



รายงานการวิจัย

การคำนวณความถี่ธรรมชาติและกำลังงานสูญเสียของ
หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ
(Calculation of Natural Frequency and Power Loss of a Piezoelectric
Transformer by Using 3D Finite Element Method)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การคำนวณความถี่ธรรมชาติและกำลังงานสูญเสียของ
หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ
(Calculation of Natural Frequency and Power Loss of a Piezoelectric
Transformer by Using 3D Finite Element Method)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผู้ร่วมวิจัย

นายสมศักดิ์ วัชรระคุปต์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2555

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

พฤษภาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ได้สนับสนุนทุนวิจัยสำหรับโครงการนี้ โดยการวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2555



บทคัดย่อ

หม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์จะทำหน้าที่ในการเพิ่มหรือลดระดับพลังงานไฟฟ้าให้เหมาะสมกับการส่งจ่ายพลังงาน โดยในทางด้านขาเข้าของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์จะแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลก่อนแล้วจึงแปลงพลังงานกลกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งทางด้านขาออกของหม้อแปลง สำหรับการส่งจ่ายพลังงานทางกลจะส่งจ่ายในรูปแบบของการสั่นสะเทือนโดยจะทำงานในช่วงความถี่ธรรมชาติ สิ่งหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ก็คือกำลังงานสูญเสีย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติพร้อมกับการจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการสั่นสะเทือนสำหรับในการหาค่าความถี่ธรรมชาติและสมการความสัมพันธ์ระหว่างทางไฟฟ้ากับทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย โดยใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติในการหาผลเฉลย เพื่อที่จะสามารถคาดเดาช่วงความถี่ในการทำงานของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์และสามารถนำผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่ได้จากการจำลองนั้นนำไปประยุกต์ใช้ในการหาค่ากำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์รวมไปถึงการคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์โดยโปรแกรมสำหรับจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมโปรแกรมคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ใช้โปรแกรม MATLABTM ที่พัฒนาขึ้นเองพร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมด้วยการนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

ABSTRACT

A piezoelectric transformer has the main function as an ordinary transformer in order to decrease or increase power 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 research, calculation of the natural frequency together with electric potential distribution and mechanical displacement for a piezoelectric transformer is determined. Partial differential equations of mechanical vibration coupled with electromagnetic fields for a 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.

สารบัญ

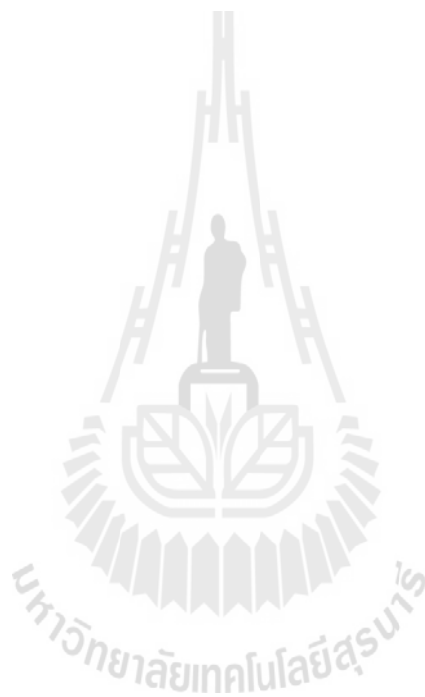
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย.....	3
บทที่ 2 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของ หม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกแบบ 3 มิติ.....	5
2.3 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์.....	8
2.3.1 การออกแบบอิลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา.....	9
2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ.....	11
2.3.3 การสร้างสมการอิลิเมนต์.....	12
2.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ.....	18
2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย.....	18
2.4 สรุป.....	20

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก.....	21
3.1 บทนำ.....	21
3.2 ความถี่ธรรมชาติ.....	21
3.3 วิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก.....	22
3.4 การคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีค่าเจาะจง.....	23
3.5 ผลการวัดความถี่ธรรมชาติและค่าศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก.....	26
3.6 การเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากการทดลองกับการคำนวณ ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์.....	28
3.7 สรุป.....	29
บทที่ 4 โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมผลการจำลองแบบ 3 มิติ.....	30
4.1 บทนำ.....	30
4.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล.....	30
4.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด.....	30
4.2.2 โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของ หม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก.....	32
4.3 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล.....	33
4.4 การคำนวณกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก.....	40
4.5 ผลการจำลองกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล.....	41
4.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก.....	45
4.7 สรุป.....	47
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุป.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต.....	49
บรรณานุกรม.....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	
การเผยแพร่ผลงานวิจัย.....	54
ประวัติผู้วิจัย.....	55



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟอิชอิล็กทริกที่ใช้ในการจำลองผล.....	19
3.1 การเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟอิชอิล็กทริกระหว่างการทดลองจริงและวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์.....	28



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 หม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ชนิดวงแหวนเบน	10
2.2 การแบ่งอิลิเมนต์และจุดต่อของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติ	10
2.3 ภาพการขยายการแบ่งอิลิเมนต์และการเชื่อมต่อของอิลิเมนต์ต่างๆ	11
3.1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบสั่นสะเทือน	23
3.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ชนิดการสั่นตามแนวรัศมีเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ	26
3.3 แผนภาพวงจรการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์	29
3.4 กราฟแสดงผลของความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์	27
4.1 ขอบเขตในการศึกษาของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์แบบ 3 มิติ	31
4.2 แผนภูมิการดำเนินงานของโปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกล ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติ	32
4.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 82 kHz	34
4.4 การกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 82 kHz	34
4.5 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 84 kHz	35
4.6 การกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 84 kHz	35
4.7 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 86 kHz	36
4.8 การกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 86 kHz	36
4.9 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 88 kHz	37
4.10 การกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 88 kHz	37
4.11 อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงความถี่ 80-90 kHz	39
4.12 ระยะเวลาการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงความถี่ 80-90 kHz	39
4.13 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 82 kHz	42
4.14 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 84 kHz	42
4.15 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 86 kHz	43
4.16 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 88 kHz	43
4.17 กำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงความถี่ 80-90 kHz	44
4.18 วงจรการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด	45
4.19 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์	46

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การสั่นสะเทือน คือ ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุจากอิทธิพลของแรงกระทำ ซึ่งอาจเป็นแรงกระทำจากภายในที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration) โดยสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายความถี่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบ หรือเป็นแรงกระทำจากภายนอกที่ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration) โดยสั่นด้วยความถี่เท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำ และถ้าความถี่ที่มากระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ (resonance) นั่นคือขนาดของการสั่นสะเทือนจะถูกขยายมากขึ้นจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้ (เผด็จ เฝ้าละออ, 2548) แต่ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีไปอีกขั้นหนึ่งซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะการทำงานด้วยการสั่นสะเทือน คือ หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric transformers) ซึ่งจะอาศัยหลักการคัปปลิงทางไฟฟ้าและทางกล (electro-mechanical coupling) โดยทางด้านขาเข้าจะแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลก่อน แล้วจะแปลงพลังงานกลกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งทางด้านขาออก ซึ่งจะส่งถ่ายพลังงานทางกลในรูปแบบของการสั่นและในช่วงความถี่ที่หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้นั้นคือ ช่วงความถี่ธรรมชาติ หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกจะมีโครงสร้างของตัวอุปกรณ์ที่ไม่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติที่สำคัญ คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ไม่มีขดลวด ไม่มีสนามแม่เหล็ก อัตราการขยายไฟฟ้าสูง ดังนั้นหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกจึงนับเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในบรรดาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายและสิ่งหนึ่งที่จะบอกถึงประสิทธิภาพของหม้อแปลงได้คือกำลังงานงานสูญเสีย (losses)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริก โดยปกติจะสามารถอธิบายได้ในรูปของสมการอนุพันธ์ (differential equation) หรือสมการอินทิกรัล (integral equation) ซึ่งเป็นไปได้ยากที่จะหาผลเฉลยแน่นอนตรง (exact solution) ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณ (approximate solution) ซึ่งวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณนั้นมีหลายวิธีและวิธีที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวางคือ วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) ซึ่งเป็นวิธีการหาผลเฉลยโดยประมาณของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) และวิธีนี้สามารถนำมาใช้กับปัญหาที่มีรูปร่างลักษณะซับซ้อนใดๆ ก็ได้ โดยสามารถจำลองรูปร่างลักษณะดั้งเดิมที่แท้จริงได้ใกล้เคียงและเที่ยงตรงกว่า ด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้งสมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้น จึงทำให้การคำนวณเชิงตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ทำให้วิธีไฟไนต์

อิลิเมนต์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดและได้รับความนิยมแพร่หลายในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานวิจัยนี้ซึ่งต้องอาศัยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติมาช่วยดำเนินการ

ระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์เริ่มวิวัฒนาการมาตั้งแต่ต้นปี ค.ศ. 1950 ปัจจุบันเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขวิธีหนึ่งที่ได้รับคามนิยมมาก เนื่องจากปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีความเร็วสูงและมีหน่วยความจำขนาดใหญ่ ทำให้สามารถคำนวณงานต่าง ๆ ด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น ในปัจจุบันได้มีการนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมแทบทุกสาขา ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะจัดแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นชิ้นส่วนย่อยที่ประกอบขึ้นจากจุดต่อ โดยเชื่อมต่อกันด้วยกริด สำหรับปัญหา 3 มิตินิยมใช้ชิ้นส่วนย่อยที่เป็นรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (linear tetrahedral) เพื่อประมาณโดเมนของปัญหา ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถหาผลเฉลยรวมไปถึงหาค่าความถี่ธรรมชาติของระบบที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี นอกจากนี้ยังง่ายต่อการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่อาจมีหลายลักษณะผสมกันอยู่ในระบบ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยหม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริกที่ต้องนำวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์มาใช้ในการดำเนินการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อศึกษาคุณสมบัติและการทำงานของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริก
- เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์ 3 มิติ สำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและสำหรับคำนวณหาค่าการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและการกระจายเชิงกลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ
- เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริก

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- หม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริกเป็นแบบวงแหวนแบนอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์และแหล่งจ่ายไฟเป็นรูปคลื่นไซน์ที่สมบูรณ์
- วัสดุที่ใช้ทำหม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริกมีคุณสมบัติความเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) และความเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) ประกอบกับหม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริกทำงานที่อุณหภูมิห้องคงที่ จึงยังไม่พิจารณาผลจากการขยายตัวของวัสดุ

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- ใช้ MATLAB™ เพื่อพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์สำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติและวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้ากับการกระจายเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีกริกชนิดวงแหวนแบน พร้อมเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจริง

- พิจารณามื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน โหมมการทำงานแบบสั้นตามแนวรัศมี
- วิธีไฟในท้อลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลเป็นแบบ 3 มิติ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

- สามารถเข้าใจถึงพฤติกรรมการสั้นของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกในช่วงความถี่ปกติและช่วงความถี่ธรรมชาติที่ส่งผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้น
- ได้หลักการและแนวความคิดสำหรับความถี่ธรรมชาติและการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้น อันมีผลต่อกำลังงานสูญเสียและประสิทธิภาพของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริก
- ได้โปรแกรมจำลองผลที่เกิดจากการพัฒนาโปรแกรมไฟในท้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้เข้ากับปัญหาจริงในการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติและการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริก

1.6 การจัดรูปเล่มรายงานการวิจัย

รายงานการวิจัยนี้ประกอบด้วย 5 บท และ 1 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความ เป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัย รวมทั้งขอบเขตของงานวิจัย ส่วนบทอื่นๆ ประกอบด้วยเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 2 มีเนื้อหาว่าด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟในท้อลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้อธิบายขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟในท้อลิเมนต์เพื่อคำนวณหาค่าคำนวณ ศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่กระจาย ณ ตำแหน่งต่างๆของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน

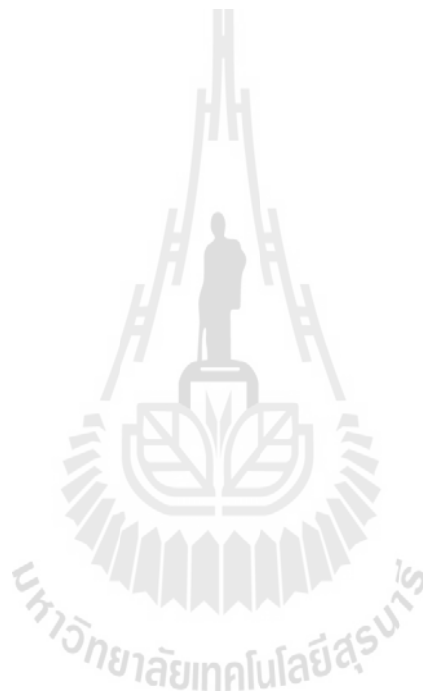
บทที่ 3 ได้นำเสนอวิธีคำนวณความถี่ธรรมชาติของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกด้วยวิธีไฟในท้อลิเมนต์ โดยได้อธิบายทฤษฎีและขั้นตอนต่างๆในการประยุกต์ใช้ พร้อมแสดงผลความถี่ธรรมชาติของมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

บทที่ 4 อธิบายถึงโปรแกรมที่ใช้ในการวาดรูปและสร้างกริดอัตโนมัติประกอบกับโปรแกรมการจำลองศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมแสดงผลการจำลองมื้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกแบบ 3 มิติ โดยกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ประยุกต์ใช้ในการจำลองผล รวมถึงอธิบายโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล ประกอบกับการเปรียบเทียบผลเฉลยค่าศักย์ไฟฟ้าแบบ 3 มิติ จาก

การจำลองผลกับการทดลองจริงรวมไปถึงอธิบายทฤษฎีของกำลังงานสูญเสียพร้อมขั้นตอนต่างๆในการนำไปประยุกต์ใช้ประกอบกับแสดงวิธีการคำนวณกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์และแสดงผลประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 5 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ส่วนภาคผนวก เป็นการกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



บทที่ 2

การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์

2.1 บทนำ

ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ (finite element method : FEM) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation : PDE) ดังเช่น สมการสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และสมการการกระจายของอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถวิเคราะห์งานที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือรูปร่างที่มีลักษณะโค้งมนได้ อีกทั้งประสิทธิภาพและการประมวลผลที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันสามารถรองรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ได้ นอกจากนี้ในบางระบบที่มีบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ห้มีพื้นที่ขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับปัญหา รวมของระบบที่เป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ก็สามารถแบ่งกริดขนาดเล็กลงหรือใหญ่ ที่สามารถเชื่อมความสัมพันธ์ของ 2 บริเวณที่มีขนาดแตกต่างกันได้อย่างครอบคลุมและอิสระอย่างเช่น งานวิจัยนี้ที่พิจารณาค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่ปรากฏขึ้นรอบตัวหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก ซึ่งพื้นที่บริเวณดังกล่าวมีลักษณะที่โค้งมนแต่ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ก็สามารถตีกริดรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติให้มีขนาดเล็กเหมาะสมเพื่อการวิเคราะห์ภายในบริเวณดังกล่าวให้ได้ค่าผลเฉลยที่มีความแม่นยำได้ ซึ่งระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ก็สามารถตีกริดให้มีขนาดใหญ่เพื่อลดปริมาณของกริดของบริเวณที่ไม่จำเป็นเพื่อช่วยย่นระยะเวลาในการหาผลเฉลยแต่ยังสามารถรักษาความแม่นยำของผลเฉลยได้เช่นกัน ซึ่งการดำเนินการแบบนี้จะก่อให้เกิดจำนวนอิลิเมนต์ที่ใช้ในระบบที่ศึกษามีจำนวนไม่มาก และสามารถคำนวณหาผลเฉลย ณ บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว รวมทั้งยังสามารถจำลองผลระบบที่มีความแตกต่างกันทางด้านวัสดุได้ ดังนั้นในบทนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกและขั้นตอนการจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ พร้อมทั้งประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่กระจายตัวรอบหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกต่อไป

2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก

แบบ 3 มิติ

การทำงานของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก ซึ่งเป็นการทำงานในลักษณะของไฟโอโซอิล็กทริกแอกชวลเอเตอร์ที่มีการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล (inverse effect) และมีการ

ทำงานในลักษณะของไพโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ที่มีเปลี่ยนจากพลังงานกลเป็นไฟฟ้า (direct effect) เพราะฉะนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกจะปรากฏในรูปแบบของสมการความสัมพันธ์ระหว่างทางไฟฟ้าและทางกล โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลได้แก่ ความเค้น (stress tensor: \mathbf{T}) ความเครียด (strain tensor: \mathbf{S}) สนามไฟฟ้า (electric field: \mathbf{E}) และความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric displacement: \mathbf{D}) สามารถแสดงด้วยสมการความสัมพันธ์ดังนี้ (Joo, Lee, and Jung, 2001)

$$\mathbf{T} = c^E \mathbf{S} - e^T \mathbf{E} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{D} = e \mathbf{S} + \epsilon^E \mathbf{E} \quad (2.2)$$

เมื่อ ϵ^E คือ เมตริกซ์สภาพยอมทางไฟฟ้าเมื่อความเครียดคงที่ (dielectric permittivity tensor at constant strain) มีค่าเท่ากับ $\epsilon_0 \epsilon_r$

ϵ_0 คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F/m

ϵ_r คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative permeability) โดยจะขึ้นกับวัสดุตัวกลาง

c^E คือ เมตริกซ์ค่าคงที่เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่ (elastic stiffness tensor at constant electric)

e คือ เมตริกซ์ค่าคงที่ความเค้นของไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric stress tensor)

ในการคำนวณหาค่าสนามไฟฟ้า \mathbf{E} สามารถดำเนินการได้โดยเลี้ยงไปคำนวณหาศักย์ไฟฟ้า Φ ก่อน โดยที่ค่าสนามไฟฟ้า \mathbf{E} สามารถคำนวณได้ด้วยเกรเดียนต์ (gradient) ศักย์ไฟฟ้า Φ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi \quad (2.3)$$

การคำนวณหาความเครียด \mathbf{S} สามารถกระทำได้โดยผ่านการกระจัดเชิงกล u แสดงได้ดังนี้

$$\mathbf{S} = \mathbf{B}u \quad (2.4)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}$$

จากกฎข้อ 2 ของนิวตัน (Newton's law) จะได้ว่า

$$\nabla \cdot \mathbf{T} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นมวลของวัสดุ (mass density) และจากการศึกษาคุณสมบัติจากกฎของเกาส์ (Gauss's law) ในรูปอนุพันธ์ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า โดยที่การกระจายประจุเชิงไฟฟ้าเป็นศูนย์พบว่า

$$(\nabla \cdot \mathbf{D}) = 0 \quad (2.6)$$

แล้วนำสมการที่ (2.5) แทนลงในสมการที่ (2.1) แล้วนำสมการที่ (2.6) แทนลงในสมการที่ (2.2) จะได้

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot (c^E \mathbf{S} - e^T \mathbf{E}) \quad (2.7)$$

$$0 = \nabla \cdot (e \mathbf{S} + \varepsilon^s \mathbf{E}) \quad (2.8)$$

นำสมการที่ (2.3) และ (2.4) แทนลงในสมการที่ (2.7) และ (2.8) จะได้

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot (c^E B \mathbf{u} + e^T \nabla \Phi) \quad (2.9)$$

$$0 = \nabla \cdot (eBu - \varepsilon^s \nabla \Phi) \quad (2.10)$$

ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะปรากฏอยู่ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) อันดับสอง สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ (2.11) และ (2.12) ดังนี้

$$c^E (\nabla \cdot Bu) - \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + e^T (\nabla \cdot \nabla \Phi) = 0 \quad (2.11)$$

$$e(\nabla \cdot Bu) - \varepsilon^s (\nabla \cdot \nabla \Phi) = 0 \quad (2.12)$$

ในกรณีปัญหาที่พิจารณามีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและมีเพียงความถี่เดียว (time harmonic) โดยสามารถแทน \mathbf{u} อยู่ในรูปของจำนวนเชิงซ้อน $\mathbf{u} = ue^{j\omega t}$ ดังนั้น

$$\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = -\omega^2 u \quad (2.13)$$

ซึ่ง ω คือความถี่เชิงมุมเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.13) จึงได้สมการเป็น

$$c^E (\nabla \cdot Bu) + \rho \omega^2 u + e^T (\nabla \cdot \nabla \Phi) = 0 \quad (2.14)$$

$$e(\nabla \cdot Bu) - \varepsilon^s (\nabla \cdot \nabla \Phi) = 0 \quad (2.15)$$

การหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของสมการอนุพันธ์ย่อย อันดับที่สองที่ปรากฏในสมการที่ (2.14) และ (2.15) ซึ่งมีความยากและซับซ้อนอย่างมากในการแก้ปัญหา ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการแก้สมการอนุพันธ์ย่อย

2.3 การคำนวณศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

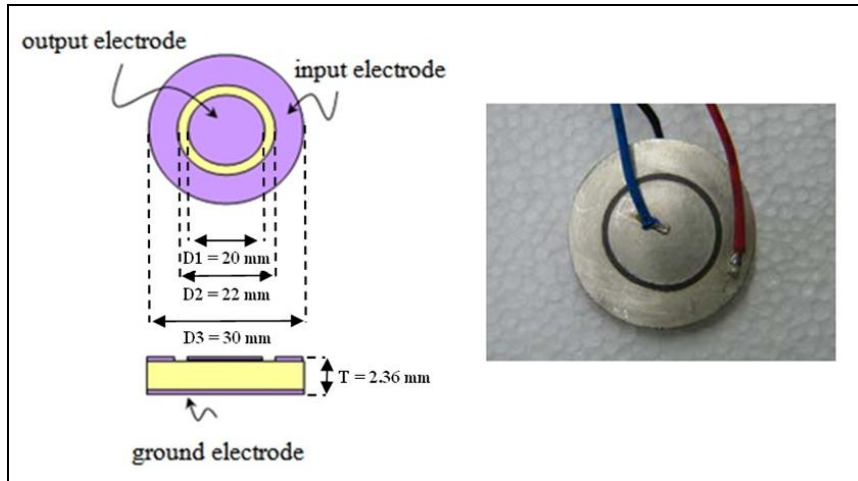
สืบเนื่องจากสมการเชิงอนุพันธ์เพื่อใช้ในการคำนวณหาศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในสมการที่ (2.14) และ (2.15) สำหรับปัญหาในรูปแบบ 3 มิติ

นั้นหาผลเฉลยแม่นยำตรงได้ยากเพราะด้วยเหตุที่ติดอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยขนาด 3 มิติ ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนการดำเนินงานต่าง ๆ ดังนี้

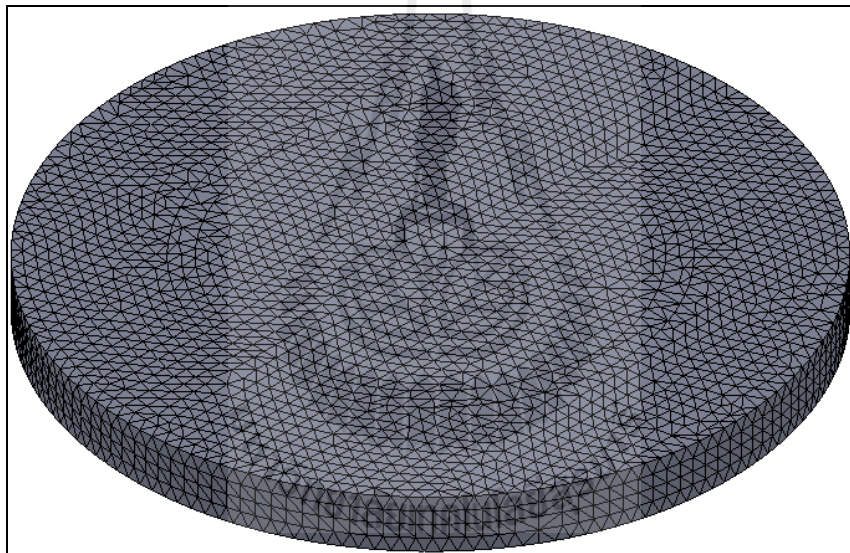
2.3.1 การออกแบบอีลิเมนต์ของพื้นที่ศึกษา

งานวิจัยนี้ได้พิจารณาหม้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน (circular ring) ซึ่งเป็นชนิดโหมดการสันตามแนวรัศมี โดยมีลักษณะเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร มีความหนา 2.36 มิลลิเมตร ด้านบนของหม้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกจะทำขั้วอิลเล็กโทรดตามลายวงแหวนแบ่งออกเป็น 2 ชั้น โดยชั้นรอบนอกจะทำหน้าที่เป็นขั้วอิลเล็กโทรดขาเข้าและชั้นรอบในเป็นขั้วอิลเล็กโทรดขาออกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร โดยมีช่องว่างระหว่างชั้น 1 มิลลิเมตร และด้านล่างจะทำขั้วอิลเล็กโทรดเต็มหน้าวงกลม ซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วอิลเล็กโทรดกราวด์ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาในรูปแบบ 3 มิติ

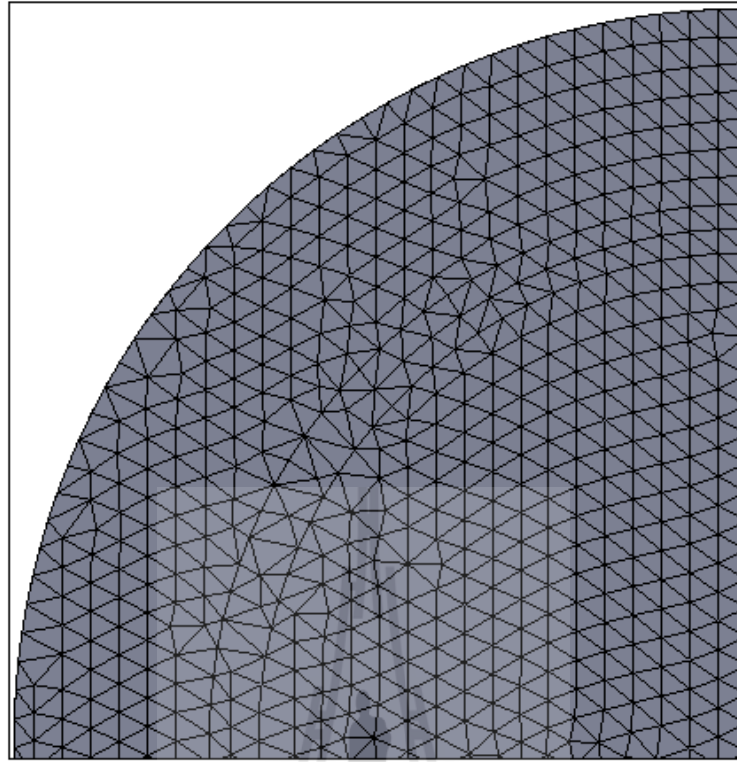
สำหรับปัญหาในแบบ 3 มิติ นั้น ขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการแบ่งปริมาตรของหม้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกออกเป็นอีลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (tetrahedral elements) โดยสมมติลักษณะการกระจายของผลลัพท์โดยประมาณ ณ ตำแหน่งใด ๆ บนอีลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งผ่านการเชื่อมต่อกันระหว่างจุดต่อและอีลิเมนต์ต่าง ๆ การออกแบบกริดของหม้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกเป็นรูปอีลิเมนต์ต่าง ๆ ได้ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solidworks โดยเมื่อกำหนดความละเอียดของกริดสูงสุดจะมีจำนวนจุดต่อและอีลิเมนต์ที่ใช้ภายในระบบอยู่เป็นจำนวน 11,607 จุดต่อและ 55,406 อีลิเมนต์ ตามลำดับ ตัวอย่างการออกแบบกริดของปัญหาในแบบ 3 มิติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.2 โดยจะแสดงให้เห็นถึงความละเอียดในการออกแบบกริดและในรูปที่ 2.3 จะแสดงภาพการขยายการแบ่งอีลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิลเล็กทริกเพื่อให้เห็นถึงการเชื่อมต่อระหว่างจุดต่ออย่างชัดเจนยิ่งขึ้น



รูปที่ 2.1 หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบน



รูปที่ 2.2 การแบ่งอีลิเมนต์และจุดต่อของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกแบบ 3 มิติ



รูปที่ 2.3 ภาพการขยายการแบ่งอิลิเมนต์และการเชื่อมต่อของอิลิเมนต์ต่างๆ

2.3.2 ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์แบบ 3 มิติ

การออกแบบอิลิเมนต์นั้นสามารถออกแบบได้หลายรูปแบบ โดยรูปแบบของอิลิเมนต์ที่แตกต่างกันนี้นำมาซึ่งการเลือกใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ที่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นในหัวข้อนี้ได้ทำการพิจารณาฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ในรูปแบบทรงสี่หน้าสี่จุดต่อและแสดงให้เห็นถึงกระบวนการดำเนินงานในการเลือกใช้ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ที่ถูกต้องตามรูปร่างของอิลิเมนต์ที่เลือกใช้

ขั้นตอนนี้เป็นทางเลือกรูปแบบของฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ โดยเมื่อสมมติให้ลักษณะการกระจายของผลเฉลยบนอิลิเมนต์เป็นแบบเชิงเส้น ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของผลเฉลย A ใดๆ ในระบบพิกัดฉาก 3 มิติ จะได้ว่า

$$A(x, y, z) = A_1N_1 + A_2N_2 + A_3N_3 + A_4N_4 \quad (2.16)$$

สมการที่ (2.16) คือฟังก์ชันรูปร่าง (shape function) ของรูปแบบทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ โดยที่ N_n , $n = 1, 2, 3, 4$ คือ ฟังก์ชันการประมาณภายในอิลิเมนต์ และ A_n , $n = 1, 2, 3, 4$ คือ ผลลัพธ์แต่ละจุดต่อ (1, 2, 3, 4) ในแต่ละอิลิเมนต์ โดย

$$N_n = \frac{I}{6V}(a_n + b_n x + c_n y + d_n z) \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, 3, 4 \quad (2.17)$$

โดยที่

$$a_1 = x_4(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_3(y_4 z_2 - y_2 z_4) + x_2(y_3 z_4 - y_4 z_3)$$

$$a_2 = x_4(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_4 - y_4 z_1) + x_1(y_4 z_3 - y_3 z_4)$$

$$a_3 = x_4(y_1 z_2 - y_2 z_1) + x_2(y_4 z_1 - y_1 z_4) + x_1(y_2 z_4 - y_4 z_2)$$

$$a_4 = x_3(y_2 z_1 - y_1 z_2) + x_2(y_1 z_3 - y_3 z_1) + x_1(y_3 z_2 - y_2 z_3)$$

$$b_1 = y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3)$$

$$b_2 = y_4(z_1 - z_3) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1)$$

$$b_3 = y_4(z_2 - z_1) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2)$$

$$b_4 = y_3(z_1 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1)$$

$$c_1 = x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2)$$

$$c_2 = x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3)$$

$$c_3 = x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1)$$

$$c_4 = x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2)$$

$$d_1 = x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3)$$

$$d_2 = x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1)$$

$$d_3 = x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2)$$

$$d_4 = x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1)$$

และ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละอิลิเมนต์ ซึ่งหาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (2.18)$$

2.3.3 การสร้างสมการอิลิเมนต์

ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของวิธีไฟไนต์อิลิเมนต์ ซึ่งเป็นการสร้างสมการของอิลิเมนต์ให้สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาต่าง ๆ สำหรับปัญหาของ

ระบบ 3 มิติ ทางระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จะต้องจัดสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหาให้อยู่ในรูปแบบทั่วไป ดังแสดงในสมการที่ (2.14) และ (2.15) ก่อนที่จะเข้าสู่การสร้างสมการของเอลิเมนต์ดังต่อไปนี้ (Yong, and Cho, 1994)

$$\begin{bmatrix} (K+M)_{11} & (K+M)_{12} \\ (K+M)_{21} & (K+M)_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

โดยที่ $[U]$ และ $[\Phi]$ คือ ค่าการกระจัดเชิงกลและค่าศักย์ไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวที่ไม่ทราบค่าในแต่ละจุดต่อ ซึ่งสมการที่ (2.19) นี้ สามารถเขียนขึ้นได้โดยตรงจากสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการประยุกต์วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ซึ่งถูกจัดให้เป็นวิธีที่นิยมที่สุดในการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ ในปัจจุบัน และวิธีนี้ยังสามารถจำแนกแยกย่อยออกไปได้อีกเช่น ใช้วิธีของกาลเลอร์คิน (Galerkin) ซึ่งเมตริกซ์ที่เกิดขึ้นจากวิธีนี้ ปกติแล้วจะมีความสมมาตร จึงก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากในการเขียน โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้กับปัญหามหาศาล

การสร้างสมการของเอลิเมนต์ด้วยการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างมีหลักการดังนี้คือ หากแทนผลเฉลยโดยประมาณลงในสมการที่ (2.14) และ (2.15) จะไม่ได้ค่าเท่ากับศูนย์ แต่จะมีค่าเท่ากับ R ดังแสดงด้วยสมการที่ (2.20) และ (2.21)

$$c^E (\nabla \cdot Bu) + \rho \omega^2 u + e^T (\nabla \cdot \nabla \Phi) = R \quad (2.20)$$

$$e(\nabla \cdot Bu) - \varepsilon^s (\nabla \cdot \nabla \Phi) = R \quad (2.21)$$

ซึ่ง R เรียกว่าเศษตกค้าง (residual) เป็นค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ผลเฉลยโดยประมาณ ซึ่งไม่ใช่ผลเฉลยแน่นอนตรงของปัญหา เศษตกค้าง R ที่เกิดขึ้นควรมีค่าต่ำที่สุด เพื่อผลเฉลยโดยประมาณที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่เที่ยงตรงมากที่สุด และในงานวิจัยนี้ วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างได้ใช้วิธีของกาลเลอร์คิน (Preston, Reece, and Sangha, 1988) และ (Kim, Kwon, and Park, 1999) วิธีนี้สามารถกระทำได้โดยการคูณเศษตกค้าง R ด้วยฟังก์ชันน้ำหนัก (weighting function: W) แล้วอินทิเกรตรอบปริมาตรและกำหนดผลที่ได้ให้เท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\int_v W_n R dv = 0 \quad , n = 1, 2, 3, 4 \quad (2.22)$$

งานวิจัยนี้เลือกกริดรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อในการคำนวณ ดังนั้นจุดที่ไม่ทราบค่าจะมี 4 จุดซึ่งได้แก่จุดต่อทั้งสี่ ดังนั้นจึงต้องการ 4 สมการในการแก้หาจุดที่ไม่ทราบค่า นั้นหมายถึงในสมการที่ (2.19) จะต้องมีค่า $n = 1, 2, 3, 4$ และโดยปกติจะเลือก $W_n = N_n$ (Lerch, 1990) ซึ่งเรียกว่า บับ โนฟ-กาเลอร์กิน (Bubnov-Galerkin) ดังนั้นเมื่อแทนค่า R ด้วยสมการ (2.20) และ (2.21) ลงในสมการที่ (2.22) จะได้

$$\int_v \nabla \cdot N_n (c^E Bu) dv + \int_v N_n (\rho \omega^2 u) dv + \int_v \nabla \cdot N_n (e^T \nabla \Phi) dv = 0 \quad (2.23)$$

$$\int_v \nabla \cdot N_n (eBu) dv - \int_v \nabla \cdot N_n (\varepsilon^s \nabla \Phi) dv = 0 \quad (2.24)$$

และจากสมการที่ (2.3) เขียนใหม่จะได้ (Safari, and Akdogan, 2008)

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi = -[\nabla N_1 \quad \nabla N_2 \quad \dots \quad \nabla N_n] \Phi \quad (2.25)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจุดต่อที่อยู่ในอิเลเมนต์และจากสมการที่ (2.25) สามารถเขียนเป็น

$$\mathbf{E} = -[B_\Phi] \Phi \quad (2.26)$$

โดยที่

$$[B_\Phi] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_n}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\text{และ} \quad \frac{\partial N_n}{\partial x} = \frac{b_n}{6V} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial N_n}{\partial y} = \frac{c_n}{6V} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial N_n}{\partial z} = \frac{d_n}{6V} \quad (2.30)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการที่ (2.31) ได้ดังนี้

$$[B_\phi] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 & b_3 & b_4 \\ c_1 & c_2 & c_3 & c_4 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \end{bmatrix}_{3 \times 4} \quad (2.31)$$

และจากสมการที่ (2.4) สามารถเขียนในรูปใหม่แสดงได้ดังนี้

$$S = [B]\mu = [B_u]U \quad (2.32)$$

โดยที่

$$[B_u] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_n}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_n}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_n}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial N_n}{\partial z} & \frac{\partial z}{\partial N_n} \\ \frac{\partial N_n}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial z}{\partial N_n} & \frac{\partial N_n}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial N_n}{\partial y} & \frac{\partial N_n}{\partial x} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

เมื่อ $n = 1, 2, 3, 4$ และแทนสมการที่ (2.28), (2.29) และ (2.30) ในสมการที่ (2.33) ได้ดังนี้

$$[B_u] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 & b_4 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & d_1 & 0 & 0 & d_2 & 0 & 0 & d_3 & 0 & 0 & d_4 \\ 0 & d_1 & c_1 & 0 & d_2 & c_2 & 0 & d_3 & c_3 & 0 & d_4 & c_4 \\ d_1 & 0 & b_1 & d_2 & 0 & b_2 & d_3 & 0 & b_3 & d_4 & 0 & b_4 \\ c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & b_3 & 0 & c_4 & b_4 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 12} \quad (2.34)$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ (2.23) และ (2.24) จะได้

$$\int_v \frac{1}{36V^2} [B_u]^T [c^E] [B_u] U dv + \int_v \rho \omega^2 [N]^T [N] U dv + \int_v \frac{1}{36V^2} [B_u]^T [e^T] [B_\phi] \Phi dv = 0 \quad (2.35)$$

$$\int_v \frac{1}{36V^2} [B_\Phi]^T [e] [B_u] U dv - \int_v \frac{1}{36V^2} [B_\Phi]^T [\varepsilon^s] [B_\Phi] \Phi dv = 0 \quad (2.36)$$

โดยเมื่อดำเนินการอินทิเกรตสมบรูณ์แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็นสมการเชิงเส้น ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้ (Yong, 1993)

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [K_{u\Phi}] \\ [K_{u\Phi}]^T & [K_{\Phi\Phi}] \end{bmatrix}_{16 \times 16} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix}_{16 \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{16 \times 1} \quad (2.37)$$

โดยที่

$$[K_{uu}]_{12 \times 12} = \frac{1}{36V^2} [B_u]^T [c^E] [B_u] \int_v dv = \frac{1}{36V} [B_u]^T [c^E] [B_u] \quad (2.38)$$

$$[K_{u\Phi}]_{12 \times 4} = \frac{1}{36V^2} [B_u]^T [e]^T [B_\Phi] \int_v dv = \frac{1}{36V} [B_u]^T [e]^T [B_\Phi] \quad (2.39)$$

$$[K_{\Phi\Phi}]_{4 \times 4} = \frac{1}{36V^2} [B_\Phi]^T [-\varepsilon^s] [B_\Phi] \int_v dv = \frac{1}{36V} [B_\Phi]^T [-\varepsilon^s] [B_\Phi] \quad (2.40)$$

$$[M]_{12 \times 12} = \int_v (-\rho) [N]^T [N] dv \quad (2.41)$$

จากสมการที่ (2.41) ถ้ากำหนดให้ ρ เป็นค่าคงที่ภายในแต่ละอิเลเมนต์จะได้

$$[M]_{12 \times 12} = (-\rho) \int_v \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ N_{12} \end{bmatrix}_{12 \times 1} [N_1 \ N_2 \ N_3 \ \cdot \ \cdot \ N_{12}]_{1 \times 12} dv$$

$$[M]_{12 \times 12} = (-\rho) \int_v \begin{bmatrix} N_1^2 & N_1 N_2 & N_1 N_3 & \cdot & \cdot & N_1 N_{12} \\ N_2 N_1 & N_2^2 & N_2 N_3 & \cdot & \cdot & N_2 N_{12} \\ N_3 N_1 & N_3 N_2 & N_3^2 & \cdot & \cdot & N_3 N_{12} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ N_{12} N_1 & N_{12} N_2 & N_{12} N_3 & \cdot & \cdot & N_{12}^2 \end{bmatrix}_{12 \times 12} dv \quad (2.42)$$

ใช้สูตรเชิงตัวประกอบ (factorial formula) ในการประมาณการอินทิเกรตตลอดปริมาตรดังสมการที่ (2.43) เพราะเนื่องจาก $N_1 = L_1$, $N_2 = L_2$, $N_3 = L_3, \dots, N_{12} = L_{12}$ จะได้

$$\int_v L_1^a L_2^b L_3^c, \dots, L_{12}^l dv = \frac{a!b!c!, \dots, l!}{(a+b+c, \dots, l+3)!} 6V \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.42) สามารถพิจารณาแยกเป็น 2 กรณี คือ $L_n = L_m$ และ $L_n \neq L_m$ ในกรณี $L_n = L_m$ จะขอยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a = 2$ และนอกนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.43) จะได้

$$\begin{aligned} \int_v L_1^2 dv &= \frac{2!0!0!, \dots, 0!}{(2+0+0, \dots, 0+3)!} 6V \\ &= \frac{12V}{5!} = \frac{2V}{20} \end{aligned} \quad (2.44)$$

ในกรณีที่ $L_n \neq L_m$ จะขอยกตัวอย่างการพิจารณาจุดต่อที่ 1 และ 2 ของรูปทรงสี่หน้าจะได้ $a = b = 1$ และนอกนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นจากสมการที่ (2.43) จะได้

$$\begin{aligned} \int_v L_1^1 L_2^1 dv &= \frac{1!1!0!, \dots, 0!}{(1+1+0, \dots, 0+3)!} 6V \\ &= \frac{6V}{5!} = \frac{V}{20} \end{aligned} \quad (2.45)$$

ที่จุดต่ออื่น ๆ ของรูปทรงสี่หน้าก็พิจารณาในลักษณะเช่นเดียวกัน ดังนั้นจากสมการที่ (2.42) จะได้

$$[M]_{12 \times 12} = \frac{(-\rho)V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & . & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & . & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}_{12 \times 12} \quad (2.46)$$

2.3.4 การประกอบสมการอิลิเมนต์ขึ้นเป็นระบบ

ขั้นตอนนี้เป็นการนำสมการของแต่ละอิลิเมนต์ที่ได้มาประกอบกันเป็นสมการรวมของระบบ โดยจากขั้นตอนในหัวข้อที่ 2.3.1 หากเราแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นอิลิเมนต์ย่อยซึ่งประกอบด้วย n จุดต่อ จะก่อให้เกิดระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการย่อยจำนวนทั้งสิ้น $4 \times n$ สมการ ดังนั้นจึงได้สมการรวมสำหรับการจำลองผลค่าของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของงานวิจัยนี้ในรูปสมการเชิงเส้นคือ

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2[M] & [K_{u\Phi}] \\ [K_{u\Phi}]^T & [K_{\Phi\Phi}] \end{bmatrix}_{4n \times 4n} \begin{bmatrix} U \\ \Phi \end{bmatrix}_{4n \times 1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}_{4n \times 1} \quad (2.47)$$

- เมื่อ K, M คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของระบบรวม
 U คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งจุดต่อต่าง ๆ
 Φ คือ ค่าการกระจัดเชิงกลที่ไม่ทราบค่า ณ ตำแหน่งจุดต่อต่าง ๆ

2.3.5 การประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตพร้อมหาค่าผลเฉลย

สำหรับขั้นตอนการประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมดอยู่ 2 บริเวณที่กำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต คือ ศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าและศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรดของกราวด์ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณดังกล่าวและค่าคงที่วัสดุต่างๆของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริก PZT-840 สามารถสรุปเป็นตารางที่ 2.1 ดังนี้ (Buchanan, and Peddieson, 1989) และ (Henderson, 2002)

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของหม้อแปลงไฟโโซอิลเล็กทริกที่ใช้ในการจำลองผล

พารามิเตอร์	ค่า
ศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิลเล็กทริกขาเข้า	50 V
ศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิลเล็กทริกของกราวด์	0 V
เมตริกซ์ค่าคงที่เมื่อสนามไฟฟ้าคงที่ (c^E)	$\begin{bmatrix} 13.9 & 7.78 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 13.9 & 7.43 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.56 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.06 \end{bmatrix} \times 10^{10} N/m^2$
เมตริกซ์สภาพยอมทางไฟฟ้าเมื่อความเครียดคงที่ (ϵ)	$\begin{bmatrix} 13.05 & 0 & 0 \\ 0 & 13.05 & 0 \\ 0 & 0 & 11.51 \end{bmatrix} \times 10^{-9} F/m^2$
เมตริกซ์ค่าคงที่ความเค้นของไฟโโซอิลเล็กทริก (e)	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 12.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 12.7 & 0 & 0 \\ -5.2 & -5.2 & 15.1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C/m^2$
สภาพยอมทางไฟฟ้าของสูญญากาศ (ϵ_0)	$8.854 \times 10^{-12} F/m$
ความหนาแน่นมวลของวัสดุ (ρ)	$7600 Kg/m^3$

หลังจากประยุกต์เงื่อนไขค่าขอบเขตให้กับระบบแล้ว ก็ดำเนินการหาค่าศักย์ไฟฟ้า และการกระจัดเชิงกล ณ จุดต่อต่าง ๆ ของระบบสมการเชิงเส้นต่อไป

2.4 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์สำหรับคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะปรากฏอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในแบบ 3 มิติเพื่อคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกล ได้ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตค่างของกาลอ์คิน โดยรายละเอียดต่าง ๆ ในบทนี้ จะนำไปสู่การพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้เป็นโปรแกรมจำลองผลระบบที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป



บทที่ 3

ความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์

3.1 บทนำ

หม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าที่มีศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน ซึ่งมีหลักการทำงานโดยทางด้านขาเข้าจะแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลก่อน แล้วจึงแปลงพลังงานกลที่ได้มานั้นกลับเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งทางด้านขาออก ซึ่งจะส่งถ่ายพลังงานทางกลในรูปแบบของการสั่นสะเทือน โดยจะมีช่วงการทำงานที่เรียกว่า ช่วงความถี่ธรรมชาติ เพราะฉะนั้นแล้วจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงความถี่ธรรมชาติ โดยในบทที่ 3 นี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ด้วยวิธีค่าเจาะจง เนื่องจากวิธีค่าเจาะจงนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการหาค่าความถี่ธรรมชาติแล้วยังเป็นวิธีที่สามารถใช้ร่วมกับวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ได้ สำหรับการคำนวณจะใช้โปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเอง ประกอบกับเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และผลความถี่ธรรมชาติที่จากการทดสอบจริงเพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรแกรม

3.2 ความถี่ธรรมชาติ

การสั่นสะเทือน คือ ปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของวัตถุจากอิทธิพลของแรงที่มีลักษณะเป็นคาบกระทำต่อวัตถุ ซึ่งวัตถุส่วนใหญ่แล้วจะมีการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นอยู่เสมอ และในบางครั้งก็ไม่สามารถหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสั่นสะเทือนขึ้นได้ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้น อาจทำให้ชิ้นงานเกิดการล้า (fatigue) แล้วการสั่นสะเทือนดังกล่าวนั้นอาจจะมีรูปร่างที่แน่นอนหรือไม่แน่นอนก็ได้ ซึ่งปกติแล้วการสั่นสะเทือนสามารถแบ่งออกเป็นสองกรณีด้วยกัน โดยการสั่นสะเทือนอย่างแรกนั้นอาจจะเป็นแรงกระทำมาจากภายในที่เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำกับวัตถุเพียงครั้งเดียวแล้วปล่อยให้วัตถุเคลื่อนไปอย่างไร้สรีระด้วยแรงที่มีอยู่ภายในวัตถุ ซึ่งเรียกการสั่นสะเทือนแบบนี้ว่า การสั่นสะเทือนแบบอิสระ (free vibration) โดยจะสั่นสะเทือนด้วยความถี่ธรรมชาติ (natural frequency) ซึ่งอาจจะมีค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของระบบ และสำหรับกรณีที่มีแรงกระทำที่มาจากภายนอกมากระทำกับวัตถุในหลายๆครั้งจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบบังคับ (forced vibration) โดยการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นจะสั่นสะเทือนด้วยความถี่ที่เท่ากับความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำและทำให้ระบบเกิดการสั่นสะเทือนกลับไปกลับมา ถ้าความถี่ของแรงภายนอกที่มากระทำเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ จะส่งผลทำให้แอมพลิจูด (amplitude) การสั่นสะเทือนของวัตถุมีมากกว่าปกติ โดยเรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า การสั่นพ้อง

หรือเรโซแนนซ์ (resonance) ซึ่งทำให้ขนาดของการสั่นสะเทือนนั้นเกิดการขยายมากขึ้นจนทำให้เกิดความเสียหายแก่ระบบได้

3.3 วิธีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริก

ตามปกติวัตถุทุกชนิดที่สั่นสะเทือนหรือโยกตัวได้ จะมีความถี่ธรรมชาติของตัวเองอยู่แล้ว และจะสั่นสะเทือนด้วยความถี่เฉพาะตัวที่ความถี่นี้เท่านั้น ซึ่งเมื่อมีการถ่ายแรงที่มากพอเข้าไปที่วัตถุๆ นั้นก็จะสั่นสะเทือนด้วยความถี่ธรรมชาติของตนเองออกมาโดยประกอบกับที่หม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกนั้นทำงานด้วยการสั่นสะเทือน ดังนั้นจึงต้องศึกษาเกี่ยวกับความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะสามารถทำนายช่วงการทำงานสำหรับการหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกในงานวิจัยนี้จะมี 2 วิธีหลักๆ ดังต่อไปนี้

1. วิธีแรกสามารถหาได้จากการวัดอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกเมื่อทำการทดสอบจริง โดยจะปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้กับทางด้านศักย์ไฟฟ้าขาเข้าและมีความต้านทานมาต่อขนานกับหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกทางด้านศักย์ไฟฟ้าขาออก แล้วจะสังเกตถึงอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริก ซึ่งถ้าอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงมากขึ้นและลดลงจนกระทั่ง แสดงว่าช่วงความถี่ที่ทำให้อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงมากขึ้นและลดลง นั่นคือ ช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริก โดยจะอธิบายวิธีการทดลองไว้อย่างละเอียดในหัวข้อที่ 3.5

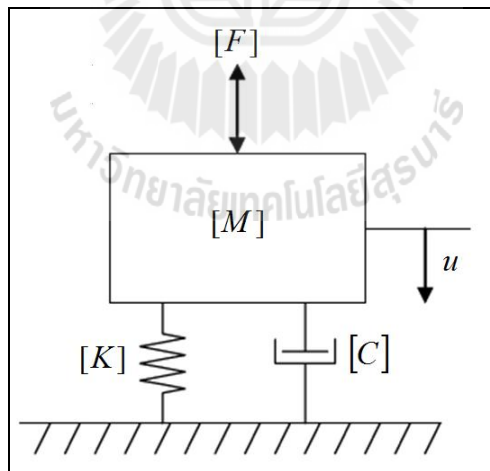
2. วิธีที่สองในการหาค่าความถี่ธรรมชาตินั้นเป็นการหาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งถ้าเป็นในกรณีทีระบบเป็นแบบง่าย ๆ ก็จะสามารถคำนวณได้แบบไม่ซับซ้อน แต่ถ้าเป็นในกรณีทีระบบมีความซับซ้อนมากๆ การดำเนินการจะทำได้ค่อนข้างยากเพราะต้องคำนวณระบบที่เป็นเมตริกซ์ โดยในปัจจุบันได้มีวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ที่สามารถคำนวณหาความถี่ธรรมชาติของระบบที่เป็นเมตริกซ์ได้ ในการจำลองหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกนั้นจะประยุกต์ใช้วิธีค่าเจาะจง (eigenvalue) เนื่องจากวิธีค่าเจาะจงนี้สามารถใช้ร่วมกับวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ได้

วิธีค่าเจาะจง (eigenvalue technique) จะศึกษาการเกิดปรากฏการณ์การสั่นพ้อง โดยใช้วิธีแปลงระบบให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในที่นี้จะใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในการหาค่าความถี่ธรรมชาติ โดยการนำค่าคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกมาจัดรูปแบบสมการแบบเมตริกซ์ แล้วแก้สมการแบบวิธีค่าเจาะจงเพื่อหาความถี่ธรรมชาติที่จะทำให้หม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกนั้นสามารถสั่นสะเทือนและทำงานได้ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสำหรับการหาค่าความถี่ธรรมชาติ แต่มีข้อเสียคือต้องมีความชำนาญในการใช้โปรแกรมทางคณิตศาสตร์และต้องการข้อมูลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกที่มีความละเอียดและมีความซับซ้อนในการแก้สมการ

ที่เป็นแบบเมตริกซ์เพื่อหาค่าเจาะจงและในการพิจารณาไม่สามารถนำผลของความไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ในระบบมาใช้ได้

3.4 การคำนวณความถี่ธรรมชาติด้วยวิธีค่าเจาะจง

ในการศึกษาเรื่องการสั่นสะเทือนทางวิศวกรรมมักจะเกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อแทนสิ่งที่มีอยู่จริงทางกายภาพ โดยสร้างแบบจำลองที่มีพฤติกรรมคล้ายกับระบบจริงให้มากที่สุด เพื่อให้สมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้นั้นสามารถแทนการสั่นสะเทือนของระบบได้อย่างถูกต้องดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งหลังจากที่ได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการหาสมการการเคลื่อนที่ของแบบจำลองที่สร้างขึ้นมา หลังจากนั้นจึงทำการหาผลเฉลยของสมการการเคลื่อนที่แล้วนำผลที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อหาความถี่ธรรมชาติรวมไปถึงคุณลักษณะต่างๆของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยนอกจากนี้แล้วยังสามารถนำแบบจำลองของระบบไปพัฒนาสำหรับแก้ไขปัญหาในรูปแบบที่คล้ายกันได้ ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนที่ที่สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ ดังแสดงในสมการที่ (3.1) ให้เป็นการแก้ปัญหาค่าเจาะจง (eigenvalue problem) แล้วสามารถนำค่าที่ได้ไปหาเวกเตอร์เจาะจง (eigenvector) เพื่อใช้ในการศึกษารูปแบบของการสั่นสะเทือนได้



รูปที่ 3.1 แบบจำลองทางกายภาพของระบบสั่นสะเทือน

รูปที่ 3.1 เป็นรูปแบบจำลองทางกายภาพของการสั่นสะเทือน โดยสำหรับการหาความถี่ธรรมชาติของระบบนี้จะปรับให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการสั่นสะเทือนดังสมการที่ (3.1)

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [F] \quad (3.1)$$

โดยที่ $[M]$ คือ เมตริกซ์มวล (mass matrix)
 $[C]$ คือ เมตริกซ์ความหน่วง (damping matrix)
 $[K]$ คือ เมตริกซ์ความยืดหยุ่น (stiffness matrix)
 $[F]$ คือ แรงที่มากระทำ
 \ddot{u} คือ ความเร่ง
 \dot{u} คือ ความเร็ว
 u คือ การกระจัดเชิงกล

โดยจากสมการ (3.1) นั้นสามารถลดรูปสมการลงได้ในกรณีที่ไม่คิดความหน่วงของวัตถุ และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ โดยสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของระบบเมื่อลดรูปแล้วจะอยู่ในรูปแบบจำลองดังนี้

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (3.2)$$

สำหรับปัญหาที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา สามารถแทน u ให้อยู่ในรูปแบบของ $\{u\} = \{\phi\} \sin \omega t$ เมื่อ $\{\phi\}$ คือเวกเตอร์ค่าแอมพลิจูดและ ω คือความถี่เชิงมุม เมื่อพิจารณาปัญหาค่าแอมพลิจูดจะมีสมการเป็น

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (3.3)$$

การแก้ปัญหาค่าแอมพลิจูดนั้นมีหลายวิธีแต่ในที่นี้จะใช้วิธีเชิงธาตุมูล (elementary method) สามารถเขียนในรูปแบบมาตรฐานโดยกำหนดให้ $\lambda = \omega^2$ จะได้

$$([K] - \lambda[M])\{\phi\} = 0 \quad (3.4)$$

หลังจากนั้นคูณด้วย $[M]^{-1}$ จะได้

$$[M]^{-1}([K] - \lambda[M])\{\phi\} = 0 \quad (3.5)$$

$$([M]^{-1}[K] - \lambda[M]^{-1}[M])\{\phi\} = 0$$

$$([M]^{-1}[K] - \lambda[I])\{\phi\} = 0$$

เมื่อ $[I]$ เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix) และกำหนดให้ $[A] = [M]^{-1}[K]$ จะได้

$$([A] - \lambda[I])\{\phi\} = 0 \text{ หรือ } \lambda[I]\{\phi\} = [A]\{\phi\} \quad (3.6)$$

เนื่องจาก $\{\phi\}$ เป็นผลเฉลยที่ทำให้สมการมีได้หลายคำตอบ ดังนั้นเรียกปัญหาแบบนี้ว่า ปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐานซึ่งคือตัวกำหนดของสมการลักษณะเฉพาะ โดยจะต้องมีค่าเป็นศูนย์และค่าเจาะจงสามารถหาได้ดังนี้

$$\det([A] - \lambda[I]) = 0 \quad (3.7)$$

สมการ (3.7) เรียกว่า สมการลักษณะเฉพาะหรือสมการความถี่และเรียกแต่ละรากของ λ จากสมการความถี่ว่า ค่าเจาะจง เมื่อรู้ค่าเจาะจงแต่ละค่าก็จะสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติแต่ละค่าที่สอดคล้องกับค่าเจาะจงได้ โดยหาก $\lambda = \omega^2$ และเมื่อแทนค่าเจาะจงลงในสมการ $([A] - \lambda[I])\{\phi\} = 0$ ก็จะได้เวกเตอร์เจาะจง

หลังจากนั้นนำหลักการดังกล่าวมาใช้กับหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก โดยการนำแบบจำลองของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกที่ได้จากวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์มาประยุกต์ใช้กับวิธีเชิงธาตุสำหรับการหาค่าเจาะจงโดยที่เมตริกซ์ความยืดหยุ่น $[K]$ และเมตริกซ์มวล $[M]$ ในสมการ (3.3) คือ เมตริกซ์ความยืดหยุ่นของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก $[K_{uu}]$ และเมตริกซ์มวลของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก $[M]$ ในแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกจากสมการที่ (2.37) ในบทที่ 2 แล้วนำสมการดังกล่าวมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของสมการสำหรับหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้

$$\det([K_{uu}] - \omega^2[M]) = 0 \quad (3.7)$$

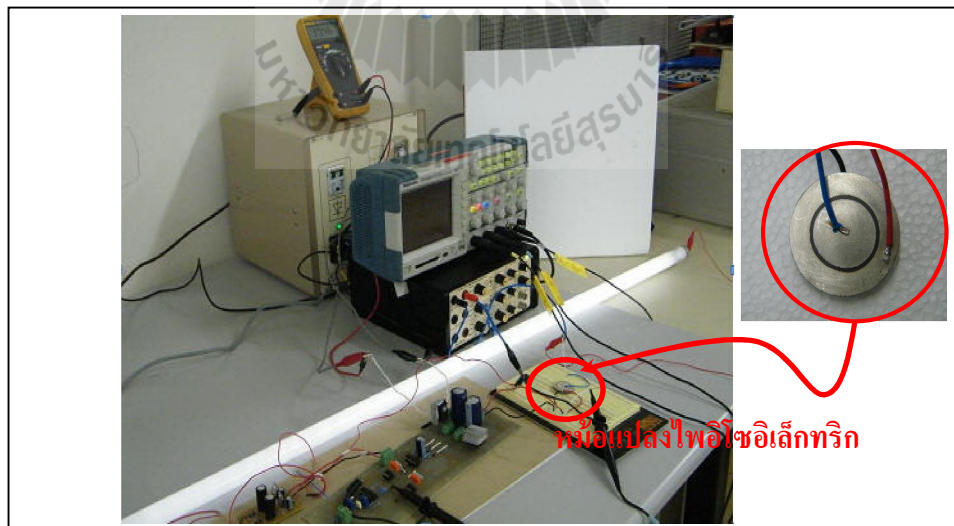
โดยที่ ω คือค่าแอมพลิจูดและสามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ดังนี้

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (3.8)$$

เมื่อ f_i คือ ความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกและ i คือลำดับของความถี่ธรรมชาติ

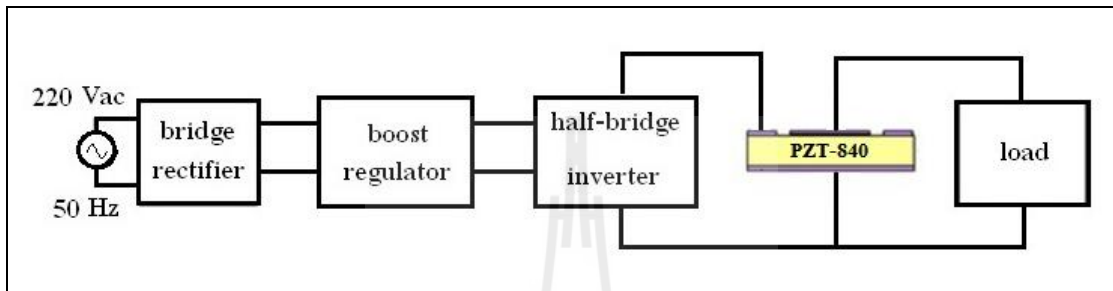
3.5 ผลการวัดความถี่ธรรมชาติและค่าศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกชนิดวงแหวนแบบโหมคการสันตามแนวรัศมี สำหรับการทดสอบเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกนั้น สามารถดำเนินการได้จากการให้แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้ากับหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกอย่างคงที่ โดยมีความต้านทานต่อขนานกับหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกทางด้านขาออก แล้วทำการปรับค่าความถี่ที่ป้อนให้กับทางด้านขาเข้าในช่วงความถี่ระหว่าง 0-100 kHz หลังจากนั้นทำการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้า ประกอบกับวัดแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริก แล้วจึงหาอัตราส่วนระหว่างค่าแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้า โดยที่แรงดันไฟฟ้าทางด้านขาเข้านั้นจะมีค่าคงที่อยู่เสมอ สำหรับวิธีการทดสอบเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2

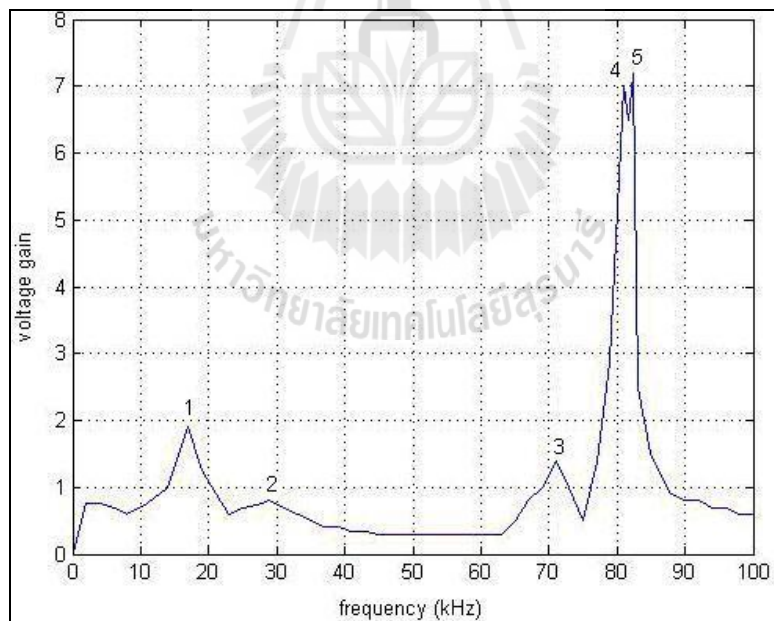


รูปที่ 3.2 การทดสอบหม้อแปลงไฟโอโซอิล็กทริกชนิดการสันตามแนวรัศมีเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ

และสำหรับวงจรการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาตินั้นสามารถแสดงได้เป็นแผนภาพดังรูปที่ 3.3 โดยในรูปที่ 3.3 นั้นจะประกอบไปด้วย 1.แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 2.วงจรเรียงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง 3.วงจรควบคุมความถี่ปฏิบัติการและภาคควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการขับมอเตอร์รวมกัน 4.วงจรอินเวอร์เตอร์แบบครึ่งคลื่น 5.หม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกชนิดวงแหวนแบบโหมดการสั้นตามแนวรัศมี 6.โหลด (หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ 36 W 1345Ω) พร้อมแสดงผลการทดสอบเพื่อหาค่าอัตราขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆได้เป็นลักษณะของกราฟได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แผนภาพวงจรการทดลองเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริก



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงผลของความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริก

สำหรับการทดสอบเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกนั้นจะกำหนดค่าความละเอียดของช่วงความถี่ที่จะป้อนให้กับทางด้านขั้วเล็ก โทรดขาเข้าของหม้อแปลง

โพซิโชนิกเล็กน้อยโดยจะเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 kHz แล้วสังเกตผลอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ซึ่งถ้ามีช่วงค่าความถี่ที่ทำให้เกิดอัตราการขยายค่าศักย์ไฟฟ้าที่สูงมากขึ้น แสดงว่าได้เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลง โพซิโชนิกเล็กน้อยแล้ว ก็จะทำการปรับความละเอียดของช่วงความถี่ที่ป้อนให้มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากหม้อแปลงโพซิโชนิกเล็กน้อยนั้นจะมีช่วงความถี่ธรรมชาติที่ค่อนข้างแคบและค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาตินั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยที่จะเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องทำการปรับความถี่ให้ละเอียดมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะเก็บข้อมูลต่างๆเมื่อเวลาหม้อแปลงโพซิโชนิกเล็กน้อยได้เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติ โดยผลการทดลองจริงจากกราฟในรูปที่ 3.4 ที่ได้แสดงผลของความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงโพซิโชนิกเล็กน้อยนั้นจะสังเกตเห็นว่าอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าสูงมากขึ้นที่ค่าความถี่บางค่าเท่านั้น ซึ่งค่าความถี่นั้นคือความถี่ธรรมชาติหรือค่าความถี่ปฏิบัติการของหม้อแปลงโพซิโชนิกเล็กน้อย โดยจากรูปที่ 3.4 จะสามารถอ่านค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงโพซิโชนิกเล็กน้อยจากการทดลองจริงได้ออกเป็น 5 ค่าและจะพบว่าค่าความถี่ในช่วง 80-90 kHz จะเป็นช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดค่าอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าได้สูงที่สุด

3.6 การเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากการทดลองกับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสมการการสั่นสะเทือนสำหรับการคำนวณหาความถี่ธรรมชาติที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4 นั้นจะสามารถคำนวณหาความถี่ธรรมชาติได้โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการสร้างระบบเมตริกซ์แล้วใช้วิธีค่าเจาะจงสำหรับการหาความถี่ธรรมชาติและเพื่อเป็นการยืนยันพิสูจน์ความถูกต้องของโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาความถี่ธรรมชาติที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ จึงได้ทำการเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณกับผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองจริงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงโพซิโชนิกเล็กน้อยระหว่างการทดลองจริงและวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

โหมดความถี่	ความถี่ธรรมชาติ (kHz)		
	การทดลองจริง	ไฟไนต์เอลิเมนต์	ความคลาดเคลื่อน(%)
1	17.75	-	-
2	29.13	30.54	4.84
3	71.08	70.48	0.84
4	81.12	83.44	2.86
5	82.29	85.57	3.99

ความถี่ธรรมชาติจากตารางที่ 3.1 นั้นจะเป็นค่าความถี่ที่มีผลทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาออกของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก โดยจำนวนคำตอบที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับเมตริกซ์ของระบบสมการ ซึ่งถ้าเมตริกซ์ของระบบมีขนาดที่ใหญ่ก็จะได้จำนวนคำตอบของค่าความถี่มากแต่ถ้าเมตริกซ์ของระบบมีขนาดที่เล็กลงก็จะได้จำนวนคำตอบของความถี่ที่น้อยลงตามไปด้วย โดยคำตอบของความถี่ที่ได้จากวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์นั้นจะเรียงจากค่าน้อยไปหาค่ามากและสำหรับการคำนวณครั้งนี้จะเลือกศึกษาความถี่ในช่วง 0-100 kHz เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ธรรมชาติความถี่แรกของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก ซึ่งจะพบว่ามี 5 โหมดความถี่ธรรมชาติจากการทดลองและ 4 โหมดความถี่ธรรมชาติจากวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ โดยความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากขั้นตอนในการทดสอบเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกเพราะว่าในการทดสอบจริงนั้นมีปัจจัยหลายๆอย่างที่ส่งผลกระทบต่อความถี่ธรรมชาติ เช่น อากาศสภาพแวดล้อมต่างๆรวมไปถึงสายไฟที่เชื่อมติดกับหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกหรือสิ่งของต่างๆ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อการสั่นสะเทือนทั้งสิ้น จึงมีผลทำให้บางช่วงความถี่ธรรมชาติที่เกิดขึ้นนั้นมีความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองจริงกับการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์นั้นจะมีความคลาดเคลื่อนในทุกๆ โหมดความถี่ไม่เกิน 5%

3.7 สรุป

ในบทที่ 3 นี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติ โดยจะประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ในแบบ 3 มิติเพื่อคำนวณหาความถี่ธรรมชาติและในบทนี้ยังกล่าวถึงการทดสอบเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4 พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลความถี่ธรรมชาติจากการทดลองจริงกับ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ ซึ่งผลเฉลยที่ได้จากการเปรียบเทียบนั้นจะมีความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่เกิน 5% ดังนั้นจากผลลัพธ์ที่ปรากฏดังกล่าวจึงสามารถยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมไฟไนท์อิลิเมนต์แบบ 3 มิติสำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้พัฒนาขึ้น จึงทำให้ผลความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณนั้นมีความน่าเชื่อถือ และนำไปสู่การจำลองค่าการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่กระจายตัวอยู่ตลอดภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติได้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ในแบบ 3 มิติที่จะได้กล่าวถึงในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 4

โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลพร้อมผลการจำลองแบบ 3 มิติ

4.1 บทนำ

การจำลองผลของงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองการทำงานของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกชนิดวงแหวนแบบโหมคการสั้นตามแนวรัศมี โดยจะสังเกตจากความสัมพันธ์ของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติและผลของค่าศักย์ไฟฟ้ากับการกระจัดเชิงกลที่ได้จากการจำลองนั้นสามารถนำไปประยุกต์ในการใช้งานจริง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องศึกษาถึงการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจายตัวของการกระจัดเชิงกลที่ตำแหน่งต่างๆของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริก โดยภายในบทที่ 4 นี้จะได้กล่าวถึงค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบที่ใช้ในการจำลองผลและอธิบายถึงโปรแกรมที่ใช้สำหรับจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ ทั้งนี้เพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่สอดคล้องกับสภาพความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น โดยโปรแกรมที่ใช้สำหรับการจำลองผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิตินั้นเป็นโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเองโดยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ จะใช้กริดรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสและได้ใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมสำเร็จรูปที่ชื่อว่า Solid works และใช้โปรแกรม MATLAB™ ในการจำลองผลของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลในแบบ 3 มิติ

4.2 โครงสร้างของโปรแกรมจำลองผล

การคำนวณเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิตินั้น สามารถดำเนินการคำนวณตามขั้นตอนภายในโครงสร้างของโปรแกรมจำลองผลที่ได้กล่าวถึงต่อไปนี้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการสร้างกริดด้วยโปรแกรม Solid works เพื่อนำข้อมูลของจุดต่อและอีลิเมนต์ต่างๆมาพัฒนาต่อด้วยโปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเอง โดยจะอธิบายถึงโครงสร้างต่างๆของโปรแกรมที่ใช้สำหรับการจำลองผลแบบ 3 มิติได้ดังต่อไปนี้

4.2.1 โปรแกรมการสร้างกริด

โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างกริดสำหรับปัญหาแบบ 3 มิติในงานวิจัยนี้ จะใช้การสร้างกริดจากโปรแกรมที่ชื่อว่า Solid works โดยความสามารถของโปรแกรม Solid works นี้ จะนำมาใช้สำหรับการวาดรูปหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริก รวมไปถึงสามารถสร้างกริดได้ในปัญหาแบบ 3 มิติ แล้วสำหรับข้อมูลจากโปรแกรม Solid works ที่มีความจำเป็นต่อการนำไปพัฒนาเป็นโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติจะประกอบไปด้วย ข้อมูลที่บอกตำแหน่งระยะพิคัดใน

แนวแกน xy และ z ข้อมูลที่บอกหมายเลขจุดต่อ ข้อมูลที่บอกหมายเลขอิลิเมนต์และข้อมูลที่บอกหมายเลขของขอบเขตของชิ้นงานที่ต้องการกำหนดเงื่อนไขของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริก ส่วนขั้นตอนของระเบียบวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์ที่นอกเหนือจากนี้ซึ่งได้แก่ การสร้างสมการของแต่ละอิลิเมนต์ การสร้างเมตริกซ์ระบบสมการรวม การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขตของชิ้นงานรวมไปถึงการแก้สมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยนั้น จะทำการโดยใช้โปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเองเพื่อจำลองผลต่อไป

งานวิจัยนี้ได้ใช้ปริมาตรตลอดตัวหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกเป็นขอบเขตในการศึกษา ซึ่งใช้การวาดภาพของระบบที่ศึกษาเป็นในรูปแบบของ 3 มิติ โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Solid works ทั้งนี้เพราะ โปรแกรม Solid works มีความสามารถในการวาดภาพที่มีความซับซ้อนได้แล้วสามารถวาดในรูปแบบที่เป็น 3 มิติ ได้สะดวก ซึ่งจะแสดงภาพโดยรวมของระบบที่ศึกษาในแบบ 3 มิติ ได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการแสดงภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกชนิดวงแหวนแบนโหมคการสั้นตามแนวรัศมีโดยการวาดรูปจากโปรแกรม Solid work ดังนี้

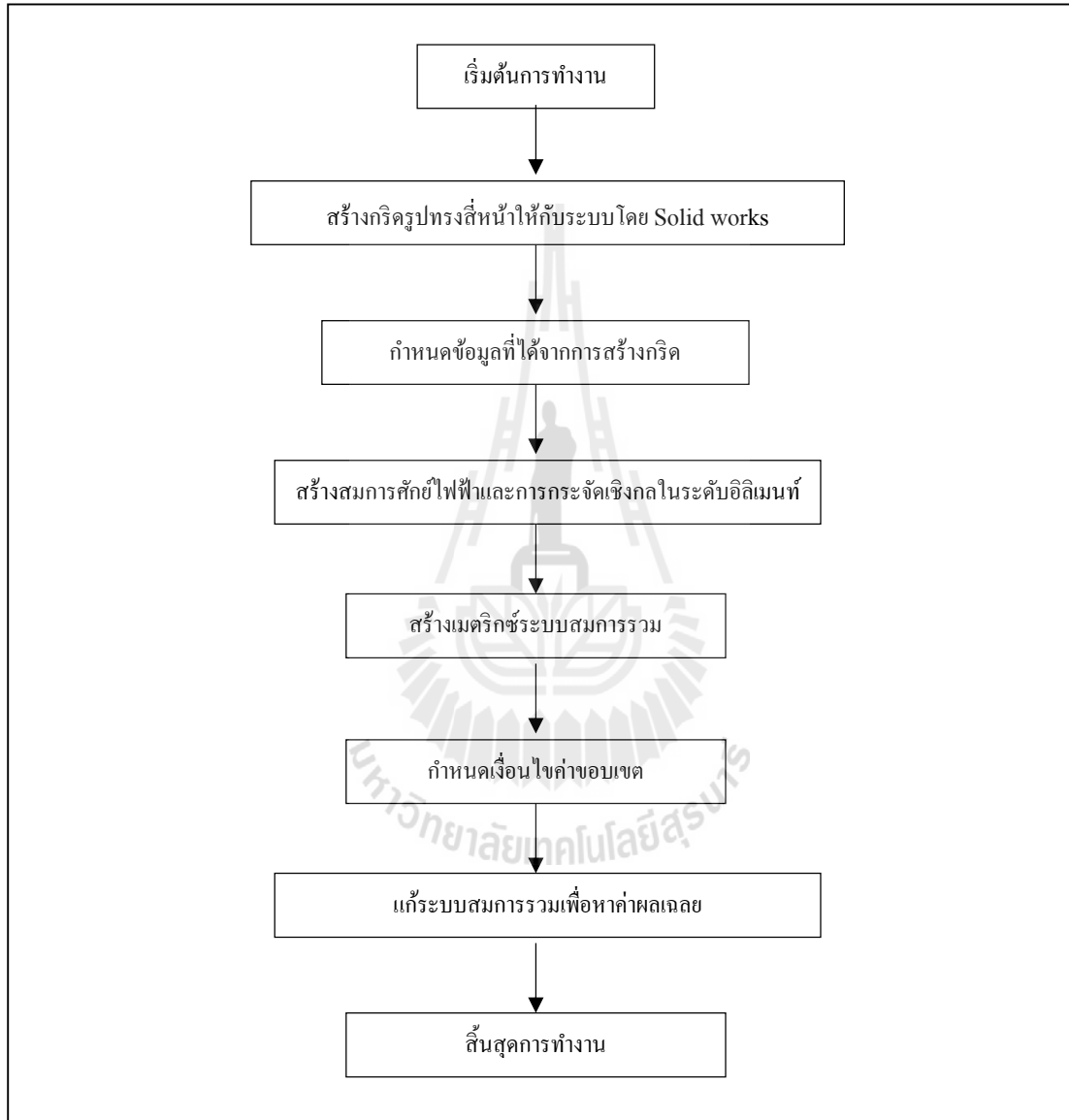


รูปที่ 4.1 ขอบเขตในการศึกษาของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกแบบ 3 มิติ

หลังจากวาดภาพหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกด้วยโปรแกรม Solid works แล้ว สำหรับขั้นตอนต่อไปคือ ทำการสร้างกริดเป็นลักษณะรูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ โดยสำหรับงานวิจัยนี้ได้ปรับความละเอียดของกริดไว้ที่สูงสุด

4.2.2 โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอซิเล็กทริก

ในขั้นตอนนี้เป็นการประยุกต์ใช้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อจำลองผลค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยข้อมูลที่ทำเป็นต่อการพัฒนาโปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์นั้นได้นำมาจากในหัวข้อ 4.2.1 ที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้แล้ว โดยโครงสร้างของโปรแกรมสามารถแสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 4.2 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.2 แผนภูมิการดำเนินงานของ โปรแกรมจำลองผลศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ

จากแผนภูมิการดำเนินงานในรูปที่ 4.2 ซึ่งแสดงโครงสร้างโปรแกรมจำลองผลของระบบในรูปแบบของ 3 มิติ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงหน้าที่ของ โปรแกรมในแต่ละขั้นตอนอย่างละเอียดชัดเจน โดยจะอธิบายถึงรายละเอียดหน้าที่ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนแรกการกำหนดข้อมูลที่ได้จากการสร้างกริด : โดยขั้นตอนแรกนี้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นจะรับค่าข้อมูลอินพุต ซึ่งจะแสดงถึงลักษณะของจุดต่อพร้อมกับอิเลเมนต์ที่ได้จากโปรแกรมการสร้างกริด Solid works ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลประกอบด้วย จำนวนและตำแหน่งของจุดต่อ หมายเลขของจุดต่อที่ประกอบขึ้นเป็นอิเลเมนต์รวมไปถึง จำนวนและหมายเลขของอิเลเมนต์ เป็นต้น

ขั้นตอนการสร้างสมการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลในระดับอิเลเมนต์ : โดยขั้นตอนนี้โปรแกรมจะสร้างสมการอิเลเมนต์เมตริกซ์ในรูปแบบของทรงสี่หน้าสี่จุดต่อเมื่อพิจารณาปัญหาในรูปแบบของ 3 มิติ ของทุก ๆ อิเลเมนต์โดยการสร้างสมการอิเลเมนต์ที่เป็นเมตริกซ์ของแต่ละอิเลเมนต์จะต้องคำนึงถึงค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของวัสดุที่ใช้ผลิตหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่เกี่ยวข้องในแต่ละอิเลเมนต์นั้น ๆ ด้วย ซึ่งค่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางกลของวัสดุต่างๆ ได้ถูกกล่าวไว้แล้วในบทที่ 2

ขั้นตอนการสร้างเมตริกซ์ระบบสมการรวม : ซึ่งขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำหน้าที่รวมสมการของอิเลเมนต์ย่อยเข้าเป็นเมตริกซ์ใหญ่ของระบบสมการรวมดังแสดงรายละเอียดอยู่ในหัวข้อที่ 2.3.4 ของบทที่ 2 ซึ่งหากแบ่งลักษณะของปัญหาออกเป็นอิเลเมนต์ทั้งหมด n จุดต่อจะก่อให้เกิดเมตริกซ์ระบบสมการรวมซึ่งประกอบด้วยสมการการกระจัดเชิงกลในแกนนอน (U_x) สมการการกระจัดเชิงกลในแกนตั้ง (U_y) สมการการกระจัดเชิงกลในแกนลึก (U_z) และสมการศักย์ไฟฟ้า (Φ) โดยรวมทั้งสิ้น $4n$ สมการ

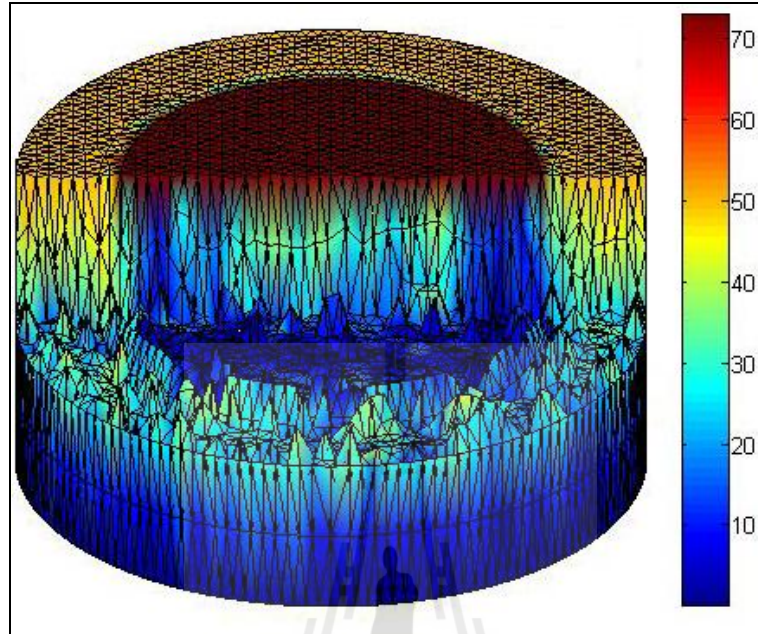
ขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต : ซึ่งขั้นตอนนี้โปรแกรมจะทำหน้าที่ประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตก่อนแล้วจึงทำการแก้ระบบสมการรวม โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าเงื่อนไขขอบเขตดังตารางที่ 2.1 ในบทที่ 2

ขั้นตอนสุดท้ายการแก้ระบบสมการรวมเพื่อหาค่าผลเฉลย : โดยในขั้นตอนสุดท้ายนี้โปรแกรมจะทำการแก้ระบบสมการรวมซึ่งเป็นสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่าผลเฉลยของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่อยู่ประจำแต่ละจุดต่อโดยจะเลือกใช้ระเบียบวิธีการทำเมตริกซ์ผกผัน

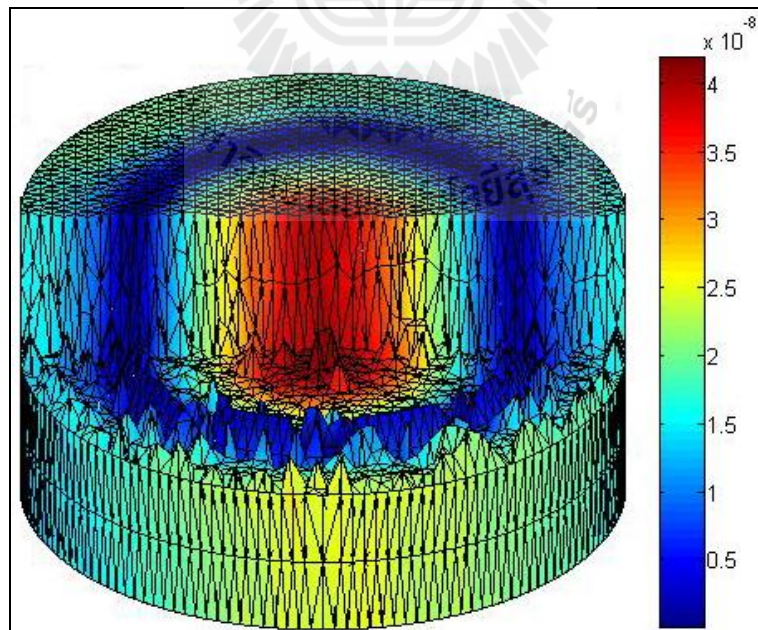
4.3 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์พร้อมวิเคราะห์ผล

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลอง โดยการจำลองผลนั้นได้ใช้โปรแกรม MATLAB™ ในการพัฒนาโปรแกรมไฟไนต์อิเลเมนต์สำหรับคำนวณการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อิเลเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมแสดงผลทางกราฟการกระจายตัวของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้น โดยการจำลองค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นนั้นจะจำลองแบบภาพตัดการกระจายตัวตลอดปริมาตรที่ศึกษา ซึ่งจะทำการพิจารณาศึกษาหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 80-90 kHz เพราะว่าเป็น

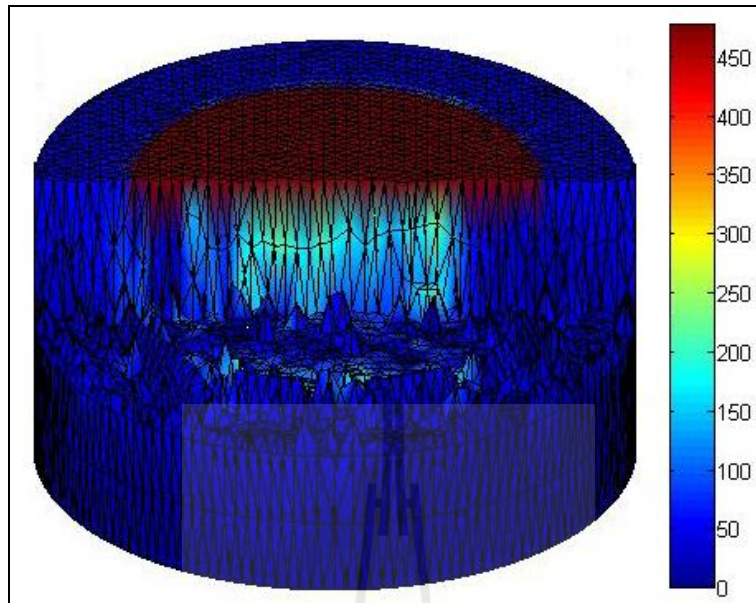
ช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดอัตราขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดตามที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.4 ของบทที่ 3 ซึ่งแสดงผลการจำลองได้ดังนี้



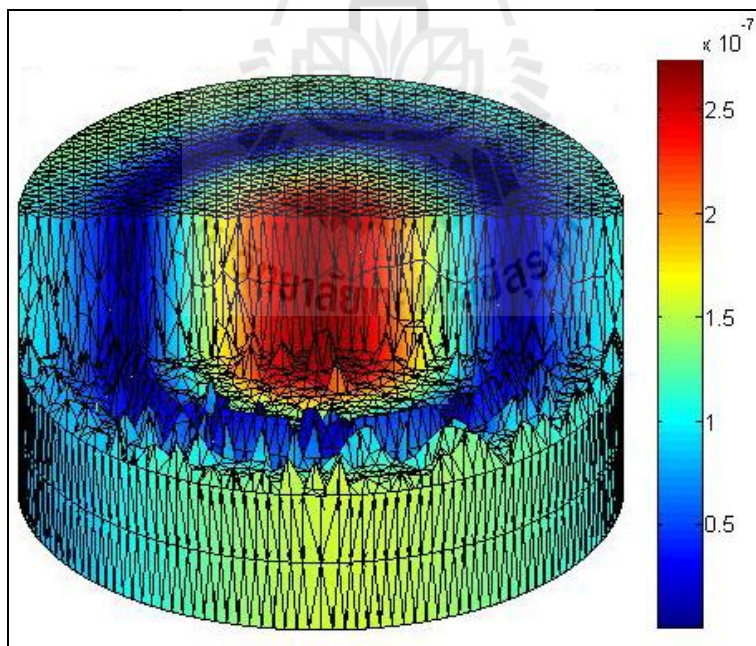
รูปที่ 4.3 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 82 kHz



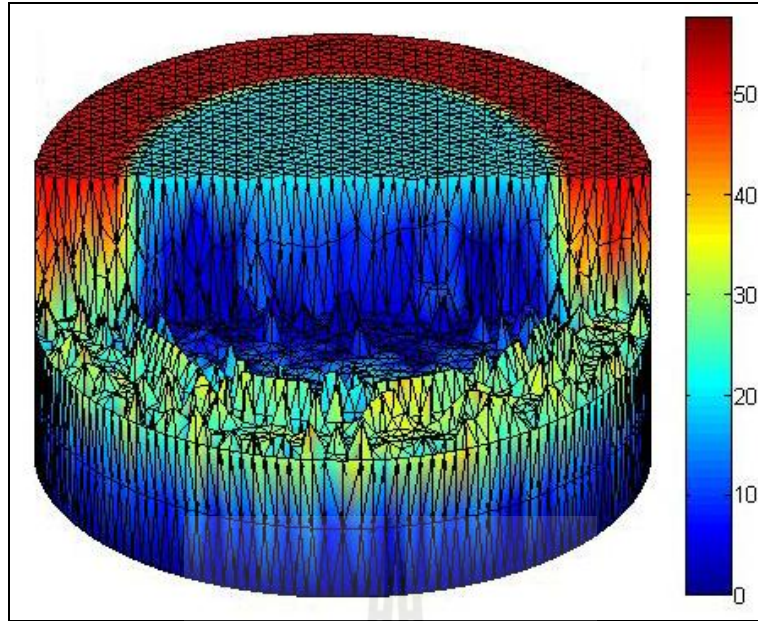
รูปที่ 4.4 การกระจายเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 82 kHz



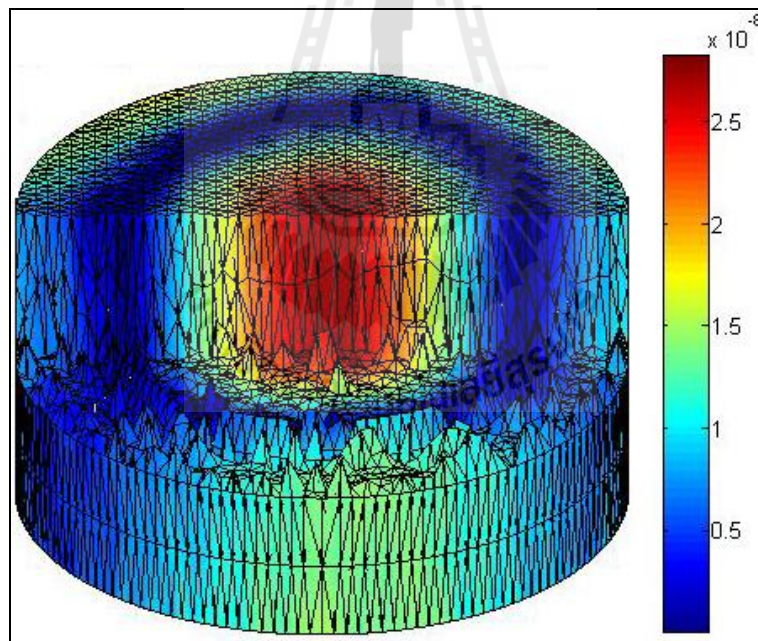
รูปที่ 4.5 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 84 kHz



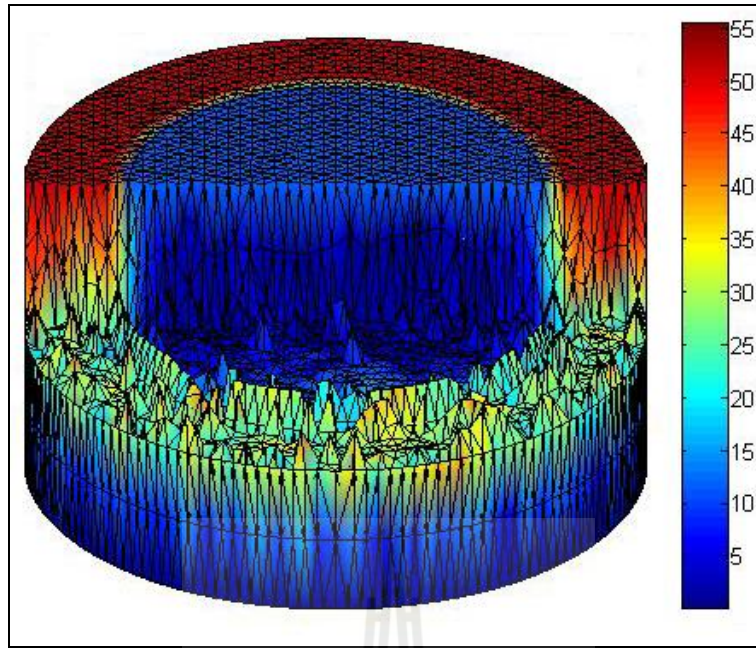
รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของแรงแม่เหล็ก (m) ภายในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่ 84 kHz



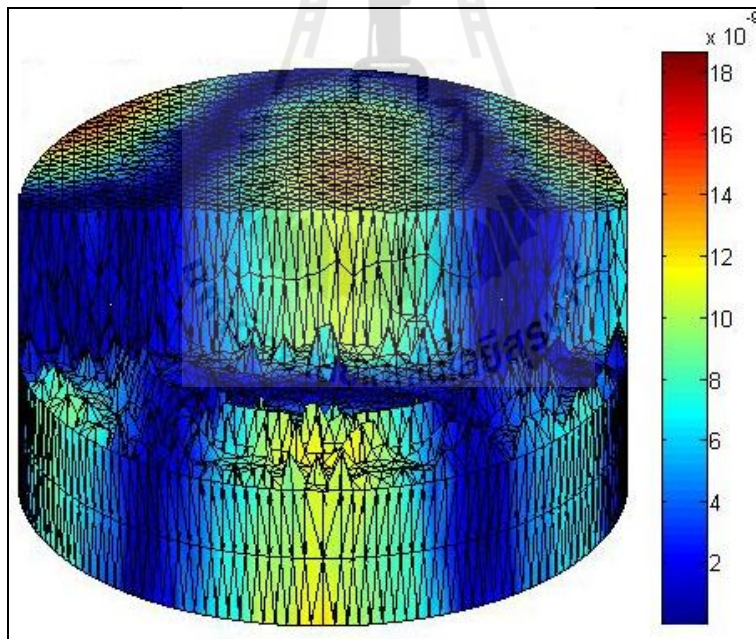
รูปที่ 4.7 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 86 kHz



รูปที่ 4.8 การกระจายจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 86 kHz

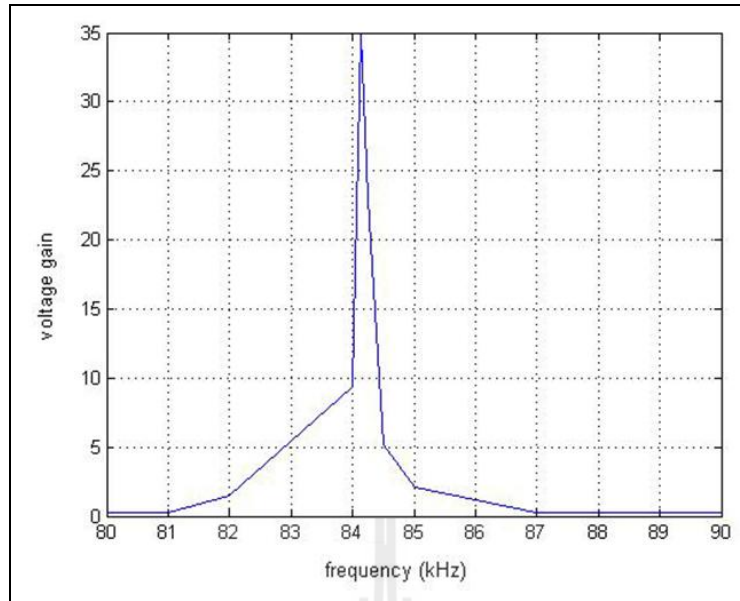


รูปที่ 4.9 การกระจายตัวของศักย์ไฟฟ้า (V) ภายในหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 88 kHz

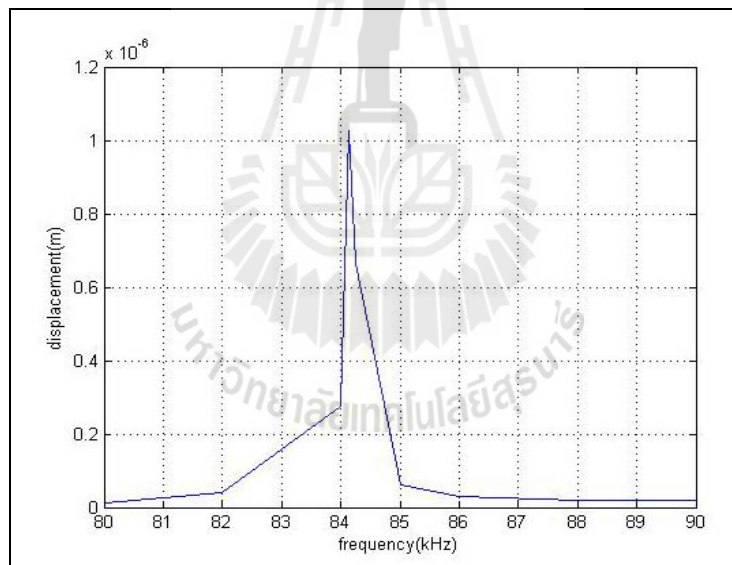


รูปที่ 4.10 การกระจัดเชิงกล (m) ภายในหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 88 kHz

จากรูปที่ 4.3-4.10 เป็นรูปที่แสดงผลการจำลองการกระจายตัวค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกในช่วงความถี่ 80-90 kHz สำหรับในรูปที่ 4.3-4.4 ที่ค่าความถี่ 82 kHz จะพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกนั้นมีค่าอยู่ที่ประมาณ 70 V ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าสูงมากกว่าบริเวณขั้วอิลิกโทรดาเข้าแสดงว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกอยู่ในช่วงความถี่ธรรมชาติแล้วและในช่วงความถี่ต่อมาที่ค่าความถี่ 84 kHz ดังรูปที่ 4.5-4.6 ซึ่งในที่ค่าความถี่นี้จะเกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกทริกโทรดาออกที่ค่อนข้างสูงมากๆ โดยที่มีค่าสูงถึง 450 V ซึ่งมีค่าเป็น 9 เท่าเมื่อเทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกโทรดาเข้า จากการที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกมีค่าสูงมากขนาดนั้น แสดงว่าที่ค่าความถี่นี้เป็นความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริก ซึ่งที่ความถี่ 84 kHz นั้นจะเป็นค่าที่สอดคล้องกับค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อิลิเมนต์และค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดสอบจริงและในช่วงความถี่ 82-84 kHz จะสังเกตเห็นว่ารูปร่างการกระจายของการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะของการกระจายที่คล้ายคลึงกัน โดยสิ่งที่ต่างกันคือระยะของการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้น โดยที่ค่าระยะของการกระจัดเชิงกลจะมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งจะพบว่าค่าการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นนั้นมีความสอดคล้องกับผลการจำลองของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดโดยที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมากเรื่อยๆและจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงที่สุดที่ความถี่ 84 kHz เช่นกัน แล้วในช่วงความถี่ถัดมาความถี่ที่ 86-88 kHz ดังรูปที่ 4.7-4.10 ซึ่งเป็นความถี่ที่ผ่านจากช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกแล้วก็จะเป็ในช่วงความถี่ที่หม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มที่ โดยจะสามารถสังเกตได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกนั้นจะมีลดลงแล้วจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกเพียงเล็กน้อยเท่านั้นและรูปร่างการกระจายของการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นนั้นจะเริ่มเปลี่ยนแปลงโดยรูปร่างการกระจายของการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นนั้นจะมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเพราะว่าเมื่อป้อนความถี่ให้กับหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกแล้วก็จะเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งการสั่นสะเทือนนั้นอาจจะจะมีรูปร่างที่แน่นอนหรือไม่แน่นอนก็ได้ จึงมีผลทำให้รูปร่างการกระจายของการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในช่วงที่ไม่เป็นความถี่ธรรมชาตินั้นมีรูปร่างที่ต่างกันและระยะการกระจัดเชิงกลมีค่าค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับระยะการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ธรรมชาติ โดยค่าระยะการกระจัดเชิงกลที่ค่อนข้างน้อยนี้ส่งผลทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณขั้วอิลิกโทรดาออกของหม้อแปลงไฟโอโซอิลิกทริกมีค่าน้อยตามไปด้วย โดยจากผลการจำลองขยาค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นแบบกราฟเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 4.11 และจากผลการจำลองการกระจายของการกระจัดเชิงกลทั้งหมดสามารถนำมาแสดงผลในลักษณะของกราฟได้ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.11 อัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 80-90 kHz



รูปที่ 4.12 ระยะการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกในช่วงความถี่ 80-90 kHz

จากรูปที่ 4.11 และ 4.12 อัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาออกและระยะการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นนั้นจะมีค่าอัตราการขยายสูงสุดที่ความถี่ 84.13 kHz โดยให้อัตราการขยายระหว่างขั้วอิเล็กโทรดขาออกกับขั้วอิเล็กโทรดขาเข้าสูงถึง 35 เท่าและให้ระยะของการกระจัดเชิงกลสูงถึง $1.04 \mu\text{m}$ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาออกของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกนั้นจะสัมพันธ์กับระยะการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในการสั่นแบบต่างๆ

จากผลการจำลองการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 80-90 kHz ทั้งหมดนั้นจะสอดคล้องกับหลักการของการสั่นสะเทือน โดยที่การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นอาจจะมีรูปร่างที่แน่นอนหรือไม่แน่นอนก็ได้ โดยการสั่นสะเทือนที่มีรูปร่างที่แน่นอนหรือไม่แน่นอนนั้นสามารถสังเกตได้จากรูปการกระจายของการกระจัดเชิงกลดังเช่นในรูปที่ 4.3-4.8 ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 82-86 kHz หม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกจะเกิดรูปร่างการกระจัดเชิงกลที่มีรูปร่างที่แน่นอนเนื่องจากเป็นช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 โดยระยะการกระจัดเชิงกลจะเพิ่มมากขึ้นจนมีค่าที่สูงสุดและลดลงตามลำดับ ความถี่ในช่วงนี้เป็นช่วงความถี่ธรรมชาติที่ส่งผลให้หม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นสะเทือนที่มีระยะการกระจัดเชิงกลที่มากจึงทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าบริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาออกมากขึ้นตามไปด้วย และสำหรับที่ค่าความถี่ 88 kHz ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการสั่นสะเทือนที่มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.10 เนื่องจากไม่ได้เป็นช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกจึงส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนที่มีระยะการกระจัดเชิงกลที่ค่อนข้างน้อยและทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กโทรดขาออกที่น้อยลงด้วย

4.4 การคำนวณกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริก

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกคือกำลังงานไฟฟ้าขาออกต่อกำลังงานไฟฟ้าขาเข้าซึ่งจะมีค่าน้อยกว่าหนึ่งเสมอ ทั้งนี้เพราะมีการสูญเสีย (losses) เกิดขึ้น โดยที่หม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งกำลังงานสูญเสียออกได้เป็น 2 ประเภทด้วยกันคือ กำลังงานสูญเสียจากการสั่นสะเทือน (mechanical vibration loss) และกำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า (dielectric loss) ซึ่งหาได้ดังนี้ (Joo, Lee, Rho, and Jung, 2006)

$$P_m = \sum_{i=1}^6 \frac{1}{2Q_m} \omega_r [T_0]_{6 \times 1} [S_0]_{6 \times 1} \quad (4.1)$$

$$P_d = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} \omega_r \tan \delta [D_0]_{3 \times 1} [E_0]_{3 \times 1} \quad (4.2)$$

เมื่อ P_m คือ กำลังงานสูญเสียจากการสั่นสะเทือน (mechanical vibration loss)

P_d คือ กำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้า (dielectric loss)

Q_m คือ ส่วนประกอบคุณภาพทางกลของไพเอโซอิเล็กทริก (mechanical quality factor)

สำหรับหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริก รุ่น PZT-840 มีค่าเท่ากับ 500

ω_r คือ ค่าความถี่เชิงมุมของเรโซแนนซ์ (angular resonance)

$\tan \delta$ คือ ส่วนประกอบการกระจายตัวของโพธิโซอิเล็กทริก (dielectric loss factor)

สำหรับหม้อแปลงโพธิโซอิเล็กทริก PZT-840 มีค่าเท่ากับ 0.4 % (Henderson, 2002)

เมื่อ T_0 , S_0 , D_0 และ E_0 คือค่าความเค้น ความเครียด ความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า และค่าสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณตามลำดับ โดยที่ค่าสนามไฟฟ้าและความเครียดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.26) และ (2.32) ในบทที่ 2 ได้ดังนี้คือ

$$E_0 = - [B_\Phi]_{3 \times 4} [\Phi]_{4 \times 1} \quad (4.3)$$

$$S_0 = [B_u]_{6 \times 12} [U]_{12 \times 1} \quad (4.4)$$

เมื่อ Φ และ U คือค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลประจำแต่ละจุดต่อที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และสำหรับค่าความเค้นกับความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนี้

$$T_0 = c^E S_0 - e^T E_0 \quad (4.5)$$

$$D_0 = e S_0 + \epsilon^S E_0 \quad (4.6)$$

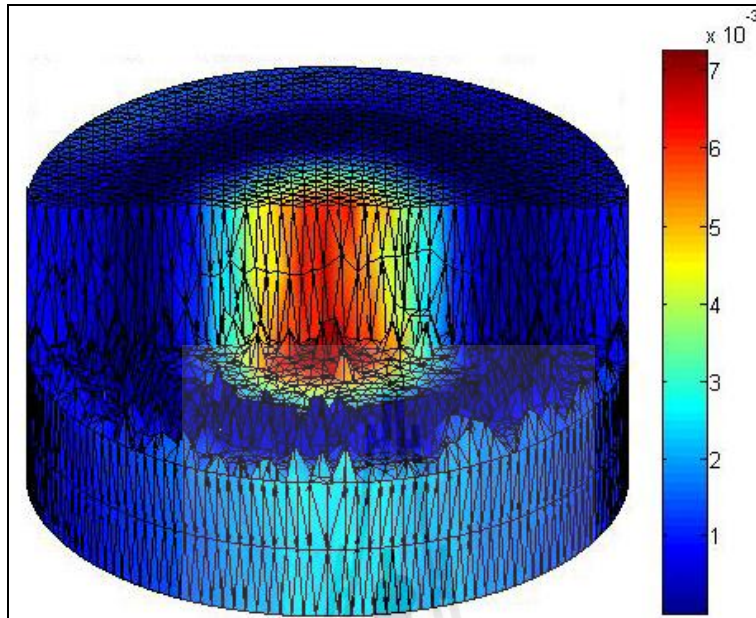
โดยที่ E_0 และ S_0 คือค่าสนามไฟฟ้าและความเครียดที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.3) และ (4.4)

4.5 ผลการจำลองกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงโพธิโซอิเล็กทริกด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

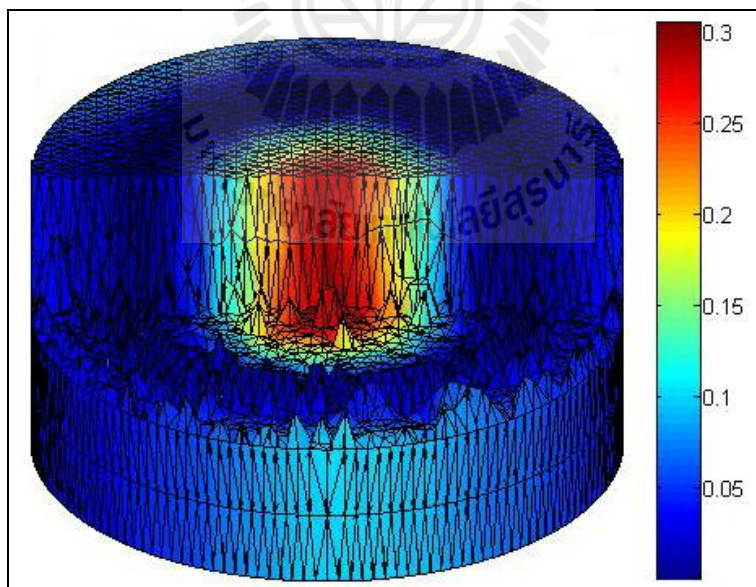
พร้อมวิเคราะห์ผล

สำหรับหัวข้อต่อไปนี้จะแสดงผลการจำลองการกระจายกำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงโพธิโซอิเล็กทริกด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในช่วงความถี่ 80-90 kHz เพราะว่าเป็นช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดอัตราการขยายของค่าศักย์ไฟฟ้าและทำให้เกิดระยะการกระจัดเชิงกลสูงสุดตามที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งได้แสดงผลแบบภาพตัดของหม้อแปลงโพธิโซอิเล็กทริกเพื่อให้เห็นถึงผลการจำลองภายในหม้อแปลง โดยจะแสดงผลการจำลองเฉพาะกำลังงานสูญเสียทางกลเท่านั้นเพราะว่ากำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้าจะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับกำลังงานสูญเสียทางกล

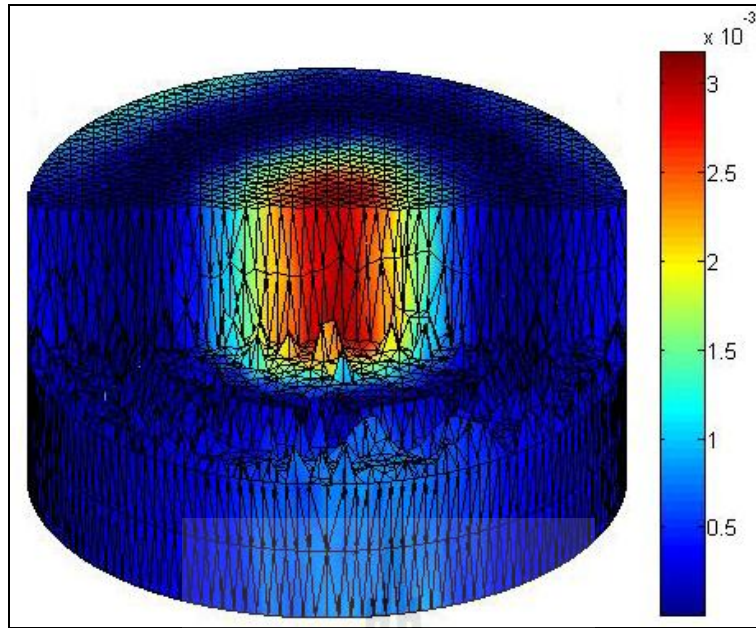
(Rho, Joo, Lee, and Jung, 2002) โดยสามารถแสดงผลการจำลองในช่วงความถี่ 80-90 kHz ได้ดังรูปที่ 4.13-4.16



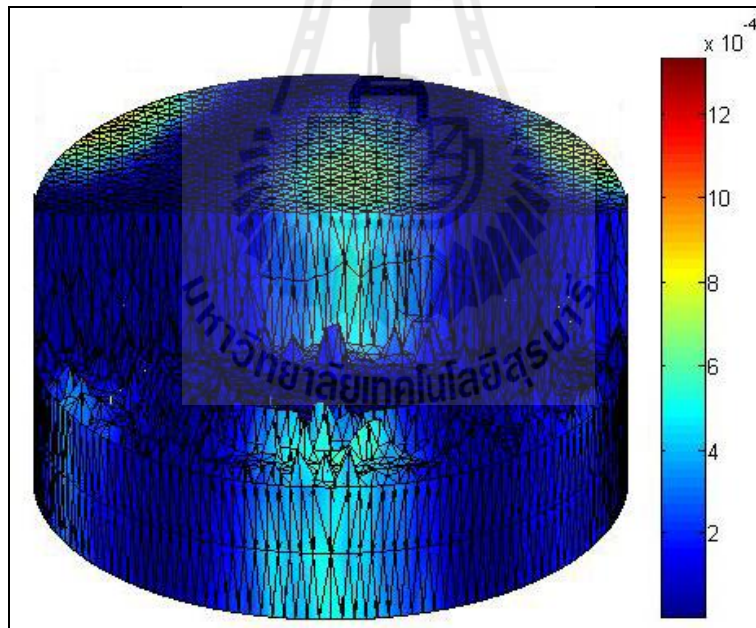
รูปที่ 4.13 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 82 kHz



รูปที่ 4.14 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 84 kHz

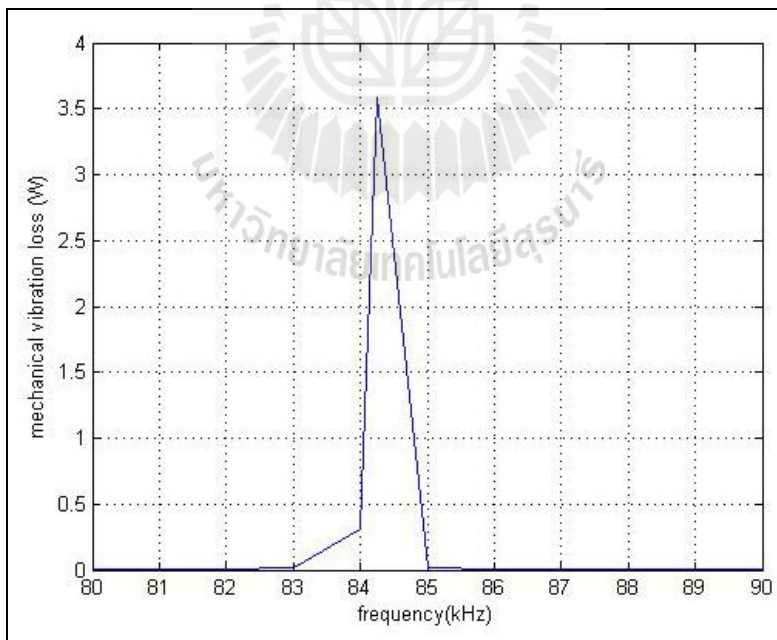


รูปที่ 4.15 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไฟอโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 86 kHz



รูปที่ 4.16 กำลังงานสูญเสียทางกล (W) ภายในหม้อแปลงไฟอโซอิเล็กทริกที่ความถี่ 88 kHz

จากรูปที่ 4.13-4.16 เป็นรูปที่แสดงผลการจำลองการกระจายกำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอซิอิเล็กทรอนิกส์โดยแสดงผลการจำลองในช่วงความถี่ 80-90 kHz โดยจากรูปที่ 4.13-4.14 ที่อยู่ในช่วงความถี่ 82-84 kHz จะพบว่ารูปร่างการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นนั้นมีลักษณะของการกระจายที่ค่อนข้างจะเหมือนกัน โดยจะมีสิ่งที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละความถี่คือค่ากำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้น โดยที่ค่ากำลังงานสูญเสียทางกลนั้นจะมีค่าเพิ่มสูงมากขึ้นเรื่อยๆ ตามลำดับ ซึ่งที่ค่าความถี่ 84 kHz นี้เป็นค่าความถี่ทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียทางกลที่สูงสุด โดยจะพบว่าค่ากำลังงานสูญเสียทางกลที่ได้จากการจำลองผลนั้นจะสัมพันธ์กับผลการจำลองของการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 82-84 kHz สำหรับผลการจำลองในช่วงความถี่ที่ 86 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะสังเกตเห็นว่ารูปร่างการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นนั้นค่อนข้างจะมีลักษณะที่คล้ายกับผลการจำลองที่ผ่านมามากเช่นกันและสำหรับในที่ค่าความถี่ 88 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จะพบว่ารูปร่างการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นนั้นมีรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปแล้วจะสังเกตเห็นอีกว่ารูปร่างการกระจายนั้นมีลักษณะคล้ายกับรูปร่างการกระจัดเชิงกลที่เกิดขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.10 จึงมีผลทำให้รูปร่างการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นในช่วงที่ไม่เป็นความถี่ธรรมชาตินั้นมีรูปร่างที่ต่างกัน โดยจากผลการจำลองการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลทั้งหมดสามารถนำมาแสดงผลในลักษณะของกราฟเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 4.17

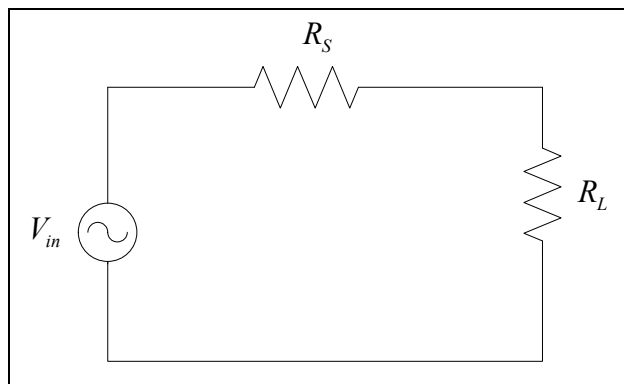


รูปที่ 4.17 กำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอซิอิเล็กทรอนิกส์ในช่วงความถี่ 80-90 kHz

จากผลการจำลองการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่ 80-90 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.17 กำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 84.13 kHz โดยให้กำลังงานสูญเสียทางกลสูงถึง 3.58 W ซึ่งกำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นในการสั่นสะเทือนแบบต่างๆทั้งหมดนั้นจะสัมพันธ์กับผลการจำลองของการกระจายการกระจายเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก โดยสังเกตได้จากรูปร่างการกระจายของกำลังงานสูญเสียในช่วงความถี่ 82-86 kHz ดังแสดงในรูป 4.13-4.15 ที่จะมึลักษณะการกระจายที่คล้ายกับการกระจายของการกระจายเชิงกล ดังแสดงในรูปที่ 4.4, 4.6 และ 4.8 ตามลำดับ และสำหรับในความถี่ 88 kHz ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ที่ลักษณะรูปร่างการกระจายของการกระจายเชิงกลนั้นมีการเปลี่ยนแปลงก็จะพบว่ารูปร่างการกระจายของกำลังงานสูญเสียทางกลนั้นก็จะมึลักษณะที่เหมือนกับรูปร่างการกระจายที่เปลี่ยนไป ดังแสดงในรูปที่ 4.16 แล้วยังมีอีกบางสิ่งที่มีความสอดคล้องกันระหว่างกำลังงานสูญเสียทางกลและการกระจายเชิงกลที่นอกเหนือจากรูปร่างการกระจายแล้วคือบริเวณตำแหน่งของการกระจายเชิงกลที่มีค่ามากก็จะพบว่าที่บริเวณตำแหน่งของกำลังงานสูญเสียทางกลที่ตำแหน่งนั้นก็จะมึค่ามากและถ้าบริเวณตำแหน่งของการกระจายเชิงกลที่มีค่าน้อยที่บริเวณตำแหน่งของกำลังงานสูญเสียทางกลก็จะมึค่าน้อยเช่นกัน

4.6 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก

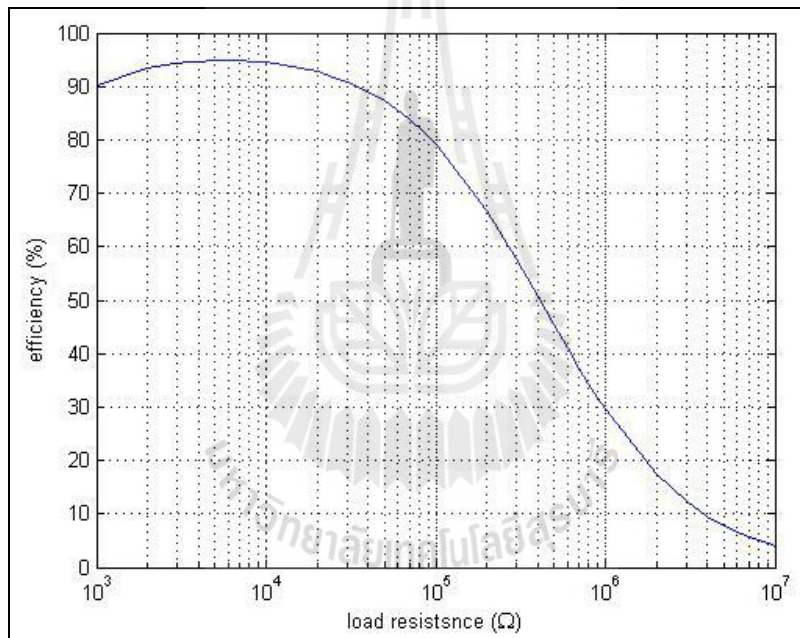
สำหรับการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพนั้นสามารถคำนวณได้โดยผ่านทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดโดยมีหลักการว่าการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดเมื่อค่าความต้านทานโหลดที่นำมาต่อมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกสำหรับการแก้ปัญหาวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าในเรื่องทฤษฎีการถ่ายโอนกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะมีลักษณะวงจรไฟฟ้าดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 วงจรการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าสูงสุด

- เมื่อ V_{in} คือ ศักย์ไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์
 R_L คือ ความต้านทานโหลด
 R_S คือ ความต้านทานของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์โดยสำหรับหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 5800Ω (มณฑกานต์ พิรศักดิ์โสภณ, 2553)

โดยที่ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์นั้นสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด (P_{load}) และค่ากำลังงานไฟฟ้าที่ตกคร่อมหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ (P_{in}) สำหรับค่าที่ได้จากการคำนวณต่าง ๆ นั้นจะแสดงผลที่ค่าความถี่ 84.13 kHz เนื่องจากเป็นค่าความถี่ที่ทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอดออก ระยะเวลาการจัดเชิงกลและค่ากำลังงานสูญเสียทางกลมากที่สุด ซึ่งค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณนั้นสามารถนำมาแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์

รูปที่ 4.19 เป็นการแสดงผลประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ โดยเป็นผลที่ได้จากการคำนวณเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานโหลดต่างๆ ที่ความถี่ 84.13 kHz เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่มีอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดและในช่วงที่เกิดอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดก็จะเกิดระยะเวลาการจัดเชิงกลที่สูงสุดซึ่งมีผลทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียทางกลสูงสุดด้วยเช่นกัน โดยจะนำค่ากำลังงานสูญเสียทางกลที่เกิดขึ้นที่บริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอดออกมาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากบริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์ทรานซอดออกของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์เป็นบริเวณที่มีค่ากำลังงานสูญเสียทางกลสูงสุด

และเป็นบริเวณที่จะถูกนำไปต่อใช้งานจึงใช้บริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรคขาออกเป็นพื้นที่ศึกษา โดยจะวิเคราะห์เฉพาะค่ากำลังงานสูญเสียทางกลเท่านั้นเพราะว่าค่ากำลังงานสูญเสียทางไฟฟ้านั้นจะมีค่าน้อยมากๆ เมื่อเทียบกับค่ากำลังงานสูญเสียทางกล และจากทฤษฎีประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังงานไฟฟ้าสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อค่าความต้านทานของโหลดมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ จากรูปที่ 4.19 จะสังเกตเห็นว่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์จะสูงสุดประมาณถึง 94 % เมื่อค่าต้านทานโหลดมีค่าประมาณเท่ากับ 5.8 k Ω

4.7 สรุป

บทที่ 4 นี้ได้ศึกษาถึงความถี่ธรรมชาติที่มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้าและระยะเวลาการระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ รวมถึงการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียและคำนวณหาประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ชนิดวงแหวนแบน สำหรับการจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB™ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์นั้น จะส่งผลให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิเล็กทรอนิกส์โทรคขาออกและเกิดระยะเวลาการระจัดเชิงกลรวมไปถึงเกิดกำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์มีค่ามากที่สุด โดยจะเกิดอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 84.13 kHz และจะเกิดประสิทธิภาพสูงถึง 94 % เมื่อมีค่าโหลดเท่ากับ 5.8 k Ω

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองสำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติพร้อมกับการจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกชนิดวงแหวนแบนในแบบโหมดการสั้นตามแนวรัศมี โดยได้ทำการศึกษาการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติพร้อมกับการจำลองผลการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลประกอบกับการคำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกลและประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยได้เน้นศึกษาที่ค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกในช่วงความถี่ที่ทำให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุด การจำลองผลด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์และโปรแกรมสำหรับคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ใช้โปรแกรม MATLAB™ ที่พัฒนาขึ้นเองพร้อมตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคำนวณความถี่ธรรมชาติ โดยการเทียบกับการทดลองจริงเพื่อให้เป็นที่น่าเชื่อถือ

ในบทที่ 2 นั้นจะเป็นขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกและขั้นตอนต่างๆ ในการประยุกต์ใช้ไฟไนท์อีลิเมนต์สำหรับการคำนวณหาค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสองและอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติโดยได้เลือกใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้างของกาลเลอร์คิน ซึ่งสำหรับการคำนวณนั้นจะคำนวณครอบคลุมตลอดทั่วทั้งปริมาตรของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริก สำหรับการดำเนินงานในบทที่ 3 นั้นจะอธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการสั้นสะเทือนเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติโดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ โดยการคำนวณหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกนั้นจะใช้วิธีค่าเจาะจง โดยสามารถใช้ร่วมกับวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ได้ พร้อมทั้งแสดงผลความถี่ธรรมชาติรวมไปถึงแสดงผลค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดลองจริงและได้ทำการเปรียบเทียบผลของความถี่ธรรมชาติจากการทดลองจริงกับผลของความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ที่พัฒนาขึ้นเอง ซึ่งผลความถี่ธรรมชาติที่ได้ออกมาเป็นที่น่าพึงพอใจอย่างยิ่ง โดยผลลัพธ์ของความถี่ธรรมชาติที่ได้มีความคล้ายคลึงและสอดคล้องกันโดยมีความคลาดเคลื่อนแตกต่างกันไม่เกิน 5 % ส่วนการดำเนินงานในบทที่ 4 นั้นเป็นการเสนอผลการจำลองการกระจายของค่าศักย์ไฟฟ้าและการกระจัดเชิงกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีคทริกในแบบ 3 มิติสำหรับกระบวนการสร้างกริดในแบบ 3 มิติได้เลือกใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Solid works อีกทั้งยังได้

คำนวณหาค่ากำลังงานสูญเสียทางกลพร้อมกับจำลองผลการกระจายกำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกประกอบการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริก โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองผลแสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกนั้น จะส่งผลให้เกิดค่าศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณขั้วอิลีทริกโตรดขาออกและเกิดระยะการกระจัดเชิงกลรวมไปถึงเกิดกำลังงานสูญเสียทางกลของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกมีค่ามากที่สุด โดยจะเกิดอัตราการขยายศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 84.13 kHz และจะเกิดประสิทธิภาพสูงถึง 94 % เมื่อโหลดของหม้อแปลงมีค่าเท่ากับ 5.8 k Ω

5.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1. พัฒนาโปรแกรมระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์แบบ 3 มิติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อมจำลองผลรูปร่างลักษณะการกระจายของความร้อน โดยจะพิจารณาถึงผลกระทบของความร้อนที่ส่งผลต่อค่าคงที่วัสดุและคุณสมบัติต่างๆของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริก

2. ออกแบบหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกในรูปแบบต่างๆ อาทิเช่น เพิ่มจำนวนชั้นของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกเป็น 2 ชั้น 3 ชั้นหรือหลายๆชั้นและทำการปรับเปลี่ยนหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริกให้เป็นรูปทรงต่างๆ เพื่อศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าคุณสมบัติต่างๆ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงไปของจำนวนชั้นหรือรูปทรงของหม้อแปลงไฟโอโซอิลีทริก

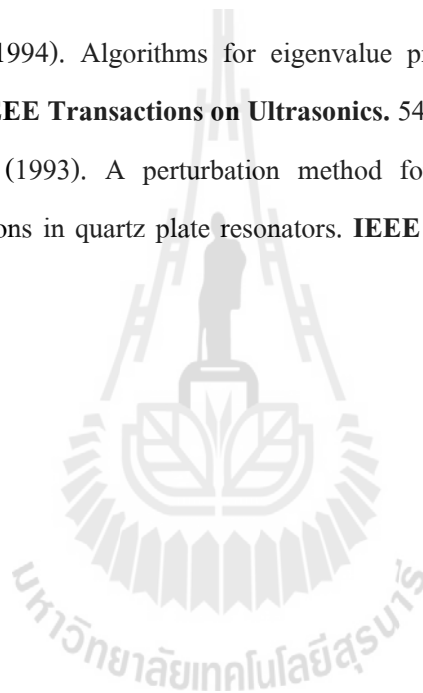
บรรณานุกรม

- ปราโมทย์ เศษอำไพ. (2549). ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เผด็จ เผ่าละออ. (2548). การออกแบบแนวใหม่ของมอเตอร์เหนี่ยวนำเพื่อลดการสั่นสะเทือนโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มณฑกานต์ พีรศักดิ์โสภณ. (2553). บัลลาสต์ไฟโซอิเล็คทริกสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์ 36 วัตต์ชนิด T8. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- มนทล นาวงษ์. (2546). การศึกษาเปียโซอิเล็คทริกทรานฟอร์มเมอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ชิ่ง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สุทัศน์ อ่วมจันทร์., และ สุพากรณ์ อัญญสกุล. (2544) เปียโซอิเล็คทริกทรานสฟอร์มเมอร์. วิทยานิพนธ์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- อานนท์ อิศรมงคลรักษ์. (2552). การออกแบบอุปกรณ์กักเก็บสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อผู้ปฏิบัติงานที่ทำงานใต้สายส่งกำลังไฟฟ้าด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Ando, E.I., and Kagawa, Y. (1992). Finite-element simulation of transient heat response in ultrasonic transducers. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 39 (3): 432-440.
- Antonova, E.E., and Silvester, P.P. (1997). Finite element for piezoelectric vibrations with open electric boundaries. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 44 (3): 548-556.
- Bai, Z., Zhao, Y., Ma, W., and Hao, T. (2008). Modal analysis for small satellite system with Finite element method. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 50 (2): 788-792.
- Bhuyan, S., and Hu, Junhui. (2008). Wireless drive of a piezoelectric plate by dipole antenna. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (6): 1199-1202.
- Buchanan, G. R., and Peddieson, J., (1989). Axsymmetric vibration of infinite piezoelectric cylinders using one-dimensional finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 36 (4): 459-465.

- Dalessandro, L., and Rosato, D. (2005). Finite element analysis of the frequency response of a metallic cantilever coupled with a piezoelectric transducer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (5): 1881-1890.
- Eric, M.B., Weixing, H., Dan, Y.C., and Fred, C.L., 2005, Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent Lamp ballast applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**. 20(5): 1213-1220.
- Friedrich, W., Lerch, R., Prestele, K., and Soldner, R., (1990). Simulation of piezoelectric lamb wave delay lines using a finite element method. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 37 (2): 248-254.
- Henderson, I. R. (2002). Piezoelectric ceramics: principles and applications. APC International Ltd. American Piezo Ceramics Inc & APC Products, Inc.
- Ho, S-T. (2007). Modeling and analysis on ring-type piezoelectric transformers. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (11): 2376-2384.
- Huebner, K. H., Dewhirst, D. L., Smith, D. E., and Byrom, T. G. (2001). **The finite element method for engineers** (4th ed.). USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Jin, Y., Foo, C.F., and Zhu, W.G. (1999). Three-dimensional simulation of piezoelectric transformer for the switching power supply. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (1): 295-299.
- Joo, H-W., Lee, C-H., and Jung, H-K. (2001). Analysis of piezoelectric transformer by using finite-element method and equivalent-circuit considering load variation. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 56 (1): 459-462.
- Joo, H-W., Lee, C-H., Rho, J-S., and Jung, H-K. (2006). Analysis of temperature rise for piezoelectric transformer using finite-element method. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 53 (8): 1449-1457.
- Joo, H-W., Lee, C-H., Rho, J-S., and Jung, H-K. (2003). Identification of material constants for piezoelectric transformers by three-dimensional, finite-element method and a design-sensitivity. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 50 (8): 965-971.
- Kim, B. T., Kwon, B. I., and Park, S. C. (1999). Reduction of electromagnetic force harmonics in asynchronous traction motor by adapting the rotor slot number. **IEEE Transactions on Magnetics**. 35 (5): 3742-3744.

- Kwok, K.F., Dong, P., Cheng, K.W.E., Kwok, K.W., Ho, Y.L., Wang, X.X., and Chan, H. (2002). General study on piezoelectric transformer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (8): 216-220.
- Lerch, R. (1990). Simulation of piezoelectric devices by two and three dimension finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 37 (2): 233-247.
- Lee, C-H., Joo, H-W., Rho, J-S, Cho H-S., and Jung H-K., (2002). Inversion of piezoelectric material coefficients by using finite element method with asymptotic waveform evaluation. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 56 (4): 661-664.
- Li, H.L., Hu, J.H., and Chan, H.L.W. (2004). Finite element analysis on piezoelectric ring transformer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 51 (10): 1247-1254.
- Lin, R. L., Lee, F. C., Baker, E. M., and Chen, D. Y. (2000). Inductor-less piezoelectric transformer ballast for linear fluorescent lamps. **Proceeding on CPES Power Electronics System**. 309-314.
- Loveday, P.W. (2007). Analysis of piezoelectric ultrasonic transducers attached to waveguides using waveguide finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (10): 2045-2051.
- Loveday, P.W. (2008). Simulation of piezoelectric excitation of guided waves using waveguide finite element. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (9): 2038-2045.
- Preston, T. W., Reece, A. B. J., and Sangha, P. S. (1988). Induction motor analysis by time-stepping techniques. **IEEE Transactions on Magnetics**. 24 (1): 471-474.
- Rho, J-S., Joo, H-W., Lee, C-H., and Jung, H-K. (2002). Analysis of ultrasonic linear motor by using finite element method and equivalent circuit. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 52 (4): 649-652.
- Safari, A., and Akdogan, E. K. (2008). Piezoelectric and acoustic materials for transducer application. USA: Springer.
- Sung, J.C., Kyu, C.L., and Bo, H.C., 2005, Design of fluorescent lamp ballast with PFC using a power Piezoelectric., **IEEE Transaction on Industrial Electronics**. 52(6): 1573-1581.
- Tsuchiya, T., Kagawa, Y., Wakatsuki, N., and Okamura H. (2001). Finite element simulation of piezoelectric transformers. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 48 (4): 872-878.
- Uchino, K., and Hirose, S. (2001). Loss mechanisms in piezoelectric how to measure different losses separately. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 48 (1): 307-321.

- Wang, Y.C., He, J.J., Liu, Y.P., Wu, J., and Lee, C.K. (2005). Theory and experiment of high voltage step-up ratio disk type piezoelectric transformer for LCD-TV. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (8): 284-287.
- Wang, J., Yong, Y-K., and Imai, T. (1997). Finite element analysis of the piezoelectric vibrations of quartz plate resonators with higher-order plate theory. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 55 (3): 650-658.
- Wang, J.S., and Ostergaard, D.F. (1999). A finite element-electric circuit coupled simulation method for piezoelectric transducer. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 59 (9): 1105-1108.
- Yong, Y-K., and Cho, Y. (1994). Algorithms for eigenvalue problems in piezoelectric finite element analyses. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 54 (5): 1057-1062.
- Yong, Y-K., and Zhen, Z. (1993). A perturbation method for finite element modeling of piezoelectric vibrations in quartz plate resonators. **IEEE Transactions on Ultrasonics**. 40 (5): 551-562.



ภาคผนวก

การเผยแพร่ผลงานวิจัย

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ

1. Vacharakup, S., Peerasaksopho, M., Kulworawanichpong, T., and Pao-la-or, P. (2012). Study of Natural Frequencies and Characteristics of Piezoelectric Transformers by Using 3-D Finite Element Method. **Applied Mechanics and Material**, Vol. 110-116, pp. 61-66.



ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เผด็จ เผ่าละออ เป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท และปริญญาเอก จากสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยด้าน Applied FEM for Electromagnetic Field, for Electrical Machine, and for Heat Transfer แล ะ Applied AI มีผลงานวิจัยตีพิมพ์ระดับชาติและนานาชาติมากกว่า 40 เรื่อง จดสิทธิบัตร 1 ผลงาน และ ลิขสิทธิ์โปรแกรม 3 ผลงาน

นายสมศักดิ์ วัชรระคุปต์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร บัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมาใน ปี พ.ศ. 2551 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้ปฏิบัติงานเป็นผู้ช่วยสอน ปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จำนวน 5 รายวิชา ได้แก่ (1) ปฏิบัติการการแปลงผันพลังงานทางกลไฟฟ้า (2) ปฏิบัติการ วิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (3) ปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (4) ปฏิบัติการระบบควบคุมและ (5) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า ทั้งนี้มีความสนใจในด้านการวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติโดยใช้ FEM รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ FEM ในงานระบบไฟฟ้ากำลัง