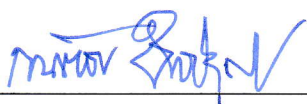
(รศ. ดร. เพ็ญใจ เพ็ญใจ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร. อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ



(รศ. ร. อ. ดร. กนกนธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร. พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

พรุจิ บุหรณ์ : การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อ
เพิ่มสมรรถนะการทำงานด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ (DESIGN OF THE
OPTIMIZATION WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM TO INCREASE
PERFORMANCE USING 3-D FINITE ELEMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา :
รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 108 หน้า.

ภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีการตระหนักถึงปัญหาของพลังงานมากขึ้น จึงได้มีการ
พัฒนารถยนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยรถยนต์ไฟฟ้านี้จะเป็นการอัดประจุไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่ที่อยู่
ภายในตัวถังของรถ ซึ่งการอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำเป็นการต่อสายไฟโดยตรงเข้ากับระบบซึ่งอาจ
ส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน อีกทั้งยังมีความเสี่ยงที่อาจเกิดประกายไฟ ด้วยปัญหา
ดังกล่าวจึงนำไปสู่แนวคิดของระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้สายไฟใน
การเชื่อมต่อระบบและมีการแยกระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิทำให้เป็นแนวคิดที่มี
ความน่าสนใจอย่างยิ่ง

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสวิตช์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่อยู่ในรูป
ของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ที่มีความสัมพันธ์กับค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้า
แบบไร้สาย โดยอาศัยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติที่พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม MATLAB
สำหรับการจำลองผลการกระจายค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของ
ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยการออกแบบมุ่งเน้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงาน
ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งได้นำเสนอทั้งสิ้น 4 รูปแบบคือ การออกแบบวิธีการ
ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ การออกแบบจำนวนของแท่งเฟอร์ไรต์ การออกแบบตำแหน่งของการติดตั้ง
แท่งเฟอร์ไรต์ และการออกแบบตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยผลการจำลอง
แสดงให้เห็นว่า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวด
ทุติยภูมิจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่ง มีตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ตรงกัน และขดลวด
ปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอยู่ในตำแหน่งตรงกันจะมีค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานมากที่สุด

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา พรุจิ บุหรณ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.เผด็จ เผ่าละออ

PORNRUJEE BURUN: DESIGN OF THE OPTIMIZATION WIRELESS
POWER TRANSFER SYSTEM TO INCREASE PERFORMANCE
USING 3-D FINITE ELEMENT. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
PADEJ PAO - LA - OR, 108 PP.

WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM /TRANSFER EFFICIENCY/
3 - D FINITE ELEMENT METHOD/MAGNETIC FIELD

The automotive industry is increasingly aware of the problem of energy. Resulting to the development of electric vehicles. In electric vehicle, electric charge is stored in the battery inside the car's body. The conductive charging is the direct connection of the wires to the system which may cause inconvenience in operation. There is also a risk of sparks. With these problems, it leads to the concept of wireless power transmission system. This does not need to use wires for connect the system. And separation between the primary coil and secondary coil, make them interesting concept.

This Thesis presents the mathematical modeling of magnetic vector potential in form of second order partial differential equation related to magnetic field of the wireless power transfer. Developed MATLAB program in 3 dimension of finite element method was used for the simulation of the magnetic field in the primary coil and the secondary coil of the wireless power transfer. Four ideas are proposed in this thesis to increase transfer efficiency between primary coil and secondary coil :

- 1) Designing for installing of ferrite bar, 2) Designing the number of ferrite bar,
- 3) Designing the position of the installing ferrite bar and 4) Designing the position of the primary coil and secondary coil. The simulation results show that the wireless

power transfer wireless power transfer system equipped with ferrite bar at primary and secondary coils of 14 ferrite bar, has the corresponding position of the ferrite bar and the primary and secondary coils are in the same position and have the highest transfer efficiency.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature พรจุติ ขุนรัตน์

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมไปถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น รวมทั้งเป็นกำลังใจ และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าทุกท่าน ที่ให้ความรู้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการศึกษา รวมทั้งการ เผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณทองดี-คุณอรทัย บุหรีน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ดูแล ห่วงใย เป็นกำลังใจ อย่างใกล้ชิด และให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายระหว่างการศึกษาแก่ผู้วิจัยเสมอมา และขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางด้านการศึกษามาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต เรื่อยมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พรจุจิ บุหรีน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย	2
1.4 ขีดกลางเบื้องต้น	2
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์	3
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 บทนำ	5
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 สรุป	19
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	20
3.1 บทนำ	20
3.2 การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า	20
3.2.1 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ	21
3.2.2 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่	22
3.2.3 การอัดประจุแบบเหนี่ยวนำ	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	24
3.4	สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	25
3.5	สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก	26
3.6	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก	28
3.7	ระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลเมนต์	30
3.8	สรุป	36
4	การคำนวณสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วย ระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลเมนต์แบบ 3 มิติ	37
4.1	บทนำ	37
4.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	38
4.3	การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลเมนต์	40
4.3.1	การออกแบบอิลเมนต์ของพื้นที่ศึกษา	40
4.3.2	ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลเมนต์แบบ 3 มิติ	42
4.3.3	การสร้างสมการของอิลเมนต์	43
4.3.4	การประกอบสมการอิลเมนต์ขึ้นเป็นระบบ	48
4.3.5	การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ	49
4.4	สรุป	49
5	ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วย ระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลเมนต์แบบ 3 มิติ	50
5.1	บทนำ	50
5.2	โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ	50
5.2.1	โปรแกรมการสร้างกริด	50
5.2.2	โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก	52
5.3	พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้จำลองผล	53

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.4 ผลการจำลองศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็ก ในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	54
5.3 สรุป	57
6 การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะ การทำงาน	58
6.1 บทนำ	58
6.2 การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อ เพิ่มสมรรถนะการทำงาน	60
6.3 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม	63
6.4 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม	69
6.5 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบลักษณะการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม	75
6.6 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อพิจารณาลักษณะการเอียงของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ที่เหมาะสม	82
6.7 สรุป	87
7 สรุปและข้อเสนอแนะ	88
7.1 สรุป	88
7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต	89
รายการอ้างอิง	90
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	94
ประวัติผู้เขียน	108

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
5.1 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย.....	53
5.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย.....	57
6.1 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์.....	63
6.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม.....	68
6.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม.....	75
6.4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบลักษณะการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม.....	81
6.5 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อพิจารณาลักษณะการเยื้องของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสม.....	86

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1 การอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับและการอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรง	22
3.2 การอัดประจุแบบเหนี่ยวนำ	23
3.3 องค์ประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	24
3.4 ทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม	26
3.6 รูปร่างของปัญหาเมื่อพิจารณาอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	31
3.6 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า	32
4.1 แบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่จะศึกษา	40
4.2 มิตติของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	41
4.3 การแบ่งอิลิเมนต์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	41
5.1 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	51
5.2 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย	51
5.3 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กใน ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในอิลิเมนต์	52
5.4 การกระจายของค่าสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวด ทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 5 cm.	55
5.5 การกระจายของค่าสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวด ทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 10 cm.	55
5.6 การกระจายของค่าสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวด ทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 15 cm.	56
6.1 การพันขดลวดรูปก้นหอย	60
6.2 ลักษณะของขดลวดที่ใช้ในการจำลองผล	61
6.3 ลักษณะการติดตั้งเฟอร์ไรต์ที่ตำแหน่งด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและตำแหน่ง ด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ	62
6.4 ขนาดของแท่งเฟอร์ไรต์	62

สารบัญรูป (ต่อ)

[illegible]

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.21 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่ง	77
6.22 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางไม่ตรงกัน	77
6.23 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน	78
6.24 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่ง	79
6.25 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่ง	79
6.26 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่ง	80
6.27 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางไม่ตรงกันแบบ 3 มิติ	80
6.28 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 100%	83
6.29 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 90%	83
6.30 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 80%	84
6.31 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 70%	84
6.32 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 60%	85
6.33 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 50%	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมยานยนต์ได้มีการตระหนักถึงปัญหาของพลังงาน มลภาวะทางอากาศ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น จึงได้มีการพัฒนายานยนต์ไฟฟ้าเกิดขึ้น โดยยานยนต์ไฟฟ้านี้จะเป็นการอัดประจุไฟฟ้าเก็บไว้ในแบตเตอรี่ที่อยู่ภายในตัวถังของรถ โดยการอัดประจุไฟฟ้าจะสามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือการอัดประจุไฟฟ้าโดยตรง (Conductive charging method) ซึ่งเป็นการต่อสายไฟโดยตรงเข้ากับระบบโดยจะอาศัยการเชื่อมต่อระหว่างรถกับระบบไฟฟ้าภายนอกผ่านสายไฟ ซึ่งวิธีการอัดประจุไฟฟ้าโดยตรงอาจส่งผลให้เกิดความไม่สะดวกในการใช้งาน อีกทั้งยังมีความอันตรายเนื่องมาจากความเสี่ยงที่อาจเกิดประกายไฟ ด้วยปัญหาและข้อจำกัดดังกล่าวจึงนำไปสู่แนวคิดของระบบการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Inductive charging method) หรือระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless power transfer : WPT) โดยหลักการของระบบส่งกำลังไฟฟ้าไร้สายที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็ก โดยใช้ขดลวดเหนี่ยวนำตั้งแต่สองขดขึ้นไป ที่มีการเชื่อมต่อทางแม่เหล็ก เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้สายไฟในการใช้งานอุปกรณ์ไฟฟ้า และมีการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างทางด้านของฝั่งขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil หรือ Transmitter) และฝั่งขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil หรือ Receiver) ซึ่งทำให้มีข้อดีหลายอย่าง เช่น ระบบมีความน่าเชื่อถือมีความปลอดภัย มีความยืดหยุ่นและไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยรวบรวมไปถึงมีค่าบำรุงรักษาที่ต่ำ จะพบว่า การส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้น ถือเป็นแนวคิดที่มีความน่าสนใจอย่างยิ่ง จึงเกิดแนวคิดเพื่อพัฒนาศักยภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายให้มีความสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น

ในการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นสามารถวิเคราะห์โดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอธิบายได้ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation, PDE) ซึ่งหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ยาก ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ (Finite element method, FEM) แบบ 3 มิติ จึงถูกนำมาใช้ในกรณีนี้ และเนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ซึ่งระเบียบวิธีนี้ได้แบ่งพื้นที่ปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยหรืออิลิเมนต์ (Element) ที่ประกอบขึ้นจากจุดต่อต่าง ๆ และเชื่อมต่อกันด้วยกริดสำหรับวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ นิยมใช้อิลิเมนต์ที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Linear tetrahedral)

เพื่อประมาณโดเมนของปัญหา โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวในขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil หรือ Transmitter) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil หรือ Receiver) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งการออกแบบจะมีทั้งสิ้น 4 รูปแบบ ได้แก่ แบบที่ 1 จะพิจารณาวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบริเวณด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและบริเวณด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะสามารถควบคุมระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย แบบที่ 2 จะพิจารณาถึงจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย แบบที่ 3 จะพิจารณาส่วนของตำแหน่งการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ และแบบที่ 4 จะพิจารณาค่าตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย และคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งกำลังงานในเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้หลังจากการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในรถยนต์ไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับการคำนวณหาค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็กในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย พร้อมทั้งจำลองผลทางกราฟิก

1.2.3 เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะและพัฒนาระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ให้มีประสิทธิภาพการทำงาน และเวลาในการอัดประจุที่ดีขึ้น

1.3 สมมุติฐานของการวิจัย

ระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย อาจจะยังมีสมรรถนะไม่ดีมากนัก หากนำมาปรับปรุงใหม่ให้เหมาะสมในทุกๆด้านภายใต้โครงสร้างของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเดิม จะทำให้การใช้งานมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ไม่พิจารณาโครงสร้างตัวถังของรถยนต์ไฟฟ้า

1.4.2 พิจารณาความถี่การทำงานของระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายมีค่าคงที่เท่ากับ 50 kHz

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 ใช้ MATLAB™ เพื่อใช้ในการพัฒนาโปรแกรมไฟต์ในคัลลิเมนต์แบบ 3 มิติ สำหรับวิเคราะห์ปัญหาสนามแม่เหล็กในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

1.5.2 ใช้ระเบียบวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของ สนามแม่เหล็กที่กระจายตัวในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย สำหรับการออกแบบระบบ ส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายจากโครงสร้างเดิม ให้มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น

1.5.3 การออกแบบมุ่งเน้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวด ปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งได้นำเสนอทั้งสิ้น 4 รูปแบบคือ การออกแบบวิธีการติดตั้งแท่ง เพอร์ไรต์ การออกแบบจำนวนของแท่งเพอร์ไรต์ การออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเพอร์ไรต์ และการออกแบบตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้หลักการและแนวคิดสำหรับการศึกษาระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบ ไร้สายของรถยนต์ไฟฟ้า

1.6.2 ได้หลักการและแนวคิดสำหรับการศึกษาการกระจายตัวของค่าศักย์ เชนจ์เวกเตอร์แม่เหล็ก และการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กภายในระบบการส่งกำลังไฟฟ้า แบบไร้สาย

1.6.3 ได้พัฒนาโปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการประยุกต์ใช้วิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์ แบบ 3 มิติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์ค่าศักย์เชนจ์เวกเตอร์ แม่เหล็ก และการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กภายในระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ตลอดจนสามารถนำไปใช้ป็นสื่อประกอบการเรียนการสอนในเรื่องศักย์เชนจ์เวกเตอร์แม่เหล็ก สนามแม่เหล็ก และระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายได้

1.6.4 ได้หลักการและแนวคิดสำหรับการพัฒนาระบบการส่งกำลังไฟฟ้า แบบไร้สาย ให้มีสมรรถนะในการทำงาน และลดเวลาในการอัดประจุให้ดีขึ้นได้

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท 1 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหาวัตถุประสงค์และ เป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขตและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 เป็นการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและระเบียบวิธีการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้น จะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบไปด้วย การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก และระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ ได้ถูกนำมาใช้เป็นความรู้พื้นฐานและความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย

บทที่ 4 กล่าวถึงขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์กิน

บทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ยังไม่ได้เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรม SolidWork พร้อมทั้งแสดงภาพกราฟิกของผลการกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

บทที่ 6 ได้กล่าวถึงการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิให้มากขึ้น พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลการจำลองที่ได้จากการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ และคำนวณค่าประสิทธิภาพการถ่ายโอนระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิในเชิงตัวเลข

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อภาคผนวก ประกอบด้วยเนื้อหา 1 ส่วนได้แก่

ภาคผนวก ก. เป็นการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา

บทที่ 2

ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการส่งกำลังไฟฟ้าจากขดลวดปฐมภูมิไปยังขดลวดทุติยภูมิ โดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟต์ในดัลลิเมนต์แบบ 3 มิติมาเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปรัทัศนัวรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE และ Science Direct เป็นต้น และงานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อไป

2.2 ปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปรัทัศนัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ในเรื่องการวิเคราะห์การกระจายของค่าสนามแม่เหล็กในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดเรียงลำดับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ก.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
2012	Haijuan, Z.and Shiyu, Y.	ได้นำเสนอวิธีการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ของwitricity สำหรับการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย โดยจำลองวงจรเทียบกับวิธีไฟต์ในดัลลิเมนต์ 3 มิติ ข้อผิดพลาดของวิธีที่เสนอเทียบกับผลทดสอบที่ได้น้อยกว่า 8% และเพื่อเป็นแนวทางสำหรับด้านวิศวกรรมศาสตร์ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับพารามิเตอร์มิติของขดลวดได้รับการศึกษาโดยจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
2013	Hongseok, K., et al.	ได้เสนอการออกแบบของชุดการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าผ่านการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กซึ่งได้กล่าวถึงการสร้างชุดขดลวดในลักษณะต่าง ๆ โดยที่นำเสนอถึงข้อดีในแต่ละแบบ เช่นการสร้างชุดขดลวดแบบ Indirect-fed นั้นจะทำให้ระบบมีค่าตัวประกอบคุณภาพที่สูงเนื่องจากความต้านทานที่โหลดและแหล่งจ่ายจะถูกแยกออกโดยชุดขดลวดเชื่อมต่อจึงทำให้ระบบมีช่วงความถี่การทำงานที่แคบส่วนชุดขดลวดแบบ Direct-fed นั้นมีความเหมาะสมหากต้องการระบบที่มีช่วงความถี่การทำงานที่กว้างและมีเสถียรภาพในการทำงานที่มากกว่า ซึ่งชุดขดลวดเชื่อมต่อกันทางแม่เหล็กนั้นจะมีการป้องกันสนามแม่เหล็กเพื่อไม่ให้เหนี่ยวนำกับวัตถุอื่น ๆ โดยชุดป้องกันสนามแม่เหล็กนั้นจะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์และอลูมิเนียม ซึ่งการใส่เฟอร์ไรต์เพียงอย่างเดียวจะเป็นการเพิ่มค่าความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำร่วมของชุดขดลวดเชื่อมต่อทางแม่เหล็กเมื่อใช้ร่วมกับอลูมิเนียมจะพบว่าอลูมิเนียมจะป้องกันไม่ให้สนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำกับวัตถุอื่น ๆ
2013	Chirag P., et al.	ได้ใช้เทคนิคการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กและปัญหาที่เกี่ยวข้อง โดยใช้วิธีไฟต์ในดอลิเมนต์ เพื่อคำนวณสนามแม่เหล็ก ผลกระทบของแท่งเฟอร์ไรต์กับการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก โดยใช้การออกแบบ 3 แบบซึ่งการออกแบบครั้งที่ 1 มีแท่งเฟอร์ไรต์เฉพาะที่ด้านขดลวดปฐมภูมิ ครั้งที่ 2 มีแท่งเฟอร์ไรต์ด้านขดลวดปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
		การออกแบบครั้งที่ 3 มีแกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยู (U) ที่ใช้สำหรับติดตั้งที่ด้านขดลวดปฐมภูมิและด้านขดลวดทุติยภูมิ การออกแบบทั้งหมดทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ 60 kHz การออกแบบที่นำเสนอใหม่ถูกนำเสนอเพื่อลดการรั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็กและลดจูลร้อน เพื่อปรับปรุงการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กและเพื่อเพิ่มความต้านทานของสนามแม่เหล็ก แกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยูเป็นการออกแบบที่ดีที่สุดสำหรับระบบการชาร์จแบบไร้สายเนื่องจากการปรับปรุงการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กที่ดีขึ้นและลดฟลักซ์แม่เหล็กที่ไปในทิศทางอื่น โดยใช้ไฟต์ในดอิลิเมนต์วิเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กและการกระจายกระแส เมื่อใช้เฟอร์ไรต์ที่ด้านทุติยภูมิและด้านปฐมภูมิจะช่วยลดการรั่วไหลของฟลักซ์ที่ไปในทิศทางอื่น แต่ไม่สามารถแก้ฟลักซ์รั่วไหลที่ขอบ ด้วยเหตุนี้การออกแบบแกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยูจึงสามารถแก้ไขการรั่วไหลของฟลักซ์ กระแส และปรับปรุงความสามารถในการกระจายพลังงานของระบบ
2014	Weidong, D. and Xu, W.	ได้ศึกษาประสิทธิภาพการส่งข้อมูลของการส่งพลังงานไร้สาย โดยการจำลองสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดหลังจากเพิ่มแท่ง Mn-Zn เฟอร์ไรต์ ในโปรแกรม Maxwell และจากผลการทดลองและการประมวลผลการทดลองขั้นสุดท้ายของข้อมูลสรุปว่าเมื่อได้ทำการเพิ่มแท่ง Mn-Zn เฟอร์ไรต์ ก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งสัญญาณของระบบส่งกำลังแบบไร้สายได้รับการปรับปรุงที่ดีขึ้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
2014	Ran, C. and Li, Q.	การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอกระบวนการทั้งหมดของการออกแบบขดลวดและสร้างระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายด้วยการวิเคราะห์ไฟต์ในคัลลิเมนต์ และการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB อย่างละเอียด จากการเปรียบเทียบผลการทดลองและการจำลองสามารถพิสูจน์ได้ว่าวิธีการออกแบบที่ใช้การวิเคราะห์ไฟต์ในคัลลิเมนต์ และการจำลอง MATLAB นั้นสมเหตุสมผลและถูกต้อง
2014	Ping-Ping, D., et al.	ได้นำเสนอการประเมินสนามแม่เหล็กในร่างกายมนุษย์ที่สัมผัสกับระบบชาร์จแบบไร้สายของยานพาหนะไฟฟ้า เพื่อให้สามารถตรวจสอบความสอดคล้องของระบบการชาร์จต่อขีดจำกัดการสัมผัสสนามแม่เหล็กของมนุษย์ การประเมินระบบชาร์จแบบไร้สายภายใต้เงื่อนไขการทำงานที่จำกัด มีไว้เพื่อประเมินสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์แบบจำลองระบบที่อยู่ถัดจากแบบจำลองมนุษย์ที่ยืนอยู่แสดงว่าการถ่ายโอนแม่เหล็กสามารถทำได้อย่างสมบูรณ์แม้ว่าขดลวดตัวส่งจะอยู่ใกล้กับร่างกายมนุษย์มาก และจากการจำลองเชิงตัวเลขจะพบว่าสนามแม่เหล็กที่เหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นในขณะที่มีการสัมผัสใกล้สนามแม่เหล็กแสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยอย่างทั่วถึง นำไปสู่การอ้างอิงสำหรับการออกแบบที่มีประโยชน์สำหรับการพัฒนาระบบชาร์จแบบไร้สายที่เป็นประโยชน์จากอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสนับสนุนกระบวนการกำหนดมาตรฐานเพื่อให้สภาพแวดล้อมของรถปลอดภัยยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2015	Chia-Jung, C., et al.	ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของขดลวดในแบบคู่ขนานกับการชาร์จแบตเตอรี่ และวิธีการปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อขดลวด โดยคำนึงถึงการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายในยานยนต์ไฟฟ้า เพื่อให้ได้ระยะการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่เป็นไปตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรยานยนต์ (SAE-J2954) และเมื่อนำไปใช้กับข้อกำหนดของระบบที่แตกต่างกัน ผลของระยะการถ่ายโอนและค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำ ในการศึกษาใช้วิธีไฟต์ไนต์เอลิเมนต์เพื่อจำลองและวิเคราะห์โครงสร้างขดลวดที่แตกต่างกัน โดยใช้การจำลองเชิงตัวเลขและการวิเคราะห์เพื่อศึกษาความแตกต่างระหว่างขดลวดแบบอนุกรมและแบบขนานในระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายรวมกับการซึมผ่านของแผ่นเฟอร์ไรต์ในระดับต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่าการเปลี่ยนแปลงขดลวดที่เหมาะสมสามารถลดความต้านทานและการเหนี่ยวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แผ่นเฟอร์ไรต์อาจเพิ่มความเหนี่ยวนำขดลวดได้มากถึง 1.7 เท่า และยังทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 88.7% นอกจากนี้ยังมีการสร้างระบบการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อจำลองการส่งกำลังระหว่างยานพาหนะไฟฟ้าและสถานีชาร์จ ระยะทางที่แท้จริงระหว่างตัวถังรถกับพื้นได้รับการพิจารณาและพบว่าสอดคล้องกับช่วงความถี่และกำลังไฟฟ้าเข้าของมาตรฐาน SAE-J2954

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
2015	Minho, K., et al.	ได้นำเสนอการออกแบบระบบขดลวดของ WPT ขึ้นใหม่โดยใช้สายตัวนำไฟฟ้าแบบ 3 เฟส สำหรับ ฟลักซ์แม่เหล็กประสิทธิภาพสูงขึ้นและลดการ รั่วไหลของฟลักซ์แม่เหล็ก การสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กทำได้โดยใช้ กระบวนการไฟต์ในคัลลิเมนต์ 3 มิติ สนามแม่เหล็ก ที่ถูกคำนวณนั้นสอดคล้องกับผลลัพธ์ที่ได้จาก FEA จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากการจำลองสถานการณ์ว่า จะมีสนามแม่เหล็กรั่วจากสายไฟ 3 เฟสที่เสนอนั้น ต่ำกว่าสายไฟอื่น ๆ ถึง 96%
2016	Chen, Y. and Wei, N.Z.	เพื่อให้มั่นใจว่ามีการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารอบ ยานยนต์ไฟฟ้า ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัย ได้มี การเพิ่มเกราะป้องกันโลหะเข้ากับแผ่นขดลวด การ เพิ่มเกราะโลหะจะมีผลต่อกำลังไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ ความเหนี่ยวนำร่วมและการเหนี่ยวนำตัวเองของ แผ่นขดลวด โดยการสร้างแบบจำลองและ ตรวจสอบอิทธิพลของเกราะโลหะบนแผ่นขดลวด เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการออกแบบแผ่น ขดลวด ด้วยการวิเคราะห์ไฟต์ในคัลลิเมนต์ (FEA)
2016	Katharina, K., et al.	ได้ทำการศึกษาระบบถ่ายโอนพลังงาน สำหรับ รถยนต์ไฟฟ้า (EVs) ระบบของการถ่ายโอนพลังงาน แบบไร้สายประกอบด้วยขดลวดที่ซับซ้อนซึ่งมี ความแตกต่างกันอย่างมากในรูปทรงและวัสดุ สำหรับนำกระแสไฟฟ้าและการเหนี่ยวนำฟลักซ์ แม่เหล็ก จากการศึกษาแสดงให้เห็นถึงบทบาทของ เพอร์ไรต์และอูมิเนียมมีอิทธิพลต่อการป้องกัน ฟลักซ์แม่เหล็กและการทิศทางการไหลของฟลักซ์ แม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
2016	Fei, L. and Hua, Z.	ได้เสนอระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายแบบเหนี่ยวนำและแบบเก็บประจุรวมกับโทโพโลยีซดเชย LC เพื่อจะใช้สำหรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า เมื่อวงจรโทโพโลยีคือการรวมกันของระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบเหนี่ยวนำ และระบบการถ่ายโอนแบบเก็บประจุซดเชยพลังงาน การออกแบบของการเหนี่ยวนำและแบบเก็บประจุนำมาใช้โดยการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์ ระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย 3.0 kW ที่ได้รับการออกแบบและนำมาใช้เป็นตัวอย่างของการรวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุแบบรวม ขนาดของตัวเหนี่ยวนำคือ 300 mm.×300 mm. และขนาดของตัวเชื่อมต่อแบบเก็บประจุมี 610 mm.×610 mm.และมีระยะห่างของอากาศคือ 150 mm. วงจรต้นแบบมีกำลังส่ง 2.84 kW และมีประสิทธิภาพสูงถึง 94.5% ที่ความถี่ 1 MHz และทำงานได้ดี สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าระบบรวมตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสำหรับการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า
2016	Jiongran, X., et al.	ได้มีการนำเสนอต้นแบบของช่องชาร์จแบบไร้สายอย่างง่ายสำหรับยานพาหนะไฟฟ้า ช่องชาร์จไร้สายที่นำเสนอในที่นี้ประกอบด้วยขดลวดหลายเส้นซึ่งถูกวางลงบนราง พารามิเตอร์เฉพาะสำหรับรูปแบบของช่องชาร์จไร้สายที่นำเสนอถูกกำหนดโดยการจำลองด้วยวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์ ต้นแบบเล็ก ๆ ของช่องชาร์จแบบไร้สายถูกสร้างขึ้นและทดลองโดยรดัดแปลงรุ่นปรับขนาดลง โดยมีขดลวดตัวรับอยู่ด้านล่างสามารถเคลื่อนที่ไปตามช่องชาร์จไร้สายได้อย่างราบรื่นโดยไม่ต้องใช้พลังงานจากภายนอก

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้จัดทำ	การดำเนินงานวิจัย
		การทดลองได้รับการยืนยันว่าช่องชาร์จแบบไร้สายนี้สามารถให้แบบจำลองการส่งพลังงานไร้สายสำหรับ EVs แต่เนื่องจากประสิทธิภาพการถ่ายโอนต่ำงานวิจัยในอนาคตจึงมุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพของช่องชาร์จไร้สาย
2017	Shigefumi, M., et al.	ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย โดยการใช้แท่งเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีการรักษาระยะห่างของการส่งพลังงานไฟฟ้า เพื่อให้ทราบว่าการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดีขึ้นได้หรือไม่ จากการทำการทดลองหลายครั้งและคิดค้นวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่มีผลกระทบสูงต่อ WPT โดยที่ผลลัพธ์จะถูกเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์นั้นเป็นไปได้จริงและคุ้มค่า
2017	Georgiana, R.and Lavinia, B.	ได้เสนอแนวคิดสองข้อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย คือ (1) ใช้ซีเมนต์ที่ดัดแปลงเพื่อครอบคลุมพื้นที่ของขดลวดตัวส่งสัญญาณ (2) ใช้สวิตช์แบบ bandgap ที่มีความถี่ที่สูงซึ่งสามารถถ่ายโอนพลังงานจำนวนมากได้ในเวลาอันสั้น การศึกษาการหาค่าเหมาะที่สุดของขดลวดรับและขดลวดส่งจะดำเนินการทั้งที่มีและไม่มีแกนกลางผ่านการวิเคราะห์โดยไฟต์ในดอิลิเมนต์ 3 มิติ และการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ควบคู่ไปกับการวิเคราะห์ตามวงจรสำหรับการใช้งานสวิตช์ความถี่แบบช่องสัญญาณกว้าง (SiC MOSFET) และในด้านคุณสมบัติทางแม่เหล็กไฟฟ้าของซีเมนต์ที่ผ่านการดัดแปลงนั้นมีลักษณะและผลลัพธ์แสดงให้เห็นถึง

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		การปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบ จะเห็นได้ว่าการออกแบบขดลวดส่งและรับที่ปรับให้เหมาะสมสำหรับสื่อซีเมนต์ที่ผ่านการดัดแปลงนั้นแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงาน 86%
2017	Barzegaran, M. R., et al.	มีการนำเสนอเพื่อแก้ไขปัญหาเวลาในการชาร์จและประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงาน โดยใช้แกนของหุ่นยนต์อัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้แกนหุ่นยนต์อัตโนมัติที่ติดตั้งเซ็นเซอร์หลายตัวจะถูกติดตั้งไว้ที่ช่วงล่างของยานพาหนะที่มีขดลวดรับ ในกรณีที่ยานพาหนะจอดอยู่ในจุดจอดรถที่ติดตั้งขดลวดส่งสัญญาณพลังงานไร้สาย แกนหุ่นยนต์จะค้นหาตำแหน่งของขดลวดรับในตำแหน่งที่ถูกต้องซึ่งอยู่เหนือขดลวดส่งสัญญาณเมื่อจอดรถ และเมื่อรถยนต์เคลื่อนที่บนถนนที่ติดตั้งระบบส่งกำลังแบบไร้สาย กลไกที่นำเสนอให้สัญญาณที่บ่งบอกถึงวิธีการจับจีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด และมีการใช้ทรานซิสเตอร์แบบ Field-Effect ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ของซิลิคอนคาร์ไบด์ในตัวแปลงพลังงานเพื่อรักษาความถี่ให้สูงที่สุดเพื่อลดเวลาในการชาร์จ ด้วยวิธีการนี้ปัญหาข้างต้นและปัญหาของช่องว่างอากาศขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถซึมผ่านได้และการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะได้รับการแก้ไข ในขณะที่เวลาในการชาร์จลดลง
2017	Chen, M. X., et al.	แกนแม่เหล็กแบบที่มีการซึมผ่านสูงถูกนำมาใช้และวางไว้ภายใต้ขดลวดด้านส่งสัญญาณ เช่นเดียวกับข้างบนของขดลวดด้านรับสัญญาณของระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (WPT) ซึ่งจะสามารถเป็นเกราะป้องกันสำหรับสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		และการแทรกแกนวัสดุแม่เหล็กที่สัมพันธ์กับการเหนี่ยวนำร่วมของทั้งสองขดลวดจะลดฟลักซ์รั่วไหลของแม่เหล็ก ซึ่งผลลัพธ์แสดงว่าหลังจากใส่แกนแม่เหล็กทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนพลังงานเพิ่มขึ้นประมาณ 30% โดยระยะการถ่ายโอนพลังงานอยู่ที่ 60 mm. - 80 mm.
2018	Ahmad, F.A.A. and Nur, A.B.A.	ศึกษาผลกระทบของวัสดุเฟอร์ไรต์ต่อการถ่ายโอนพลังงาน โดยพิจารณาจากจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์และขนาดของแท่งเฟอร์ไรต์ สำหรับการชาร์จแบบไร้สายของรถยนต์ไฟฟ้า มีทั้งหมด 5 กรณีที่ใช้ในโครงสร้างขดลวดเบนกลม กรณีที่ 1 เป็นขดลวดคู่ที่ไม่มีวัสดุเฟอร์ไรต์เพื่อการเปรียบเทียบของอีก 4 กรณี กรณีที่ 2 และ 3 มีจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่แตกต่างกันคือ 12 และ 14 แท่งตามลำดับ กรณีที่ 4 และ 5 มีจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ คล้ายกันกับกรณีที่ 2 และ 3 ตามลำดับ แต่ความกว้างของแท่งเฟอร์ไรต์แต่ละแท่งเพิ่มขึ้นจาก 30 mm. เป็น 40 mm. ทุกกรณีเป็นแบบจำลองในโปรแกรม ANSYS Maxwell ที่จำลองความหนาแน่นฟลักซ์และจำลองการถ่ายโอนพลังงาน ผลการจำลองแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของกรณีที่ 3 ที่มีแท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่งและความกว้าง 30 mm. นั้นจะดีที่สุด เมื่อพิจารณาการใช้แท่งเฟอร์ไรต์และปริมาณพลังงานที่ถ่ายโอน จะเห็นว่าจำนวนและขนาดของแท่งเฟอร์ไรต์มีผลกระทบต่อพลังงานที่ถ่ายโอนในระบบพลังงานไร้สาย
2018	Chen, M. X., et al.	มีการแนะนำตัวต้านทานกระแสแบบเรโซแนนซ์รูปแบบของระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (WPT) และได้วิเคราะห์เป็นพารามิเตอร์ที่เท่ากัน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2018	Chen, M. X., et al.	การควบคุมขนาดและเฟสอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ป้องกันจะถูกสร้างขึ้น สำหรับขดลวดป้องกันกระแสโซแนนซ์รีแอคทีฟ ซึ่งได้แก่ (1) ขดลวดป้องกันจะอยู่ในระดับเดียวกันกับขดลวด WPT และ (2) ขดลวดป้องกันอยู่เหนือขดลวดรับ (Rx) และอยู่ภายใต้แกนแท่งเฟอร์ไรต์ที่ส่งผ่านขดลวดส่ง (Tx) และใช้วิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ สำหรับประเมินผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (EMF) รอบ ๆ ที่ชาร์จ และได้ตรวจสอบโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS Maxwell ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการออกแบบตำแหน่งขดลวดป้องกันอยู่ในระดับเดียวกันกับ WPT ประสบความสำเร็จในการลด EMF ในแกน X และแกน Z ซึ่งระบบที่ได้นำเสนอสามารถถ่ายโอนได้ถึง 5 kW, ช่องว่างอากาศ 15 cm. ที่เหมาะสำหรับระบบชาร์จยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพที่สูงและการถ่ายโอนพลังงานสูงด้วยแผ่น WPT
2019	Xiufang, W., et al.	ได้นำเสนอผลกระทบของวัสดุตัวนำยิ่งยวดที่มีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (WPT) ซึ่งจะอาศัยหลักการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวัสดุด้วยวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์โดยการจำลองสถานการณ์ S-parameter และดูการกระจายสนามแม่เหล็ก ตำแหน่งที่ดีที่สุดของวัสดุตัวนำยิ่งยวดนั้นได้มาจากการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการถ่ายโอน ซึ่งผลการจำลองประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 3.36% เป็น 13.58% เมื่อใช้แผ่นโลหะยิ่งยวดซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณสี่เท่าเมื่อเทียบกับการไม่ต้องใช้วัสดุตัวนำยิ่งยวด แสดงให้เห็นว่าการเชื่อมต่อสนามแม่เหล็กสามารถเพิ่มขึ้นด้วยแผ่นตัวนำยิ่งยวด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2019	Yiming, Z., et al.	มีการเสนอ LCL-none (LCL-N) โทโพโลยีสำหรับระบบชาร์จแบบไร้สายกำลังแรงสูง และการชดเชยด้านฝั่งรับจะถูกกำจัดเพื่อให้ได้ขนาดที่กะทัดรัดและน้ำหนักเบาและยังคงประสิทธิภาพไว้ในระดับสูง ความต่างเฟสระหว่างกระแสส่งสัญญาณและตัวรับสัญญาณมีขนาดใหญ่มากกว่า 90° โมเดลของ LCL-N โทโพโลยีที่ถูกสร้างขึ้นและวิเคราะห์กำลังไฟและประสิทธิภาพการส่ง จากการทดลองเห็นว่า LCL-N โทโพโลยีมีข้อดีคือ (1) กำจัดการชดเชยด้านขดลวดรับเพื่อให้มีขนาดกะทัดรัดและใช้ต้นทุนต่ำ (2) การจะลดความหนาของเฟอร์ไรต์ของตัวรับเนื่องจากความต่างเฟสของกระแสที่มีขนาดใหญ่มากกว่า 90° เพื่อที่จะลดต้นทุนและลดน้ำหนักของตัวรับ (3) แรงดันไฟฟ้าคงที่และการชาร์จที่กระแสไฟคงที่เนื่องจากแรงดันโหลดหรือกระแสไม่ได้ถูกแก้ไข
2019	Behnam, M.M., et al.	ได้นำเสนอและเปรียบเทียบแผ่นโครงสร้างแม่เหล็กแบบดั้งเดิมเพื่อการนำเสนอโครงสร้างที่ดีที่สุด ซึ่งจะประกอบด้วย Double-D pad (DDP), Circular Pad (CP) ใช้สำหรับด้านฝั่งส่งสัญญาณและ Bipolar Pad (BPP), Double-D Quadrature Pad (DDQP) ใช้สำหรับฝั่งรับ โครงสร้างแม่เหล็กที่แตกต่างกันของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม 3D ANSYS Maxwell ในส่วนด้านฝั่งรับสัญญาณของ WPT เนื่องจากความแตกต่างระหว่างพลังงานที่ได้รับในโครงสร้างแบบ BPP และ DDQ นั้นไม่มีความสำคัญ ในส่วนส่งสัญญาณโครงสร้าง DDP มีค่าสัมประสิทธิ์การเหนี่ยวนำร่วมที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นอื่น ๆ

จะเห็นได้ว่าจากการสืบค้นและศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่สามารถช่วยให้ผู้ที่ศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับเรื่องนี้ มองภาพได้ว่ามีคณณักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกแยะเป็นหมวดหมู่ตามวิธีดำเนินการศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้เรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญและมีแตกต่างกันอย่างชัดเจน จากหลายงานวิจัยที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงโดยย่อ ดังนี้

Haijuan, Z. and Shiyoun, Y. (2012) ได้มีการนำเสนอวิธีการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ของ witrlicity สำหรับระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (WPT) โดยการใช้แบบจำลองวงจรเทียบ กับวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์ 3 มิติ เพื่อให้แนวทางสำหรับการใช้งานด้านวิศวกรรมความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์กับพารามิเตอร์มิติของขดลวดได้รับการศึกษาอย่างครอบคลุมโดยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ Hongseok, K., et al. (2013) ได้นำเสนอการออกแบบชุดการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าผ่านการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็ก ซึ่งชุดขดลวดเชื่อมต่อทางแม่เหล็กนั้นจะมีการป้องกันสนามแม่เหล็กเพื่อไม่ให้เหนี่ยวนำกับวัตถุอื่น ๆ โดยชุดป้องกันสนามแม่เหล็กนั้นจะประกอบไปด้วยเฟอร์ไรต์และอลูมิเนียม ซึ่งการใส่เฟอร์ไรต์เพียงอย่างเดียวจะเป็นการเพิ่มความเหนี่ยวนำตัวเองและความเหนี่ยวนำร่วมของชุดขดลวดเชื่อมต่อทางแม่เหล็กเมื่อใช้ร่วมกับอลูมิเนียมจะพบว่าอลูมิเนียมจะป้องกันไม่ให้สนามแม่เหล็กไปเหนี่ยวนำกับวัตถุอื่น ๆ Chirag, P., et al. (2013) ได้ออกแบบการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 3 แบบคือ (1) มีแท่งเฟอร์ไรต์เฉพาะที่ด้านขดลวดปฐมภูมิ (2) มีแท่งเฟอร์ไรต์ทางด้านขดลวดปฐมภูมิและด้านขดลวดทุติยภูมิ (3) มีแกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยูสำหรับด้านขดลวดปฐมภูมิและด้านขดลวดทุติยภูมิ แกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยูเป็นการออกแบบที่ดีที่สุดสำหรับระบบการชาร์จแบบไร้สายเนื่องจากมีการปรับปรุงการกระจายฟลักซ์แม่เหล็กที่ดีขึ้นและลดฟลักซ์แม่เหล็กที่ไปในทิศทางอื่นโดยใช้วิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์ตัวเคราะห์ฟลักซ์แม่เหล็กและการกระจายกระแส เมื่อใช้เฟอร์ไรต์ที่ด้านทุติยภูมิและด้านปฐมภูมิจะช่วยลดการรั่วไหลของฟลักซ์ที่ไปในทิศทางอื่น แต่ไม่สามารถแก้ฟลักซ์รั่วไหลที่ขอบ ด้วยเหตุนี้การออกแบบแกนเฟอร์ไรต์รูปตัวยูจึงสามารถแก้ไขการรั่วไหลของฟลักซ์ กระแส และปรับปรุงความสามารถในการกระจายพลังงานของระบบ Chia-Jung, C., et al. (2015) ได้ศึกษาความแตกต่างระหว่างขดลวดแบบอนุกรมและแบบขนานในระบบการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายร่วมกับการซึมผ่านของแผ่นเฟอร์ไรต์ในระดับต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่าการเปลี่ยนแปลงขดลวดที่เหมาะสมสามารถลดความต้านทานและการเหนี่ยวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ แผ่นเฟอร์ไรต์อาจเพิ่มความเหนี่ยวนำของขดลวดได้สูงสุดถึง 1.7 เท่า และมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนสามารถเพิ่มขึ้นเป็น 88.7% Chen, Y. and Wei, N.Z. (2016) กล่าวว่าแผ่นขดลวดสำหรับการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นมักจะประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากลวดทองแดง และแถบเฟอร์ไรต์เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำร่วมของสนามแม่เหล็กและลดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก และได้แนะนำการ

เพิ่มเกราะป้องกันโลหะเข้ากับแผ่นขดลวด การเพิ่มเกราะโลหะจะมีผลต่อกำลังไฟฟ้า สัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำร่วมและการเหนี่ยวนำตัวเองของแผ่นขดลวด Shigefumi, M., et al. (2017) ได้ทำการศึกษาวิธีการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย โดยใช้แท่งเฟอร์ไรต์ด้วยการรักษาระยะห่างของการส่งพลังงานไฟฟ้า จากการทำการทดลองหลายครั้งและคิดค้นวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่มีผลกระทบสูงต่อ WPT โดยที่แต่ละผลลัพธ์จะถูกเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์นั้นเป็นไปได้จริงและคุ้มค่า Mohammad, H.M. and Weam, E.(2017) ได้เสนอแนวคิดสองข้อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ คือ (1) ใช้ซีเมนต์ที่ดัดแปลงเพื่อครอบคลุมพื้นที่ของขดลวดตัวส่งสัญญาณ (2) ใช้สวิตช์แบบ bandgap ที่มีความถี่สูงซึ่งสามารถถ่ายโอนพลังงานจำนวนมากได้ในเวลาอันสั้น ผ่านการวิเคราะห์โดยวิธีไฟต์ในต่อลิเมนต์ 3 มิติ และการวิเคราะห์เชิงฟิสิกส์ จะเห็นได้ว่าการออกแบบขดลวดส่งและรับที่ได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับสื่อซีเมนต์ที่ผ่านการดัดแปลงนั้นแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานถึง 86% Ahmad, F A.A. and Nur, A.B.A. (2018) ได้ศึกษาผลกระทบของวัสดุเฟอร์ไรต์ต่อการถ่ายโอนพลังงาน โดยพิจารณาจากจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์และขนาดของแท่งเฟอร์ไรต์ ผลการจำลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกรณีที่มีแท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่งและกว้าง 30 mm. สำหรับแต่ละแท่งนั้นคือที่สุดใน 5 กรณีเมื่อพิจารณาการใช้แท่งเฟอร์ไรต์และปริมาณพลังงานที่ถ่ายโอน การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าจำนวนและขนาดของแท่งเฟอร์ไรต์มีผลกระทบต่อพลังงานที่ถ่ายโอนในระบบการส่งพลังงานแบบไร้สาย Xiufang, W., et al. (2019) ได้นำเสนอผลกระทบของวัสดุตัวนำยิ่งยวดที่มีต่อการเพิ่มประสิทธิภาพสำหรับการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (WPT) โดยอาศัยการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวัสดุด้วยวิธีการไฟต์ในต่อลิเมนต์ ในการจำลองประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจาก 3.36% เป็น 13.58% เมื่อใช้แผ่นโลหะยิ่งยวดซึ่งเพิ่มขึ้นประมาณสี่เท่าเมื่อเทียบกับการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายโดยไม่ต้องใช้วัสดุตัวนำยิ่งยวด นอกจากนี้การจำลองสนามแม่เหล็กแสดงให้เห็นว่าการเชื่อมต่อสนามแม่เหล็กสามารถเพิ่มขึ้นด้วยแผ่นตัวนำยิ่งยวด Behnam, M.M., et al. (2019) ได้มีการศึกษาโครงสร้างของแผ่นขดลวดที่ดีที่สุดของระบบ ซึ่งจะประกอบด้วย Double-D pad (DDP), Circular Pad (CP) สำหรับด้านส่งสัญญาณ และ Bipolar Pad (BPP), Double-D Quadrature Pad (DDQP) สำหรับฝั่งรับ โครงสร้างของแผ่นขดลวดที่แตกต่างกันของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายสำหรับชาร์จยานพาหนะไฟฟ้าถูกวิเคราะห์โดยใช้ 3D ANSYS Maxwell ในส่วนรับของระบบ WPT ทั่วไปเนื่องจากความแตกต่างระหว่างพลังงานที่ได้รับในโครงสร้างแบบ BPP และในโครงสร้างแบบ DDQ นั้นไม่มีความสำคัญ ในส่วนส่งสัญญาณ โครงสร้างแบบ DDP มีค่าสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำร่วมที่เหมาะสมและประสิทธิภาพที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นอื่น ๆ

2.3 สรุป

บทที่ 2 ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE Science Direct และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ระเบียบวิธีที่ผู้ทำการวิจัยอื่นได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากผู้วิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาและออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิให้มากขึ้นด้วยการพัฒนา ระเบียบวิธีไฟต์ในทอพลิเมนต์แบบ 3 มิติ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาขึ้นเพื่อศึกษาการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในทอพลิเมนต์แบบ 3 มิติ



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาและเข้าใจถึงทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ถือว่ามีความสำคัญ และเป็นประโยชน์อย่างมากในการดำเนินงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นพื้นฐานความรู้ และความเข้าใจในงานสำหรับนำไปเป็นแหล่งอ้างอิงในการดำเนินงานวิจัย ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วย 6 หัวข้อหลัก ได้แก่ (1) การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า (2) ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (WPT) (3) สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field: EMF) (4) สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (5) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก และ (6) ระเบียบวิธีไฟต์ในอิลิเมนต์ โดยจะกล่าวถึงเฉพาะส่วนที่เป็นประโยชน์หรือถูกกล่าวอ้างถึงการดำเนินงานวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้เนื้อหามีความกระชับและชัดเจนยิ่งขึ้น

3.2 การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า

การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า เป็นการเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าเพื่ออัดประจุพลังงานให้กับแบตเตอรี่ เปรียบเทียบได้กับการเติมน้ำมันของยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน การใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าจะทำให้พลังงานที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่ลดลงไปตามการใช้งาน และหากพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในแบตเตอรี่หมดลง ยานยนต์ไฟฟ้าก็จะไม่สามารถขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าได้อีก ซึ่งในกรณียานยนต์ไฟฟ้าชนิดแบตเตอรี่ (BEV) จะไม่สามารถขับเคลื่อนต่อไปได้อีก แต่ในกรณียานยนต์ไฟฟ้าชนิด PHEV จะยังสามารถใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเพื่อขับเคลื่อนยานยนต์ต่อไปได้ แต่ก็จะต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงมากกว่าการใช้พลังงานไฟฟ้า ดังนั้น ผู้ใช้ยานยนต์ไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องทำการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่เป็นระยะเพื่อเก็บสะสมพลังงานไฟฟ้าไว้ในแบตเตอรี่ให้เพียงพอต่อการใช้งานเทคโนโลยีการอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging) และการอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ (Inductive Charging) นอกจากการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ยานยนต์ไฟฟ้าแล้ว ยังมีแนวคิดเรื่องการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping) ซึ่งเป็นอีกรูปแบบการให้บริการที่สามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องระยะเวลาที่ใช้ในการอัดประจุไฟฟ้าได้ โดยสามารถแบ่งการชาร์จได้ดังนี้

3.2.1 การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ (Conductive Charging)

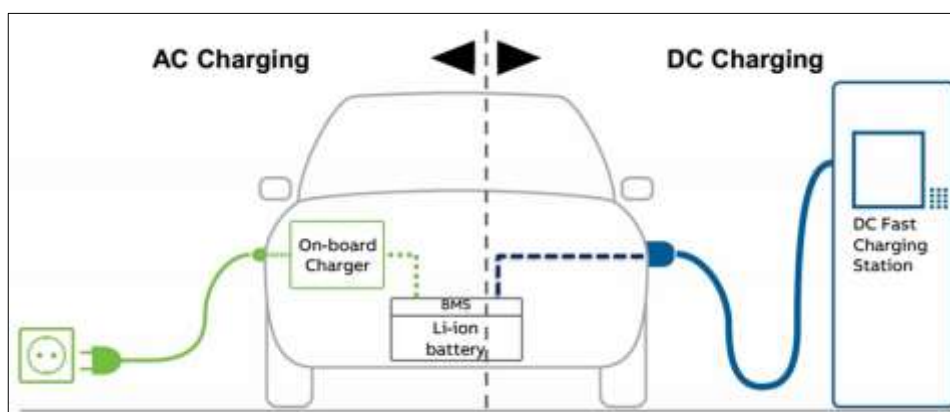
การอัดประจุไฟฟ้าผ่านตัวนำ เป็นการอัดประจุแบตเตอรี่โดยเชื่อมต่อยานยนต์ไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟฟ้าโดยตรงผ่านสายเคเบิล (หรือสายชาร์จ) ซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้า การอัดประจุไฟฟ้าวิธีนี้จะอาศัยหลักการนำไฟฟ้าผ่านตัวนำไฟฟ้า โดยพลังงานไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าผ่านสายเคเบิลเข้าสู่แบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งถือเป็นรูปแบบการอัดประจุไฟฟ้าที่มีการใช้งานแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถติดตั้งได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และสามารถใช้ได้ทั้งการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับและกระแสตรง

3.2.1.1 การอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับ (Normal Charge)

เป็นการอัดประจุไฟฟ้าโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าสู่ยานยนต์ไฟฟ้า จากนั้น On-board Charger ซึ่งติดตั้งอยู่ในยานยนต์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนจ่ายเข้าสู่ แบตเตอรี่ต่อไป การอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับโดยทั่วไปจะเป็นการอัดประจุไฟฟ้าแบบปกติ (Normal Charge) เนื่องจากใช้กำลังไฟฟ้าค่อนข้างต่ำด้วยข้อจำกัดของ On-board Charger ในยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปจะรองรับกระแสไฟฟ้าได้เพียง 16-32 A ดังนั้นการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับจึงเหมาะสำหรับการอัดประจุไฟฟ้าในบ้านพักอาศัย อาคารสำนักงาน และห้างสรรพสินค้า ซึ่งสามารถจอดรถได้เป็นระยะเวลานาน

3.2.1.2 การอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรง (Quick Charge)

เป็นการอัดประจุไฟฟ้าโดยการจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเข้าสู่ยานยนต์ไฟฟ้า โดยในกรณีนี้ สถานีอัดประจุไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนที่จะจ่ายเข้าสู่ยานยนต์ไฟฟ้า ซึ่งไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายเข้าสู่ยานยนต์ไฟฟ้าจะจ่ายเข้าสู่แบตเตอรี่โดยตรง โดยมีระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System: BMS) ทำหน้าที่ควบคุมการอัดประจุ การอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรงถือเป็นการอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (Quick Charge) โดยสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าในการอัดประจุไฟฟ้าได้สูงเนื่องจากไม่มีข้อจำกัดเรื่อง On-board Charger ซึ่งโดยทั่วไปสามารถอัดประจุไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของความจุแบตเตอรี่ได้ภายในระยะเวลาเพียง 10-15 นาที และเนื่องจากการอัดประจุไฟฟ้าที่ใช้กำลังไฟฟ้าสูง (ปัจจุบันอยู่ที่ประมาณ 50 kW) จึงจำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า 3 เฟส ที่มีพิกัดกระแสสูง การอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรงมักเป็นการใช้งานในแหล่งสาธารณะซึ่งต้องการความรวดเร็วในการอัดประจุ ในลักษณะคล้ายกับสถานีบริการน้ำมัน และเหมาะสมกับยานยนต์ไฟฟ้าที่ต้องการอัดประจุไฟฟ้าหลายครั้งระหว่างวัน หรือสำหรับการเดินทางระยะทางไกล เช่น การเดินทางระหว่างจังหวัด เป็นต้น



รูปที่ 3.1 การอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับและการอัดประจุไฟฟ้ากระแสตรง

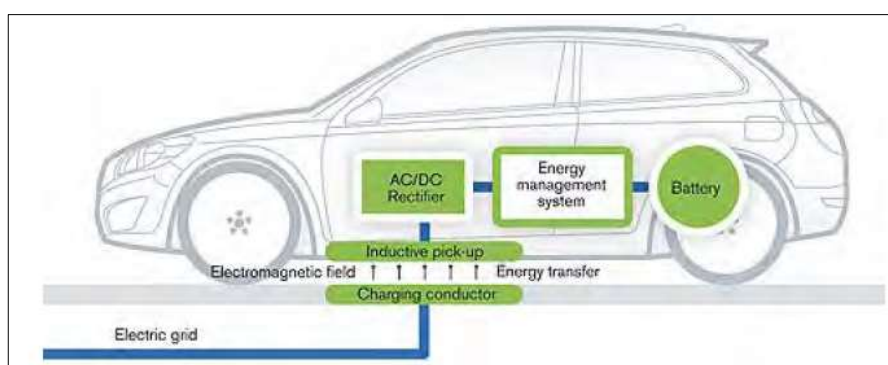
3.2.2 การสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ (Battery Swapping)

เพื่อรองรับการเกิดขึ้นของยานยนต์ไฟฟ้า นอกจากการสร้างและขยายสถานีอัดประจุไฟฟ้าทั้งในที่อยู่อาศัยและที่สาธารณะ ยังมีอีกแนวคิดหนึ่ง คือ การพัฒนาสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าโดยในกรณีที่พลังงานไฟฟ้าในแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าใกล้หมด ก็สามารถใช้บริการสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ เพื่อสับเปลี่ยนแบตเตอรี่กับแบตเตอรี่ที่ได้รับการอัดประจุไฟฟ้าจนเต็มแล้ว แนวคิดนี้จะช่วยให้ข้อดีของเรื่องระยะทางขับขี่ของยานยนต์ไฟฟ้าและความไม่สะดวกของการอัดประจุไฟฟ้าหมดไป เนื่องจากการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สามารถทำได้รวดเร็ว (เช่น ไม่เกิน 5 นาที) จึงเหมาะสำหรับสถานะเร่งรีบ เนื่องจากการอัดประจุไฟฟ้าแบบเร็ว (Quick Charge) ก็ยังใช้เวลายาวนาน 15 นาที ซึ่งถือว่าช้าเมื่อเปรียบเทียบกับ การเติมน้ำมันของยานยนต์เครื่องยนต์สันดาปภายใน รูปแบบการให้บริการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะเป็นลักษณะการทำสัญญากับผู้ใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าแบบจ่ายเงินตามระยะทาง โดยผู้ให้บริการจะเป็นผู้รับภาระค่าใช้จ่ายทั้งค่าแบตเตอรี่ โครงสร้างพื้นฐานการอัดประจุไฟฟ้าให้กับแบตเตอรี่ รวมทั้งค่าไฟฟ้า แนวคิดนี้ยังมีข้อดี คือ เจ้าของยานยนต์ไฟฟ้าไม่มีภาระค่าใช้จ่ายในด้านแบตเตอรี่ ทำให้การซื้อยานยนต์ไฟฟ้ามีราคาถูกลง และลดความเสี่ยงในการซื้อยานยนต์ไฟฟ้ามาใช้งาน เนื่องจากโดยทั่วไปอายุการใช้งานของแบตเตอรี่จะต่ำกว่าอายุการใช้งานของยานยนต์ไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ยังมีข้อจำกัดที่ว่ายานยนต์ไฟฟ้าจะต้องออกแบบให้สามารถถอดสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้ จึงจะใช้บริการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้ อีกทั้งยังมีปัญหาสำคัญด้านมาตรฐานและคุณภาพของแบตเตอรี่ซึ่งไม่สามารถตรวจสอบได้ด้วยตาเปล่า ดังนั้น บริการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จำเป็นต้องมีระบบควบคุมและดูแลอย่างใกล้ชิด

แม้แนวคิดเรื่องสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจะเป็นแนวคิดที่ดี แต่การนำมาใช้งานจริงในปัจจุบันยังมีน้อยมาก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนก่อสร้างและค่าบำรุงรักษาสถานีสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสถานีอัดประจุไฟฟ้าทั่วไป และการใช้งานจริงยังไม่สามารถสับเปลี่ยนแบตเตอรี่ได้รวดเร็วตามที่ต้องการ เทคโนโลยีการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่สำหรับยานยนต์ไฟฟ้าจึงยังจำเป็นต้องได้รับการพัฒนาให้สามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้น ด้วยระบบอัตโนมัติ นอกจากนี้ การติดตั้งแบตเตอรี่และระบบบริหารจัดการแบตเตอรี่ของยานยนต์ไฟฟ้าแต่ละรุ่นมีความหลากหลาย จึงเป็นเรื่องยากที่สถานีบริการสับเปลี่ยนแบตเตอรี่จะรองรับได้ครบทุกรุ่น

3.2.3 การอัดประจุแบบเหนี่ยวนำ (Inductive charging)

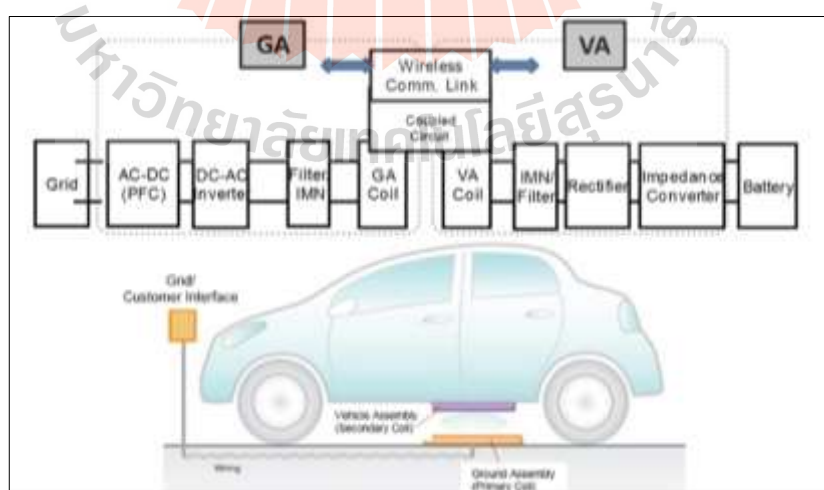
การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำ หรือการอัดประจุไฟฟ้าแบบไร้สาย (Wireless Charging หรือ Wireless Power Transfer) เป็นเทคโนโลยีสำหรับการอัดประจุไฟฟ้าที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า โดยเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านตัวส่งซึ่งติดตั้งอยู่บนพื้นดิน ขดลวดเหนี่ยวนำ (Induction Coil) ในตัวส่งจะสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดเหนี่ยวนำของตัวรับซึ่งติดตั้งอยู่ในยานยนต์ไฟฟ้า จากนั้นยานยนต์ไฟฟ้าจะนำไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นไปอัดประจุไฟฟ้าแบตเตอรี่ต่อไป การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำมีข้อดีในเรื่องความสะดวกและปลอดภัยเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเสียบปลั๊ก และสามารถลดความเสี่ยงในการเกิดอันตรายจากการอัดประจุไฟฟ้า เช่น การลัดวงจร แต่ก็มีข้อด้อยที่สำคัญ คือ มีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ และทำให้เกิดความร้อนง่าย จึงไม่สามารถรองรับการอัดประจุไฟฟ้าด้วยกำลังไฟฟ้าสูงได้ นอกจากนี้ การอัดประจุไฟฟ้าแบบเหนี่ยวนำจะเป็นการอัดประจุไฟฟ้ากระแสสลับเท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้ On-board Charger ในยานยนต์ไฟฟ้าเพื่อแปลงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรงก่อนจ่ายเข้าสู่แบตเตอรี่



รูปที่ 3.2 การอัดประจุแบบเหนี่ยวนำ (Inductive charging)

3.3 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นเป็นเครื่องอัดประจุแบตเตอรี่ที่เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานร่วมกับรถยนต์ไฟฟ้าโดยมีคุณสมบัติในการถ่ายโอนพลังงานไปสู่แบตเตอรี่ของตัวรถยนต์ได้โดยไม่ต้องใช้สายนำ โดยการส่งผ่านพลังงานไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังนี้ ตัวควบคุมการจ่ายพลังงาน ขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil) ใช้สำหรับส่งพลังงาน ขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil) ใช้สำหรับรับพลังงาน ตัวควบคุมที่ติดตั้งอยู่ภายในรถยนต์ และแบตเตอรี่ ซึ่งการเชื่อมต่อมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.3 โดยมีหลักการทำงานเบื้องต้นคือ ตัวควบคุมการจ่ายพลังงานจะทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้พอเพียงต่อการนำไปส่งผ่านพลังงานโดยการส่งผ่านพลังงานนี้จะต้องอาศัยขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil) ที่ใช้สำหรับส่งพลังงาน และต้องอาศัยขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil) ที่ใช้สำหรับรับพลังงานซึ่งติดตั้งอยู่ภายในตัวรถยนต์ด้วยเช่นกัน หลังจากขดลวดทุติยภูมิได้รับพลังงานเพื่อทำการอัดประจุเข้าสู่แบตเตอรี่แล้ว ภายในรถยนต์จะมีตัวควบคุมซึ่งทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงอีกทั้งยังทำหน้าที่ควบคุมการจ่ายแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมแก่การนำไปอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ของรถยนต์นั้น ๆ ข้อดีของเครื่องอัดประจุแบบไร้สายคือสามารถอัดประจุให้แบตเตอรี่ได้โดยไม่ต้องเสียบสายไฟต่อเข้ากับตัวรถยนต์ด้วยคุณสมบัตินี้เองทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้คือขดลวดปฐมภูมิ สามารถนำไปติดไว้บนถนนซึ่งเป็นเลนสำหรับพาหนะพลังงานไฟฟ้าโดยเฉพาะเนื่องจากสามารถขยับไปและสามารถอัดประจุให้แก่แบตเตอรี่ได้ไปในตัวซึ่งจะสร้างความสะดวกสบายให้แก่ผู้ใช้งานเป็นอย่างมาก ถ้าวิธีการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้ในชีวิตประจำวัน



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

3.4 สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Field: EMF)

เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำ จะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นรอบ ๆ เส้นลวดตัวนำนั้น แต่อำนาจแม่เหล็กที่เกิดขึ้นมีเพียงจำนวนเล็กน้อย ซึ่งไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ การจะเพิ่มความเข้มของสนามแม่เหล็ก ทำได้โดยการนำเส้นลวดตัวนำมาพันเป็นขดลวด สนามแม่เหล็กที่เกิดในแต่ละส่วนของเส้นลวดตัวนำจะเสริมอำนาจกัน ทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้น ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้

1. จำนวนรอบของการพันเส้นลวดตัวนำ การพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำจำนวนมาก จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมาก ในทางกลับกันถ้าพันจำนวนรอบของเส้นลวดตัวนำจำนวนน้อย การจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กก็น้อยตามไปด้วย

2. ปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดตัวนำ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำในปริมาณมากจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กมาก และถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านเส้นลวดตัวนำในปริมาณน้อยการจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กก็น้อยตามไปด้วย

3. ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำแกนของแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุต่างชนิดกันจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กต่างกัน เช่น แกนอากาศจะให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อยกว่าแกนที่ทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic) หรือสารที่สามารถเกิดอำนาจแม่เหล็กได้ เช่น เหล็ก เพอร์ไรต์ เป็นต้น สารเหล่านี้จะช่วยเสริมอำนาจแม่เหล็กในขดลวดตัวนำทำให้มีความเข้มของสนามแม่เหล็กมากขึ้น

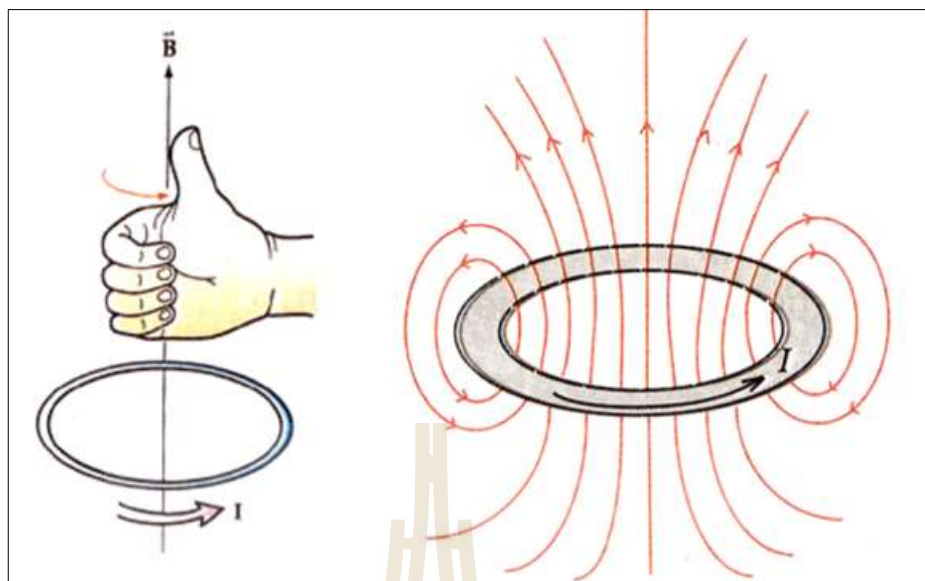
4. ขนาดของแกนแท่งแม่เหล็กไฟฟ้า แกนที่มีขนาดใหญ่จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กได้มากกว่าแกนที่มีขนาดเล็ก

3.4.1 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

ถ้ากระแสไฟฟ้าไหลผ่านไปในขดลวดตัวนำที่ถูกดัดเป็นวงกลม สนามแม่เหล็กจะเกิดรอบ ๆ ขดลวดตัวนำนั้น โดยขนาดของสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของขดลวด แปรผกผันกับรัศมีของขดลวด (a) แต่จะแปรผันตามจำนวนรอบของขดลวดและปริมาณกระแส และสามารถคำนวณสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของขดลวดได้จาก

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2a} \quad (3.1)$$

เมื่อ N คือ จำนวนรอบของขดลวด
 I คือ กระแสที่ไหลผ่านขดลวด



รูปที่ 3.4 ทิศของสนามแม่เหล็กของลวดตัวนำวงกลม

3.5 สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

ประจุไฟฟ้า (Electric charge) คือปริมาณของความเป็นไฟฟ้าที่สถิตอยู่ในสสารนั้น ๆ ซึ่งแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างประจุไฟฟ้าจะเรียกว่าแรงไฟฟ้า (Electric force) และถ้าประจุไฟฟ้ามีการเคลื่อนที่ด้วยจะเกิดแรงที่เรียกว่า แรงแม่เหล็ก (Magnetic force) ด้วยเหตุที่ทั้งแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีแหล่งกำเนิดเดียวกันคือประจุไฟฟ้า การจัดจำแนกกลุ่มของแรงจึงได้จัดให้ทั้งสองแรงนี้อยู่ในกลุ่มเดียวกันที่เรียกว่า แรงแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic force) ทุก ๆ ประจุในสสารจะมีความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity) หรือเรียกว่า สนามไฟฟ้า (Electric field : E) อยู่ปริมาณหนึ่งซึ่งเป็นตัวกำกับให้ประจุหนึ่งออกแรงกระทำต่อประจุหนึ่งด้วยแรงปริมาณหนึ่ง ส่วนความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux density) หรือเรียกว่าสนามแม่เหล็ก (Magnetic field : B) จะเป็นตัวกำกับให้ออกแรงกระทำเฉพาะประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้เองที่เป็นรากฐานของกลไกในการผันแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปสู่รูปแบบอื่น ๆ โดยใช้เป็นพื้นฐานสำหรับอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าและหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งการผันแปลงพลังงานที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์เหล่านี้จะประกอบด้วยกฎพื้นฐานอยู่ 4 กฎ (Chapman, 1998) คือ

1. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กล้อมรอบเส้นลวดนี้
2. เมื่อสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้นขดลวดที่เกิดจากการพันของเส้นลวดตัวนำ (พื้นฐานปรากฏการณ์หม้อแปลง)

3. เมื่อกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงทางกลขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์มอเตอร์)

4. เมื่อเส้นลวดตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำขึ้น (พื้นฐานปรากฏการณ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้า)

ซึ่งปริมาณของสนามแม่เหล็กนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (3.2)

$$B = \mu H \quad (3.2)$$

เมื่อ μ คือความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability) มีค่าเท่ากับ $\mu_0 \mu_r$ โดยที่ μ_0 คือความซาบซึมได้ของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m และ μ_r คือค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) ซึ่งก็จะขึ้นอยู่กับวัสดุตัวกลาง และ H คือความเข้มสนามแม่เหล็ก (Magnetic field intensity) และจากการศึกษาคุณสมบัติของ B พบว่า การกระทำไดเวอร์เจนซ์ของสนามแม่เหล็กนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.3)

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.3)$$

จากสมการที่ (3.3) นั่นคือ กฎของเกาส์ (Gauss's law) ซึ่งแสดงในรูปสมการอนุพันธ์ของสนามแม่เหล็ก โดยหากนำไปประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ดังแสดงในสมการที่ (3.4) และจะได้ว่าค่าไดเวอร์เจนซ์ของ B เท่ากับศูนย์แล้วย่อมมีอีกเวกเตอร์หนึ่งที่เมื่อกระทำเคิร์ลแล้ว จะได้ผลเป็นเวกเตอร์ B และเวกเตอร์ใด ๆ ที่กระทำเคิร์ลแล้วเท่ากับ B จะเรียกว่าศักย์เชิงเวกเตอร์สนามแม่เหล็ก (Magnetic vector potential : A)

$$B = \nabla \times A \quad (3.4)$$

ดังนั้นเมื่อต้องการคำนวณค่าสนามแม่เหล็ก B จึงสามารถเลี่ยงได้โดยการคำนวณค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ก่อน ซึ่งเป็นการคำนวณที่ง่ายกว่า โดยค่าสนามแม่เหล็ก B สามารถคำนวณได้จากการเคิร์ลค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A

3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย สามารถแสดงได้โดยสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation: PDE) อันดับสอง แสดงได้ด้วยสมการที่ (3.5)

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial t} = J_0 \quad (3.5)$$

เมื่อ A คือ ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา t

D คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา t

μ คือ ความซาบซึมได้ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability)

σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (Electrical conductivity)

J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแส (Current density)

จากการศึกษาคุณสมบัติของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (A) พบว่า $\nabla \cdot A = 0$ ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์คือ $\nabla \times (\nabla \times A) = \nabla(\nabla \cdot A) - \nabla^2 A$ ทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.6)

$$\nabla A^2 - \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \mu \frac{\partial D}{\partial t} = -\mu J_0 \quad (3.6)$$

และจากคุณสมบัติของ A จะได้ว่า $\nabla^2 A = \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2}$ จึงสามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.7)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{\partial D}{\partial t} = -J_0 \quad (3.7)$$

และจากนิยามของค่า D ซึ่งจะได้ว่า $D = \epsilon E$ จึงสามารถเขียนสมการของค่าศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (3.8)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} = -J_0 \quad (3.8)$$

เมื่อ ε คือ ค่าไดอิเล็กตริก (dielectric)

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่าสนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.9)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.9)$$

แทนสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.9) จะได้ดังสมการที่ (3.10)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times A \quad (3.10)$$

ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้า (E) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.11)

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.11)$$

นำสมการที่ (3.11) แทนค่าลงในสมการที่ (3.8) จะได้สมการของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (3.12)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -J_0 \quad (3.12)$$

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาระบบโดยพิจารณาการแปลงของโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ (Time-harmonic) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (3.13) และ (3.14)

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\omega^2 A \quad (3.14)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14) แทนค่าลงในสมการที่ (3.12) จะได้สมการของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (3.15)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\omega \sigma A - \omega^2 \epsilon A = -J_0 \quad (3.15)$$

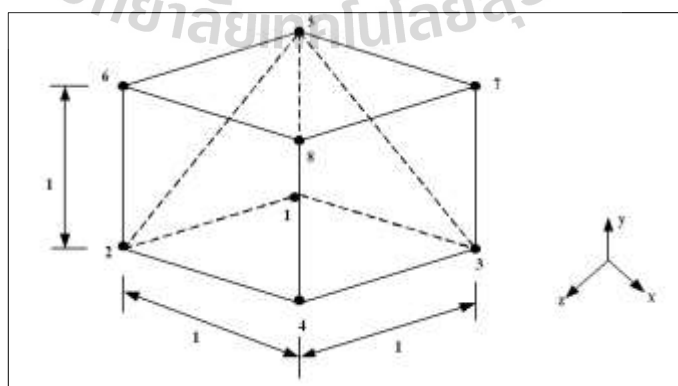
3.7 ระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์

ปัญหาทางวิศวกรรมศาสตร์ส่วนใหญ่ต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล ซึ่งในกรณีที่เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ส่วนใหญ่แล้วจะหาผลเฉลยด้วยวิธีประมาณ เนื่องจากความซับซ้อนของสมการ ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี และวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสลับเนื่อง โดยแบ่งวัตถุของปัญหาที่สนใจออกเป็นช่องตารางสี่เหลี่ยม ซึ่งตารางสี่เหลี่ยมเหล่านี้จะต่อกันที่จุดต่อตามหัวมุมของสี่เหลี่ยมต่าง ๆ และขนาดของปัญหาหรือจำนวนตัวที่ไม่รู้ค่านั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดต่อนั้นเอง ถ้าให้ขนาดตารางสี่เหลี่ยมมีขนาดเล็กลงนั้นหมายถึงต้องเพิ่มจำนวนตารางสี่เหลี่ยมให้มากขึ้น จึงจะสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมของวัตถุดังกล่าวได้ใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น แต่ในขณะเดียวกันจำนวนจุดต่อที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้จำนวนสมการผลต่างสลับเนื่องมากขึ้นด้วย และกระบวนการในการแก้ปัญหาก็จำเป็นต้องใช้หน่วยความจำบนเครื่องคอมพิวเตอร์มากขึ้นรวมถึงใช้เวลาในการคำนวณเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ข้อดีของวิธีผลต่างสลับเนื่องคือ เป็นวิธีการที่ง่ายต่อการศึกษาและการทำความเข้าใจ รวมไปถึงสะดวกในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้คำนวณหาผลเฉลยของปัญหานั้น ๆ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสลับเนื่องนั้นมีหลายประการ เช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่เกี่ยวข้องกับวัตถุซึ่งอาจมีรูปร่างลักษณะซับซ้อน อย่างเช่น โครงสร้างหรือชิ้นส่วนต่าง ๆ ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งสาเหตุของความยากดังกล่าวนี้มีส่วนทำให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณอีกวิธีหนึ่งที่เรียกว่า วิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใด ๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมได้

ระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อที่จะใช้คำนวณหาค่าผลเฉลยโดยประมาณของปัญหาที่อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยการแบ่งรูปร่างขอบเขตของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ แล้วสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ และอิลิเมนต์ต่าง ๆ จะเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะใช้คำนวณหาค่าผลเฉลย และสำหรับระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ในงานวิจัยนี้จะดำเนินการคำนวณแบบ 3 มิติ

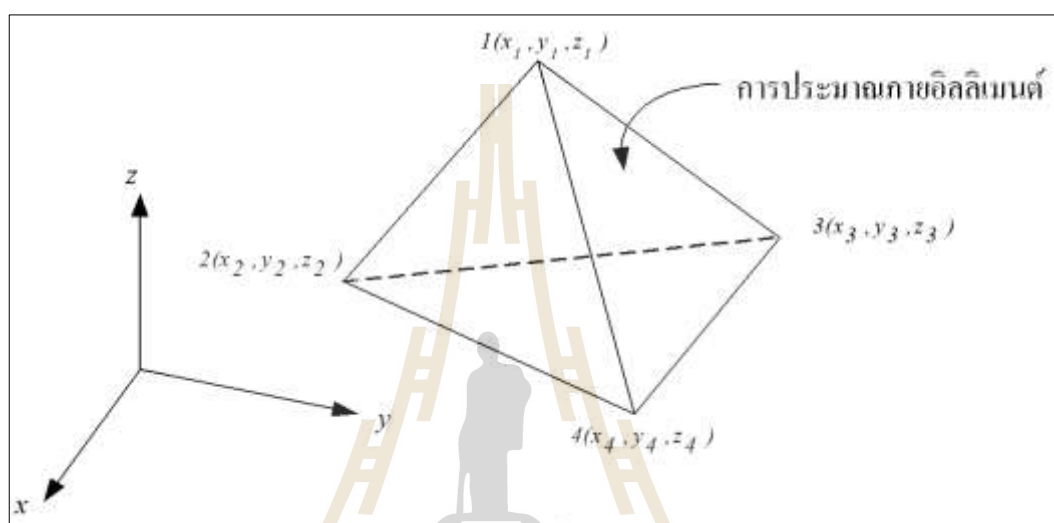
หลักการของระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ คือ เริ่มจากการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นพื้นที่หลาย ๆ ส่วนที่เรียกว่า อิลิเมนต์ โดยที่การกระจาย และแรงภายในแต่ละอิลิเมนต์ ณ จุดที่อิลิเมนต์ต่อโยงกันจะต้องเข้ากันได้และสมดุล ซึ่งอิลิเมนต์ต่าง ๆ นี้ จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของแต่ละงานว่าต้องการรูปร่างลักษณะใกล้เคียงกับของจริงดั้งเดิมมากเท่าใด ซึ่งถ้าพิจารณาแบบ 3 มิติ อาจอยู่ในรูปลักษณะของรูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral), รูปทรงหกหน้า (Hexahedron), รูปทรงแปดหน้า (Octahedron) หรือ รูปทรงพีรามิด (Pyramids) ก็สามารทำได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เนื่องจากเป็นรูปทรงที่มีจำนวนโนดหรือ จำนวนจุดเชื่อมต่อที่น้อยที่สุด อีกทั้งรูปทรงสี่หน้าสามารถประกอบกันได้เป็นรูปทรงอื่น ๆ ที่กล่าวมานั้นได้ง่าย โดยค่าผลเฉลยโดยประมาณที่มีจำนวนนับที่จะคำนวณออกมานั้นจะมีความแม่นยำขึ้นอยู่กับขนาด และจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในการแก้ปัญหานั้นซึ่งขึ้นตอนโดยทั่วไปของวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ ๆ 6 ขั้นตอน

1. แบ่งอิลิเมนต์ย่อยให้กับระบบ แบ่งขอบเขตรูปร่างของระบบปัญหาที่ต้องการหาผลลัพธ์ออกเป็นอิลิเมนต์ย่อย ๆ โดยแต่ละอิลิเมนต์จะมีความเป็นปริมาตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งเป็นรูปแสดงการแบ่งอิลิเมนต์ของรูปร่างปัญหาแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) โดยใช้อิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า (Tetrahedral)



รูปที่ 3.5 รูปร่างของปัญหาเมื่อพิจารณาอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

2. เลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ อย่างในกรณีอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าจะประกอบด้วย 4 โหนดที่มีตัวห้อย 1 2 3 และ 4 ซึ่งเป็นการประมาณค่าภายในอิลิเมนต์แบบเชิงเส้นดังแสดงในรูป 3.6 ตำแหน่งของโหนด (x_i, y_i, z_i) , $i = 1, 2, 3, 4$ เป็นตำแหน่งของตัวที่ไม่ทราบค่า A_i โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพธ์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์ $A(x, y, z)$ เป็นแบบเชิงเส้น ดังสมการที่ (3.16)



รูปที่ 3.6 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้า

$$A(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (3.16)$$

โดยที่ a, b, c, d เป็นค่าคงที่ ซึ่งสามารถหาได้จากโหนดทั้งสี่ดังนี้

$$A(x_1, y_1, z_1) = A_1 = a + bx_1 + cy_1 + dz_1$$

$$A(x_2, y_2, z_2) = A_2 = a + bx_2 + cy_2 + dz_2$$

$$A(x_3, y_3, z_3) = A_3 = a + bx_3 + cy_3 + dz_3$$

$$A(x_4, y_4, z_4) = A_4 = a + bx_4 + cy_4 + dz_4$$

นำค่า a b c d ที่ได้จากการแก้สมการทั้งสี่ข้างต้น แทนค่ากลับไปในสมการที่ (3.16) จะได้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยโดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอิลิเมนต์เป็นดังสมการที่ (3.17)

$$A(x, y, z) = A_1 N_1 + A_2 N_2 + A_3 N_3 + A_4 N_4 \quad (3.17)$$

ซึ่ง $N_i, i = 1 \ 2 \ 3 \ 4$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (3.18)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3.18)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละอีลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ แสดงได้ดังสมการที่ (3.19)

$$6V = \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3. สร้างสมการของอีลิเมนต์ (Element formulation) ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหา ซึ่งขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญของวิธีไฟต์ไนต์อีลิเมนต์ อย่างเช่นกรณีสมการของอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าที่ได้ยกมาเป็นตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะอยู่ในรูปแบบดังแสดงในสมการที่ (3.20)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix}_e \begin{bmatrix} A_i \\ A_j \\ A_k \\ A_l \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} f_i \\ f_j \\ f_k \\ f_l \end{bmatrix}_e \quad (3.20)$$

ซึ่งเขียนโดยย่อได้ว่า $[K]_e[A]_e = [f]_e$ โดย $[A]_e$ คือ เมทริกซ์ตัวไม่ทราบค่าที่โนด และตัวห้อย e แสดงให้ทราบว่า เป็นเมทริกซ์ระดับอีลิเมนต์ ซึ่งสมการของอีลิเมนต์ดังกล่าว จำเป็นต้องถูกสร้างขึ้นมาให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ซึ่งอยู่ในรูปแบบของสมการที่ (3.20) สามารถทำได้โดย

- วิธีการโดยตรง (Direct approach) วิธีนี้สามารถใช้ได้เฉพาะกับปัญหาที่เข้าใจได้ง่าย ๆ อย่างเช่น ปัญหาต่าง ๆ ในรูปทรง 1 มิติ เท่านั้น ซึ่งไม่สามารถขยายเปลี่ยนแปลงเพื่อนำไปใช้กับปัญหาใน 2 หรือ 3 มิติโดยทั่วไปได้

- วิธีการแปรผัน (Variational approach) หลักการที่สำคัญของวิธีการนี้คือ จำเป็นจะต้องทำการหาหรือสร้างฟังก์ชัน ซึ่งเมื่อทำการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันนั้นแล้ว จะเป็นผลให้เกิดสมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่สอดคล้องกับปัญหาที่กำลังสนใจอยู่ อย่างไรก็ตามวิธีการแปรผันเป็นวิธีการดั้งเดิมที่ใช้กันในช่วงต้น ๆ ของการพัฒนาวิธีไฟต์ไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับทางด้านโครงสร้าง และยังมีจุดอ่อนอีกคือ จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันแปรผันที่

สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้น ๆ ซึ่งปัญหาหลาย ๆ ชนิดในทางปฏิบัติสามารถสร้างสมการอนุพันธ์ขึ้นมาได้ แต่ไม่สามารถหาฟังก์ชันแปรผันที่สอดคล้องกันนั้นได้

- วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Method of weighted residuals) วิธีนี้จะใช้วิธีการสร้างสมการไฟต์ในอีลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทราบฟังก์ชันการแปรผันที่สอดคล้อง ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างสมการของไฟต์ในอีลิเมนต์สำหรับปัญหาโดยทั่วไป และถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ ในปัจจุบัน

4. นำสมการของแต่ละอีลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกัน (Assembly) เป็นสมการรวมของระบบจากขั้นตอนที่ 1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ย่อย ๆ ซึ่งประกอบด้วย n โหนด จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น n สมการ โดยจะแสดงได้ดังสมการที่ (3.21)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdot & \cdot & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdot & \cdot & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdot & \cdot & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdot & \cdot & K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (3.21)$$

หรือเขียนโดยย่อได้ดังนี้ $[K]_{\text{sys}}[A]_{\text{sys}} = [F]_{\text{sys}}$ จากสมการที่ (3.21) เมทริกซ์ $[K]_{\text{sys}}$ จะมีคุณสมบัติของความเป็นเมทริกซ์สมมาตร กล่าวคือ $[K]_{\text{sys}} = [K]_{\text{sys}}^T$ และมีคุณสมบัติของการจับกลุ่มกันของค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์บริเวณแนวทแยงมุมของเมทริกซ์ ซึ่งจะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นแถบ (Banded matrix) จากคุณสมบัติดังกล่าวนี้ จะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในทางปฏิบัติที่จำเป็นต้องใช้จำนวน โหนดเป็นจำนวนมากเพื่อที่จะก่อให้เกิดผลเฉลยที่เที่ยงตรง โดยสามารถพัฒนาให้เก็บเฉพาะค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ไว้ในหน่วยความจำเพื่อใช้ในการคำนวณเท่านั้น การนำสมการย่อยของแต่ละอีลิเมนต์มาประกอบกันเข้าเป็นสมการรวมของระบบจำเป็นต้องมีหลักการซึ่งหลักการที่จะกล่าวนี้เป็นหลักการที่ง่าย สามารถทำได้โดยสะดวก เหมาะกับรูปร่างของปัญหาที่มีอีลิเมนต์ย่อยจำนวนมาก ๆ และหลักการนี้จะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาคอมพิวเตอร์โปรแกรมด้วย

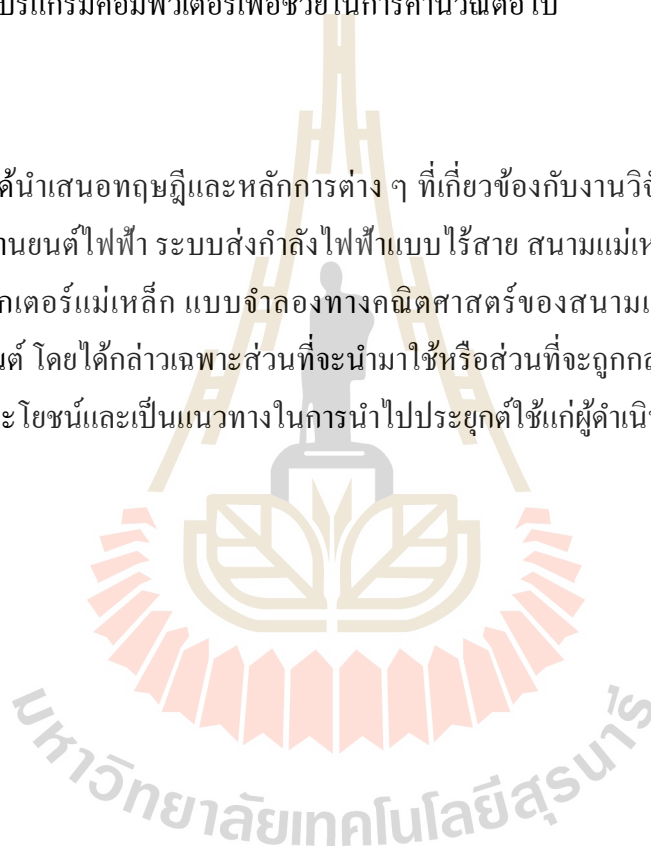
5. การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่สอดคล้องกับปัญหาลงในสมการรวมของระบบเพื่อหาค่าผลเฉลย โดยการแก้สมการรวมของระบบเพื่อหาตัวไม่ทราบค่า

6. การคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ต้องการต่อไป เมื่อทราบค่าผลลัพธ์ที่โนดต่าง ๆ แล้วสามารถคำนวณหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับผลลัพธ์นี้ต่อไปได้

จากขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอน จะเห็นได้ว่าระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์เป็นวิธีที่มีแบบแผนเป็นขั้นเป็นตอน โดยมีส่วนที่สำคัญที่สุดคือการสร้างสมการของอิลิเมนต์ในขั้นตอนที่ 3 ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาที่กำหนด และในขั้นตอนทั้ง 6 ขั้นตอนนี้จะนำไปพัฒนาขึ้นเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อช่วยในการคำนวณต่อไป

3.8 สรุป

บทนี้ได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งได้แก่ การอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก และระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ โดยได้กล่าวเฉพาะส่วนที่จะนำมาใช้หรือส่วนที่จะถูกกล่าวอ้างถึงในบทต่อ ๆ ไป ทั้งนี้เพื่อเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้แก่ผู้ดำเนินงานวิจัย



บทที่ 4

การคำนวณสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ

4.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลิเมนต์ (Finite element method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยดังเช่น สมการสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และสมการการกระจายของอุณหภูมิ เป็นต้น และเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์ชิ้นงานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะความโค้งมนได้ อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถรองรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลิเมนต์ได้ นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์มีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหาของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระอย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าสนามแม่เหล็กที่ปรากฏขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil หรือ Transmitter) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil หรือ Receiver) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย (WPT) ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย และขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลิเมนต์พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟต์ในต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กที่กระจายตัวอยู่ระหว่างขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil หรือ Transmitter) และขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil หรือ Receiver) ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายต่อไป

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสามารถแสดงด้วยสมการที่ (4.1)

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial t} = J_0 \quad (4.1)$$

จากการศึกษาคุณสมบัติของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (A) ประกอบกับการใช้เอกลักษณ์ของเวกเตอร์คือทำให้สามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (4.2)

$$\nabla A^2 - \mu \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \mu \frac{\partial D}{\partial t} = -\mu J_0 \quad (4.2)$$

จากนิยามของ D จะได้ว่า $D = \epsilon E$ จึงสามารถเขียนสมการของศักย์เวกเตอร์เชิงแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (4.3)

$$\frac{1}{\mu} \nabla A^2 - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} = -J_0 \quad (4.3)$$

จากกฎของฟาราเดย์ (Faraday's law) ที่กล่าวว่าสนามแม่เหล็กแปรผันตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า (E) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4.4)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.4)$$

แทนสมการ ลงในสมการที่ (4.4) จะได้ดังสมการที่ (4.5)

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t} \nabla \times A \quad (4.5)$$

ดังนั้นจะได้สนามไฟฟ้า (E) ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (4.6)

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} \quad (4.6)$$

นำสมการที่ (4.6) แทนค่าลงในสมการที่ (4.3) จะได้สมการของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กเป็นดังสมการที่ (4.7)

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -J_0 \quad (4.7)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายใน 3 มิติตามระนาบ x, y และ z ซึ่งแปรผันตามเวลา จะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4.8) โดยสมการจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equation : PDE) อันดับสอง

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + J_0 = 0 \quad (4.8)$$

ในกรณีของปัญหาที่พิจารณาเป็นระบบที่แปลงจากโดเมนของเวลาเป็นโดเมนของความถี่ (Time harmonic) โดยสามารถแทน A อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน (Christopoulos, 1995) ดังนั้น

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\omega^2 A \quad (4.10)$$

เมื่อพิจารณาใน 3 มิติ แทนค่าสมการที่ (4.9) และ (4.10) ลงในสมการที่ (4.8) จะได้สมการเป็น

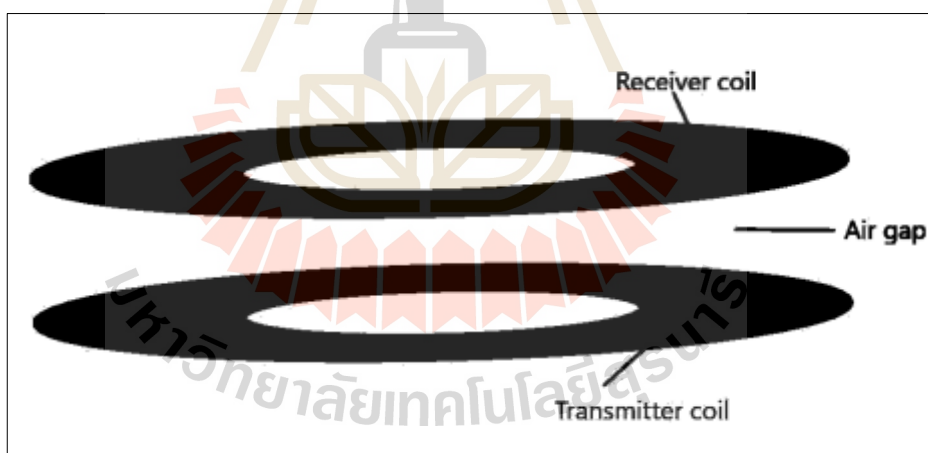
$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\omega \epsilon A - \omega^2 \epsilon A = -J_0 \quad (4.11)$$

4.3 การคำนวณสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์

เนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อใช้ในการคำนวณหาสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ดังแสดงในสมการที่ (4.11) และสำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิตินั้นหาผลเฉลยแม่นยำได้ยาก ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในกรณีนี้ ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะค่อนข้างซับซ้อน โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงกว่าวิธีการอื่น ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

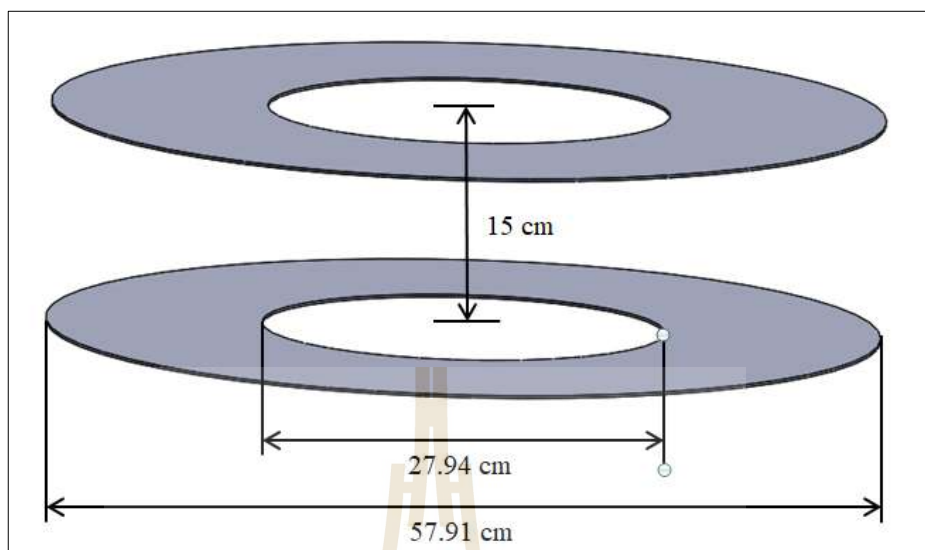
4.3.1 การออกแบบอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายดังแสดงในรูปที่ 4.1 และสามารถแสดงขนาดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายได้ดังรูปที่ 4.2

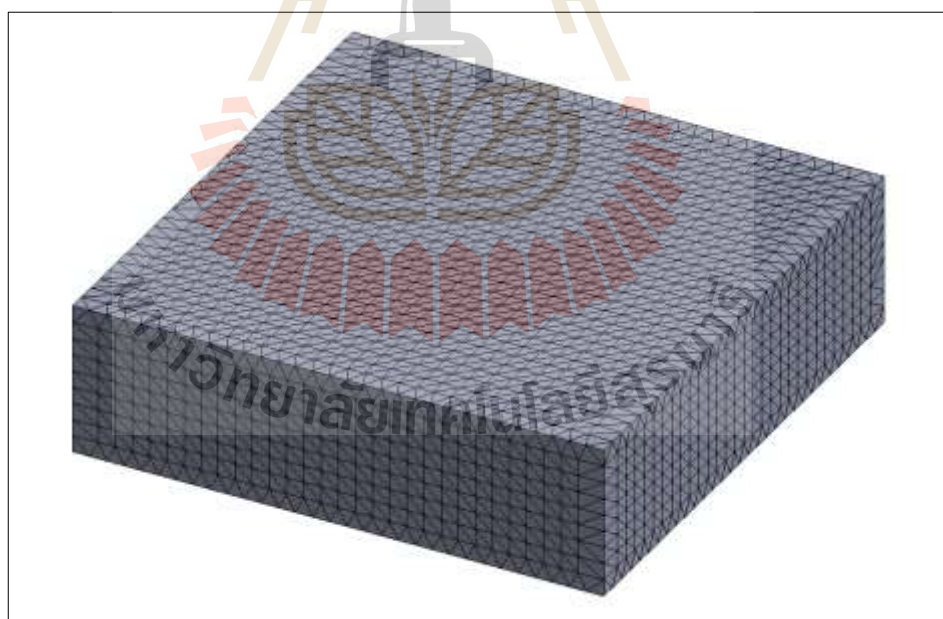


รูปที่ 4.1 แบบจำลองของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่จะศึกษา

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ ซึ่งในที่นี้จะใช้อิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) งานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ย่อยโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solidworks โดยจะมีจำนวนโนดและจำนวนอิลิเมนต์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ยังไม่มีการออกแบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เป็นจำนวน 12,731 โนด และ 67,053 อิลิเมนต์ สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 มิติของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย



รูปที่ 4.3 การแบ่งอิลิเมนต์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายในแบบ 3 มิติ

4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบในแบบ 3 มิติ โดยเมื่อกำหนดให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้นจะได้

$$A(x, y, z) = A_i N_i + A_j N_j + A_k N_k + A_l N_l \quad (4.12)$$

โดยที่ N_n , $n = i, j, k, l$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ A_n , $n = i, j, k, l$ คือผลลัพธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (i, j, k, l) ของอิลิเมนต์ ซึ่งในกรณีอิลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อจะได้

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad \text{เมื่อ } i = 1, 2, 3, 4 \quad (4.13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

และ V คือปริมาตรของแต่ละอีลิเมนต์หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์
ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

4.3.3 การสร้างสมการของอีลิเมนต์

วิธีถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weight residual method) ของกาเลอร์คิน (Galerkin) เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ (Preston, Reece, and Sangha, 1988; Kim, Kwon, and Park, 1999) ซึ่งเมทริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้จะมีคุณสมบัติที่ก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหามิติใหญ่ สำหรับกรณีระบบปัญหา 3 มิติ การสร้างสมการของอีลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการคือ การแทนค่าผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (4.11) จะไม่ก่อให้เกิดค่าเท่ากับศูนย์ หากแต่จะมีค่าเท่ากับ R แทนดังแสดงด้วยสมการที่ (4.15)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\omega\sigma A - \omega^2 \epsilon A + J_0 = R \quad (4.15)$$

โดยที่ A คือ ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า

ซึ่ง R เรียกว่า เศษตกค้าง (Residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแม่นยำตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรจะมีความต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เที่ยงตรงมาก ซึ่งวิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (Weighting function : W) แล้วอินทิเกรตตลอดทั้งโดเมนของอีลิเมนต์ (V) และกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_V W_n R dV = 0 \quad ; n = 1, 2, 3, 4 \quad (4.16)$$

โดยปกติเราจะเลือก $W_n = N_n$ ซึ่งเรียกว่า บับ โนฟ-กาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทน R ด้วยสมการที่ (4.16) ลงในสมการที่ (4.15) จะได้

$$\int_v N_n \left[\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] - (j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2)A + J_0 \right] dV = 0 \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} & \int_v N_n \left[\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right) \right] \right] dV - \int_v N_n [(j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2)A] dV \\ & + \int_v N_n [J_0] dV = 0 \end{aligned} \quad (4.18)$$

พิจารณาการอินทิเกรตที่ละพจน์ของสมการที่ (4.18) สำหรับพจน์แรกซึ่งเป็นพจน์อนุพันธ์อันดับสองใช้วิธีการอินทิเกรตที่ละส่วน (Integrate by parts) โดยจะใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's theorem) ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned} & \int_{\Gamma} N_n \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} n_x + \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} n_y + \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} n_z \right] d\Gamma \\ & - \int_v \left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right] dV \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$- \int_v N_n [(j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2)A] dV + \int_v N_n [J_0] dV = 0$$

พิจารณาพจน์แรกทางด้านซ้ายมือของสมการที่ (4.19) ซึ่งเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับขอบเขตของอิลลิเมนต์ (Γ) โดยค่าศักร์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่บริเวณขอบมีค่าเท่ากับศูนย์ แสดงดังสมการที่ (4.20) ดังนั้นสมการที่ (4.19) จึงลดรูปเหลือดังสมการที่ (4.21) และเนื่องจากสมการที่ (4.21) มีทั้งหมด 4 สมการ ดังนั้นสามารถเขียนสมการไฟต์ในดอิลลิเมนต์นี้ให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังสมการที่ (4.22)

$$\begin{aligned} A(x, y, z) &= 0 \\ (x, y, z) &\in \Gamma \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} &\int_V \left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial N_n}{\partial y} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial N_n}{\partial z} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right] dV + \int_V N_n [(j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2)A] dV \\ &= \int_V N_n [J_0] dV \end{aligned} \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} &\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) dV \\ &+ \int_V [N_n]_{4 \times 1} (j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2) A dV = \int_V [N_n]_{4 \times 1} J_0 dV \end{aligned} \quad (4.22)$$

และจากสมการที่ (4.12) จึงได้ลักษณะของการกระจายของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A โดยประมาณในแต่ละอีลีเมนต์เป็น

$$A(x, y, z) = [N]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\partial A}{\partial x} = \left[\frac{\partial N}{\partial x} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}, \quad \frac{\partial A}{\partial y} = \left[\frac{\partial N}{\partial y} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial A}{\partial z} = \left[\frac{\partial N}{\partial z} \right]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1}$$

และสมการไฟต์ในอีลีเมนต์จึงกลายเป็น

$$\begin{aligned} &\int_V \left(\left[\frac{\partial N_n}{\partial x} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial A}{\partial x} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial y} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial A}{\partial y} \right]_{1 \times 4} + \left[\frac{\partial N_n}{\partial z} \right]_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial A}{\partial z} \right]_{1 \times 4} \right) dV \\ &+ \int_V [N_n]_{4 \times 1} (j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2) [N]_{1 \times 4} [A]_{4 \times 1} dV = \int_V [N_n]_{4 \times 1} J_0 dV \end{aligned} \quad (4.23)$$

หรือสามารถเขียนสมการไฟฟ้าในต้อลลิเมนต์สำหรับแต่ละอิลลิเมนต์ ซึ่งจะประกอบด้วย 4 สมการได้ดังนี้

$$([M]_{4 \times 4} + [K]_{4 \times 4})\{A\}_{4 \times 1} = \{F\}_{4 \times 1} \quad (4.24)$$

พิจารณาเมทริกซ์ $[M]_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$\text{จาก } [M]_{4 \times 4} = \int_V [N_n]_{4 \times 1} (j\omega\sigma + \sigma\epsilon\omega^2) [N]_{1 \times 4} dV \quad (4.25)$$

จากสมการที่ (4.13) ฟังก์ชันการประมาณภายในแสดงได้ดังนี้

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad \text{เมื่อ } i = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \quad (4.26)$$

จากสมการที่ (4.26) นี้จะสามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (Factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (4.27) จะได้

$$\int_V L_1^a L_2^b L_3^c L_4^d dV = \frac{a!b!c!d!}{(a+b+c+d+3)!} 6V \quad (4.27)$$

จากสมการที่ (4.26) จะสามารถแบ่งการพิจารณาได้เป็น 2 กรณีคือ $L_n = L_m$ และ $L_n \neq L_m$ ดังนั้นจากสมการที่ (4.26) เมื่อประยุกต์ใช้สมการที่ (4.27) จะได้

$[M]_{4 \times 4}$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์การนำทางไฟฟ้า

$$[M] = \frac{(j\omega\sigma - \sigma\epsilon\omega^2)}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

พิจารณาเมทริกซ์ $[K]_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$[K]_{4 \times 4} = \int_V \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial N_n}{\partial x} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial x} \end{bmatrix}_{1 \times 4} + \begin{bmatrix} \frac{\partial N_n}{\partial y} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial y} \end{bmatrix}_{1 \times 4} + \begin{bmatrix} \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix}_{4 \times 1} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial z} \end{bmatrix}_{1 \times 4} \right) dV \quad (4.29)$$

และจากฟังก์ชันการประมาณภายในดังสมการที่ (4.26) จึงได้

$$\frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V}, \quad \frac{\partial N_n}{\partial \tilde{N}} = \frac{c_n}{6V} \quad \text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad (4.30)$$

แทนความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.30) ลงในสมการที่ (4.29) จะได้

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{\mu} \int_V \left(\frac{b_n}{6V} \frac{b_m}{6V} + \frac{c_n}{6V} \frac{c_m}{6V} + \frac{d_n}{6V} \frac{d_m}{6V} \right) dx dy dz \quad (4.31)$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \int_V dx dy dz$$

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V^2} (b_n b_m + c_n c_m + d_n d_m) \quad n, m = 1, 2, 3, 4$$

จะได้ $[K]_{4 \times 4}$ คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ความขาคซึมได้ของแม่เหล็ก

$$[K] = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 + d_1 d_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 + d_1 d_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 + d_1 d_3 & b_1 b_4 + c_1 c_4 + d_1 d_4 \\ & b_2 b_2 + c_2 c_2 + d_2 d_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 + d_2 d_3 & b_2 b_4 + c_2 c_4 + d_2 d_4 \\ & & b_3 b_3 + c_3 c_3 + d_3 d_3 & b_3 b_4 + c_3 c_4 + d_3 d_4 \\ & & & b_4 b_4 + c_4 c_4 + d_4 d_4 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Sym

พิจารณาเมทริกซ์โหลดเวกเตอร์ $\{F\}_{4 \times 4}$ จะได้ว่า

$$\{F\}_{4 \times 4} = \int_V [N]_{4 \times 1} J_0 dV \quad (4.33)$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (4.27) จะได้ $\{F\}_{4 \times 4}$ คือ โหลดเวกเตอร์ของกระแสได้ดังสมการที่ (4.34)

$$\{F\} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

4.3.4 การประกอบสมการอีลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็น การนำสมการของแต่ละอีลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ และจากหัวข้อที่ 4.3.1 หากแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอีลิเมนต์ย่อย ๆ ที่ประกอบด้วย n จุดต่อ ระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อย n สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าความศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$([M] + [K])_{n \times n} \{A\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1}$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} + K_{11} & M_{12} + K_{12} & M_{13} + K_{13} & \dots & M_{1n} + K_{1n} \\ M_{21} + K_{21} & M_{22} + K_{22} & M_{23} + K_{23} & \dots & M_{2n} + K_{2n} \\ M_{31} + K_{31} & M_{32} + K_{32} & M_{33} + K_{33} & \dots & M_{3n} + K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} + K_{n1} & M_{n2} + K_{n2} & M_{n3} + K_{n3} & \dots & M_{nn} + K_{nn} \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times n)} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix}_{\text{sys}(n \times 1)} \quad (4.22)$$

เมื่อ	M	คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์การนำทางไฟฟ้า
	K	คือ เมทริกซ์ของสัมประสิทธิ์ความขบขันได้ของแม่เหล็ก
	A	คือ ค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งโนดต่าง ๆ
	F	คือ โหลดเวกเตอร์ของกระแส

4.3.5 การคำนวณค่าตัวแปรอื่นที่ต้องการ

เมื่อทราบค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก A ที่จุดต่อต่าง ๆ แล้ว จึงสามารถคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก B ซึ่งหาจากความสัมพันธ์ $B = \nabla \times A$ ดังแสดงได้ด้วยสมการที่ (4.23) ดังนั้นเมื่อพิจารณาระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายใน 3 มิติ ตามระนาบ x, y และ z เมื่อมีกระแสในแนวแกน x และแนวแกน y จึงได้ค่าสนามแม่เหล็กในแนวแกน x (B_x) แนวแกน y (B_y) แนวแกน z (B_z) รวมทั้งค่าสนามแม่เหล็กรวม ดังแสดงด้วยสมการที่ (4.24), (4.25), (4.26) และ (4.27) ตามลำดับ

$$B = \nabla \times A = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) i + \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) j + \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) k \quad (4.23)$$

$$B_x = -\frac{\partial A_y}{\partial z} = -\frac{d_1 A_1 + d_2 A_2 + d_3 A_3 + d_4 A_4}{6V} \quad (4.24)$$

$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} = \frac{d_1 A_1 + d_2 A_2 + d_3 A_3 + d_4 A_4}{6V} \quad (4.25)$$

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} = \frac{b_1 A_1 + b_2 A_2 + b_3 A_3 + b_4 A_4}{6V} - \frac{c_1 A_1 + c_2 A_2 + c_3 A_3 + c_4 A_4}{6V} \quad (4.26)$$

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (4.27)$$

4.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์ใช้วิธีไฟต์ในดอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็กได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเออร์คิน โดยการคำนวณสนามแม่เหล็กจะพิจารณาระบบที่แปลงจากโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ และในบทนี้จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟต์ในดอิลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 5 และบทที่ 6 ต่อไป

บทที่ 5

ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ

5.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย โดยที่ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้ในการจำลองผลในบทที่ 5 นี้เป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้งานทั่วไปที่ไม่ได้เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิซึ่งประสิทธิภาพการส่งพลังงานที่คำนวณได้นั้นจะมีผลมาจากค่าสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ในบทที่ 5 นี้จึงได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นผลเฉลยโดยละเอียดของปัญหา โดยโปรแกรมถูกออกแบบให้ทำงานบนพื้นฐานการใช้งานของ MATLAB™ ที่ได้พัฒนาขึ้น

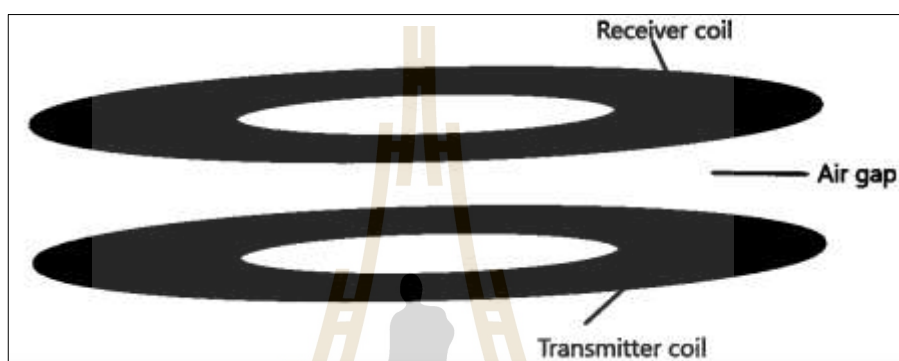
5.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กแบบ 3 มิติ

การคำนวณค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่จะได้กล่าวถึงต่อไปนี้ งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อนำข้อมูลของโนดและอิลิเมนต์มาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่ได้พัฒนาขึ้นเอง โดยจะอธิบายถึงโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลแบบ 3 มิติได้ดังนี้

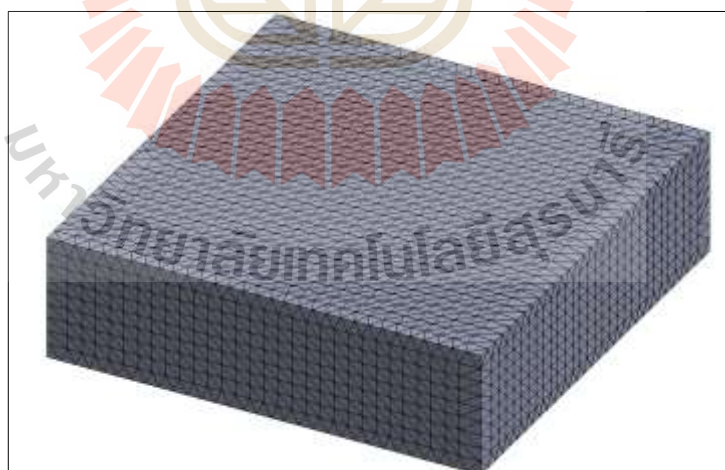
5.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด

โปรแกรมการสร้างกริดสำหรับปัญหา 3 มิติในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากโปรแกรม Solidwork โดยโปรแกรม Solidwork สามารถสร้างกริดในพิทช์ 3 มิติ สำหรับข้อมูลจากโปรแกรม Solidwork ที่จำเป็นต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติได้แก่ข้อมูลบอกระยะพิทช์ในแนวแกน x, y และ z ข้อมูลหมายเลขโนด ข้อมูลบอกหมายเลขอิลิเมนต์และข้อมูลบอกหมายเลขที่แบ่งชนิดของวัสดุในระบบ ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์อื่น จะทำการพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB™ เพื่อจำลองผลต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการวาดภาพและการตีกริดของระบบที่จะศึกษาแบบ 3 มิติ โดยการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Solidwork ทั้งนี้เพราะโปรแกรม Solidwork สามารถวาดภาพที่มีความซับซ้อนในรูปแบบ 3 มิติ ได้ง่ายและสะดวก โดยภาพรวมของระบบที่จะศึกษาเป็นแบบ 3 มิติ สามารถแสดงดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นการแสดงลักษณะโครงสร้างของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย และได้มีการแบ่งปริมาตรที่จะศึกษาออกเป็นปริมาตรย่อย ๆ ได้แก่ ปริมาตรที่เป็นขดลวดปฐมภูมิ (Primary coil), ปริมาตรที่เป็นขดลวดทุติยภูมิ (Secondary coil), ปริมาตรช่องอากาศ (Air gap)



รูปที่ 5.1 ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย



รูปที่ 5.2 ลักษณะการสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

5.2.2 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก

จากนั้นอาศัยโปรแกรม Solidwork ในการสร้างกริดและอีลิเมนต์ให้แบบอัตโนมัติ โดยเลือกกริดแบบทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (Tetrahedral element) สามารถแสดงได้ด้วยรูปที่ 5.2

ในขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมเพื่อจำลองผลค่าสนามแม่เหล็กด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในอีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยข้อมูลการพัฒนาโปรแกรมนั้นได้มาจากหัวข้อ 5.2.1 ที่อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กแสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในอีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

จากแผนภูมิในรูปที่ 5.3 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบแบบ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของโปรแกรมแต่ละขั้นตอนจะได้อธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนการกำหนดข้อมูลที่ได้จากการสร้างกริด : ขั้นตอนนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะรับค่าข้อมูลอินพุตซึ่งแสดงถึงลักษณะของโนดและอิลิเมนต์จากโปรแกรมการสร้างกริด SolidWork ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของโนด หมายเลขโนดที่ประกอบขึ้นเป็นอิลิเมนต์ จำนวนและหมายเลขของอิลิเมนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย โปรแกรมจะทำหน้าที่แก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ประจำโนดโดยการเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมทริกซ์ผกผัน

ขั้นตอนการคำนวณตัวแปรอื่นที่ต้องการ ขั้นตอนสุดท้ายนี้จะนำค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ มาคำนวณหาค่าสนามแม่เหล็ก โดยค่าสนามแม่เหล็กจะหาได้จากการเกร็ดศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก

5.3 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้จำลองผล

การจำลองผลของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กและค่าสนามแม่เหล็กในขั้นตอนนี้ โดยพารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้จำลองผลจะแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

พารามิเตอร์	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย
พิกัดกระแสของขดลวดปฐมภูมิ	15 A
ความถี่	50 kHz
พื้นที่หน้าตัดขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ	$3.141 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ	50
สภาพนำทางไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิ (σ)	$5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$
สภาพนำทางไฟฟ้าของอากาศ (σ)	0
สภาพขบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (μ_r)	1

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย(ต่อ)

พารามิเตอร์	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย
สภาพซาบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมผัสของอากาศ(μ_r)	1.00000037
ค่าไดอิเล็กตริกของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ(ϵ_r)	1
ค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ(ϵ_r)	1

5.4 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

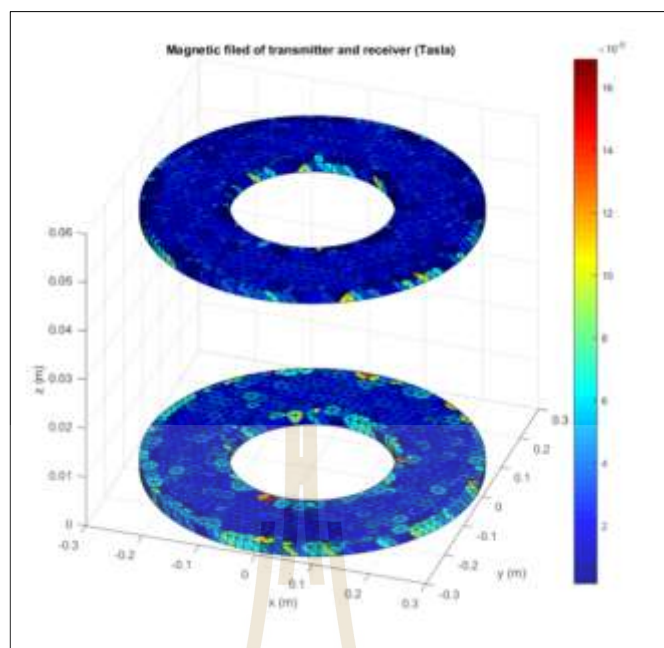
สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยผลการจำลองจะเป็นแบบทั่วไปที่ยังไม่ได้เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะแสดงดังนี้

การจำลองค่าสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายจะดำเนินการตามหัวข้อที่ได้กล่าวมา วิทยานิพนธ์นี้จะมุ่งพิจารณาการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและบริเวณขดลวดทุติยภูมิดังนี้

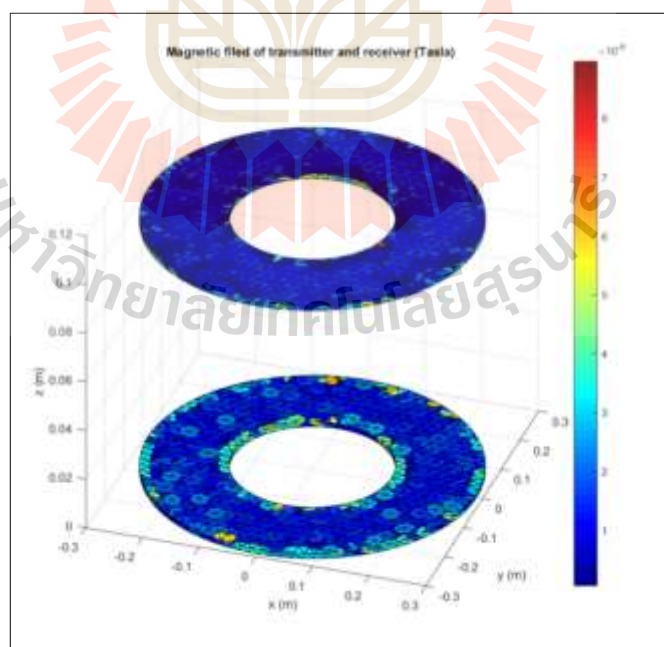
- การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 5 cm. แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

- การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 10 cm. แสดงได้ดังรูปที่ 5.5

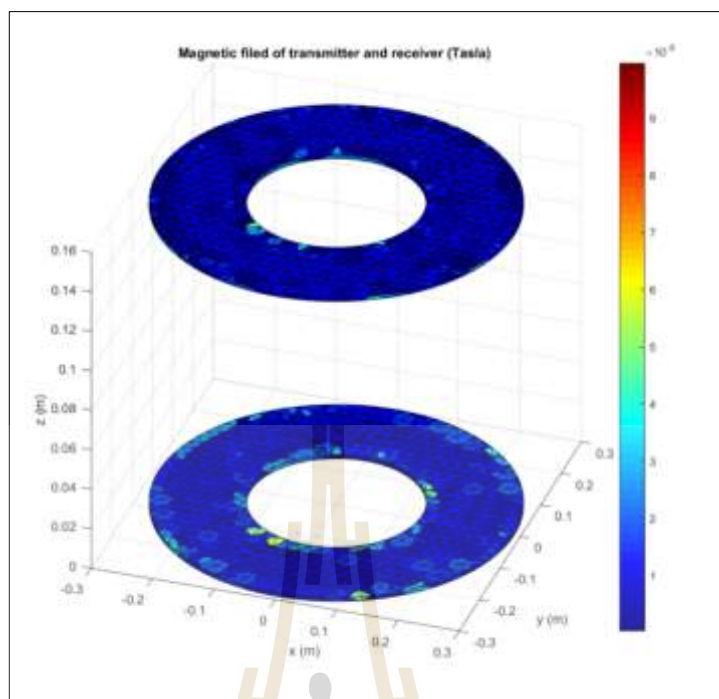
- การกระจายตัวของค่าสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 15 cm. แสดงได้ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.4 การกระจายของค่าสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 5 cm.



รูปที่ 5.5 การกระจายของค่าสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 10 cm.



รูปที่ 5.6 การกระจายของค่าสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 15 cm.

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่แสดงด้วยรูปที่ 5.4 – 5.6 จะเห็นได้ว่าค่าสนามแม่เหล็กจะมีค่าสูงที่ตำแหน่งบริเวณของขดลวดปฐมภูมิโดยจะแพร่กระจายสมมาตรรอบขดลวดและแกนกลาง และจะเห็นได้ว่าการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กในบริเวณของขดลวดทุติยภูมิมีค่าลดลง แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่มีระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ 5, 10 และ 15 cm. เพื่อให้เห็นถึงข้อแตกต่างจะขอนำเสนอผลการจำลองในเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิในขณะที่ยังไม่ได้เน้นการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงาน โดยผลการจำลองและผลการคำนวณของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายแสดงได้ในตารางที่ 5.2

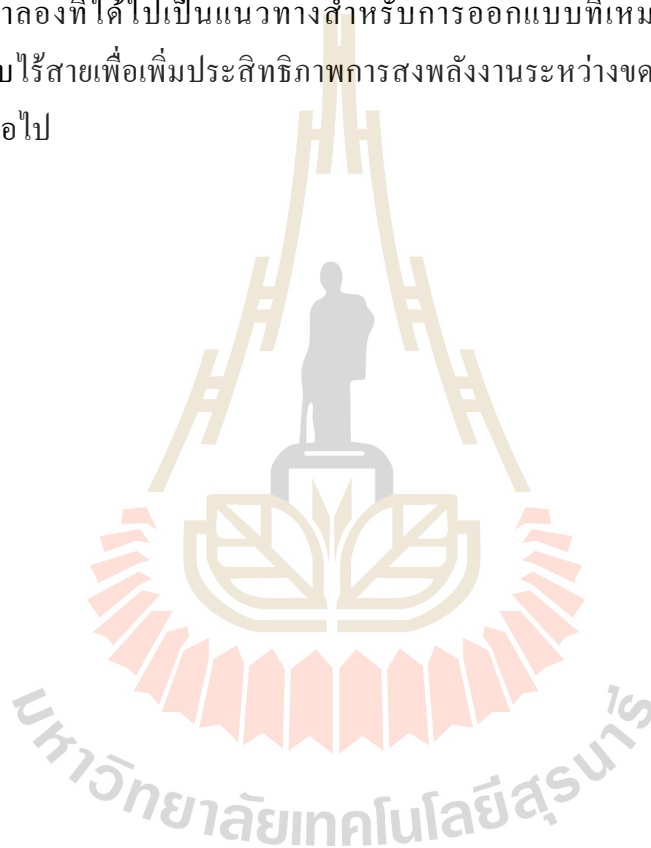
ตารางที่ 5.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่าง
ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

ช่องว่างอากาศ (cm)	ขดลวดปฐมภูมิ (T)	ขดลวดทุติยภูมิ (T)	ประสิทธิภาพการส่ง พลังงาน(%)
5	1.6851×10^{-4}	1.4850×10^{-4}	88.13
10	8.9721×10^{-5}	7.4780×10^{-5}	83.35
15	9.9636×10^{-5}	5.8863×10^{-5}	59.08

จากผลการคำนวณในเชิงตัวเลขของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5, 10, และ 15 cm. ซึ่งค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะคำนวณได้จากค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดในขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะพิจารณาเป็นค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานรวมของการทำงาน จะได้ค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 5, 10, และ 15 cm. เป็น 88.13%, 83.35% และ 59.08% ตามลำดับ ซึ่งผลการจำลองที่ได้พบว่าบริเวณขดลวดปฐมภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ 5, 10, และ 15 cm. จะมีค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าบริเวณอื่น ๆ ส่งผลให้ขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่อยู่ใกล้เคียงถูกเหนี่ยวนำโดยขดลวดปฐมภูมิ ทำให้สนามแม่เหล็กมีค่าสูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามพฤติกรรมของสนามแม่เหล็ก และเมื่อพิจารณาผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานในเชิงตัวเลขของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายจะเห็นได้ว่า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีระยะห่างระหว่างขดลวด 15 cm.จะมีค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิน้อยที่สุดซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานเท่ากับ 59.08% ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ระยะห่างระหว่างขดลวด 15 cm.จะมีค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิน้อยที่สุดหรือก็คือยิ่งระยะช่องว่างอากาศมากขึ้น จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานมีค่าลดลง

5.5 สรุป

บทที่ 5 เป็นการอธิบายโปรแกรมจำลองผลและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการจำลองผล พร้อมจำลองผลเพื่อศึกษาถึงการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายระยะห่างระหว่างขดลวด 5, 10, และ 15 cm. ขณะที่ยังไม่ได้เน้นการออกแบบที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในคัลลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จะมีผลโดยตรงต่อค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานโดยจะนำผลการจำลองที่ได้ไปเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิในบทต่อไป



บทที่ 6

การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงาน

6.1 บทนำ

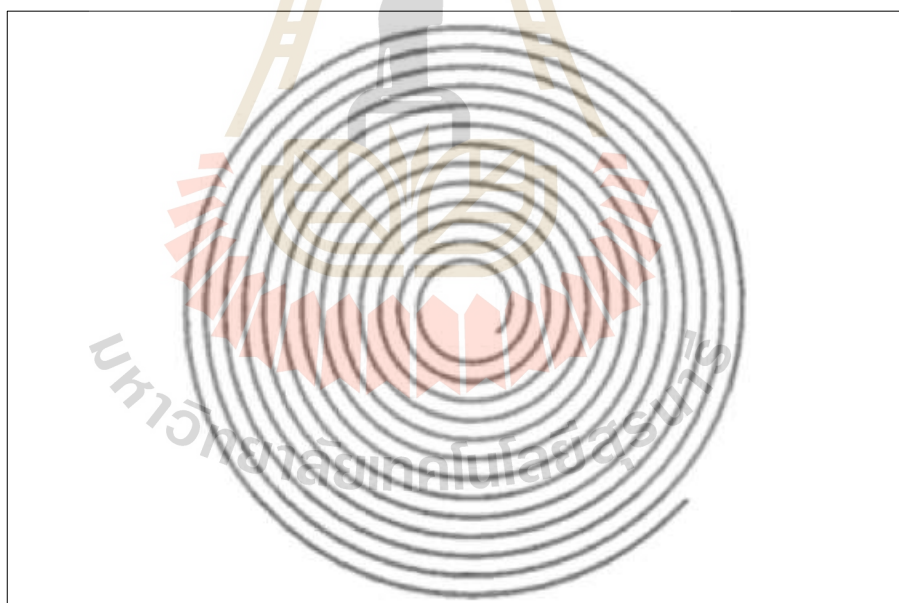
การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมในบทที่ 6 นี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิให้มากขึ้น โดยระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ใช้ออกแบบนั้นยังมีขนาดและพารามิเตอร์ของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเท่ากับแบบเดิมก่อนการออกแบบใหม่ทุกประการ ซึ่งการออกแบบจะมีทั้งสิ้น 4 รูปแบบคือ แบบที่ 1 จะพิจารณาวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบริเวณด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและบริเวณด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งได้ควบคุมระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายแบบที่ 2 จะพิจารณาถึงจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย แบบที่ 3 จะพิจารณาส่วนของตำแหน่งการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ และแบบที่ 4 จะพิจารณาดำเน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย อีกทั้งยังได้นำเสนอผลการจำลองค่าสนามแม่เหล็กกับบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อพิจารณาการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงาน และคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานในเชิงตัวเลขเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองที่ได้หลังจากการออกแบบที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

6.2 การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะ

การทำงาน

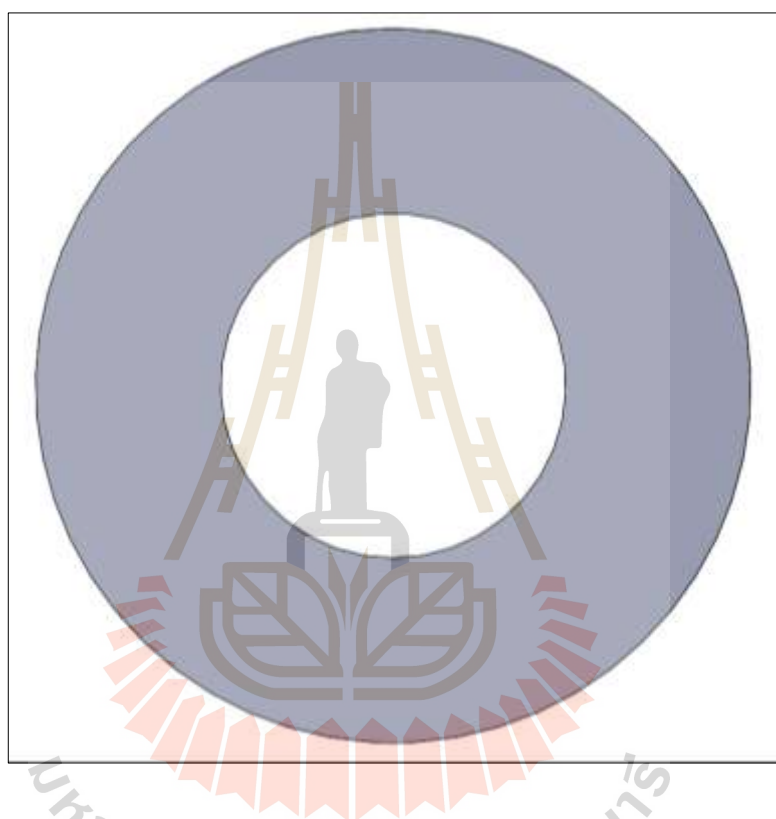
ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาศัยหลักการเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า เมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับผ่านขดลวดปฐมภูมิซึ่งติดตั้งอยู่บนพื้นดิน ขดลวดปฐมภูมิจะเหนี่ยวนำให้เกิดการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดไฟฟ้ากระแสสลับที่ขดลวดทุติยภูมิซึ่งติดตั้งอยู่ในยานยนต์ไฟฟ้า จากนั้นยานยนต์ไฟฟ้าจะนำไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นเพื่อนำไปอัดประจุไฟฟ้าให้แบตเตอรี่ต่อไป ดังนั้นการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมนั้นจะต้องคำนึงถึงองค์ประกอบหลายประการ

โดยทั่วไปขดลวดปฐมภูมิเป็นขดลวดที่ใช้กำเนิดสนามแม่เหล็กเพื่อส่งพลังงานไปยังขดลวดทุติยภูมิโดยใช้ตัวนำชนิดตัวนำทองแดงในการพันเป็นขดลวด ในงานวิจัยนี้จะใช้แกนอากาศเป็นแกนกลางในการพันขดลวด โดยออกแบบการพันด้วยรูปแบบก้นหอย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 6.1 เพื่อลดการเกิดฟลักซ์แม่เหล็กรั่วไหลระหว่างขดลวด



รูปที่ 6.1 การพันขดลวดรูปก้นหอย

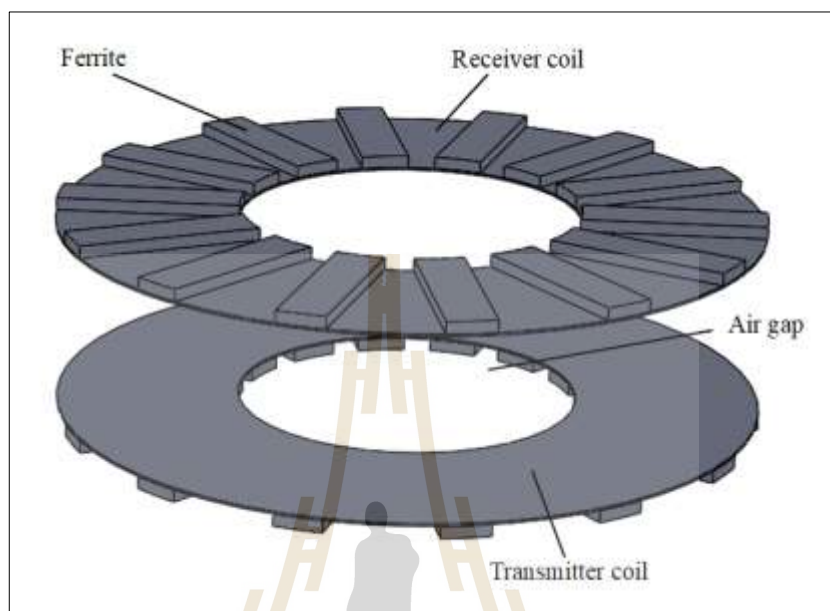
อย่างไรก็ตามเมื่อขดลวดมีการวนรอบมากขึ้นส่งผลให้แบบจำลองมีความซับซ้อนมากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะทำให้การคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ใช้เวลามาก ดังนั้นรูปแบบของการพันขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจึงต้องออกแบบเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ดังแสดงในรูปที่ 6.2 โดยกำหนดให้เป็นทรงกระบอกที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งทำให้การสร้างกริดและการคำนวณด้วยวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์เป็นไปได้ง่ายขึ้น แต่ยังคงมีความแม่นยำเช่นเดิม



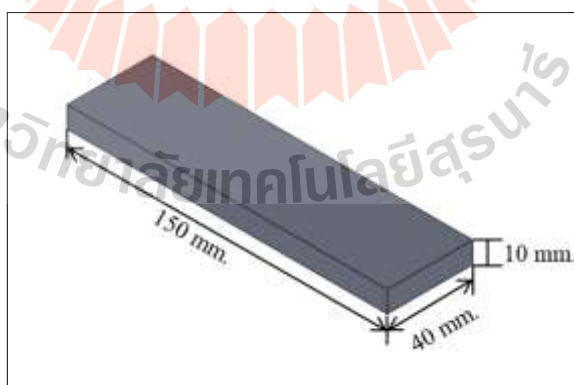
รูปที่ 6.2 ลักษณะของขดลวดที่ใช้ในการจำลองผล

แผ่นขดลวดสำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นมักประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากลวดทองแดง และแท่งเฟอร์ไรต์เพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์ความเหนี่ยวนำร่วมของสนามแม่เหล็กและลดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก จึงเกิดแนวคิดเพื่อลดการสูญเสียสนามแม่เหล็กและเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่มีค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของแม่เหล็ก (Magnetic permeability : μ_r) ที่สูงและยังมีค่าสภาพนำทางไฟฟ้า (Electrical conductivity : σ) ที่ต่ำ ที่ตำแหน่งด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและตำแหน่งด้านบนของขดลวดทุติยภูมิแสดงได้ดังรูปที่ 6.3 ซึ่งข้อดีของเฟอร์ไรต์ คือสามารถสร้างให้มีรูปร่างลักษณะต่าง ๆ ได้ และใช้งานได้ดีทั้งในความถี่ต่ำและความถี่สูง ซึ่งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ใช้

ในงานวิจัยนี้มีขนาดความกว้าง 40 มิลลิเมตร ความยาว 150 มิลลิเมตร และความหนา 10 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.3 ลักษณะการติดตั้งเฟอร์ไรต์ที่ตำแหน่งด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและตำแหน่งด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 6.4 ขนาดของแท่งเฟอร์ไรต์

โดยพารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอไรต์ที่ใช้จำลองผล จะแสดงได้ดังตารางที่ 6.1

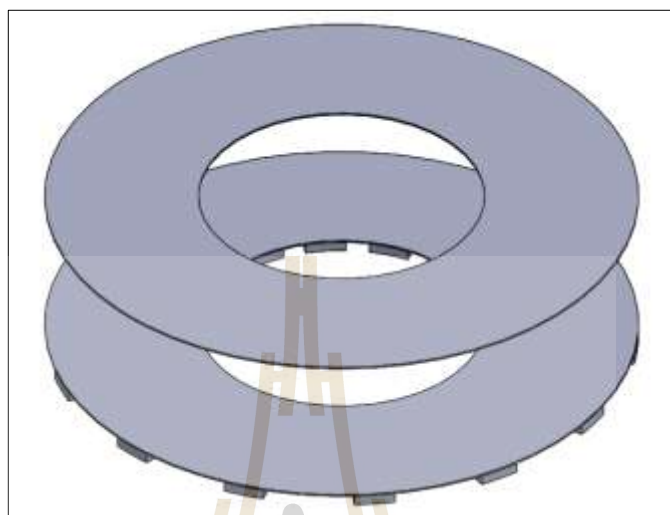
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอไรต์

พารามิเตอร์	ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย
พิกัดกระแสของขดลวดปฐมภูมิ	15 A
ความถี่	50 kHz
พื้นที่หน้าตัดขดลวดปฐมภูมิ	$3.141 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
จำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ	50
สภาพนำทางไฟฟ้าของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (σ)	$5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$
สภาพนำทางไฟฟ้าของอากาศ (σ)	0
สภาพนำทางไฟฟ้าของเฟอไรต์ (σ)	1×10^{-2}
สภาพขบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมผัสของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (μ_r)	1
สภาพขบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมผัสของอากาศ (μ_r)	1.00000037
สภาพขบซึมได้ทางแม่เหล็กสัมผัสของเฟอไรต์ (μ_r)	3200
ค่าไดอิเล็กตริกของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ (ϵ_r)	1
ค่าไดอิเล็กตริกของอากาศ (ϵ_r)	1
ค่าไดอิเล็กตริกของเฟอไรต์ (ϵ_r)	1

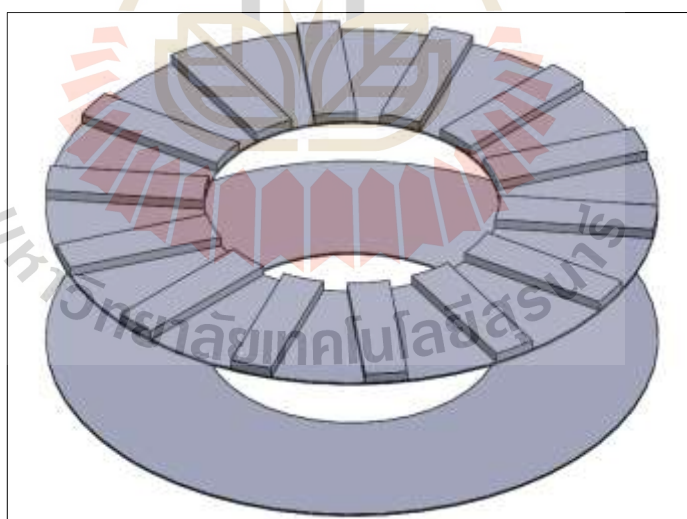
6.3 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อออกแบบวิธีการติดตั้งแท่งเฟอไรต์ที่เหมาะสม

การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานรูปแบบที่ 1 ด้วยการออกแบบวิธีการติดตั้งแท่งเฟอไรต์ที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย และเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบโดยให้ปริมาตรและระยะห่างระหว่างขดลวดของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพื่อรักษาให้คุณสมบัติของขดลวดยังคงเดิมนั้น การออกแบบในรูปแบบที่ 1 จึงได้ออกแบบวิธีการติดตั้งแท่งเฟอไรต์ ซึ่งมีวิธีการติดตั้งแท่งเฟอไรต์ 3 แบบ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.5 – 6.7 โดยรูปที่ 6.5 เป็นภาพแสดงการติดตั้งแท่งเฟอไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ รูปที่ 6.6

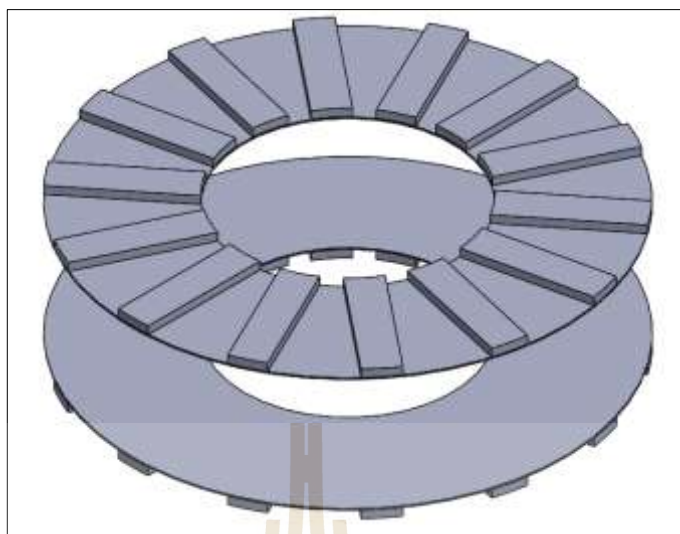
เป็นภาพแสดงการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดทุติยภูมิ และรูปที่ 6.7 เป็นภาพแสดงการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ตามลำดับ



รูปที่ 6.5 เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ



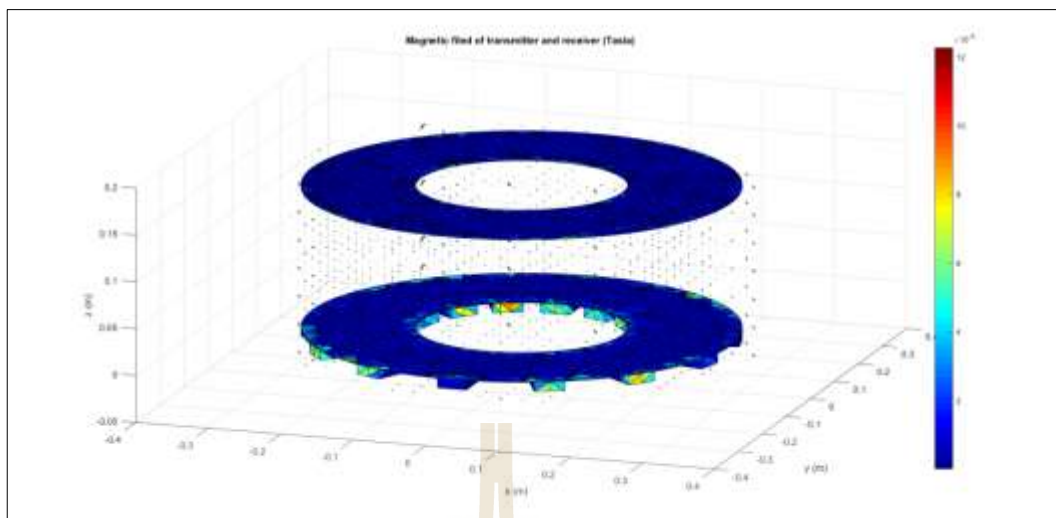
รูปที่ 6.6 เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดทุติยภูมิ



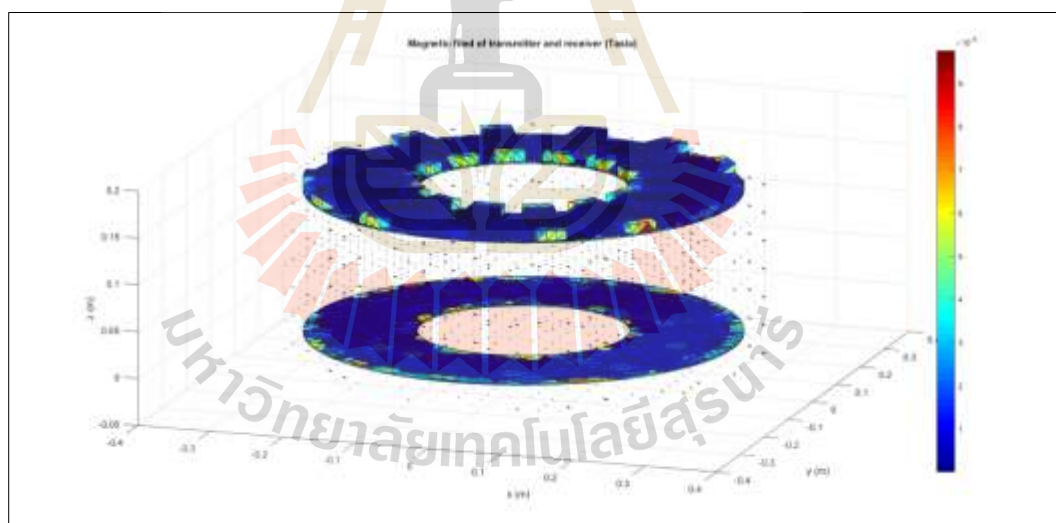
รูปที่ 6.7 เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

จากรูปที่ 6.5 – 6.7 วิชยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบกริดและอิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solidwork เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยผลการจำลองในเชิงกราฟิกสามารถแสดงได้ดังนี้

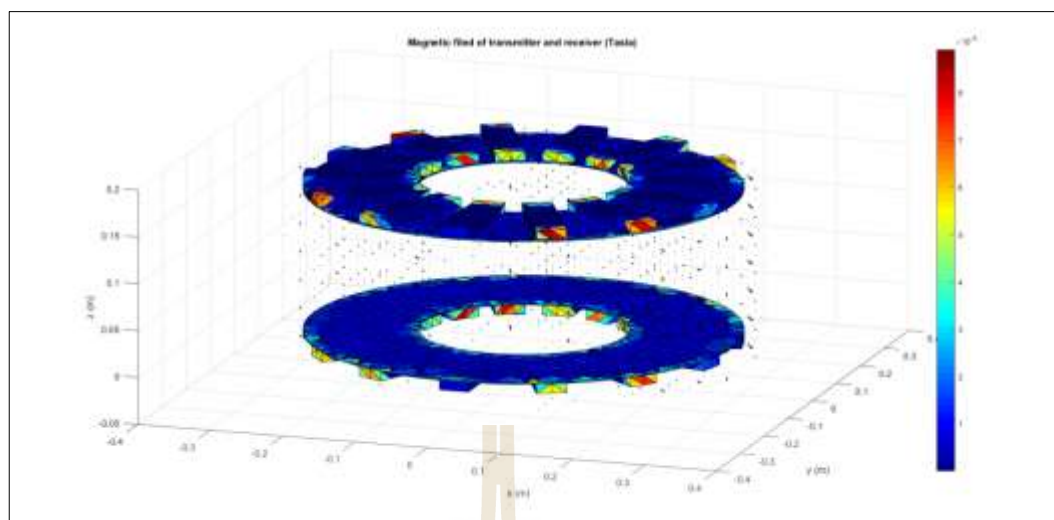
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 6.8
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดทุติยภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 6.9
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.8 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ



รูปที่ 6.9 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 6.10 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อพิจารณาการกระจายค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิ จะเห็นว่าลักษณะของการกระจายหนาแน่นมากที่สุดที่ขดลวดปฐมภูมิ ส่วนระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ด้านบนของขดลวดทุติยภูมิจะมีลักษณะการกระจายของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดทุติยภูมิเพิ่มมากขึ้น และเมื่อพิจารณาการกระจายค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ จะเห็นว่าลักษณะของการกระจายมีความสมดุลมากขึ้น และเมื่อพิจารณาเส้นแรงแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ จะเห็นได้ว่าการหักล้างกันของเส้นแรงแม่เหล็ก ส่งผลให้ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและด้านบนของขดลวดทุติยภูมิลดลง

จากผลการจำลองในเชิงกราฟิก สามารถหาค่าในเชิงตัวเลขของค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม พร้อมทั้งคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่าง
ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบ
วิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

วิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์	ขดลวดปฐมภูมิ (T)	ขดลวดทุติยภูมิ (T)	ประสิทธิภาพ การส่งพลังงาน (%)
เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ	8.250×10^{-5}	6.2143×10^{-5}	75.32
เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดทุติยภูมิ	9.7563×10^{-5}	8.1068×10^{-5}	83.31
เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ และขดลวดทุติยภูมิ	6.5550×10^{-5}	6.0774×10^{-5}	92.71

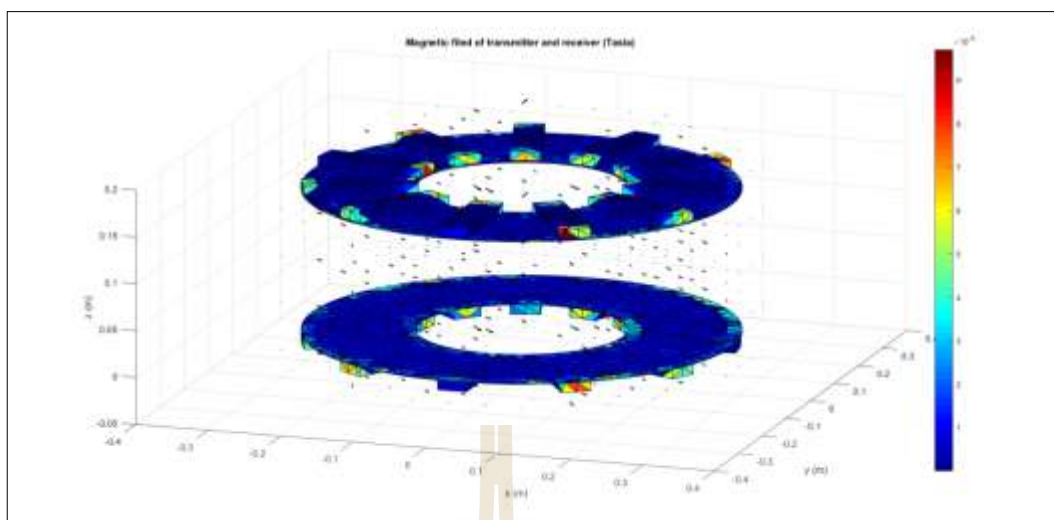
จากผลการคำนวณเชิงตัวเลข เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิ,เมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดทุติยภูมิ และเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จะทำให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นมีค่าเป็น 75.32%, 83.31% และ 92.71% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะมีประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมากที่สุด และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองในเชิงตัวเลขในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานได้สูงขึ้นจริง

6.4 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

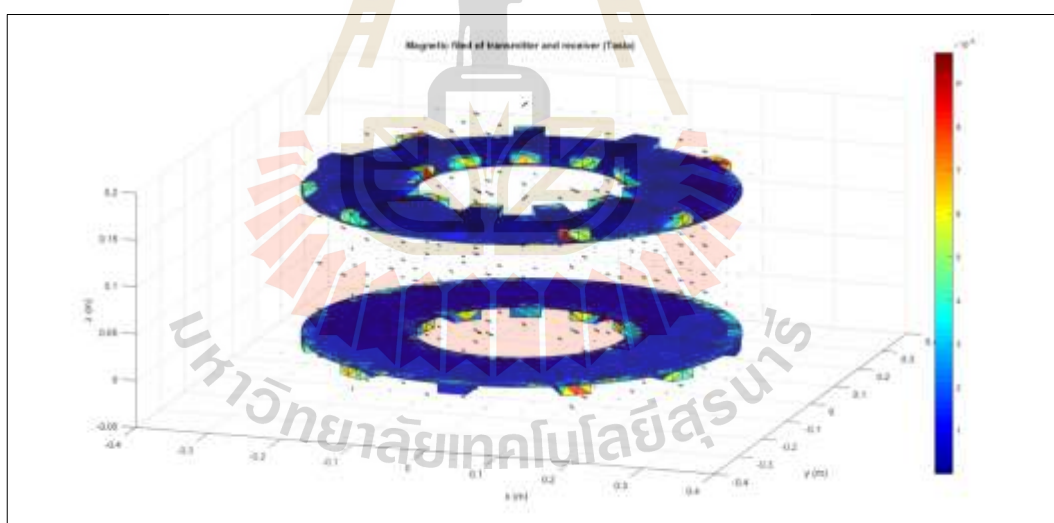
สำหรับหัวข้อนี้จะอาศัยผลการจำลองรูปแบบที่ 1 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะทำให้การส่งพลังงานมีประสิทธิภาพที่สูงที่สุด การออกแบบรูปแบบที่ 2 จะนำเสนอผลการจำลองการกระจายค่าสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ เมื่อได้ดำเนินการออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งจะแสดงดังนี้

การจำลองค่าสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ได้รับ การออกแบบตามหัวข้อที่ได้อธิบายมาข้างต้น สามารถแสดงผลการจำลองโดยในวิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นพิจารณาการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กในบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายดังนี้

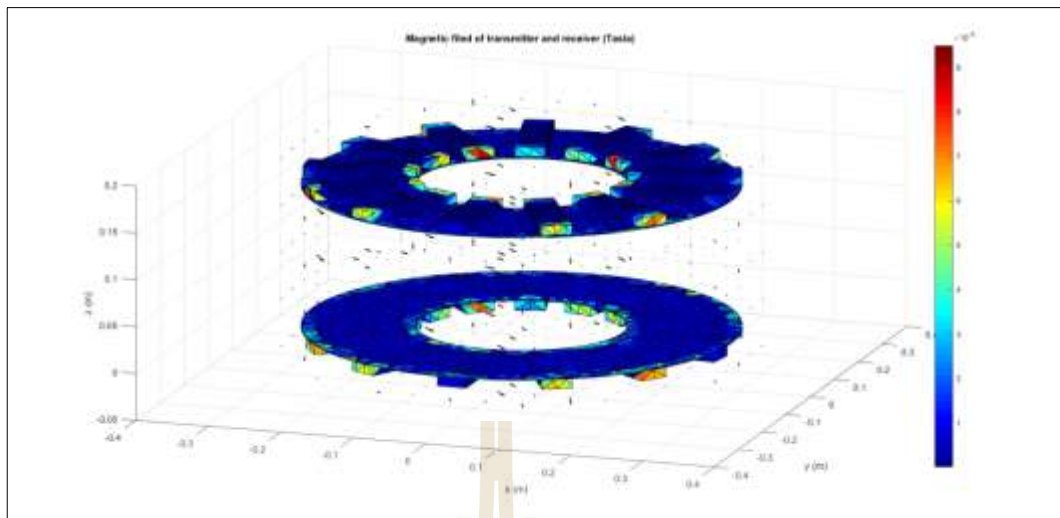
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 11 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.11
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 12 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.12
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 13 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.13
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.14
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 15 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.15
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 16 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.16
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 17 แท่ง แสดงได้ดังรูปที่ 6.17



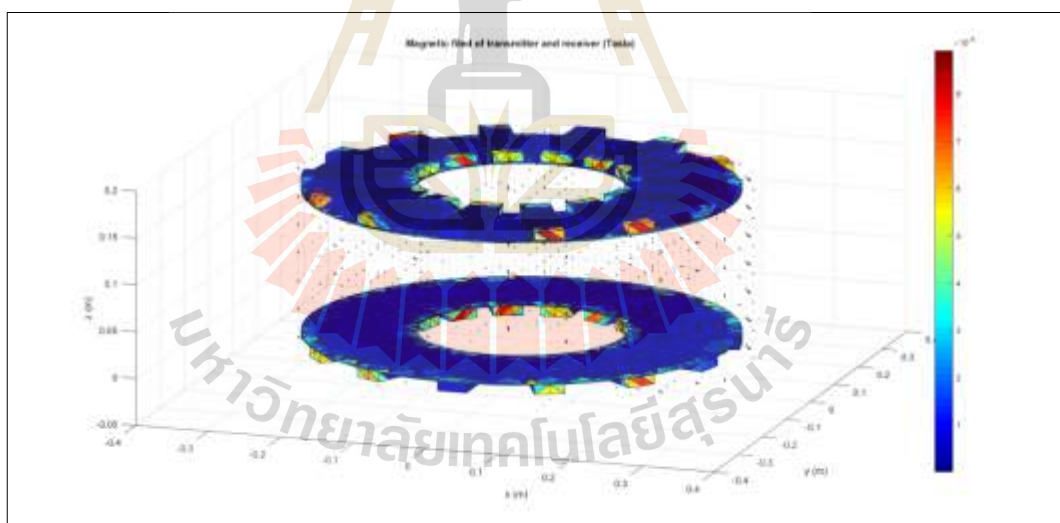
รูปที่ 6.11 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 11 แท่ง



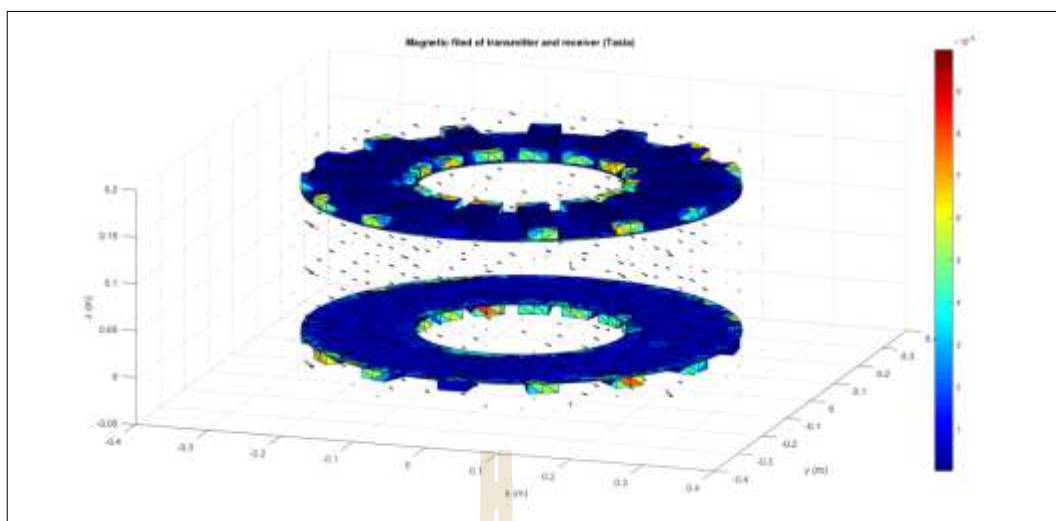
รูปที่ 6.12 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 12 แท่ง



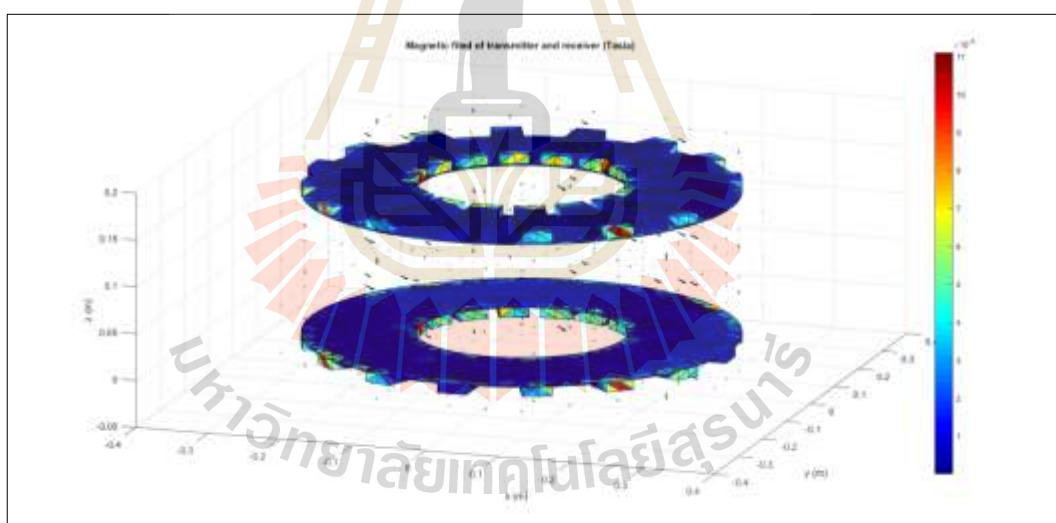
รูปที่ 6.13 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 13 แท่ง



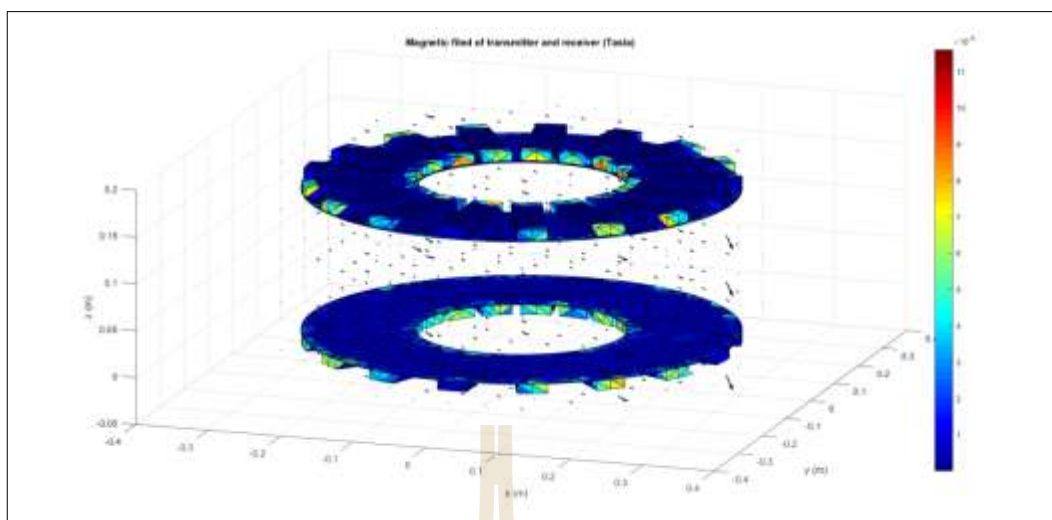
รูปที่ 6.14 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่ง



รูปที่ 6.15 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 15 แท่ง



รูปที่ 6.16 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 16 แท่ง



รูปที่ 6.17 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 17 แท่ง

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ซึ่งเป็นระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิและด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ โดยขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะมีขนาดเท่ากันและติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์จำนวนเท่ากัน เมื่อพิจารณาการกระจายค่าสนามแม่เหล็กที่แสดงดังรูปที่ 6.11 – 6.17 จะเห็นว่าลักษณะของการกระจายมีความไม่สมดุล โดยมีความหนาแน่นมากที่สุดที่ด้านในของขดลวดและมีความน้อยที่สุดที่บริเวณขอบของขดลวด และเมื่อพิจารณาผลการจำลองเชิงกราฟิกของเส้นแรงแม่เหล็กจะเห็นได้ว่าการหักล้างกันของเส้นแรงแม่เหล็กเกิดขึ้นและส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย และเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์จำนวน 14 แท่ง ทำให้การกระจายตัวและความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็กระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่สมดุลมากที่สุด

จากผลการจำลองในเชิงกราฟิก สามารถหาค่าเชิงตัวเลขของค่าสนามแม่เหล็กที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ พร้อมทั้งทั้งคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยผลการคำนวณสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.3

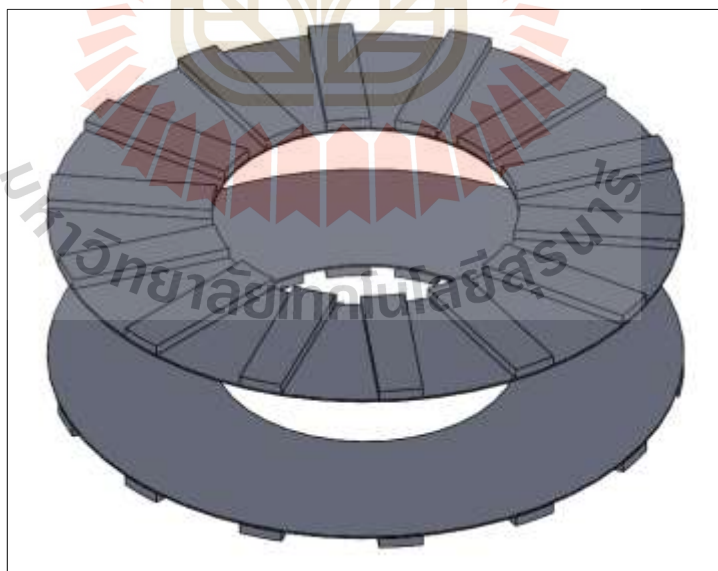
ตารางที่ 6.3 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่าง
ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบ
จำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

จำนวนแท่งเฟอร์ไรต์	ขดลวดปฐมภูมิ (T)	ขดลวดทุติยภูมิ (T)	ประสิทธิภาพการ ส่งพลังงาน(%)
11	6.3870×10^{-5}	4.0410×10^{-5}	63.32
12	6.4548×10^{-5}	4.4712×10^{-5}	69.27
13	6.4850×10^{-5}	4.8903×10^{-5}	75.41
14	6.5550×10^{-5}	6.0774×10^{-5}	92.71
15	6.7512×10^{-5}	5.3996×10^{-5}	79.98
16	6.8548×10^{-5}	5.2692×10^{-5}	76.86
17	6.8726×10^{-5}	5.0264×10^{-5}	73.13

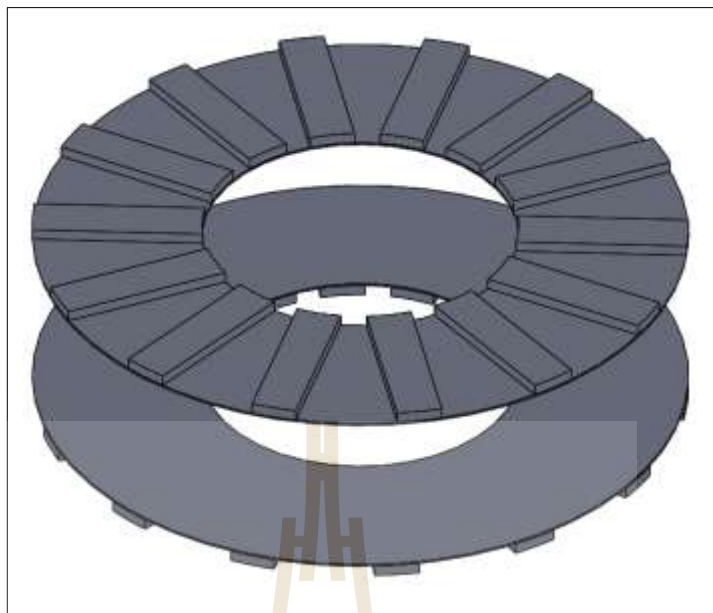
จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขจะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่มีจำนวนเท่ากันให้กับ
ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิและพิจารณาประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวด
ปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่ติดตั้ง 11, 12, 13, 14, 15, 16, และ 17 แท่ง จะทำ
ให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นมีค่าเป็น 63.32%, 69.27%,
75.41%, 92.71%, 79.89%, 76.86% และ 73.13% ตามลำดับ จะเห็นว่าสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้า
แบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่งมีประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิ
และขดลวดทุติยภูมิมากที่สุด และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ไม่ได้
ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 จะเห็นว่า ผลการ
ออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อเพิ่ม
ประสิทธิภาพการส่งพลังงาน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานได้สูงขึ้นจริง เมื่อติดตั้งแท่ง
เฟอร์ไรต์จำนวน 14 แท่งจะทำให้มีประสิทธิภาพการส่งพลังงานถึง 92.71% ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 33.63%
โดยวิทยานิพนธ์นี้จะดำเนินการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการจำลองและผลการคำนวณในหัวข้อ
ถัดไป

6.5 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

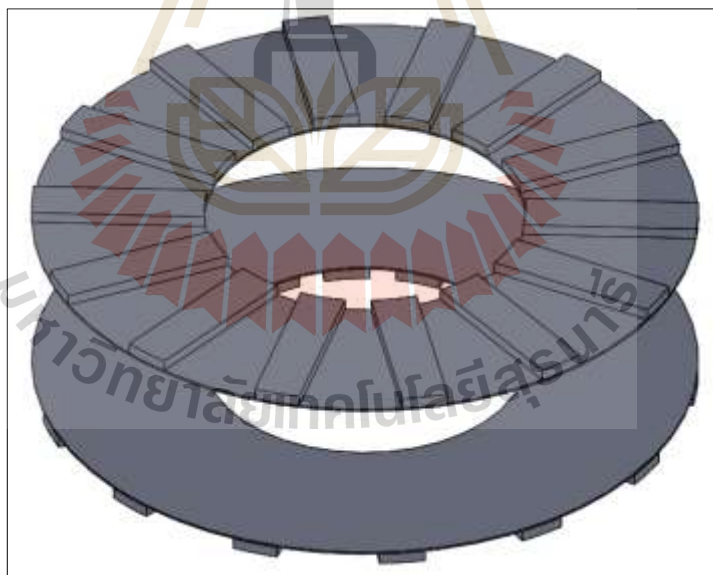
สำหรับการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานรูปแบบที่ 3 ด้วยการออกแบบลักษณะการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นจะอาศัยผลการจำลองในรูปแบบที่ 2 โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์จำนวน 14 แท่งจะทำให้มีประสิทธิภาพการส่งพลังงานสูงขึ้น และเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดเงื่อนไขการออกแบบโดยให้ปริมาตรและระยะห่างระหว่างขดลวดของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดเพื่อรักษาคูสมบัตินี้ของขดลวดให้คงเดิมนั้น การออกแบบในรูปแบบที่ 3 จึงได้ออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ ซึ่งมีตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ 5 แบบ จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6.18 – 6.22 โดยรูปที่ 6.18 เป็นการแสดงตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบตรงกัน รูปที่ 6.19 เป็นการแสดงตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่ง รูปที่ 6.20 เป็นรูปการแสดงตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่ง รูปที่ 6.21 เป็นรูปการแสดงตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่ง และรูปที่ 6.22 เป็นรูปการแสดงตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางไม่ตรงกัน ตามลำดับ



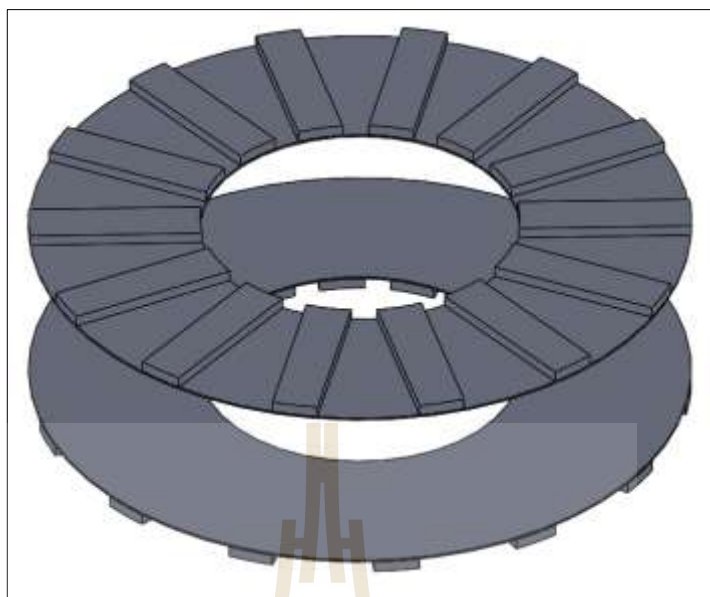
รูปที่ 6.18 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบตรงกัน



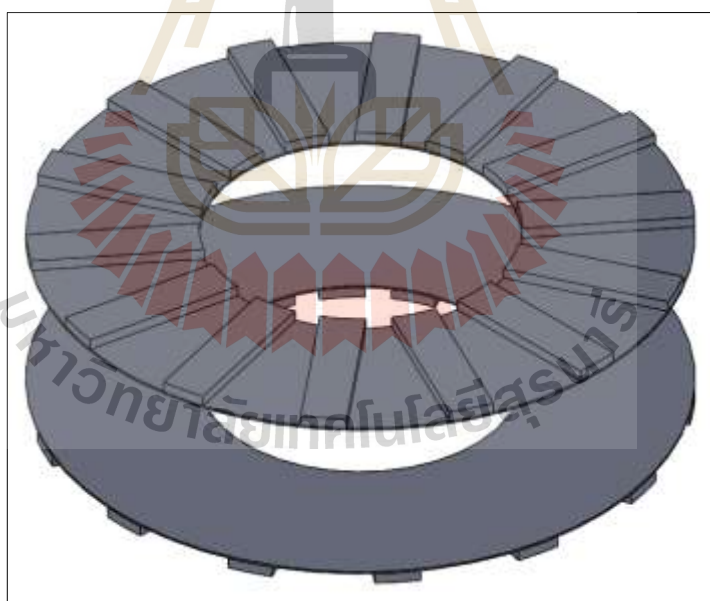
รูปที่ 6.19 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่ง



รูปที่ 6.20 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่ง



รูปที่ 6.21 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่ง



รูปที่ 6.22 ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางไม่ตรงกัน

จากรูปที่ 6.18 – 6.22 วิจัยนพณ์นี้ได้ดำเนินการออกแบบกริดและอิลิเมนต์ด้วยโปรแกรม Solidwork เพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในอิลิเมนต์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยผลการจำลองในเชิงกราฟิกสามารถแสดงได้ดังนี้

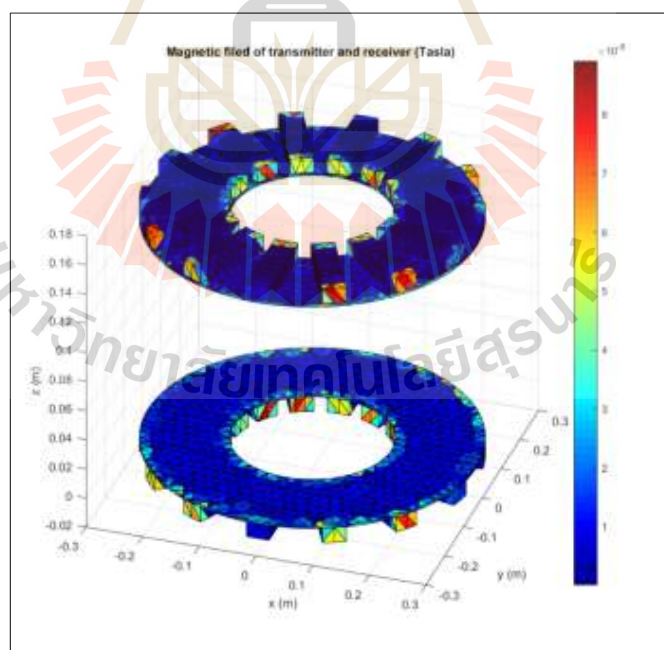
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน แสดงได้ดังรูปที่ 6.23

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.24

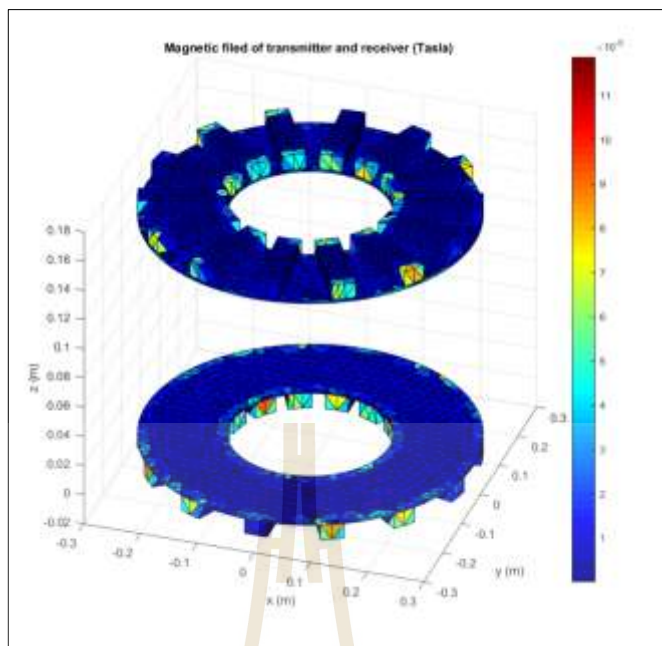
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.25

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย ที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่งแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.26

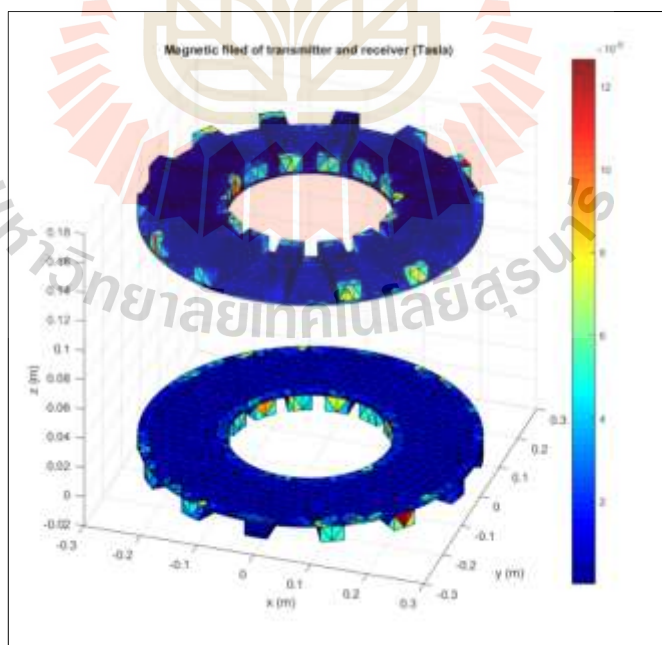
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางไม่ตรงกันแบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.27



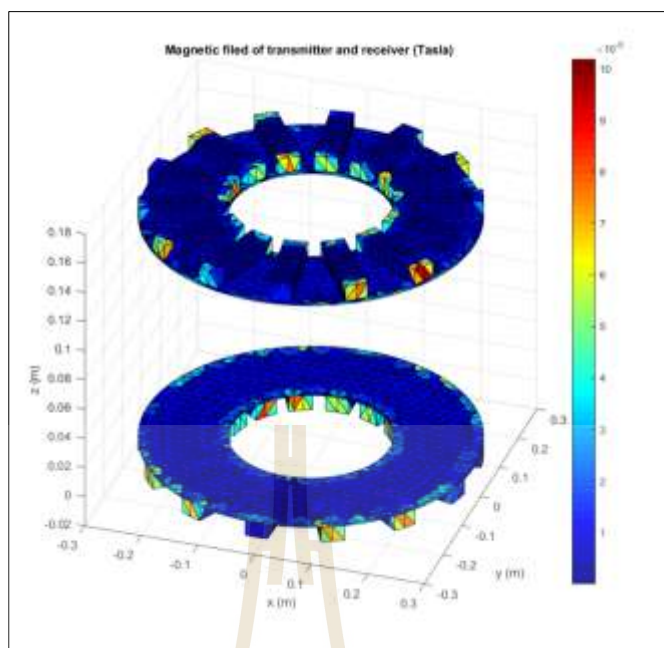
รูปที่ 6.23 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน



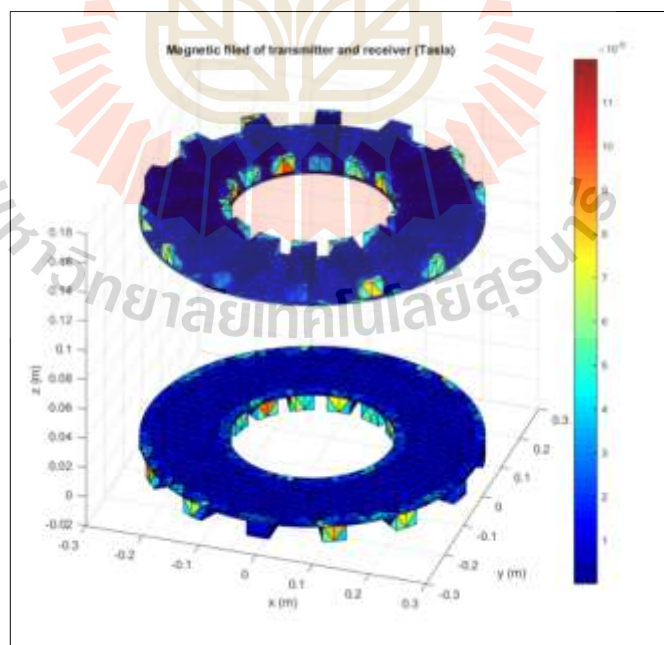
รูปที่ 6.24 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่ง



รูปที่ 6.25 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่ง



รูปที่ 6.26 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่ง



รูปที่ 6.27 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางไม่ตรงกัน

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกจะเห็นได้ว่า การกระจายของค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ พบว่าการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กมีความไม่สม่ำเสมอ โดยมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กหนาแน่นที่แท่งเฟอร์ไรต์ และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์พบว่าขนาดของสนามแม่เหล็กสูงสุดของการวางแท่งเฟอร์ไรต์แบบตรงกันมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับการวางแท่งเฟอร์ไรต์แบบอื่น ๆ จากผลการจำลองเชิงกราฟิกสามารถนำค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ในตำแหน่งต่าง ๆ ไปคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิเชิงตัวเลขซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม

ลักษณะการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์	ขดลวดปฐมภูมิ (T)	ขดลวดทุติยภูมิ (T)	ประสิทธิภาพการส่งพลังงาน(%)
แบบวางตรงกัน	6.5550×10^{-5}	6.0774×10^{-5}	92.71
แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่ง	7.9544×10^{-5}	6.4567×10^{-5}	81.17
แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่ง	8.7756×10^{-5}	7.8646×10^{-5}	89.62
แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่ง	7.9979×10^{-5}	6.1391×10^{-5}	76.75
แบบวางไม่ตรงกัน	8.2541×10^{-5}	6.9180×10^{-5}	83.81

จากผลการคำนวณเชิงตัวเลขจะเห็นได้ว่า เมื่อพิจารณาดำเนินการตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสมและพิจารณาประสิทธิภาพการส่งพลังงาน กรณีที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกัน, แบบวางตรงกัน $\frac{3}{4}$ แท่ง, แบบวางตรงกัน $\frac{1}{2}$ แท่ง, แบบวางตรงกัน $\frac{1}{4}$ แท่งและแบบวางไม่ตรงกัน จะทำให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายนั้นมีค่าเป็น 92.71%, 81.17%, 89.62%, 76.75% และ 83.81% ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายกรณีที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกันจะมีประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมากที่สุด และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการจำลองเชิงตัวเลข พบว่าการออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์แบบวางตรงกันเหมาะสมสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายมากที่สุด ซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานได้สูงขึ้นจริง

6.6 ผลการจำลองสนามแม่เหล็กของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อพิจารณา

ตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสม

การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานนอกจากจะออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์และตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมแล้ว ตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการพิจารณาตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ โดยการพิจารณาเป็น 6 กรณี และจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์ซึ่งได้ผลการจำลองของการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กดังนี้

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อขดลวดปฐมภูมิวางตรงกับขดลวดทุติยภูมิ 100% แบบ 3 มิติ แสดงได้ดังรูปที่ 6.28

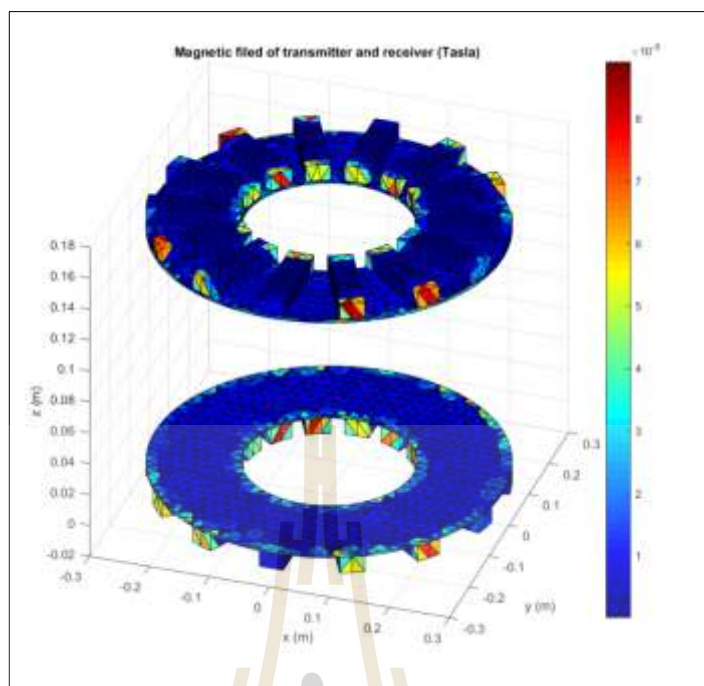
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อขดลวดปฐมภูมิวางตรงกับขดลวดทุติยภูมิ 90% แสดงได้ดังรูปที่ 6.29

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อขดลวดปฐมภูมิวางตรงกับขดลวดทุติยภูมิ 80% แสดงได้ดังรูปที่ 6.30

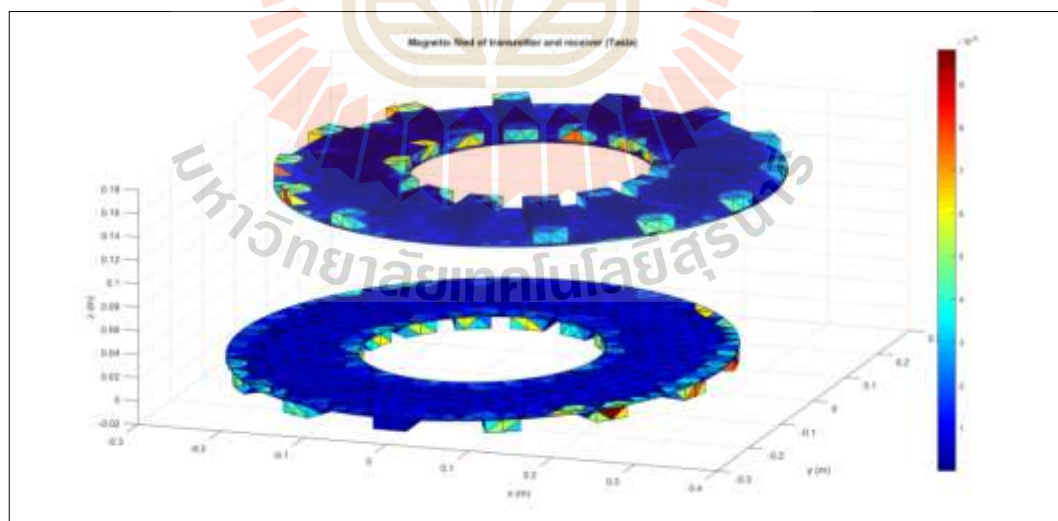
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อขดลวดปฐมภูมิวางตรงกับขดลวดทุติยภูมิ 70% แสดงได้ดังรูปที่ 6.31

- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อขดลวดปฐมภูมิวางตรงกับขดลวดทุติยภูมิ 60% แสดงได้ดังรูปที่ 6.32

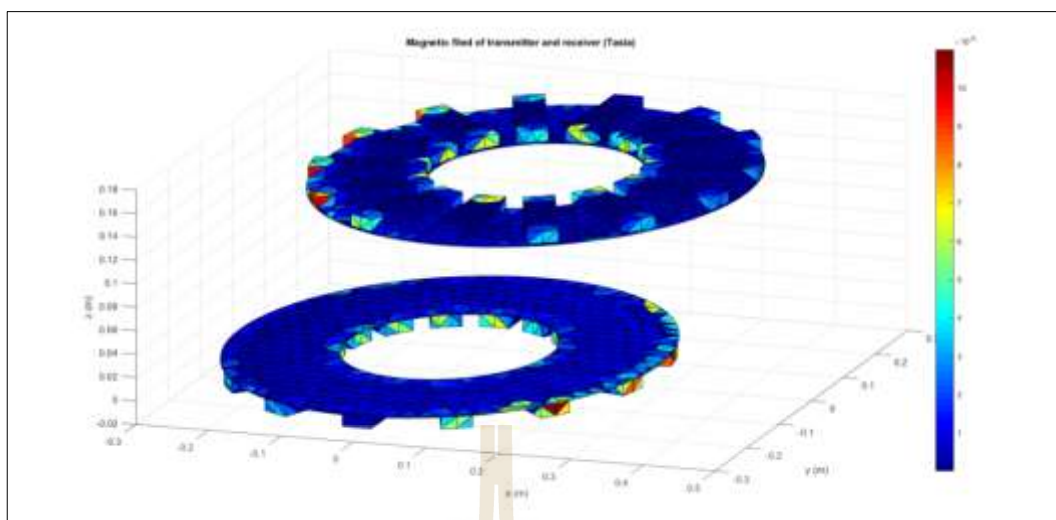
- การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อขดลวดปฐมภูมิวางตรงกับขดลวดทุติยภูมิ 50% แสดงได้ดังรูปที่ 6.33



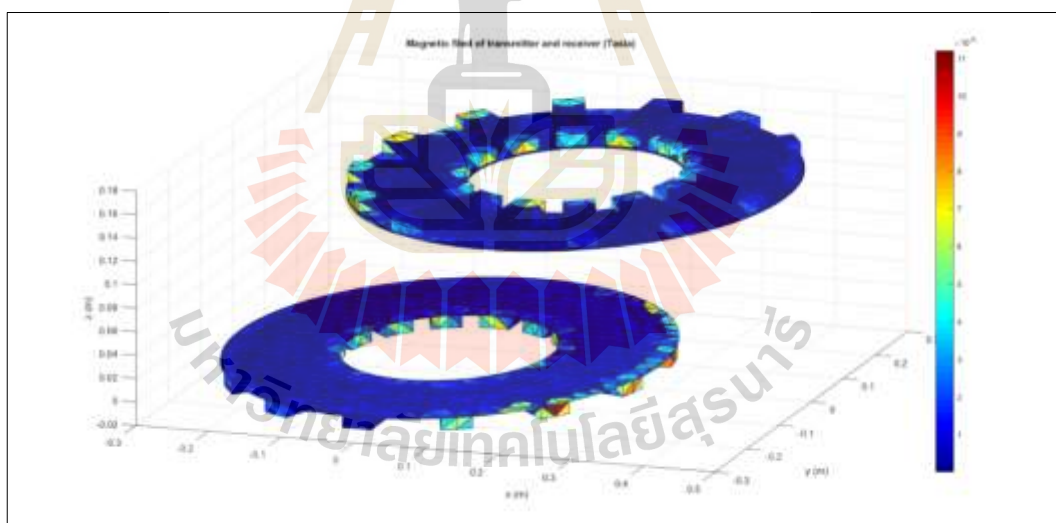
รูปที่ 6.28 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 100%



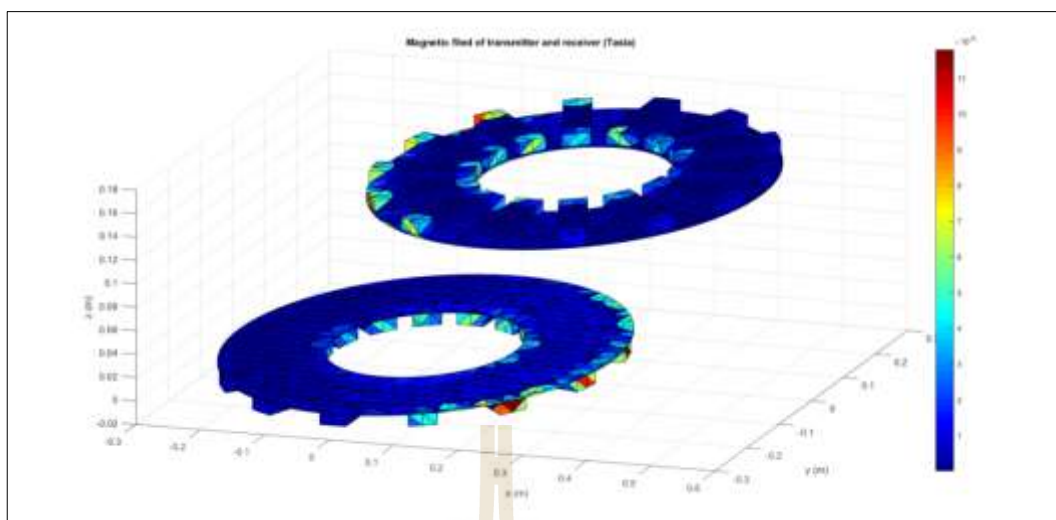
รูปที่ 6.29 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 90%



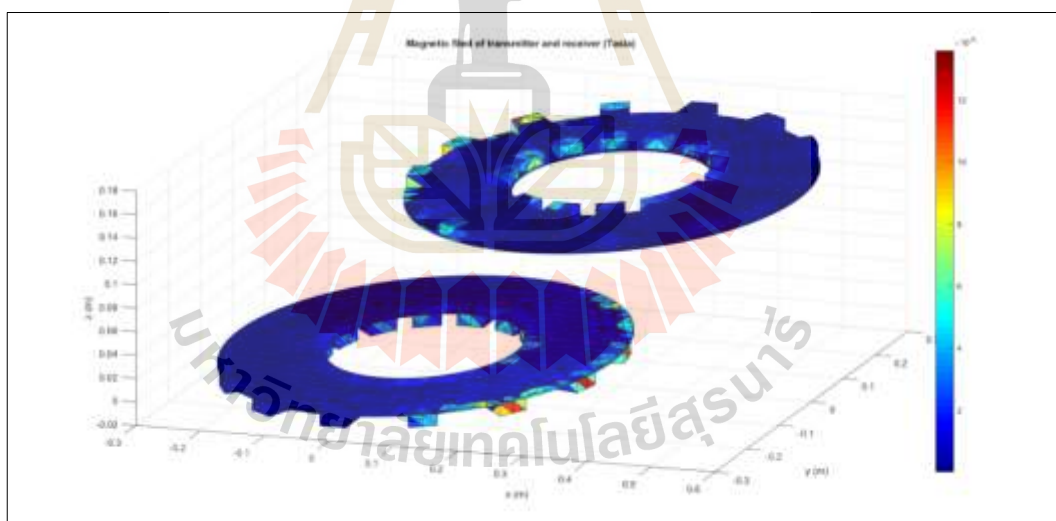
รูปที่ 6.30 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 80%



รูปที่ 6.31 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 70%



รูปที่ 6.32 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 60%



รูปที่ 6.33 การกระจายสนามแม่เหล็ก (T) ที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อวางตรงกัน 50%

จากผลการจำลองเชิงกราฟิกของการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เมื่อพิจารณาคำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ จะเห็นว่าในกรณีที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิไม่อยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันจะทำให้เกิดการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไม่สม่ำเสมอ โดยมีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กหนาแน่นที่บริเวณขดลวดปฐมภูมิตรงกับขดลวดทุติยภูมิ แต่เมื่อพิจารณากรณีที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิอยู่ในตำแหน่งที่ตรงกันจะทำให้การกระจายค่าสนามแม่เหล็กที่มีความสมดุลมากขึ้น และขนาดของสนามแม่เหล็กสูงสุดของตำแหน่งการวางแบบตรงกัน 100% จะมีค่าน้อยกว่า เมื่อเทียบกับตำแหน่งการวางแบบไม่ตรงกัน และเมื่อนำค่าสนามแม่เหล็กสูงสุดของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิไปคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานเชิงตัวเลขสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 ผลการจำลองเชิงตัวเลขและผลการคำนวณประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายเมื่อพิจารณาคำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสม

ตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ	ขดลวดปฐมภูมิ (T)	ขดลวดทุติยภูมิ (T)	ประสิทธิภาพการส่งพลังงาน(%)
แบบวางตรงกัน 100%	6.5550×10^{-5}	6.0774×10^{-5}	92.71
แบบวางตรงกัน 90%	7.0737×10^{-5}	6.3808×10^{-5}	90.20
แบบวางตรงกัน 80%	7.4202×10^{-5}	6.5943×10^{-5}	88.87
แบบวางตรงกัน 70%	7.6971×10^{-5}	6.3808×10^{-5}	82.90
แบบวางตรงกัน 60%	8.0723×10^{-5}	6.5178×10^{-5}	80.74
แบบวางตรงกัน 50%	8.4209×10^{-5}	6.0143×10^{-5}	71.42

จากผลการคำนวณเชิงตัวเลข เมื่อพิจารณาคำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสมและพิจารณาประสิทธิภาพการส่งพลังงาน กรณีที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิวางตรงกัน 100%, แบบวางตรงกัน 90%, แบบวางตรงกัน 80%, แบบวางตรงกัน 70%, แบบวางตรงกัน 60% และแบบวางตรงกัน 50% จะทำให้ประสิทธิภาพการส่งพลังงานของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายมีค่าเป็น 92.71%, 90.20%, 88.87%, 82.90%, 80.74% และ 71.42% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายกรณีที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิวางตรงกัน 100% มีประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมากที่สุด

จากการเปรียบเทียบการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้การออกแบบรูปร่าง ขนาดและระยะห่างระหว่างขดลวดของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิมีค่าคงที่ จะเห็นได้ว่า การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าที่มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานได้ทั้ง 4 วิธีจากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น โดยการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพการส่งพลังงานคิดเป็นร้อยละ 33.63

6.7 สรุป

ในบทที่ 6 นี้ ได้ดำเนินการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มสมรรถนะการทำงานด้วยระเบียบวิธีไฟต์ในต้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งประกอบไปด้วย 4 วิธีคือ วิธีที่ 1 วิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม วิธีที่ 2 วิธีการออกแบบจำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม วิธีที่ 3 วิธีการออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสม และวิธีที่ 4 วิธีการออกแบบตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสม พร้อมทั้งคำนวณค่าของประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ เมื่อออกแบบให้ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มุ่งเน้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงาน ซึ่งจากผลการจำลองและผลการคำนวณที่ได้พบว่า การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจำนวน 14 แท่งในตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ตรงกัน และขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจะต้องอยู่ในตำแหน่งตรงกันจะมีค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานมากที่สุด และเมื่อพิจารณาวิธีการออกแบบทั้ง 4 วิธีเปรียบเทียบกับผลการจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ไม่ได้ติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 จะเห็นได้ว่าทั้ง 4 วิธีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานได้สูงขึ้นจริง โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการส่งพลังงาน 92.71% ซึ่งเพิ่มขึ้นถึง 33.63% และเมื่อค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้เวลาในการชาร์จลดลงและจะนำไปสู่กลไกการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่แข็งแกร่งและเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การจำลองผลค่าสนามแม่เหล็ก และการคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย เพื่อนำเสนอวิธีการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากวิธีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ควบคู่ไปกับการออกแบบจำนวนของแท่งเฟอร์ไรต์ การออกแบบตำแหน่งของการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ และพิจารณาดำเนินการของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งการจำลองผลอาศัยระเบียบวิธีไฟต์ในตัดลิเมนต์แบบ 3 มิติด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้น พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมให้มีความน่าเชื่อถือ

การสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ถือเป็นส่วนที่สำคัญในการดำเนินงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาต่อยอดองค์ความรู้ในงานวิจัย การศึกษาทฤษฎีและหลักการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในบทที่ 3 เรื่องการอัดประจุไฟฟ้าสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า ระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สนามแม่เหล็กและศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก และระเบียบวิธีไฟต์ในตัดลิเมนต์ ได้ถูกนำมาใช้เป็นความรู้พื้นฐานและความเข้าใจในการดำเนินงานวิจัย ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 เป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง และอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟต์ในตัดลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเออร์คิน ในบทที่ 5 ได้อธิบายถึงโปรแกรมจำลองผลพร้อมนำเสนอผลการจำลองการกระจายของค่าสนามแม่เหล็กและประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่ไม่ได้เน้นการเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงาน โดยกระบวนการสร้างกริดแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solidwork ในการสร้างกริด พร้อมทั้งแสดงภาพทางกราฟิกการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กบริเวณขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ และผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการส่งพลังงานโดยพิจารณาการออกแบบแบ่งเป็น 4 รูปแบบคือออกแบบวิธีการติดตั้ง

แท่งเฟอร์ไรต์ จำนวนแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งบริเวณด้านล่างของขดลวดปฐมภูมิ และบริเวณด้านบนของขดลวดทุติยภูมิ ซึ่งได้ควบคุมระยะห่างระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย การออกแบบโดยพิจารณาส่วนของตำแหน่งการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ และการออกแบบโดยพิจารณาดำเนินการของขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่เหมาะสม พร้อมทั้งนำเสนอผลการจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก และผลการคำนวณค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงาน โดยเมื่อพิจารณาการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายทั้ง 4 รูปแบบจะเห็นว่า เมื่อระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายมีการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิจำนวน 14 แท่ง และแท่งเฟอร์ไรต์จะต้องอยู่ในตำแหน่งตรงกัน ควบคู่ไปกับตำแหน่งของขดลวดปฐมภูมิที่จะต้องตรงกับขดลวดทุติยภูมิ จะเป็นวิธีการออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่จะทำให้มีประสิทธิภาพการส่งพลังงานระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิที่ดีที่สุด โดยคิดเป็นประสิทธิภาพการส่งพลังงานสูงถึง 92.71% และการปรับปรุงประสิทธิภาพการส่งพลังงานให้สูงขึ้น จะช่วยทำให้เวลาในการชาร์จลดลงและจะนำไปสู่กลไกการชาร์จยานยนต์ไฟฟ้าที่แข็งแกร่งและเชื่อถือได้มากขึ้น

7.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้า โดยพิจารณาถึงสถานะไม่เป็นเชิงเส้นของแม่เหล็กประกอบด้วย
2. การออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายสำหรับใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้าที่เน้นลดกำลังสูญเสียระหว่างขดลวดเพื่อให้เกิดกำลังสูญเสียน้อยที่สุด

รายการอ้างอิง

- เฉลิมพล น้ำค้าง. (2538). ทฤษฎีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก (พิมพ์ครั้งที่4). กรุงเทพฯ: ศูนย์ส่งเสริมกรุงเทพ.
- ชัยรัตน์ วิเชียรมงคลกุล. (2544). การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กความถี่ต่ำมากรอบตัวนำบางโดยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์กับวิธีบาวนด์รีอีลีเมนต์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร
- ณัฐพงศ์ หัษชะวิช. (2558). การออกแบบวงจรเรโซแนนซ์อินเวอร์เตอร์ชนิดแอล – ซี – แอล (L-C-L) สำหรับการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- ณัฐ ราชกรม. (2559). การออกแบบขดลวดวงกลมแบบอย่างง่ายสำหรับระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.
- ประมุข อุณหเลขกะ. (2556). การวิเคราะห์และออกแบบการโอนถ่ายพลังงานไฟฟ้า. รายงานโครงการวิจัย. สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย กลุ่มวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีพื้นฐานทางวิศวกรรมศาสตร์.
- ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. (2547). ไฟไนต์อีลีเมนต์ในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปราโมทย์ เฉชะอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวคิดใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์. วิทยานิพนธ์ ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- วราวุธ ศิริผล และคณะ. (2559). รายงานแผนพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานด้านไฟฟ้า เพื่อรองรับยานยนต์ไฟฟ้าของประเทศไทย. รายงานแผนพัฒนา. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.
- หัตถุระรัช งามรุ่งศิริ. (2558). การควบคุมกำลังขาออกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดของระบบส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สายที่มีการชดเชยแบบอนุกรม-อนุกรม. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร.

- เอกชัย ชัยดี, สุกัลย์ ยะอู่, เอกพจน์ ขศแก้ว และ อนนท์ นำอิน. (2556). ผลกระทบทางความถี่ที่มีต่อสมรรถนะการส่งกำลังไฟฟ้าไร้สาย, วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 26, ฉบับที่ 2, หน้า 173–182.
- Ahmad, F.A., Nur, A.B.A., Mohd, Z.Z., and Mohd, F.R. (2018). Effect of Ferromagnetic Material in Circular Magnetic Structure for Electric Vehicle Wireless Power Transfer. **2018 International Conference on Intelligent and Advanced System (ICIAS)**.
- Chen, Y., WeiNa, Z., Dian, G.M., XiJun, Y., and HouJun, T. (2016). 3D modeling of metal Shield on circular coil pad for contactless electric vehicle charging using finite element Analysis. **2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC)**. 1 - 5 .
- Chia-Jung, C., Chia-Ming, H., and Cheng-Chi, T. (2015). Numerical and Experimental Studies of The Effects of Parallel Inductive Coils and Distance Variation on Wireless Power Transfer Systems of Electric Vehicles. **2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)**. 2662 – 2666.
- Fei, L., Hua, Z., Heath, H., and Chunting, C.M. (2016). An Inductive and Capacitive Combined Wireless Power Transfer System With LC-Compensated Topology. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 12: 8471 – 8482.
- Haijuan, Z., and Shiyu, Y., “Resonant Frequency Calculation of Witricity Using Equivalent Circuit Model Combined with Finite Element Method. (2012). **2012 Sixth International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications**.
- Hongseok, K., Chiuk, S., Dong-Hyun, K., Daniel, H., and In-Myoung, K. (2016). Coil Design and Measurements of Automotive Magnetic Resonant Wireless Charging System for High-Efficiency and Low Magnetic Field Leakage. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**. Vol. 64, No. 2: 383 – 400.
- Jiongran, X., Eric, C0, Norbert, C., Bo, Z., and Pan, J. F. (2016). Study of wireless charging lane for electric vehicles. **2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)**.

- Katharina, K., Markus, S., and Peter, G. (2016). Comparison of Coil Topologies for Inductive Power Transfer under the Influence of Ferrite and Aluminum. **2016 Eleventh International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER) Comparison.**
- Kamal, E.I.E., Liang, H., Linlin, T., Songcen, W., and Xiaokang, W. (2018). Resonant Reactive Current Shield Design in WPT Systems for Charging EVs. **2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC).** 56 - 59.
- Kawase, Y., Mori, T. and Ota, T. (1998). Magnetic field analysis of coupling transformers for electric vehicle using 3-D finite element method. **IEEE Transactions on Magnetic.** 34 (5): 3186-3189.
- Md, H.M., Weam, E., Barzegaran, M. R., and Nicholas, A.B. (2016). Efficient wireless power charging of electric vehicle by modifying the magnetic characteristics of the transmitting medium. **2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC).**
- Barzegaran, M. R., Hassan, Z., and Mohammed, O.A. (2017). Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Using an Adaptive Robot. **IEEE Transactions on Magnetics.** Vol. 53, No. 6.
- Chen, M. X., K., and Chen, W. E.(2018). Design of flat magnetic core for inductively coupled coils in high efficiency wireless power transfer application. **2017 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA).**
- Ping-Ping, D., Laurent, B., Lionel, P., and Adel, R. (2017). Evaluation of Electromagnetic Fields in Human Body Exposed to Wireless Inductive Charging System. **IEEE Transactions on Magnetics.** Vol. 50, No. 2.
- Ran, C., Li, Q., Xiaoyong, Z., Zaiyun, Z., and Huawei, Z. (2014). Design of a Wireless Power Transfer System for EV Application Based on Finite Element Analysis and MATLAB Simulation. **2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific).** 1 – 4.
- Shigefumi, M., Takuya, H., Eko, S., and Ichijo, H. (2017). Power Efficiency Improvement of Wireless Power Transfer Using Magnetic Material. **2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies.** 304 – 307.

Tommaso, C., Silvano, C., Valerio, D.S., Francesca, M., and Mauro, F.,. (2018). Numerical Analysis Applying the AMSL Method to Predict the Magnetic Field in an EV with a WPT System. **2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)**.

Tommaso, C., Silvano, C., Valerio, D.S., Francesca, M., and Mauro, F. (2017). EMC and EMF safety issues in wireless charging system for an electric vehicle (EV). **2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive**.





ภาคผนวก ก

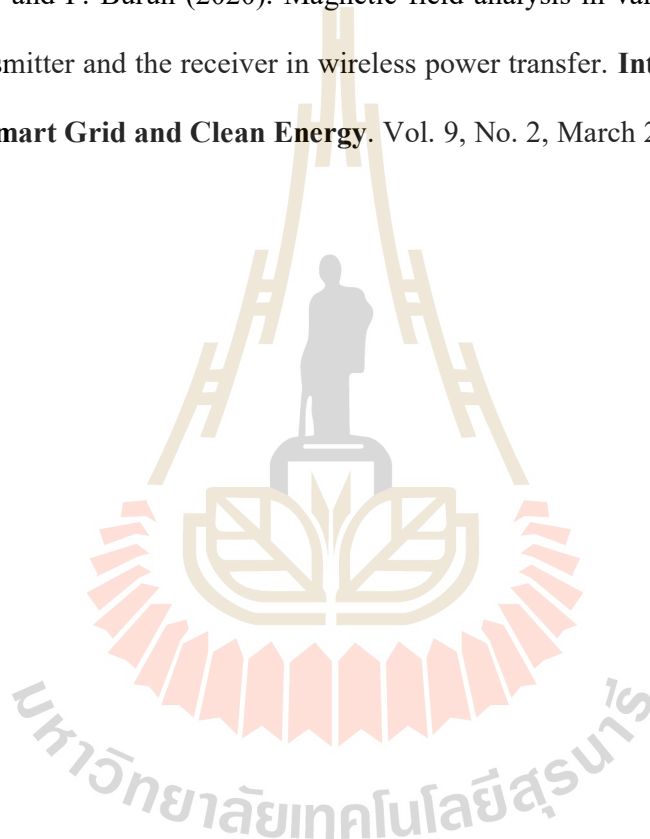
บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

พรุจี บุหรณ์ และ เพ็ญใจ เผ่าละออ. (2562). การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายโดยใช้วิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ 3 มิติ, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42, ฉบับที่ 2, หน้า 657–660.

P. Pao-la-or and P. Burun (2020). Magnetic field analysis in various material of the transmitter and the receiver in wireless power transfer. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**. Vol. 9, No. 2, March 2020.



การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Magnetic field analysis in wireless power transfer using 3-D finite element method

พรจุฑา บุหรณ์¹ และ ผศ. นพ. นพ. นพ.

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

¹pornrujee.b@gmail.com, ²paddej@sut.ac.th

บทคัดย่อ

เทคโนโลยีการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายมีความน่าสนใจอย่างยิ่งเนื่องจากให้ความสะดวกและรวดเร็วในการถ่ายโอนพลังงานไฟฟ้าประสิทธิภาพการถ่ายโอนจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากสำหรับระบบถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย ควรจะต้องวิเคราะห์เพื่อที่จะปรับปรุงประสิทธิภาพการถ่ายโอนให้ดีขึ้น บทความนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กในการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายซึ่งดำเนินการในสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ด้วยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งได้ทั้งหมดนี้ถูกพัฒนาโดยโปรแกรม MATLAB และแสดงรูปกราฟสนามแม่เหล็กของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายเมื่อพิจารณาการติดตั้งแท่งเฟอร์ไรต์ที่ขดลวดตัวรับและขดลวดตัวส่ง

คำสำคัญ: การถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย, สนามแม่เหล็ก, วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ, แท่งเฟอร์ไรต์

Abstract

Wireless power transfer (WPT) technology is particularly interesting, because it is convenient and quick to transfer electricity. The transfer efficiency is therefore a very important parameter for the wireless power transfer system. Must be should analyze in order to improve transfer efficiency. This paper presents a mathematical model of the magnetic field for wireless power transfer which performs in the partial differential equation. The paper simulations using 3-D finite element method that all the coded developed by MATLAB program and show the graphical representation for the magnetic field of the WPT when considering the installation of ferrite at the receiver and transmitter.

Keywords: Wireless power transfer, Magnetic field, Finite element method 3-D, Ferrite

1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาวิธีการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย (wireless power transfer :WPT) ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นเนื่องจากอุตสาหกรรมมีแนวโน้มในการใช้งานหลายอย่าง เช่น การปลูกถ่ายทางชีวภาพ โทรศัพท์มือถือและการชาร์จรถยนต์ไฟฟ้า [1] วิธีการถ่ายโอนพลังงาน

แบบไร้สายเป็นวิธีการส่งกำลังแบบไม่ต้องสัมผัส ซึ่งการถ่ายโอนจะขึ้นอยู่กับ การส่งพลังงานจากขดลวดตัวส่งไปยังขดลวดตัวรับผ่านสนามแม่เหล็ก ปัญหาหลักของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายคือ ช่องว่างอากาศขนาดใหญ่ระหว่างขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ ส่งผลให้เกิดการรั่วไหลของสนามแม่เหล็ก ทำให้การออกแบบขดลวดตัวรับและขดลวดตัวส่งให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยการเพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ที่มีความสามารถในการซึมซับของแม่เหล็ก (magnetic permeability) สูงที่ขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ

ในบทความนี้ได้ศึกษาระบบการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3-D finite element method: 3-D FEM) ในการวิเคราะห์ผลเฉลย เนื่องจากวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นวิธีที่สามารถแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของสนามแม่เหล็กได้ ซึ่งในส่วนที่ 2 จะเป็นการแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง ส่วนที่ 3 เป็นการสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับปัญหาสนามแม่เหล็กใน 3 มิติของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย โดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษคกคัง และระบุพารามิเตอร์ของการจำลอง ส่วนที่ 4 เป็นผลการจำลองและอภิปรายผล เมื่อพิจารณาในการหาคำนวณสนามแม่เหล็กของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์และการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ และส่วนที่ 5 เป็นบทสรุป

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กของการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย สามารถแสดงได้โดยสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) อันดับสอง [2 - 3] ดังแสดงด้วยสมการที่ (1)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \epsilon \sigma \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -J_0 \quad (1)$$

โดยที่ A คือ ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา, μ คือ ความสามารถในการซึมซับของแม่เหล็ก (magnetic permeability), σ คือ สภาพนำทางไฟฟ้า (electrical conductivity), ϵ คือ ค่าไดอิเล็กตริก (dielectric), J_0 คือ ความหนาแน่นของกระแส (current density)

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงโดเมนเวลาเป็นโดเมนความถี่ (time-harmonic) [4] จะได้

$$\frac{\partial A}{\partial t} = j\omega A \quad (2)$$

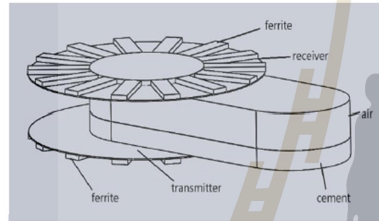
$$\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\omega^2 A \quad (3)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เชิงมุม

จากสมการที่ (1) จึงสามารถพิจารณาสมการสนามแม่เหล็กใน 3 มิติ ได้ดังนี้

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\omega \sigma A - \epsilon \sigma \omega^2 A = -J_0 \quad (4)$$

การถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายของบทความนี้ประกอบด้วย ช่องว่างอากาศระหว่างขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับกำหนดเป็น 76.2 mm. ขดลวดทั้งสองมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 579.12 mm. และมีความหนา 2 mm. แท่งเฟอร์ไรต์มีขนาด $40 \times 150 \times 5$ mm. จำนวน 14 แท่ง ระยะห่างระหว่างแท่งเฟอร์ไรต์ 25 องศา กระแสขาเข้าที่ขดลวดตัวรับ 15 A ความถี่ในการจำลองคือ 50 kHz [5] รายละเอียดดังแสดงได้ด้วยรูปที่ 1



รูปที่ 1 แบบจำลองการส่งกำลังไฟฟ้าแบบไร้สาย

3. การสร้างสมการไฟฟ้าในทอเลียนนท์สำหรับปัญหา

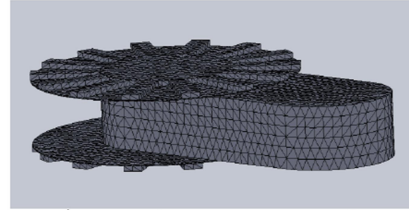
สนามแม่เหล็กใน 3 มิติ

วิธีการไฟฟ้าในทอเลียนนท์ในการแก้สมการอนุพันธ์อันดับสอง ในสมการที่ (4) สามารถทำได้ถึงขั้นตอนต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการแบ่งพื้นที่ย่อยของปัญหาออกเป็นทอเลียนนท์ ซึ่งในที่นี้จะใช้ทอเลียนนท์รูปทรงสี่หน้า งานวิจัยนี้จะดำเนินการแบ่งพื้นที่ที่ ย่อยโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป Solid works ซึ่งจะประกอบด้วย 11,882 ทอเลียนนท์ 2,863 จุดต่อ สำหรับแบบจำลองการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ และประกอบด้วย 30,445 ทอเลียนนท์ 7,222 จุดต่อ สำหรับแบบจำลองการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์เข้าดังแสดงในรูปที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) ของแต่ละองค์ประกอบใน 3 มิติ โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษคกค้าง (weighted residual) ด้วยวิธีของกาลูร์กิน (Galerkin) ตามวิธีนี้ศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กแสดงได้ในสมการที่ (5) [6 - 7]

$$A(x, y, z) = A_1 N_1 + A_2 N_2 + A_3 N_3 + A_4 N_4 \quad (5)$$



รูปที่ 2 การแบ่งทอเลียนนท์และจุดต่อของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย

โดยที่ N_n , $n = i, j, k, l$ คือฟังก์ชันการประมาณภายในทอเลียนนท์ และ A_n , $n = i, j, k, l$ คือผลลัพธ์ของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็กในแต่ละจุดต่อ (i, j, k, l) ของทอเลียนนท์ โดยที่

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad (6)$$

โดยที่ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละทอเลียนนท์ ซึ่งแสดงในสมการที่ (7) [8]

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (7)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_3(y_2 z_4 - y_4 z_2) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_1(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= x_4(z_3 - z_2) + x_3(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_3) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 จัดสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของปัญหาให้อยู่ในรูปเชิงเส้นโดยดัดแปลงสมการที่ (8)

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} - j\omega \sigma A - \epsilon \sigma \omega^2 A + J_0 = R \quad (8)$$

โดย R คือ เชนคค้าง (residual) ประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษคค้าง โดยวิธีของกาลเลอรืคิน แล้วทำการอินทิเกรตรอบปริมาตร V ได้ดังนี้

$$\int_V \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} + \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial z} \right) - (j\omega\sigma + \sigma\omega^2)A + J_0 \right] dV = 0 \quad (9)$$

ดำเนินการแก้สมการที่ (9) ด้วยกระบวนการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงได้สมการแต่ละเอลิเมนต์ที่ประกอบด้วยสมการเชิงเส้น 4 สมการดังนี้

$$[K + M]\{A\} = \{F\} \quad (10)$$

โดยที่

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36\mu V} \begin{bmatrix} b_{11} + c_{11} + d_{11} & b_{12} + c_{12} + d_{12} & \dots & \dots \\ b_{21} + c_{21} + d_{21} & b_{22} + c_{22} + d_{22} & \dots & \dots \\ b_{31} + c_{31} + d_{31} & b_{32} + c_{32} + d_{32} & \dots & \dots \\ b_{41} + c_{41} + d_{41} & b_{42} + c_{42} + d_{42} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{(j\omega\sigma - \sigma\omega^2)}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$[F]_{4 \times 1} = \frac{J_0 V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

ขั้นตอนที่ 4 รวมเป็นระบบใหญ่ ซึ่งจะประกอบด้วยสมการเชิงเส้นทั้งหมดเท่ากับจำนวนจุดต่อที่ใช้ พร้อมแก้สมการเชิงเส้นเพื่อคำนวณผลลัพธ์ของค่าศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (A) จากนั้นคำนวณสนามแม่เหล็ก (B) โดยใช้สมการที่ (11)

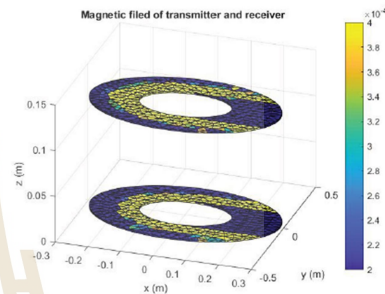
$$B = \nabla \times A \quad (11)$$

4. ผลการจำลองและอภิปรายผล

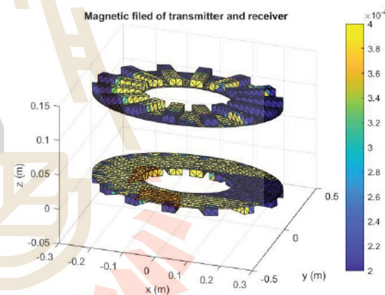
บทความนี้ได้พิจารณาสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดตัวรับและตัวส่งใน 2 กรณีคือ แบบจำลองการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์และแบบจำลองการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ โดยออกแบบให้แท่งเฟอร์ไรต์ 14 แท่ง ขนาด $40 \times 150 \times 10 \text{ mm}^3$ สำหรับพารามิเตอร์ในการจำลองโดยใช้การพัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB ที่พัฒนาขึ้นเอง สามารถแสดงได้ในตารางที่ 1 [5,7]

ตารางที่ 1. พารามิเตอร์ของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย

วัสดุ	Relative Permeability (μ_r)	Conductivity (σ)	Dielectric constant (ϵ_r)
ขดลวด	4,000	1.00 S/m	1
ซีเมนต์	150	0.10 S/m	1
อากาศ	1.00000037	0	1.00058986
พื้นดิน	0	0	1
แท่งเฟอร์ไรต์	1,600	0.001 S/m	1



รูปที่ 3 สนามแม่เหล็ก (T) ของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์



รูปที่ 4 สนามแม่เหล็ก (T) ของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์

ตารางที่ 2. ค่าสนามแม่เหล็กของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย

การถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย	ขดลวดตัวส่ง (mT)	ขดลวดตัวรับ (mT)	ประสิทธิภาพการถ่ายโอน (%)
ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์	3.1636	2.7319	86.34
เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์	5.3324	5.0856	95.37

จากรูปที่ 3 – 4 แสดงภาพ 3 มิติของสนามแม่เหล็กระหว่างขดลวดตัวรับและขดลวดตัวส่งเมื่อพิจารณาการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์และการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าสนามแม่เหล็กมีการกระจายตัวรอบขดลวด โดยด้านในของขดลวดจะมีค่าสนามแม่เหล็กสูงกว่าบริเวณรอบข้าง จาก

รูปที่ 4 จะพบว่า การถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กมากกว่าการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่ไม่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ และจากการเปรียบเทียบค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กในขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับ เพื่อแสดงให้เห็นว่าการสูญเสียสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนสนามแม่เหล็ก 86.34 % และการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายที่เพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์มีประสิทธิภาพการถ่ายโอนสนามแม่เหล็กถึง 95.37 % ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนสนามแม่เหล็กจากขดลวดตัวส่งไปยังขดลวดตัวรับมีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของเฟอร์ไรต์มีความซาบซึมได้ของแม่เหล็กสูง

5. สรุป

บทความนี้เป็นงานจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติเพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของสนามแม่เหล็กในการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนให้กับขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ให้กับขดลวดตัวส่งและขดลวดตัวรับส่งผลให้มีการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กได้ดียิ่งขึ้น และมีประสิทธิภาพการถ่ายโอนสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้น ดังนั้นการออกแบบโดยการเพิ่มแท่งเฟอร์ไรต์ให้กับขดลวดตัวรับและขดลวดตัวส่งของการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สายจึงเป็นทางเลือกในการลดการสูญเสียสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะนำไปสู่การประหยัดพลังงานมากขึ้นในการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Z. Pantic, B. Heacock, and S. Lukic, "Magnetic link optimization for wireless power transfer applications: Modeling and experimental validation for resonant tubular coils," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012, pp. 3825–3832.
- [2] Q. Wang, W. Li, J. Kang and Y. Wang, "Electromagnetic safety of magnetic resonant wireless charging system in electric vehicles," in *2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoT)*, 2017, pp. 1–4.
- [3] P. Pao-La-Or, and A. Isaramongkolrak, "New design and magnetic field analysis of transformer shape with V-connection for core loss reduction in railway system," in *International Review of Modelling and Simulations*, No.1, Vol.12, 2019, pp. 56-65.
- [4] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, T. Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems," in *Engineering Letters*, Vol.18, No.1, 2010, pp. 1-9.
- [5] M.H. Mahmud, W. Elmahmoud, M.R. Barzegaran, N.A. Brake, "Efficient Wireless Power Charging of Electric Vehicle by Modifying the Magnetic Characteristics of the Transmitting Medium," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 53, No. 6, 2017, pp. 192-196.
- [6] S. Vacharakup, M. Peerasaksophol, T. Kulworawanichpong, P. Pao-la-or, "Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method," *Applied Mechanics and Materials*, vols. 110-116, pp. 61-66, 2012.
- [7] P. Pao-La-Or, and S. Vacharakup, "Simulation of the 6-phase Fractional Pitch Induction Motors to Reduce Harmonic by using the 3-D Finite Element Method," in *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, No.4, Vol.8, 2019, pp. 580-587.
- [8] A.F.A. Aziz, N.A.B. Anuar, M.Z. Zainol, and M.F. Romlie, "Effect of Ferromagnetic Material in Circular Magnetic Structure for Electric Vehicle Wireless Power Transfer," in *International Conference on Intelligent and Advanced System (ICIAS)*, 2018, pp. 1-6.



พรจี บุหรีน

นักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ
การศึกษาระดับปริญญาตรี (2561) ใน
สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ เรื่องวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
สนามแม่เหล็กและการถ่ายโอนพลังงานแบบไร้สาย



รศ. ดร. เนติง ฝาละออ

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จ
การศึกษาระดับปริญญาโท (2541),
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (2545) และ วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (2549) ในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี งานวิจัยที่สนใจ
เรื่องวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ การหาตำแหน่งที่ดีที่สุด สนามแม่เหล็ก
เครื่องจักรไฟฟ้า และการแปลงพลังงาน

Magnetic field analysis in various material of the transmitter and the receiver in wireless power transfer

Padej Pao-la-or , Pornrujee Burun

*School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,
Nakhon Ratchasima 30000, Thailand*

Abstract

There is a developing for electric vehicle (EV) because of their lower fuel and greenhouse gas. Wireless power transfer (WPT) is easy to use ways to recharge, but the problem with the current wireless charging technology for electric vehicle are low efficiency and slow charging time. This paper presents the design parameters of permeability and conductivity in various material of the transmitter and the receiver which performs in the partial differential equation. The paper simulation using 3-D finite element method that all the coded developed by MATLAB program and show the graphical representation for the magnetic field of the WPT.

Keywords: Wireless charging, wireless power transfer (WPT), magnetic field, electric vehicle (EV), 3-D finite element method (3-D FEM).

1. Introduction

Electric vehicles (EVs) have been projected as one of the next-generation methods of transportation. Designed to manage the environmental and energy but the demand is still relatively low. However, it is widely known that EVs have several disadvantages. First, the current plug-in charging method prevents an EVs from operating while the battery is being charged. A considerable amount of recharging downtime. Wireless charging EVs have been introduced to solve the problems above [1].

The wireless power transfer technology has obtained increasing attention recently [2], [3]. It is a method for contactless power transmission. It is based on the transmission of energy from a transmission coil and the receiver coil, resulting from a leakage magnetic flux, designing high- power high-efficiency capacitive WPT systems for EV charging is very challenging.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2, the mathematical model of the wireless power transfer (WPT) system. The 3-D finite element method (3-D FEM) by using Galerkin approach applied from WPT to obtain magnetic field distribution and specifies the WPT dimensions. Section 3 presents the design parameter in various material of the WPT and simulation results. Finally, Section 4 the conclusion of the study.

2. Mathematical Modeling for Magnetic Field of WPT and Simulation Parameters

Finite element method is the most efficient numerical technique [8] for solving the partial differential equations (PDE) such as electromagnetic problem, temperature rise, and heat transfer problem [9].

* Manuscript received March 27, 2019; revised January 8, 2020.
Corresponding author. Tel.: +66-44-22-4400; E-mail address: padej@sut.ac.th.
doi: 10.12720/sgce.9.2.274-281

Regarding wireless power transfer (WPT) magnetic problems, the magnetic field intensity (H) is associated with the magnetic field (B), $B = \mu H$. Which can be shown the PDE as follow (1) [10].

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) - \mu \sigma \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

where,

H is the magnetic field intensity (A/m)

v is propagation velocity of the magnetic field (m/s)

μ is permeability of material (H/m) while permeability of free space (μ_0) is $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

σ is electrical conductivity of the material (S/m)

t is time (s)

The magnetic field propagation velocity can be explained by the relation between electric permittivity (ϵ) and magnetic permeability (μ), which can be shown in (2)

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2)$$

Where, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ is permittivity of material (F/m) while permittivity of free space (ϵ_0) is 8.854×10^{-12} F/m. Therefore, the PDE as follow (3)

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - \mu\epsilon \left(\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (3)$$

This paper has considered the system by using time-harmonic mode and representing the magnetic field intensity in complex form therefor [11].

$$\frac{\partial H}{\partial t} = j\omega H \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} = -\omega^2 H \quad (5)$$

where, ω is the angular frequency (rad/s).

From (3), we have considered the problem in three dimensions, therefore, the magnetic field intensity equation in x , y and z -direction, which can be shown in (6).

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - (j\mu\omega\sigma - \mu\omega^2\epsilon)H = 0 \quad (6)$$

This paper refers to the modelling of WPT scaling of dimension, which is as follows Fig. 1 and Fig. 2. The air gap between transmitter and receiver is set as 76.2 mm. The coil has a 290 mm radius with a 2 mm thickness, with the operating frequency of 50 kHz [12].

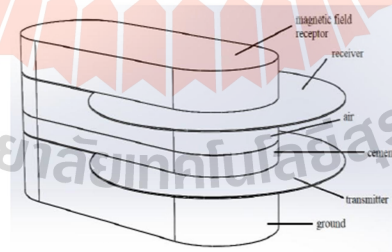


Fig. 1. The material of WPT

Finite element method for solving the PDE in (6) follow these steps.

The first step, the division of the problem into the nodes and elements. The general of an element in three dimensions is linear tetrahedral. This can be accomplished by using Solid Works for 3-D grid generation. Which has a number of nodes is 3,638 and the number of elements is 15,818 can be shown in Fig. 3.

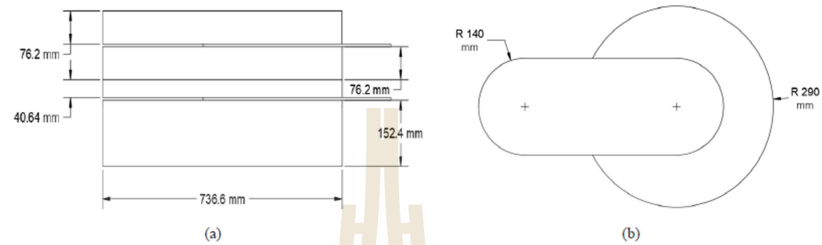


Fig. 2. The dimension of modeling WPT (a) front view (b) top view

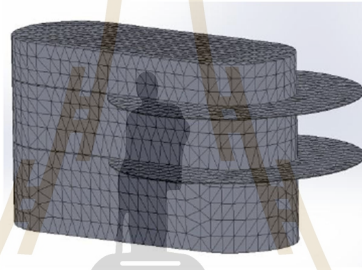


Fig. 3. Mesh of the WPT

The second step, formulating the shape function of each element in three dimensions. According to this method, the magnetic field intensity is shown in (7) [13].

$$H(x, y, z) = H_i N_i + H_j N_j + H_k N_k + H_l N_l \quad (7)$$

where, $N_n, n = i, j, k, l$ are the shape functions, and $H_n, n = i, j, k, l$ are the magnetic field intensity at node for each element. The shape function can be written as (8).

$$N_n = \frac{1}{6V} (a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad (8)$$

where, V is the volume of each tetrahedral element, which defined as (9)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (9)$$

And the positional coefficient defined by

$$\begin{aligned}
a_1 &= x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_3(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3) & b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\
a_2 &= x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_4 - y_4z_1) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4) & b_2 &= y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\
a_3 &= x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_2(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2) & b_3 &= y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\
a_4 &= x_3(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3) & b_4 &= y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) & d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\
c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) & d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\
c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) & d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\
c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) & d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)
\end{aligned}$$

The third step, from (6) is Galerkin approach equation as referring to the differential equation was then adapted by using the weighted residual method, in which element domain V as in (9) was done by using the integrations as in (10) [14].

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} - (j\omega\mu\sigma - \mu\omega^2\varepsilon)H = R \quad (10)$$

where R is the residual function. The method of the weighted residual with Galerkin approach applied to the PDE. Therefore, the residual function expresses as (11).

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) - (j\omega\mu\sigma - \mu\omega^2\varepsilon)H \right] dV = 0 \quad (11)$$

From (11) can be divided into two parts as follows.

$$\int_V N_n \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] dV - \int_V N_n [(j\omega\mu\sigma - \mu\omega^2\varepsilon)H] dV = 0$$

Or in the compact matrix form

$$[K + M][H] = 0 \quad (12)$$

where $[K]$ is the permeability matrix of the problem and element equation can be written in term of the matrix with 4x4 size, which shown in (13).

$$[K]_{4 \times 4} = \frac{1}{36V} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & b_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & b_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ b_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ b_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ b_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Sym

where $[M]$ is the constant matrix depends on the constant of electrical conductivity, permeability, and angular frequency as follows equation (14).

$$[M]_{4 \times 4} = \frac{(j\omega\mu\sigma - \mu\omega^2\varepsilon)}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Fourth step, applying the boundary conditions in term of Dirichet, at surface of the transmitter boundary conditions is 400 A/m [15].

Fifth step, solving the linear equation for calculation a result of the magnetic field intensity. Then magnetic field calculation, $B = \mu H$.

For the simulation parameters, the finite element method was used for solving the PDE in this paper. The parameters for simulation depends on (13) – (14). However, All of the parameter simulation shown in the Table 1 [12], [15].

Table 1. Parameters of WPT simulation

Material	Permeability (μ_r)	Conductivity (σ)	permittivity (ϵ_r)
Ground	0	0	1
Cement	150	0.1 S/m	1
Air	1.00000037	0	1.00058986
Magnetic field receptor	1	1 S/m	1

3. Designing Parameters in Various Material of the WPT and Simulation Results

This paper has considered the magnetic field in the magnetic field receptor of the wireless power transfer (WPT). From the mathematical modeling, we see that there are three parameters: relative permeability (μ_r), conductivity (σ) and relative permittivity (ϵ_r). From the testing found that relative permeability (ϵ_r) has a very small effect on the system. It is not considered to affect the system. In this case, the permittivity of the transmitter and the receiver is 1. In this paper, we are proposed compare between the relative permeability (μ_r) and conductivity (σ) of the transmitter and the receiver. To analyze which parameters of the coil has affected to a magnetic field receptor of WPT.

For the simulation, this paper has considered the magnetic field receptor of WPT using finite element method, which a new created material all 4 type: A, B, C and D. The new design parameters of the transmitter and receiver shown in Table 2. For the simulation results, A magnetic field of the WPT and the magnetic field receptor which supplied from material Type A, Type B, Type C and Type D shown as Fig. 4 – 7, respectively.

Table 2. The parameters in various of the transmitter and the receiver

Material Type	Relative Permeability (μ_r)	Conductivity (σ)
A	4,000	1.0000 S/m
B	4,000	0.2000 S/m
C	9,000	1.0000 S/m
D	9,000	0.2000 S/m

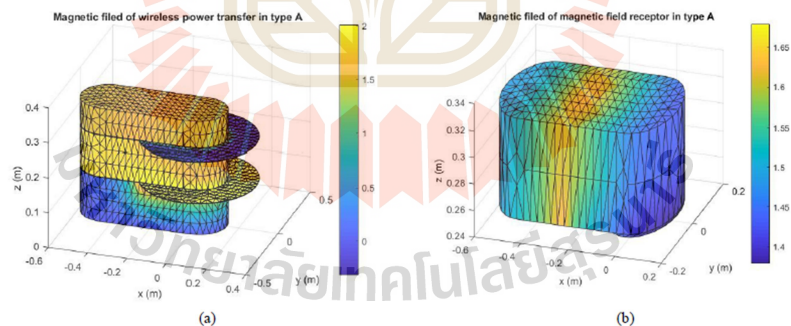


Fig. 4. A magnetic field (T) in Type A (a) wireless power transfer (b) magnetic field receptor

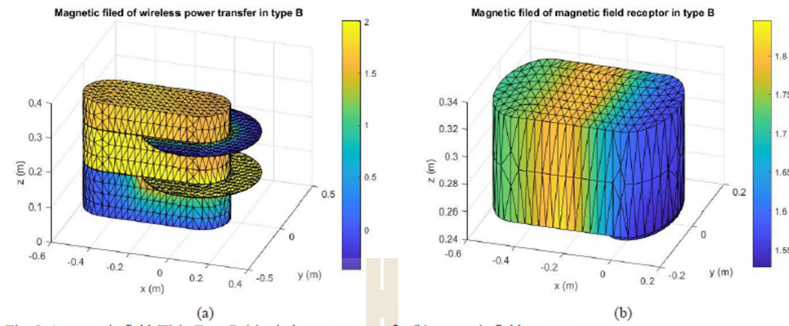


Fig. 5. A magnetic field (T) in Type B (a) wireless power transfer (b) magnetic field receptor

Table 3. Maximum, minimum and average of the magnetic in the transmitter

Results	Maximum (T)	Minimum (T)	Average (T)
A	2.0116	1.8464	2.0045
B	2.0116	1.8464	2.0046
C	4.5261	4.1544	4.5101
D	4.5260	4.1545	4.5102

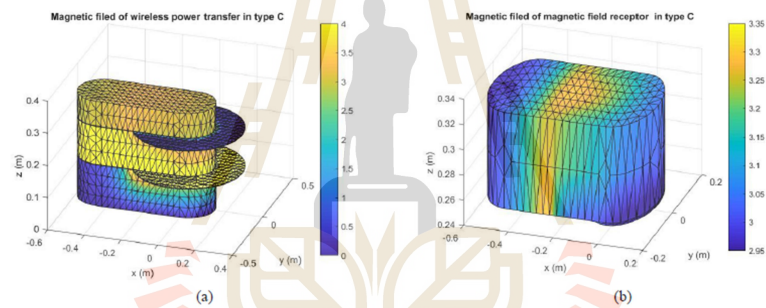


Fig. 6. A magnetic field (T) in Type C (a) wireless power transfer (b) magnetic field receptor

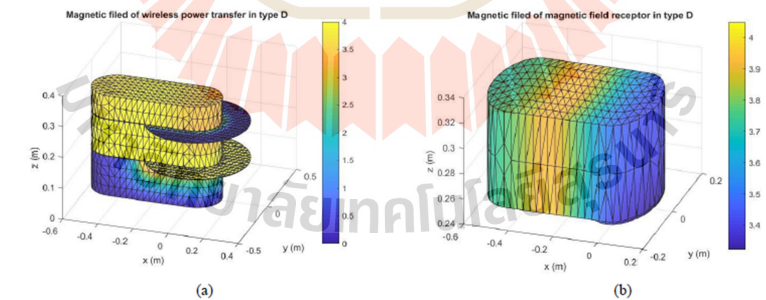


Fig. 7. A magnetic field (T) in Type D (a) wireless power transfer (b) magnetic field receptor

Table 4. Maximum, minimum and average of the magnetic in the magnetic field receptor

Results	Maximum (T)	Minimum (T)	Average (T)	Transfer efficiency (%)
A	1.7760	1.4198	1.6237	81.00
B	1.8739	1.5405	1.7168	85.64
C	3.8073	3.0436	3.4913	77.41
D	4.1527	3.3713	3.8676	85.75

From Fig. 4 – 7 shows the 3-D a magnetic field, we will see that the magnetic field appears to be symmetric around the coil and the core. From the Table 3 and Table 4 show a maximum, minimum and average comparison of the magnetic field in the transmitter and magnetic field receptor, to see that average of the transmitter and magnetic field receptor have a magnetic field loss. Two ideas are proposed in this paper to enhance the magnetic mutuality between the transmitter and the receiver and reduces magnetic field loss: 1) we be changing the conductivity and be unchanged the permeability of the transmitter and the receiver. 2) we be changing the permeability and be unchanged the conductivity of the transmitter and the receiver. Two ideas have an effect to the magnetic field of the magnetic field receptor will be increased.

From the Table 4 which is an average of the magnetic field in the magnetic field receptor, to see that Type D has a 3.8676 T. It is a higher magnetic field, 85.75% magnetic field transfer efficiency was achieved in terms of the transmitter and the magnetic field receptor. We will see that the magnetic field transfer efficiency in Type B and D have a similar value, although two type have the permeability unequal. Therefore, this simulation result can be helped to the guideline for designing the transmitter and the receiver of wireless power transfer that has a higher the magnetic field transfer efficiency. The property of the material for the transmitter and the receiver must be low conductivity. Because increase the permeability has a very small effect on the magnetic field transfer efficiency.

4. Conclusion

This paper simulation via the 3-D finite element method for solving the partial differential equation of the magnetic field to design the transmitter and the receiver of wireless power transfer. The wireless power transfer that has a higher the magnetic field transfer efficiency. The property of the material for the transmitter and the receiver must be low conductivity. Improved magnetic field transfer efficiency decreases charging time and will lead to more robust and reliable EV charging mechanisms. A resonant frequency of wireless power transfer for loss reduction will analyze as the future research. On the other hand, In terms of manufacturing there are many factors to determine.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions

Pao-la-or conducted the research; Burun analyzed the data; Pao-la-or and Burun wrote the paper; all authors had approved the final version.

Acknowledgment

This work was supported by School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology.

References

- [1] I. Hwang, Y. J. Jang, Y. D. Ko, M. S. Lee, "System Optimization for Dynamic Wireless Charging Electric Vehicles Operating in a Multiple-Route Environment," *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, No. 6, pp. 1709-1725, June 2018.
- [2] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, and C. T. Rim, "Advances in wireless power transfer systems for roadway-powered electric vehicles," *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 18-36 March 2015.
- [3] S. Li and C. C. Mi, "Wireless power transfer for electric vehicle applications," *IEEE Journal Of Emerging And Selected Topics In Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 4-17, March 2015.
- [4] S. Hui and W. Ho, "A new generation of universal contactless battery charging platform for portable consumer electronic equipment," *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 20, No. 3, pp. 620-627, May 2005.
- [5] P. Li and R. Bashirullah, "A wireless power interface for rechargeable battery operated medical implants," *IEEE Transaction on Circuits and System*, Vol. 54, No. 10, pp. 192-196, October 2007.
- [6] C. Wang, O. H. Stielau, and G. A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 5, pp. 1308-1314, October 2005.
- [7] M. Budhia, V. Vyatkin, G. A. Covic, "Powering flexible manufacturing systems with intelligent contact-less power transfer," 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN 2008), pp. 1160-1165, Daejeon Korea, 2008.
- [8] M.V.K. Chari, and S.J. Salon, "Numerical Methods in Electromagnetism," *Academic Press*, USA, 2000.
- [9] W. Lewis, P. Nithiarasu, N. Seetharamu, "Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow," John Wiley & Sons, USA, 2004.
- [10] A. Bunmat, P. Pao-la-or., "Analysis of Magnetic Field Effects Operators Working a Power Transmission Line Using 3-D Finite Element Method," 18th International Conference on Electrical machine and System (ICEMS 2015), pp. 1187-1191, Pattaya Thailand, 2015.
- [11] P. Pao-la-or, A. Isaramongkolrak, T. Kulworawanichpong, "Finite Element Analysis of Magnetic Field Distribution for 500-kV Power Transmission Systems," *Engineering Letters*, Vol.18, No.1, pp. 1-9, 2010.
- [12] M.H. Mahmud, W. Elmahmoud, M.R. Barzegaran, N.A. Brake, "Efficient Wireless Power Charging of Electric Vehicle by Modifying the Magnetic Characteristics of the Transmitting Medium," *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 53, No. 6, pp. 192-196, June 2017.
- [13] S. Vacharakup, M. Peerasaksothol, T. Kulworawanichpong, P. Pao-la-or, "Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method," *Applied Mechanics and Materials*, vols. 110-116, pp. 61-66, 2012.
- [14] P.I. Kattan, "MATLAB Guide to Finite Elements (2nd edition)," *Springer Berlin Heidelberg*, USA, 2007.
- [15] A. Hirata, T. Sunohara, I. Laakso, T. Onishi "SAR in a Simplified Human Model Due to wireless power Transfer with Induction Coupling," 7th European Conference on Antennas Propagation (EUCAP 2013), pp. 1769-1772, 2013.

Copyright © 2020 by the authors. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY-NC-ND 4.0), which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided that the article is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.



ประวัติผู้เขียน

นางสาวพรรุจิ บุหรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 7 กันยายน พ.ศ. 2538 เกิดที่อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ.2560 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2560 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้สอนในวิชาปฏิบัติการต่างๆของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีผลงานตีพิมพ์ในรายละเอียดภาคผนวก ก

