การคำนวณความถี่ธรรมชาติและกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบนด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ

นายสมศักดิ์ วัชระคุปต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

CALCULATION OF NATURAL FREQUENCY AND LOSSES OF CIRCULAR RING PIEZOELECTRIC TRANSFORMER BY USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD

Somsak Vatcharakup

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การคำนวณความถี่ธรรมชาติและกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบนด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.อนันท์ อุ่นศิวิไลย์)
ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.เผด็จ เผ่าละออ)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รศ. ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์)
กรรมการ

(ผศ. ดร.กีรติ สุลักษณ์)
กรรมการ

(ผศ. ดร.สุขเกษม กังวานตระกูล)
กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมศักดิ์ วัชระคุปต์ : การคำนวณความถี่ธรรมชาติและกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบนด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ (CALCULATION OF NATURAL FREQUENCY AND LOSSES OF CIRCULAR RING PIEZOELECTRIC TRANSFORMER BY USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ, 218 หน้า.

หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจะทำหน้าที่ในการเพิ่มหรือลดระดับพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการส่งจ่ายพลังงาน โดยในทางด้านขาเข้าของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจะแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลก่อนแล้วจึงแปลงพลังงานกลกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งทางด้านขาออกของหม้อแปลง สำหรับการส่งถ่ายพลังงานทางกลจะส่งถ่ายในรูปแบบของการสั่นสะเทือนโดยจะทำงานในช่วงความถี่ธรรมชาติ สิ่งหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกได้คือกำลังงานสูญเสีย ดังนั้นงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติพร้อมกับการจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการสั่นสะเทือนสำหรับในการหาค่าความถี่ธรรมชาติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างทางไฟฟ้ากับทางกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกนั้นจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติในการหาผลเฉลย เพื่อที่จะสามารถคาดเดาช่วงความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกและสามารถนำผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่ได้จากการจำลองนั้นนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกรวมไปถึงการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกโดยโปรแกรมสำหรับจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมโปรแกรมคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ใช้โปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเองพร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม _____

SOMSAK VATCHARAKUP : CALCULATION OF NATURAL FREQUENCY AND LOSSES OF CIRCULAR RING PIEZOELECTRIC TRANSFORMER BY USING 3-D FINITE ELEMENT METHOD.
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. PADEJ PAO-LA-OR, Ph.D., 218 PP.

NATURAL FREQUENCY/LOSSES/PIEZOELECTRIC TRANSFORMER/3-D FINITE ELEMENT METHOD

A piezoelectric transformer has the main function as an ordinary transformer in order to decrease or increase voltage level. When applying electric stress on its input terminal, the piezoelectric material converts electrical energy into mechanical energy in form of vibration. This energy transfers through piezoelectric materials, layer by layer, until it reaches the output terminal. The mechanical energy will be transformed back to electric energy. This process is to operate at the natural frequency in order to gain the maximum efficiency and low losses. In this thesis, calculation of the natural frequency together with electric potential field distribution and mechanical displacement for a ring-dot piezoelectric transformer is determined. Second order partial differential equations of mechanical vibration coupled with electromagnetic fields for the ring-dot piezoelectric transformer are formulated and solved by using 3D finite element method (3D-FEM). MATLAB software is employed to simulate electrical and mechanical responses of the piezoelectric transformer. Electrical potential, mechanical displacement, energy losses and overall efficiency are investigated. In addition, comparisons between simulation results with those of the experimental test are made.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2011

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

Co-advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลืออย่างดียิ่งทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายกิจการนักศึกษา ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนทำให้มีความสมบรูณ์ยิ่งขึ้นรวมทั้งเป็นกำลังใจ นอกจากนี้ยังมีความเป็นกันเองแก่ผู้วิจัยและเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรวานิชพงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยได้ทุก ๆ เวลา พร้อมดูแลเอาใจใส่ให้กำลังใจ ช่วยเหลือผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาและให้ความรู้ทางด้านวิชาการที่จำเป็นสำหรับงานวิจัยอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและแนะนำความรู้ทางวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอดระยะเวลาที่ผู้วิจัยได้ศึกษาและขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายทุกอย่างในการศึกษา รวมทั้งการเผยแพร่ผลงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณมณฑกานต์ พีรศักดิ์โสภณ คุณชวลิต ปัญญาอิสระ และ คุณพีรวัจน์ มีสุข ที่ได้ให้ความช่วยเหลือดูแล และเป็นกำลังใจอย่างใกล้ชิดแก่ผู้วิจัยเสมอมาและขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และดูแลส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา

สมศักดิ์ วัชระคุปต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ซ
สารบัญรูป ..... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 3
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น 4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย 4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ 5
2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.1 บทนำ 7
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 7
2.3 สรุป 14
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 16
3.1 บทนำ 16
3.2 หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 16
3.2.1 ประวัติความเป็นมาของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 18
3.2.2 ไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 19
3.2.3 หลักการทำงานของสารไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 19
3.2.4 ลักษณะการทำงานของไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 21

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.5 คุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก.....22
3.2.6 การทำงานของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก.....23
3.2.7 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก.....24
3.2.8 ชนิดของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก.....26
3.3 วงจรบัสลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริก.....30
3.4 ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ.....35
3.5 สรุป.....44
4 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์.....45
4.1 บทนำ.....45
4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกล ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ.....46
4.3 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์.....49
4.3.1 การออกแบบอิลิเมนท์ของพื้นที่ศึกษา.....49
4.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนท์แบบ 3 มิติ.....51
4.3.3 การสร้างสมการอิลิเมนท์.....53
4.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนท์ขึ้นเป็นระบบ.....59
4.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย.....59
4.4 สรุป.....60
5 ความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก.....61
5.1 บทนำ.....61
5.2 ความถี่ธรรมชาติ.....61
5.3 วิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก.....74
5.4 การคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีค่าเจาะจง.....75
5.5 ผลการวัดความถี่ธรรมชาติและค่าศักย์ไฟฟ้าของ หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก.....80

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.6 การเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากการทดลอง
กับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 85
5.7 สรุป 87
**6 โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกล
พร้อมผลการจำลองแบบ 3 มิติ** 88
6.1 บทนำ 88
6.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล 88
6.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด 89
6.2.2 โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของ
หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 90
6.3 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์พร้อมวิเคราะห์ผล 92
6.4 การคำนวณกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 132
6.5 ผลการจำลองกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลง
ไพอิโซอิเล็กทริกพร้อมวิเคราะห์ผล 134
6.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 155
6.7 สรุป 197
7 สรุปและข้อเสนอแนะ 198
7.1 สรุป 198
7.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต 200
รายการอ้างอิง 201
ภาคผนวก
ภาคผนวก ก. การประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขต 205
ภาคผนวก ข. การเผยแพร่ผลงานในขณะศึกษา 210
ประวัติผู้เขียน 218

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 8

3.1 การเปรียบเทียบลักษณะเฉพาะของหม้อแปลงไฟฟ้าทั้งแบบแม่เหล็กไฟฟ้าและแบบเซรามิก 29

3.2 ลักษณะข้อมูลของอิลิเมนท์ 37

3.3 ลักษณะข้อมูลของตำแหน่งจุดต่อ 38

4.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการจำลองผล 60

5.1 ผลการทดสอบเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 83

5.2 การเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกระหว่างการทดลองจริงและวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ 86

6.1 ผลการคำนวณประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 156

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

3.1 การทำงานของไพอิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ 20
3.2 การทำงานของไพอิโซอิเล็กทริกแอคชวลเอเตอร์ 20
3.3 ลักษณะการทำงานของ longitudinal mode ของไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 21
3.4 ลักษณะการทำงานของ transverse mode ของไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 21
3.5 คุณลักษณะทางไฟฟ้าและทางกลของไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 22
3.6 ลักษณะการยืดหดของวัตถุที่เป็นสารไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 23
3.7 การทำงานของไพอิโซอิเล็กทริก 24
3.8 หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกที่มีการประยุกต์มาจากการทำงาน
ของไพอิโซอิเล็กทริกเซรามิก 24
3.9 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจากการรวมทั้งสองส่วน 25
3.10 การพัฒนาวงจรสมมูลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 25
3.11 วงจรสมมูลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 26
3.12 โครงสร้างของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซน 27
3.13 หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามความหนา 27
3.14 โครงสร้างหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามแนวรัศมี 28
3.15 วงจรบัลลาสต์ชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ 32
3.16 โครงสร้างของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกทำหน้าที่แทนบัลลาสต์ 32
3.17 ชุดวงจรบัลลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริก 33
3.18 วงจรบัลลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริก 33
3.19 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ 34
3.20 วงจรบัลลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริกสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 35
3.21 แสดงรูปร่างอิลิเมนต์แบบ 3 มิติในชนิดต่าง ๆ 36
3.22 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 6 อิลิเมนท์ 8 จุดต่อ เมื่อพิจารณา
อิลิเมนท์รูปทรงสี่หน้า 37
3.23 การประมาณภายในแบบเชิงเส้นบนอิลิเมนท์รูปทรงสี่หน้า 38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.24 รูปร่างของปัญหาที่ประกอบด้วย 3 อิลิเมนท์ 4 จุดต่อ 42
4.1 หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน 50
4.2 การแบ่งอิลิเมนท์และจุดต่อของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ 50
4.3 ภาพการขยายการแบ่งอิลิเมนท์และการเชื่อมต่อของอิลิเมนท์ต่าง ๆ 51
5.1 การแกว่งอย่างอิสระของลูกตุ้มนาฬิกา 62
5.2 การแกว่งอย่างอิสระของลูกตุ้มนาฬิกาเมื่อออกแรงเพียงครั้งเดียว
และไม่เกิดการสั่นพ้องทำให้วัตถุจะหยุดแกว่งในที่สุด 63
5.3 การแกว่งอย่างอิสระของลูกตุ้มนาฬิกาเมื่อออกแรงผลัก
ที่ความถี่ใด ๆ และไม่เกิดการสั่นพ้องทำให้วัตถุแกว่ง
ด้วยความถี่เท่ากับแรงที่ผลัก 64
5.4 การแกว่งอย่างอิสระของลูกตุ้มนาฬิกาเมื่อออกแรงผลักด้วยความถี่
ธรรมชาติของวัตถุและเกิดการสั่นพ้องทำให้วัตถุแกว่งด้วยความถี่
ธรรมชาติและมีแอมปลิจูดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ 64
5.5 ฟลุตเครื่องดนตรีชนิดสั่นด้วยความถี่เพียงค่าเดียว 65
5.6 ทูบาเครื่องดนตรีชนิดสั่นสะเทือนโดยมีความถี่หลายค่า 66
5.7 ทรอมโบนเครื่องดนตรีชนิดความถี่ธรรมชาติขึ้นอยู่วัตถุต้นกำเนิดเสียง 66
5.8 ระยะที่อนุภาคสั่นออกจากตำแหน่งเดิมกับตำแหน่งบนท่อสั่นพ้อง
ขณะเกิดการสั่นพ้องของเสียง 67
5.9 การเกิดปรากฏการณ์บีตส์ 68
5.10 แสดงการเกิดคลื่นนิ่งในเส้นเชือก 69
5.11 ปรากฏการณ์การแทรกสอดของคลื่นน้ำที่เกิดจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่ง 70
5.12 การสั่นของเส้นเชือกในรูปแบบต่าง ๆ 72
5.13 การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นในแก้วน้ำ 73
5.14 การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นในสะพานแขวน 74
5.15 แบบจำลองทางกายภาพของระบบสั่นสะเทือน 76
5.16 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมการคำนวณการสั่นสะเทือน
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ 79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.17 แผนภาพวงจรการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 82
5.18 การทดสอบหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดการสั่นตามแนวรัศมีเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ 83
5.19 กราฟแสดงผลของความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 84
6.1 ขอบเขตในการศึกษาของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ 89
6.2 การสร้างกริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 90
6.3 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ 91
6.4 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 80 kHz 94
6.5 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 80 kHz 94
6.6 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 80 kHz 95
6.7 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 81 kHz 95
6.8 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 81 kHz 96
6.9 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 81 kHz 96
6.10 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 82 kHz 97
6.11 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 82 kHz 97
6.12 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 82 kHz 98
6.13 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 83 kHz 98
6.14 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 83 kHz 99
6.15 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 83 kHz 99
6.16 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 84 kHz 100
6.17 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 84 kHz 100

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.18 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 84 kHz 101
6.19 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 85 kHz 101
6.20 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 85 kHz 102
6.21 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 85 kHz 102
6.22 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 86 kHz 103
6.23 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 86 kHz 103
6.24 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 86 kHz 104
6.25 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 87 kHz 104
6.26 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 87 kHz 105
6.27 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 87 kHz 105
6.28 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 88 kHz 106
6.29 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 88 kHz 106
6.30 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 88 kHz 107
6.31 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 89 kHz 107
6.32 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 89 kHz 108
6.33 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 89 kHz 108
6.34 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 90 kHz 109
6.35 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 90 kHz 109
6.36 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก ที่ความถี่ 90 kHz 110
6.37 อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาออกในช่วงความถี่ 80-90 112

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.38 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 80 kHz 114
6.39 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 80 kHz 114
6.40 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 80 kHz 115
6.41 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 81 kHz 115
6.42 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 81 kHz 116
6.43 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 81 kHz 116
6.44 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 82 kHz 117
6.45 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 82 kHz 117
6.46 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 82 kHz 118
6.47 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 83 kHz 118
6.48 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 83 kHz 119
6.49 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 83 kHz 119
6.50 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 84 kHz 120

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.51 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 84 kHz 120
6.52 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 84 kHz 121
6.53 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 85 kHz 121
6.54 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 85 kHz 122
6.55 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 85 kHz 122
6.56 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 86 kHz 123
6.57 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 86 kHz 123
6.58 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 86 kHz 124
6.59 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 87 kHz 124
6.60 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 87 kHz 125
6.61 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 87 kHz 125
6.62 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 88 kHz 126
6.63 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 88 kHz 126

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.64 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 88 kHz 127
6.65 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 89 kHz 127
6.66 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 89 kHz 128
6.67 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 89 kHz 128
6.68 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 90 kHz 129
6.69 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 90 kHz 129
6.70 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 90 kHz 130
6.71 ระยะการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
ในช่วงความถี่ 80-90 kHz 131
6.72 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 80 kHz 136
6.73 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 80 kHz 136
6.74 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 80 kHz 137
6.75 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 81 kHz 137
6.76 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 81 kHz 138

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.77 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 81 kHz 138
6.78 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 82 kHz 139
6.79 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 82 kHz 139
6.80 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 82 kHz 140
6.81 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 83 kHz 140
6.82 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 83 kHz 141
6.83 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 83 kHz 141
6.84 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 84 kHz 142
6.85 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 84 kHz 142
6.86 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 84 kHz 143
6.87 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 85 kHz 143
6.88 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติที่ความถี่ 85 kHz 144
6.89 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 85 kHz 144

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.90 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 86 kHz 145
6.91 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก แบบ 3 มิติที่ความถี่ 86 kHz 145
6.92 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 86 kHz 146
6.93 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 87 kHz 146
6.94 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก แบบ 3 มิติที่ความถี่ 87 kHz 147
6.95 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 87 kHz 147
6.96 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 88 kHz 148
6.97 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก แบบ 3 มิติที่ความถี่ 88 kHz 148
6.98 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 88 kHz 149
6.99 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 89 kHz 149
6.100 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก แบบ 3 มิติที่ความถี่ 89 kHz 150
6.101 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 89 kHz 150
6.102 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ ที่ความถี่ 90 kHz 151

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.103 ภาพตัดกำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 90 kHz 151
6.104 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 90 kHz 152
6.105 กำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกใน
ช่วงความถี่ 80-90 kHz 154
6.106 วงจรการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด 155
6.107 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก 157
6.108 ผลการคำนวณอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสภาวะที่โหลด
มีค่าเท่ากับ 1345 Ω 158
6.109 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 30 kHz 160
6.110 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 30 kHz 161
6.111 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 30 kHz 161
6.112 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 32 kHz 162
6.113 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 32 kHz 162
6.114 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 32 kHz 163
6.115 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 34 kHz 163
6.116 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 34 kHz 164
6.117 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 34 kHz 164
6.118 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 36 kHz 165
6.119 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 36 kHz 165
6.120 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 36 kHz 166

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.121 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 38 kHz 166
6.122 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 38 kHz 167
6.123 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 38 kHz 167
6.124 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 40 kHz 168
6.125 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 40 kHz 168
6.126 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 40 kHz 169
6.127 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 70 kHz 169
6.128 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 70 kHz 170
6.129 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 70 kHz 170
6.130 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 72 kHz 171
6.131 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 72 kHz 171
6.132 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 72 kHz 172
6.133 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 74 kHz 172
6.134 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 74 kHz 173
6.135 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 74 kHz 173
6.136 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 76 kHz 174
6.137 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 76 kHz 174
6.138 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 76 kHz 175
6.139 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 78 kHz 175
6.140 ภาพตัดการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) แบบ 3 มิติที่ความถี่ 78 kHz 176

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.141 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออก
ที่ความถี่ 78 kHz 176
6.142 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 30 kHz 179
6.143 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 30 kHz 179
6.144 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 30 kHz 180
6.145 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 32 kHz 180
6.146 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 32 kHz 181
6.147 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 32 kHz 181
6.148 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 34 kHz 182
6.149 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 34 kHz 182
6.150 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 34 kHz 183
6.151 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 36 kHz 183
6.152 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 36 kHz 184
6.153 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 36 kHz 184

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.154 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 38 kHz 185
6.155 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 38 kHz 185
6.156 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 38 kHz 186
6.157 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 40 kHz 186
6.158 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 40 kHz 187
6.159 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 40 kHz 187
6.160 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 70 kHz 188
6.161 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 70 kHz 188
6.162 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 70 kHz 189
6.163 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 72 kHz 189
6.164ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 72 kHz 190
6.165 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 72 kHz 190
6.166 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 74 kHz 191

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

6.167 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 74 kHz 191
6.168 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 74 kHz 192
6.169 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 76 kHz 192
6.170 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 76 kHz 193
6.171 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 76 kHz 193
6.172 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ
ที่ความถี่ 78 kHz 194
6.173 ภาพตัดการกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
แบบ 3 มิติที่ความถี่ 78 kHz 194
6.174 การกระจัดเชิงกล (m) ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกบริเวณ
ขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและขาออกที่ความถี่ 78 kHz 195
ก.1 ตัวอย่างปัญหาสำหรับประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต 206

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสั่นสะเทือน คือ ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุจากอิทธิพลของแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นแรงกระทำจากภายในที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration) โดยสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ซึ่งอาจจะมีความถี่เดียวหรือหลายความถี่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบ หรือเป็นแรงกระทำจากภายนอกที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration) โดยสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ และถ้าความถี่ที่มากระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (resonance) นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายมากขึ้นจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ โดยทั่วไปการสั่นสะเทือนมักเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ แต่หลีกเลี่ยงไม่ได้อย่างดีที่สุดคือพยายามจำกัดขนาดของการสั่นสะเทือนให้อยู่ภายในขอบเขตที่ยอมรับได้ (เผด็จ เผ่าละออ, 2548) แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีไปอีกขั้นหนึ่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานด้วยการสั่นสะเทือน คือ หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก (piezoelectric transformers) โดยตัวหม้อแปลงนั้นจะผลิตขึ้นมาจากไพอิโซเซรามิก (piezo ceramic) และอาศัยหลักการคัปปลิ้งทางไฟฟ้าและทางกล (electro-mechanical coupling) ซึ่งทำหน้าที่แปลงรูปพลังงานคล้ายกับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแกนเหล็กทั่วไป โดยทางด้านขาเข้าจะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลก่อน แล้วจะแปลงพลังงานกลกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งทางด้านขาออก โดยจะส่งถ่ายพลังงานทางกลในรูปแบบของการสั่น และในช่วงความถี่ที่หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้นั้นคือ ช่วงความถี่ธรรมชาติ หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีแรงดันไฟฟ้าต่างกัน โดยจะทำหน้าที่เพิ่มหรือลดแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการส่ง การจ่าย และการใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจะมีโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีขดลวด ไม่มีสนามแม่เหล็ก อัตราการขยายไฟฟ้าสูง ความต้านทานทางไฟฟ้าสูง พิสัยการทำงานที่ความถี่สูงและมีประสิทธิภาพการทำงานสูง ทำให้ช่วยลดการสิ้นเปลืองพลังงาน และทำให้ขนาดของวงจรที่นำไปใช้เล็กลงไปด้วยและข้อดีอีกประการหนึ่งของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกคือ การไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนเวลาทำงานแล้วยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานมากขึ้นเนื่องจาก หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจะไม่ทำให้เกิดควันหรือประกายไฟ ดังนั้น หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง

ในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลาย ฉะนั้นแล้วหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจะต้องมีประสิทธิภาพที่ดี เพื่อให้ระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความเสถียร (stable) และมีความน่าเชื่อถือ (reliability) สิ่งหนึ่งที่จะบอกถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้คือกำลังงานงานสูญเสีย (losses) หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิคส์ต่าง ๆ เช่น การนำไปประยุกต์ในจอแสดงผล LCD (liquid crystal display) ที่ติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ประเภทโน๊ตบุ๊คคอมพิวเตอร์ (notebook computer) ,กล้องถ่ายภาพดิจิตอล ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านั้นมีขนาดเล็กกะทัดรัดและเหมาะแก่การพกพาเพื่อความสะดวกในการใช้ นอกจากนั้นหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรอิเลคทรอนิคส์ที่ต้องใช้แรงดันไฟฟ้าสูง (high voltage power source) หรือในภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าทั่วไป เช่น ภาค DC/DC หรือ AC/DC และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นวงจรบัสลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริกได้ด้วย (สุทัศน์ อ่วมจันทร์ และ สุพาภรณ์ อิฏฐสกุล, 2544)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (integral equation) ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแม่นตรง (exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธี ที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางในอดีตที่ผ่านมาคือ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (finite difference method) ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายแก่การศึกษาและการทำความเข้าใจรวมไปถึงความสะดวก ในการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนข้อเสียของการใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องมีหลายประการเช่น ความไม่สะดวกในการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต และที่สำคัญที่สุดคือ ความยากลำบากในการประยุกต์วิธีการนี้เพื่อใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะที่ซับซ้อน สาเหตุของความยากลำบากดังกล่าวมีส่วนก่อให้เกิดวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) วิธีใหม่ที่เรียกว่า วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ (finite element method : FEM) ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใด ๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่า ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้นจึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติมาช่วยดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา

ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากจุดต่อ โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิตินิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) เพื่อประมาณโดเมนของปัญหา ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยรวมไปถึงหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกที่ต้องนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์มาใช้ในการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและจำลองผลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก ชนิดวงแหวนแบน (circular ring) โหมดการสั่นตามแนวรัศมี โดยจะมุ่งเน้นไปในส่วนของการคำนวณความถี่ธรรมชาติและการจำลองผลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกในแบบ 3 มิติ เนื่องจากงานวิจัยในอดีตนั้นจะเลือกทำการปรับค่าความถี่ในช่วง ๆ หนึ่งและแสดงผลคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกในลักษณะของกราฟเชิงเส้น ซึ่งการคำนวณความถี่ธรรมชาตินั้นทำให้ทราบถึงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกพร้อมกับการจำลองผลแบบ 3 มิติ (ระนาบ xyz) ทำให้ทราบถึงผลเฉลยที่ชัดเจนยิ่งขึ้น สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกนั้นจะอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ทางไฟฟ้าและทางกล โดยจะแสดงอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับที่สองซึ่งยากในการหาผลเฉลย ดังนั้นระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์จึงเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะที่สุดสำหรับการจำลองผลเพื่อหาผลเฉลยในงานวิจัยนี้ โดยได้วิเคราะห์ผลการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้า (electrical potential) และการกระจัดเชิงกล (mechanical displacement) ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ตลอดทั้งปริมาตรของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก เพื่อที่จะใช้ในการคำนวณค่าต่าง ๆ ในทางไฟฟ้าและทางกลที่ส่งผลต่อกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพในช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบนซึ่งหม้อแปลงชนิดนี้เหมาะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิคส์ เช่น วงจรบัสลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริก เป็นต้น สำหรับการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ของงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB™ โดยพิจารณาปัญหาแบบ 3 มิติ พร้อมแสดงผลความถี่ธรรมชาติและแสดงผลทางกราฟิกของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นโดยผลลัพธ์ของค่าความถี่ธรรมชาติและค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ จะถูกนำไปเทียบกับผลการทดลองจริง

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก

1.2.2 เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ 3 มิติ สำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและสำหรับคำนวณหาค่าการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมจำลองผลทางกราฟฟิกของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบนให้สามารถทำนายความถี่ธรรมชาติ

และคำนวณผลของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำพร้อมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

1.2.3 เพื่อศึกษาพร้อมวิเคราะห์ผลของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่ส่งผลกระทบต่อกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติและในขณะที่ใช้งานในสภาวะโหลดต่าง ๆ

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกเป็นแบบวงแหวนแบนอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์และแหล่งจ่ายไฟเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์

1.3.2 วัสดุที่ใช้ทำหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติความเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) และความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ประกอบกับหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกทำงานที่อุณหภูมิห้องคงที่ จึงยังไม่พิจารณาผลจากการขยายตัวของวัสดุ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ใช้ MATLAB™ เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์สำหรับคำนวณหาความถี่ธรรมชาติและวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน พร้อมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

1.4.2 พิจารณาหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน โหมดการทำงานแบบสั่นตามแนวรัศมี

1.4.3 วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลเป็นแบบ 3 มิติ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมการสั่นของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกในช่วงความถี่ปกติและช่วงความถี่ธรรมชาติที่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้น

1.5.2 ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับความถี่ธรรมชาติและการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้น อันมีผลต่อกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก

1.5.3 ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติและการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก

1.6 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท และ 2 ภาคผนวก ดังต่อไปนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอบเขตของงานส่วนบทอื่น ๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทาง และระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยผลจากการสำรวจสืบค้นจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

บทที่ 3 นำเสนอทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ โดยเนื้อหาประกอบไปด้วย 3 หัวข้อหลัก ๆ ได้แก่ หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก วงจรบัสลาสต์ไพอิโซอิเล็กทริก และระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ

บทที่ 4 มีเนื้อหาว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ โดยได้อธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เพื่อคำนวณหาค่าคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่กระจาย ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน

บทที่ 5 ได้นำเสนอวิธีคำนวณความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ โดยได้อธิบายทฤษฎีและขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ พร้อมแสดงผลความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

บทที่ 6 อธิบายถึงโปรแกรมที่ใช้ในการวาดรูปและสร้างกริดอัตโนมัติประกอบกับโปรแกรมการจำลองศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมแสดงผลการจำลองหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองผล รวมถึงอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล ประกอบกับการเปรียบเทียบผลเฉลยค่าศักย์ไฟฟ้าแบบ 3 มิติ จากการจำลองผลกับการทดลองจริงรวมไปถึงอธิบายทฤษฎีของกำลังงานสูญเสียพร้อมขั้นตอนต่าง ๆ ในการนำไปประยุกต์ใช้ประกอบกับแสดงวิธีการคำนวณกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกและแสดงผลประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ พร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวกประกอบด้วยเนื้อหา 2 ส่วน ได้แก่ ภาคผนวก ก. กล่าวถึงการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต โดยยกตัวอย่างการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขต ด้วยการนำหลักการการดัดแปลงระบบสมการรวม ก่อนทำการแก้ระบบสมการรวม เพื่อให้เห็นภาพการทำงานของโปรแกรมภายในงานวิจัยนี้และภาคผนวก ข. กล่าวถึงการรวบรวมผลงานที่ได้รับการเผยแพร่ของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ในขณะดำเนินการศึกษา

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ คือ การคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไฟอิโซอิเล็กทริกโดยเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติมาเป็นเครื่องมือในการแก้ปัญหา ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องดำเนินการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีที่เคยมีการใช้งานมาก่อน ผลการดำเนินงานข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตเป็นต้นมา โดยใช้ฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ ฐานข้อมูลจาก IEEE และอื่น ๆ เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์ และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำเสนอปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากเรื่องการวิเคราะห์และพิจารณาค่าความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้า การกระจัดเชิงกลและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟอิโซอิเล็กทริกตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน สามารถสรุปโดยย่อเป็นตารางได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถจัดเรียงลำดับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1990	Lerch	ได้นำวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์มาใช้ในการวิเคราะห์หม้อแปลงไฟอิโซอิเล็กทริกโดยได้ทำการเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากวิธีการทดลองจริงและวิธีคำนวณอื่น ๆ ซึ่งผลปรากฏว่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณนั้น ได้จำนวนโหมดการสั่นที่ไม่เท่ากันแต่ค่าความถี่ที่ได้นั้นมีค่าความถี่ที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
1994	Yong and Cho	ได้ศึกษาถึงวิธีการสร้างโปรแกรมอัลกอริทึมสำหรับคำนวณหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟอิโซอิเล็กทริกด้วยวิธีค่าเจาะจงโดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนท์ในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งพบว่าวิธีค่าเจาะจงจะถูกนำมาใช้หลังจากการใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการวิเคราะห์ปัญหาหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกโดยที่คำตอบของช่วงความถี่นั้นจะขึ้นอยู่กับระบบเมตริกซ์ของปัญหาถ้าระบบมีเมตริกซ์ขนาดใหญ่ก็จะได้คำตอบของช่วงความถี่สูงขึ้นตามไปด้วย
2001	Joo, Lee, and Jung	ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอัตราการขยายที่เกิดขึ้นที่ค่าโหลดและช่วงความถี่ต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์พร้อมคำนวณหากำลังงานสูญเสียด้วยวิธีวงจรสมมูลโดยที่กำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้านั้นจะมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียทางกล
2001	Tsuchiya, Kagawa, Wakatsuki, and Okamura	ได้วิเคราะห์และศึกษาหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ ซึ่งได้แสดงผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณพร้อมจำลองผลการสั่นสะเทือนที่ค่าความถี่ธรรมชาติต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าในแต่ละความถี่ธรรมชาติก็จะให้รูปร่างการสั่นที่ต่าง ๆ กันและได้แสดงผลอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติที่เกิดอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดซึ่งสามารถให้อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดถึง 150 เท่า

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2002	Rho, Joo, Lee, and Jung	ได้พิจารณาถึงรูปร่างการสั่นและระยะการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนในช่วงความถี่ต่าง ๆ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการแก้ปัญหาแล้วยังใช้วิธีวงจรสมมูลในการวิเคราะห์คำนวณหาแรงและความเร็วในการสั่นที่เกิดขึ้นรวมไปถึงกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก
2003	Joo, Lee, Rho, and Jung	ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าคงที่วัสดุที่มีผลต่อความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนโดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการคำนวณหาอัตราการขยายที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ เมื่อค่าคงที่วัสดุเปลี่ยนแปลงในช่วง ± 20% โดยผลของความถี่ที่ได้นั้นจะมีค่าค่อนข้างที่ใกล้เคียงกัน
2004	Li, Hu, and Chan	ได้วิเคราะห์หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามแนวรัศมีในรูปแบบวงแหวนโดยได้พิจารณาถึงจำนวนรอบชั้นของวงแหวนที่มีผลต่อความถี่ รูปร่างการสั่นและอัตราการขยายของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกโดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์
2005	Dalessandro and Rosato	ได้วิเคราะห์และศึกษาไพอิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ ซึ่งจากผลจะสังเกตเห็นว่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติที่ได้จากวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เป็นอย่างมากพร้อมกับแสดงผลศักย์ไฟฟ้าเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ โดยผล

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2005	Dalessandro and Rosato	ปรากฏว่าทุกความถี่ธรรมชาติของไพอิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงมาก
2006	Joo, Lee, Rho, and Jung	ได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการคำนวณหาค่าอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่าง ๆ พร้อมทั้งคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียจากการสั่นสะเทือนและค่ากำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกแล้วยังใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผลต่อค่าคงที่วัสดุและยังแสดงความร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกในแบบ 3 มิติโดยพบว่าจะมีเพียงค่าคงที่วัสดุบางค่าเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อความร้อนเพิ่มมากขึ้น
2007	Ho	ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวน โดยจะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นรวมไปถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก สำหรับการจำลองผลจะสังเกตเห็นว่ารูปร่างการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาตินั้นจะมีรูปร่างการสั่นที่ต่าง ๆ กันออกไปในแต่ละความถี่ธรรมชาติแล้วได้นำผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณมาเปรียบเทียบผลความถูกต้องโดยผลที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกันรวมไปถึงการแสดงผลอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติ โดยจะทำการปรับค่าความต้านทานโหลดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ผลปรากฏว่าเมื่อค่าความต้านโหลดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2008	Bhuyan and Hu	ได้ศึกษาหม้อแปลงไฟอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามความหนาที่ใช้ในเสารับสัญญาณ โดยได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในแบบ 2 มิติสำหรับการคำนวณหาค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยผลปรากฏว่าการกระจายของค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลาง และจะกระจายออกมาจากตำแหน่งรอบ ๆ กึ่งกลางของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงอะไรมากแต่ค่าสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วในตำแหน่งบริเวณรอบข้างของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยที่ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 50.72 kV/m และยังได้ใช้วิธีวงจรสมมูลสำหรับหากำลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลระหว่างจากการทดลองและผลจากการคำนวณพร้อมแสดงผลกำลังงานไฟฟ้าเทียบกับค่าความต้านทานโหลดต่าง ๆ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเท่ากับ 150 V ซึ่งผลปรากฏว่ากำลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นและจะสูงสุดที่ค่าความต้านทานโหลดค่าหนึ่งและกำลังงานไฟฟ้าจะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับ พร้อมกับแสดงผลกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก

จะเห็นได้ว่าจากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะปรากฏแต่งานวิจัยที่แก้ปัญหาความถี่โดยจะดำเนินการปรับค่าความถี่ไปเรื่อย ๆ แต่ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่เน้นศึกษาการคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยการพัฒนาวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ เพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลอย่างละเอียดและชัดเจนมาก่อน จากวรรณกรรม

และงานวิจัยที่ได้สรุปผ่านมา สามารถช่วยให้ผู้ที่จะดำเนินการศึกษาหรือพัฒนาเกี่ยวกับงานวิจัยนี้พอมองภาพออกอย่างกว้างได้ว่า มีคณะนักวิจัยผู้ใดได้ศึกษาสิ่งใดไปแล้วบ้าง แต่ยังไม่สามารถแยกเป็นหมวดหมู่ตามวิธีการดำเนินงานศึกษาได้อย่างชัดเจน ดังนั้นในส่วนถัดไปนี้ จึงได้ทำการเรียบเรียงและคัดสรรงานวิจัยหลัก ๆ ที่สำคัญ และมีความแตกต่างกันอย่างเด่นชัด จากหลาย ๆ ผลงานที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 2.1 โดยจะได้กล่าวถึงโดยย่อดังนี้

งานวิจัยของ Lerch (1990) ได้นำวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์มาใช้ในการวิเคราะห์พร้อมจำลองการสั่นสะเทือนของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามความหนา โดยได้กล่าวถึงการใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งจำนวนคำตอบของความถี่ธรรมชาติที่ได้จากวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์นั้นจะขึ้นอยู่กับเมตริกซ์ของระบบ สำหรับการจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนท์ที่พัฒนาขึ้นเอง เนื่องจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองนั้นใช้เวลาในการจำลองผลไม่นานมากเมื่อเทียบกับเวลาที่ใช้ในการทดลองจริงและสามารถปรับเปลี่ยนค่าคงที่วัสดุเป็นชนิดต่าง ๆ เพื่อสะดวกต่อการออกแบบ โดยได้ทำการเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากวิธีการทดลองจริงวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์และวิธีคำนวณอื่น ๆ ซึ่งผลปรากฏว่าความถี่ธรรมชาติที่คำนวณนั้น ได้จำนวนโหมดการสั่นที่ไม่เท่ากันในแต่ละวิธีแต่ค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีต่าง ๆ นั้นมีค่าความถี่ที่ใกล้เคียงกัน งานวิจัยของ Yong and Cho (1994) ได้ศึกษาถึงวิธีการสร้างโปรแกรมอัลกอริทึมสำหรับคำนวณหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกด้วยวิธีค่าเจาะจงโดยใช้ไฟไนท์อิลิเมนท์ในการวิเคราะห์ปัญหาซึ่งพบว่าวิธีค่าเจาะจงจะถูกนำมาใช้หลังจากการใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการวิเคราะห์ปัญหาหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกโดยที่คำตอบของช่วงความถี่นั้นจะขึ้นอยู่กับระบบเมตริกซ์ของปัญหาถ้าระบบมีเมตริกซ์ขนาดใหญ่ก็จะได้คำตอบของช่วงความถี่สูงขึ้นตามไปด้วย งานวิจัยของ Tsuchiya, Kagawa, Wakatsuki, and Okamura (2001) ได้วิเคราะห์และศึกษาหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ ซึ่งได้แสดงผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณพร้อมจำลองผลการสั่นสะเทือนที่ค่าความถี่ธรรมชาติต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก ซึ่งจากผลการจำลองจะสังเกตเห็นว่าในแต่ละความถี่ธรรมชาติก็จะให้รูปร่างการสั่นที่ต่าง ๆ กันออกไปและได้วิเคราะห์พร้อมแสดงผลอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติที่อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุด โดยพบว่าหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนสามารถให้อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดถึง 150 เท่า และให้ประสิทธิภาพการทำงานสูงถึง 90% เมื่อใช้งานที่สภาวะโหลดมีค่าเท่ากับ 13 kΩ งานวิจัยของ Joo, Lee, Rho, and Jung (2006) ได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการคำนวณหาค่าอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่าง ๆ พร้อมทั้งคำนวณค่ากำลังงานสูญเสียจากการสั่นสะเทือนและค่ากำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามแนวรัศมีพร้อมกับใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ดำเนินการศึกษาความสัมพันธ์ของความร้อนที่ส่งผลต่อค่าคงที่วัสดุ

และแสดงผลความร้อนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกในแบบ 3 มิติโดยพบว่าจะมีเพียงค่าคงที่วัสดุบางค่าเท่านั้นที่เปลี่ยนแปลงเมื่อความร้อนเพิ่มมากขึ้นและที่ตำแหน่งกึ่งกลางของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกจะมีความร้อนสูงสุด งานวิจัยของ Bhuyan and Hu (2008) ได้ศึกษาหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามความหนาที่ใช้ในเสารับสัญญาณ โดยพิกัดของหม้อแปลงอยู่ที่กำลังงานไฟฟ้า 3.12 mW ศักย์ไฟฟ้า 1200 V และมีพื้นที่ขนาด 2500 cm^2 ซึ่งได้ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในแบบ 2 มิติสำหรับการคำนวณหาค่าการกระจายของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณตำแหน่งต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยผลปรากฏว่าการกระจายของค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณตำแหน่งกึ่งกลาง และจะกระจายออกมาจากตำแหน่งรอบ ๆ กึ่งกลางของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลงอะไรมากแต่ค่าสนามไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วในตำแหน่งบริเวณรอบข้างของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก โดยที่ค่าสนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 50.72 kV/m และยังได้ใช้วิธีวงจรสมมูลสำหรับคำนวณหากำลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบผลระหว่างจากการทดลองและผลจากการคำนวณพร้อมแสดงผลกำลังงานไฟฟ้าเทียบกับค่าความต้านทานโหลดต่าง ๆ โดยที่ศักย์ไฟฟ้าขาเข้ามีค่าเท่ากับ 150 V ซึ่งผลปรากฏว่ากำลังงานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นและจะสูงสุดที่ค่าความต้านทานโหลดค่าหนึ่งและกำลังงานไฟฟ้าจะลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับพร้อมกับแสดงผลกำลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกที่ค่าความต้านโหลดเท่ากับ 350 Ω โดยที่ค่ากำลังงานไฟฟ้ามีค่าสูงสุดอยู่ที่ 65 μW งานวิจัยของ Joo, Lee, and Jung (2001) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของอัตราการขยายที่เกิดขึ้นที่ค่าโหลดและช่วงความถี่ต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์พร้อมกับคำนวณหากำลังงานสูญเสียด้วยวิธีวงจรสมมูลโดยพบว่ากำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้านั้นจะมีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียทางกล งานวิจัยของ Joo, Lee, Rho, and Jung (2003) ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของค่าคงที่วัสดุที่มีผลต่อความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนโดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการคำนวณหาอัตราการขยายที่ช่วงความถี่ต่าง ๆ เมื่อค่าคงที่วัสดุเปลี่ยนแปลงในช่วง ±20% โดยผลของความถี่ที่ได้นั้นจะมีค่าค่อนข้างที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าเมื่อค่าคงที่วัสดุเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยก็ไม่ส่งผลต่อความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกงานวิจัยของ Rho, Joo, Lee and Jung (2002) ได้พิจารณาถึงรูปร่างการสั่นและระยะการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโรเซนในช่วงความถี่ต่าง ๆ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ในการแก้ปัญหาแล้วยังใช้วิธีวงจรสมมูลในการวิเคราะห์คำนวณหาแรงและความเร็วในการสั่นที่เกิดขึ้นรวมไปถึงกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกโดยพบว่าแรงกับความเร็วในการสั่นจะเพิ่มขึ้นตามศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก งานวิจัยของ Dalessandro, and Rosato (2005) ได้วิเคราะห์และ

ศึกษาไพอิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ โดยใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์และคำนวณหาความถี่ธรรมชาติ โดยจะเปรียบเทียบผลจากการคำนวณและจากการทดลองจริง ซึ่งจากผลจะสังเกตเห็นว่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองจริงมีค่าใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติที่ได้จากวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์เป็นอย่างมากพร้อมกับแสดงผลศักย์ไฟฟ้าเทียบกับค่าความถี่ต่าง ๆ โดยผลปรากฏว่าทุกความถี่ธรรมชาติของไพอิโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงมากเมื่อเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ปกติแล้วยังได้แสดงผลการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ต่าง ๆ ซึ่งพบว่าทุกความถี่ที่ทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าสูงก็จะทำให้เกิดการกระจัดเชิงกลที่มีค่าสูงขึ้นตามด้วยเช่นกันและที่ความถี่ที่ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าลดลงก็จะส่งผลให้การกระจัดเชิงกลลดลงตามลำดับ งานวิจัยของLi, Hu, and Chan (2004) ได้วิเคราะห์หม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดโหมดการสั่นตามแนวรัศมีในรูปแบบวงแหวนโดยได้พิจารณาถึงจำนวนรอบชั้นของวงแหวนที่มีผลต่อความถี่ รูปร่างการสั่นและอัตราการขยายของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกโดยเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจริงกับผลจากวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์ซึ่งพบว่าจำนวนรอบชั้นของวงแหวนมีผลทำให้คุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงและงานวิจัยของ Ho (2007) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พร้อมกับวิเคราะห์คุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวน โดยกำหนดให้ชั้นรอบนอกเป็นขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและชั้นรอบในเป็นขั้วอิเล็กโทรดขาออก ซึ่งจะใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นรวมไปถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริก สำหรับการจำลองผลจะสังเกตเห็นว่ารูปร่างการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาตินั้นจะมีรูปร่างการสั่นที่ต่าง ๆ กันออกไปในแต่ละความถี่ธรรมชาติแล้วได้นำผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองจริงและจากการคำนวณมาเปรียบเทียบผลความถูกต้องโดยผลที่ได้นั้นมีความใกล้เคียงกันรวมไปถึงการแสดงผลอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติ โดยจะทำการปรับค่าความต้านทานโหลดเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ผลปรากฏว่าเมื่อค่าความต้านโหลดเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามลำดับและเมื่อค่าความต้านโหลดเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ความถี่ธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยอีกด้วย

2.3 สรุป

บทที่ 2 นี้ ได้นำเสนอรายงานผลการสืบค้นวรรณกรรมและงานวิจัยย้อนหลังที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่จะดำเนินการ จากฐานข้อมูล IEEE และอื่น ๆ ซึ่งทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัยที่เกี่ยวข้องระเบียบวิธีที่ผู้วิจัยอื่น ๆ ได้นำมาใช้ ผลการดำเนินงาน ข้อเสนอแนะต่าง ๆ จากคณะนักวิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน จากการสืบค้นปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ไม่เคยปรากฏงานวิจัยที่มุ่งเน้นการศึกษาและคำนวณถึงความถี่ธรรมชาติเพื่อทำนายช่วงการทำงานและ

แสดงผลศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นบนหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนท์แบบ 3 มิติเพื่อให้เห็นถึงการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลอย่างละเอียดและชัดเจนมาก่อน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยชิ้นนี้จึงพัฒนาขึ้นเพื่อหาแนวทางการคำนวณหาความถี่ธรรมชาติและจำลองผลของศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลรวมไปถึงการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพอิโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี