



การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบสเต็ปดาวน์
Design of the Step-down Piezoelectric Transformer

ตรีศูต คชพลายุกต์
Treesoon Kotchaplayuk

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Engineering in Mechanical Engineering
Prince of Songkla University**

2552

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสถียร
ผู้เขียน นายตรีศุล กชพลายุศักดิ์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี)

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ปัญญรักษ์ งามศรีตระกูล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภสโรช หมั่นสิทธิ์)

.....กรรมการ
(ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกริกชัย ทองหนู)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสตีปคาวน
ผู้เขียน	นายตรีศุล กชพลายุกต์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2552

บทคัดย่อ

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำจากวัสดุเซรามิกส์ประเภทเพียโซอิเล็กทริก มีความสามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า และในทางกลับกัน สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกประกอบด้วยสองส่วน คือส่วนที่เป็นตัวทำงาน (Actuator) ทำหน้าที่เป็นด้านปฐมภูมิ และส่วนที่เป็นตัวรับรู้ (Sensor) ทำหน้าที่เป็นด้านทุติยภูมิ วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้คือ เพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสตีปคาวน โดยศึกษาผลกระทบของขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก และพื้นที่อิเล็กโทรด ที่มีต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก การยืนยันความถูกต้องของผลการศึกษาทำโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์กับการทดลอง หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ศึกษามีรูปทรงแบบวงแหวนทำมาจากวัสดุเลตเซอร์โคเนตไททาเนต (lead zirconate titanate, PZT) จากผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดส่งผลต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า นั่นคือ เมื่ออัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดมีค่าลดลงจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น และยังพบว่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกในแต่ละตำแหน่งมีค่าต่างกัน จากผลการวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อให้ได้ศักย์ไฟฟ้าเหมาะสมตามการใช้งาน และสามารถออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเป็นได้ทั้งแบบเสตีปคาวนและแบบเสตีปคาวน

Thesis Title	Design of the Step-down Piezoelectric Transformer
Author	Mr. Treesoon Kotchaplayuk
Major Program	Mechanical Engineering
Academic Year	2009

ABSTRACT

The piezoelectric transformer is an electro-mechanical device that transfers the electrical energy through mechanical vibration and then transfers the vibration to the voltage output. It is a combination of actuator part for the primary side and sensor part for the secondary side. The objective of this research is to study the effects of electrode area, electrode pattern and dimensions on the voltage ratio (output area/input area) by using finite element method (FEM). The FEM results are verified by experimented result to evaluate the accuracy. A ring shape piezoelectric transformer made of lead zirconate titanate (PZT) was selected for this study. The results show that the voltage ratio increases as area ratio decreases and the output voltage regarding the radius direction. The knowledge of the electrode pattern can be used for designing step-up piezoelectric transformer, step-down piezoelectric transformer or both in one.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ. ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้คำแนะนำ และให้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงการตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ รศ. ดร.ศุภสโรจน์ หมั่นสิทธิ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำเรื่องวัสดุ ขอขอบคุณ ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุลที่ให้คำแนะนำและแนวทางที่ควรศึกษาวิจัย รวมถึงให้ความอนุเคราะห์สถานที่ และใช้เครื่องมือของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ขอขอบคุณ ท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณท่านอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ รวมเพื่อนพี่น้องในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่คอยให้การช่วยเหลือ สุดท้ายขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่ และเครื่องมือในงานวิจัย

ตรีศูต คชพลาญกต์

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(6)
รายการตาราง	(8)
รายการรูป	(10)
สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ	(16)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	15
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	15
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	15
2. ทฤษฎี	16
2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	16
2.2 การทำโพลิงวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	22
2.3 การวัดคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุ	26
2.4 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	30
2.5 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	34
3. อุปกรณ์และวิธีวิจัย	43
3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.2 เครื่องมือวิจัย	44
3.3 อุปกรณ์วิจัย	44
3.4 ขั้นตอนและวิธีวิจัย	45
4. ผลการทดลอง	55
4.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์	55

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และศักย์ไฟฟ้า	59
4.3 ผลกระทบของพื้นที่อิเล็กโทรดต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า	62
4.4 การออกแบบอิเล็กโทรดสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสถียร	73

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 ผลของขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า	88
5. บทสรุป	100
5.1 หัวข้อของการวิจัย	100
5.2 สรุปผล	101
5.3 ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง	108
ภาคผนวก	112
ประวัติผู้เขียน	117

รายการตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แสดงถึงค่าศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (Jin et al., 1999)	3
1.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่โหนดต่างๆ (Leung et al., 2004)	5
1.3 แสดงขนาดและอัตราส่วนพื้นที่ของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ (Wang et al., 2005)	7
1.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ (Du et al., 2004)	14
2.1 แสดงลักษณะรูปทรงและทิศทางการยึดหกดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (Laoratanakul et al., 2002)	20
2.2 แสดงเงื่อนไข และค่าตัวแปรไร้มิติ λ_{ij}^2 ของรูปร่างวงแหวน (Blevins, 1979)	21
2.3 แสดงเงื่อนไข และค่าตัวแปรไร้มิติ λ_{ij}^2 ของรูปร่างดิสก์ (Blevins, 1979)	22
2.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างหม้อแปลงแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับหม้อแปลง ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Laoratanakul, 2002)	31
2.5 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากับทางกล (Laoratanakul, 2002)	42
3.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (SPK ELECTRONICS CO.,LTD.)	43
4.1 แสดงขนาดของอิเล็กโทรดบนหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบวงแหวน	63
4.2 แสดงพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกในกรณีที่ 1	65
4.3 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีที่ 1	67
4.4 แสดงพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกในกรณีที่ 2	68
4.5 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์กรณีที่ 2	70
4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทั้งสองกรณี	71
4.7 แสดงขนาดของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงแต่ละรูปแบบ	78
4.8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆ	84
4.9 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบต่างๆของผลที่ได้จากการ คำนวณไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง	85
4.10 แสดงขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการคำนวณ	89

4.11 แสดงค่าตัวแปรไว้มิติสำหรับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	99
---	----

รายการตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษารูปแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก แบบต่างๆ	103
5.2 แสดงการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิต่างกัน	104
5.3 แสดงการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดต่างกัน	105

รายการรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แสดงถึงการเปลี่ยนของขนาดและความเค้นที่เกิดขึ้น (Jin et al., 1999)	3
1.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโรเซนเพียโซอิเล็กทริก (Morris et al., 2005)	4
1.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ขนาดความยาว 50 มิลลิเมตร (Morris et al., 2005)	4
1.4 แสดงผลการจำลองวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ขนาดความยาว 110 มิลลิเมตร (Morris et al., 2005)	4
1.5 แสดงแบบจำลองสามมิติหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบวงแหวน (Leung et al., 2004)	5
1.6 แสดงการลักษณะการเปลี่ยนรูปที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีของ การสั้นโหนดต่างๆ (Leung et al., 2004)	6
1.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ อัตราส่วนการแปลง และความถี่เรโซแนนซ์ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่การทำงานโหนดต่างๆ (Leung et al., 2004)	6
1.8 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบดิสก์ (Wang et al., 2005)	7
1.9 แสดงค่าอัตราส่วนคัปปลิงไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรด ต่างกัน (Wang et al., 2005)	8
1.10 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเรเดียล (Hu et al., 2001)	9
1.11 ชุดทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Hu et al., 2001)	9
1.12 (a) แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนคัปปลิงไฟฟ้ากับค่าโหนด (Hu et al., 2001)	9
1.12 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคัปปลิงไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ (Hu et al., 2001)	9
1.13 แสดงขนาดและลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Chang et al., 2007)	10
1.14 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคัปปลิงไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างต่างกัน (Chang et al., 2007)	11
1.14 (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนคัปปลิงไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่าง ที่โหนดต่างๆ (Chang et al., 2007)	11
1.15 แสดงลักษณะองค์ประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Pulpan et al., 2007)	11

1.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า (Pulpan et al., 2007)	12
---	----

รายการรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
1.17 (a) แสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากับอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเมื่อโหลดมีค่า 1 กิโลโอห์ม (Pulpan et al., 2007)	12
1.17 (b) แสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากับอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเมื่อโหลดมีค่า 10 กิโลโอห์ม (Pulpan et al., 2007)	12
1.18 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้ามัลติเพลเจอร์เพียโซอิเล็กทริกแบบเสตีปดาวน์ (Liu et al., 2006)	13
1.19 แสดงศักย์ไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Liu et al., 2006)	13
1.20 แสดงขนาดและองค์ประกอบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Du et al., 2004)	14
1.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของด้านทุติยภูมิทั้งสอง (Du et al., 2004)	14
2.1 แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก (ที่มา: Lang and Gupta, 2000)	17
2.2 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	17
2.3 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	19
2.4 (a) แสดงทิศทางโพลาริเซชันก่อนการโพลิง (ที่มา: http://www.physikinstrumente.com)	23
2.4 (b) แสดงทิศทางโพลาริเซชันขณะโพลิง (ที่มา: http://www.physikinstrumente.com)	23
2.4 (c) แสดงทิศทางโพลาริเซชันหลังการโพลิง (ที่มา: http://www.physikinstrumente.com)	23
2.5 แสดงกระบวนการโพลิงแบบร้อน	23
2.6 แสดงกระบวนการโคโรนาโพลิง (ที่มา: http://optoweb.fis.uniroma2.it/coronapoling.html)	24
2.7 แสดงกระบวนการโพลิงแบบคอนเวนชันนอล	24
2.8 แสดงกระบวนการสปัตเตอริง (ที่มา: นิรันดร์ วิทอนันต์ และคณะ, 2551)	26
2.9 แสดงชุดทดสอบค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธี static	27
2.10 แสดงชุดทดสอบค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Quasi-static (ที่มา: Taunaumang, 1994)	28
2.11 แสดงความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์จากค่าอิมพีแดนซ์	28
2.12 แสดงการหลักการการทำงานของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก	31
2.13 เพียโซอิเล็กทริกอิเลิเมนต์ (Piezoelectric Element) ประกอบด้วยส่วนของแผ่นอิเล็กโทรด	

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 ทรานส์เวิร์ส โหมดเพียโซอิเล็กทริกอีลิเมนต์ (Transverse Mode Piezoelectric Element) (ที่มา: Lee Lin, 2001)	32
2.15 เรเดียล โหมดเพียโซอิเล็กทริกอีลิเมนต์ (Radial Mode Piezoelectric Element) (ที่มา: Lee Lin, 2001)	32
2.16 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโรเซนเพียโซอิเล็กทริก (Rosen Piezoelectric Transformer) (ที่มา: Lee Lin, 2001)	33
2.17 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบดิกเนสไวเบรชัน โหมดเพียโซอิเล็กทริก (Thickness Mode Piezoelectric Transformer) (ที่มา: Lee Lin, 2001)	33
2.18 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเรเดียล โหมดเพียโซอิเล็กทริก (Radial Mode Piezoelectric Transformer) (ที่มา: Lee Lin, 2001)	34
2.19 แสดงวงจรสมมูลของชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา: Chang และคณะ, 2007)	39
2.20 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา: Chang และคณะ, 2007)	40
3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและกระบวนการในการวิจัย	45
3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์	46
3.3 แสดงประเภทของเอลิเมนต์แบบ Hex8	47
3.4 แสดงรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	47
3.5 แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติวัสดุในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	48
3.6 แสดงขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	47
3.7 แสดงขั้นตอนการกำหนดประเภทการคำนวณในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์	50
3.8 แสดงขั้นตอนการสั่งให้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณ	50
3.9 แสดงขั้นตอนการแสดงผลของการคำนวณของโปรแกรม	51
3.10 แสดงชุดการทำโพลิง	52
3.11 ชุดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	53
4.1 แสดงขนาดและทิศโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	56
4.2 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ของแต่ละโหมดการสั่น	56

4.3 แสดงรูปแบบการสั้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกในเรเดียลโหมด	57
4.4 แสดงลักษณะอิลีกโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	58

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์	58
4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง	59
4.7 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	60
4.8 แสดงการความเครียดที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	60
4.9 แสดงการความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	61
4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	61
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	62
4.12 แสดงการแบ่งพื้นที่อิลีกโทรดของตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกวงแหวน	63
4.13 แสดงพื้นที่อิลีกโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกทั้ง 9 รูปแบบ	64
4.14 แสดงอิลีกโทรดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในการวิเคราะห์กรณีที่ 1	65
4.15 แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกทั้ง 9 รูปแบบของการวิเคราะห์กรณีที่ 1	66
4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่อิลีกโทรดกับอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าจากการวิเคราะห์กรณีที่ 1	67
4.17 แสดงอิลีกโทรดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในการวิเคราะห์กรณีที่ 2	68
4.18 แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกทั้ง 9 รูปแบบของการศึกษากรณีที่ 2	69
4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่อิลีกโทรดกับอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าจากการศึกษากรณีที่ 2	70
4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	72
4.20 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	73
4.21 แสดงลักษณะและทิศทางการเปลี่ยนรูปทรงของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกในโหมดเรเดียล	74
4.22 แสดงแบบจำลองเพื่อศึกษาการเกิดศักย์ไฟฟ้าบนหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริก	74
4.23 แสดงค่าการเปลี่ยนรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิลีกทริกตามแนวรัศมี	75

- 4.24 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 1 76
- 4.25 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 2 76

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26 แสดงลักษณะและขนาดอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก	77
4.27 แสดงลักษณะของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 1-4	79
4.27 (ต่อ) แสดงลักษณะของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 5-7	80
4.28 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 ($F_r=77000$ Hz)	80
4.29 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 2 ($F_r=77050$ Hz)	81
4.30 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ($F_r=77100$ Hz)	81
4.31 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 4 ($F_r=77150$ Hz)	82
4.32 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 5 ($F_r=77250$ Hz)	82
4.33 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 6 ($F_r=77300$ Hz)	83
4.34 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กโทรดรูปแบบที่ 7 ($F_r=77350$ Hz)	83
4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่อิเล็กโทรดปฐมภูมิกับอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า	85
4.36 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดสอบ	86
4.37 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของสามอิเล็กโทรดที่ค่าโหลดไฟฟ้าต่างๆ	86
4.38 แสดงกระแสไฟฟ้าของสามอิเล็กโทรดที่ค่าโหลดไฟฟ้าต่างๆ	87
4.39 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ค่าโหลดไฟฟ้าต่างๆ	87
4.40 แสดงแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกลักษณะที่ 1	88
4.41 แสดงแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกลักษณะที่ 2	89
4.42 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิขอบด้านใน	90
4.43 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิขอบด้านใน	90
4.44 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิขอบด้านใน	91
4.45 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร ที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านใน	91

รายการรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.46 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตรที่มีอิล็กโทรดขอบด้านใน	92
4.47 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงเพียงโซอิล็กทริกขนาดต่างๆ ที่มีอิล็กโทรดปฐมภูมิที่ขอบด้านใน	92
4.48 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรที่มีอิล็กโทรดขอบด้านนอก	93
4.49 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตรที่มีอิล็กโทรดขอบด้านนอก	94
4.50 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตรที่มีอิล็กโทรดขอบด้านนอก	94
4.51 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรที่มีอิล็กโทรดขอบด้านนอก	95
4.52 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตรที่มีอิล็กโทรดขอบด้านนอก	95
4.53 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงเพียงโซอิล็กทริกขนาดต่างๆ ที่มีอิล็กโทรดปฐมภูมิที่ขอบด้านนอก	96
4.54 แสดงขนาดของอิล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริก	97
4.55 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรดที่แต่ละส่วนความถี่ต่างๆ	97
4.56 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของอิล็กโทรดตามแนวรัศมีเมื่อกระตุ้น ที่ความถี่โซแนนซ์	98
4.57 แสดงโครงสร้างและตัวแปรไร้มิตติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซอิล็กทริก	99

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ

D	electric displacement
T	mechanical stress
d	piezoelectric constant
E	electric field
S	mechanical strain
s^E	electric compliance (electric field constant)
ϵ^T	permittivity
ν	poisson's ratio
λ_{ij}^2	dimensionless frequency parameter
A_i	Bessel functions of first kind
B_i	Bessel functions of second kind
C_i	Modified Bessel functions of first kind
D_i	Modified Bessel functions of second kind
Q	electric charge
V	voltage
F	mechanical force
k_p	coupling factor for radial mode
k_t	coupling factor for thickness mode
σ	stress tensor
t	traction at point on the surface
u	displacement
f	body force per unit volume
ρ	density
Y	modulus of elasticity
δE	virtual electric field

L	elastic stiffness
e	piezoelectric matrix (stress base)
N	shape function

สัญลักษณ์คำย่อและตัวย่อ (ต่อ)

Φ	electric potential
ω	frequency
F_r	resonance frequency
F_a	anti resonance frequency
L	inductance
R	resistance
C	capacitance

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

ปัจจุบันอุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้าและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เติบโตและมีการแข่งขันมากขึ้น สืบเนื่องได้จากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตออกมาสู่ตลาดมีขนาดที่เล็กกะทัดรัด และมีคุณภาพสูง เช่น มอเตอร์ขนาดเล็ก คอมพิวเตอร์แบบพกพา โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้มีขนาดเล็กเพื่อความสะดวกสบาย คล่องตัวเมื่อนำไปใช้งานและใช้งานได้หลากหลายจึงเป็นสิ่งสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีในส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์หลักซึ่งเกิดจากข้อจำกัดเรื่องขนาดของขดลวดภายในหม้อแปลงไฟฟ้า ดังนั้นจึงเป็นที่มาของการศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหา

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำมาจากวัสดุเซรามิกส์ประเภทที่เรียกว่า เพียโซอิเล็กทริก ที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือ สามารถเปลี่ยนจากพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ และในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน ข้อดีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก คือ มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน ทนต่อกำลังไฟฟ้าที่สูงช่วยลดการเกิดการลัดไหม้ ซึ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบดั้งเดิมที่มีขดลวดหากได้รับกำลังไฟที่สูงเกินไปอาจทำให้ขดลวดลัดไหม้ ทำให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าต่ำลง และเกิดความเสียหาย เนื่องด้วยในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกอาศัยคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกจึงไม่มีสัญญาณรบกวนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งก็ช่วยลดการสูญเสียพลังงาน ทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

ปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกได้มีการนำไปประยุกต์ใช้มากมาย เช่น ในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop Computer) (Torsten et al., 2001) โดยใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานไฟฟ้าให้กับจอแสดงผลแบบ LCD (Liquid crystal display) (Kawashima et al., 1999), (Hirose et al., 1998), (Yang et al., 2006) (Koc et al., 1999) (Kawashima et al., 1994) และ โทรศัพท์มือถือ (Sanchez et al., 2003) (Kim et al., 2005) ด้วยข้อดีของหม้อแปลงที่มีขนาดเล็ก เบา และไม่มีคลื่นแม่เหล็กรบกวนต่อจอภาพ ทำให้ภาพที่ได้มีความคมชัด นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนานำไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากำลังสูงในเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆมากมาย เช่น มอเตอร์อัลตรา-

โซนิกส์ (Manuspiya et al., 2002) เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์ และบัลลาสต์ของหลอดฟลูออเรสเซนต์ (Lee lin et al., 2001), (Baker et al., 2005) นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์เป็น AC-DC คอนเวอร์เตอร์ (Sanchez et al., 2003) (Ryu et al., 2006) (Yamamoto et al., 2002) (Zaitzu et al., 1994) เป็นต้น

ในการศึกษาและวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ผ่านมา ส่วนใหญ่เป็นการมุ่งเน้นศึกษา และวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit), (Chang et al., 2007) (Woo Joo et al., 2001), (Feng et al., 2006) (Boukazouha et al., 2008) (Moo et al., 2005) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมทางไฟฟ้า และทางกลของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกให้อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้าซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบหนึ่งมิติ แต่ในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีการเปลี่ยนรูปทรงใน 3 มิติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาและวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกในสามมิติ โดยการจำลองแบบและวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Jin et al., 1999), (Leung et al., 2004), (Wang et al., 2005) (Sanchez et al., 2003) (Koc et al., 1999) (Moo et al., 2005) (Lerch et al., 1990) (Tsuchiya et al., 2001) เพื่อศึกษาพฤติกรรม และออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสถียรด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเน้นศึกษาในส่วนของคุณสมบัติ พื้นที่ และตำแหน่งของอิเล็กโทรด

1.2 การตรวจเอกซเรย์

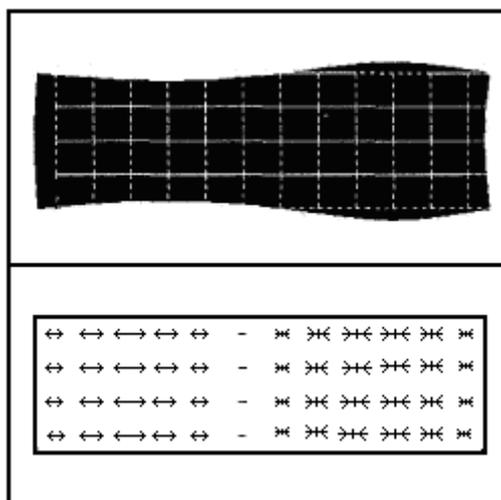
นับตั้งแต่การค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกโดย ปีแอร์ และแจ็ก คูรีย์ ในปี ค.ศ. 1880 จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1956 มีการนำเสนอหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเป็นครั้งแรก โดย โรเซนท์ (Rosen, 1956) และได้มีการค้นคว้าและพัฒนาอย่างกว้างขวางเรื่อยมา ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการตรวจเอกซเรย์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

Y. Jin และคณะ (Jin et al., 1999) ศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อหาความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขาเข้าและขาออก หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบโรเซน ซึ่งประกอบด้วย สองส่วนคือ ด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้คือ เลด เซอร์โคเนท ไททานेट (lead zirconate titanate, PZT) หม้อแปลงมีความยาว 66 มิลลิเมตร ความกว้าง 10 มิลลิเมตร และความหนา 4 มิลลิเมตร และทิศทางของโพลาไรเซชัน (Polarization) ของด้านปฐมภูมิมีทิศขึ้นซึ่งตั้งฉากกับทิศโพลาไรเซชันของด้านทุติยภูมิ ในตารางที่ 1.1 แสดงความสัมพันธ์ค่าศักย์ไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ

และด้านทฤษฎีที่มีความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นการเสด็จัฒพ์ รูปที่ 1.1 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และความเค้นที่เกิดขึ้น

ตารางที่ 1.1 แสดงถึงค่าศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิ (Jin et al., 1999)

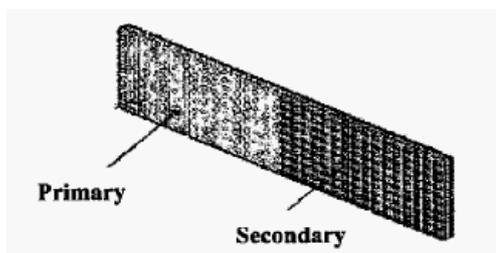
Input voltage				Output voltage	
FREQ=0.100E+06 LOAD CASE=0				FREQ=0.100E+06 LOAD CASE=0	
NODE	VOLT	NODE	VOLT	NODE	VOLT
1	5.0000	18	5.0000	6	389.61
2	5.0000	19	5.0000	12	389.61
3	5.0000	20	5.0000	13	389.61
4	5.0000	21	5.0000	14	389.61
5	5.0000	22	5.0000	15	389.61
6	5.0000	23	5.0000	37	389.61
7	5.0000	24	5.0000	43	389.61
8	5.0000	25	5.0000	44	389.61
9	5.0000	26	5.0000	45	389.61
10	5.0000	27	5.0000	46	389.61
11	5.0000	28	5.0000	72	389.61
12	5.0000	29	5.0000	78	389.61
13	5.0000	30	5.0000	88	389.61
14	5.0000	31	5.0000	89	389.61
15	5.0000	32	5.0000	90	389.61
16	5.0000	33	5.0000		
17	5.0000	34	5.0000		
		35	5.0000		



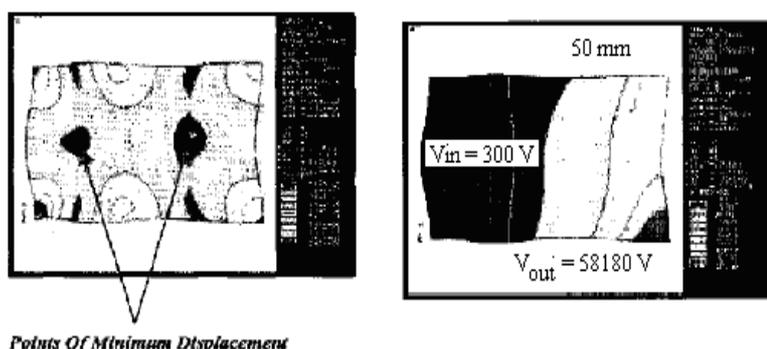
รูปที่ 1.1 แสดงถึงการเปลี่ยนของขนาดและความเค้นที่เกิดขึ้น (Jin et al., 1999)

Micheal Morris และคณะ (Morris et al., 2005) ศึกษาและออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับหลอดไฟ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเป็นแบบโรเซนดิงแสดงในรูปที่ 1.2 มีสองขนาด คือที่ความยาว 50 มิลลิเมตรและ 110 มิลลิเมตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ และบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยที่สุดเพื่อใช้เป็นตำแหน่งสำหรับยึดติดกับฐาน และพบว่าบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดน้อยที่สุด คือบริเวณกึ่งกลางของทั้งสองส่วน สำหรับหม้อแปลงขนาดความยาว 50 มิลลิเมตร ได้

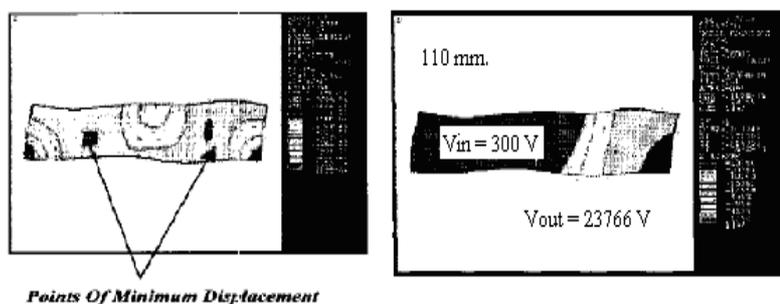
ศักย์ไฟฟ้าทุติยภูมิเป็น 193.93 เท่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าปฐมภูมิ และสำหรับหม้อแปลงที่มีความยาว 110 มิลลิเมตร ได้ศักย์ไฟฟ้าทุติยภูมิเป็น 79.22 เท่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าปฐมภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และ 1.4



รูปที่ 1.2 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโรเซนเพียโซอิเล็กทริก (Morris et al., 2005)

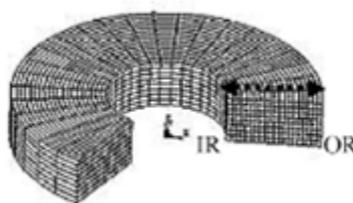


รูปที่ 1.3 แสดงผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดความยาว 50 มิลลิเมตร (Morris et al., 2005)



รูปที่ 1.4 แสดงผลการจำลองวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดความยาว 110 มิลลิเมตร (Morris et al., 2005)

Hing Leung และคณะ (Leung et al., 2004) ใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่การสั่นสะเทือนในโหมดต่างๆ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีลักษณะเป็นวงแหวน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 13.5 มิลลิเมตร และความหนา 0.6 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกคือ เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT) ตัวแปรที่ศึกษาคือ ความถี่เรโซแนนซ์ อัตราส่วนการแปลงพลังงาน และค่าคัปปลิงแฟกเตอร์



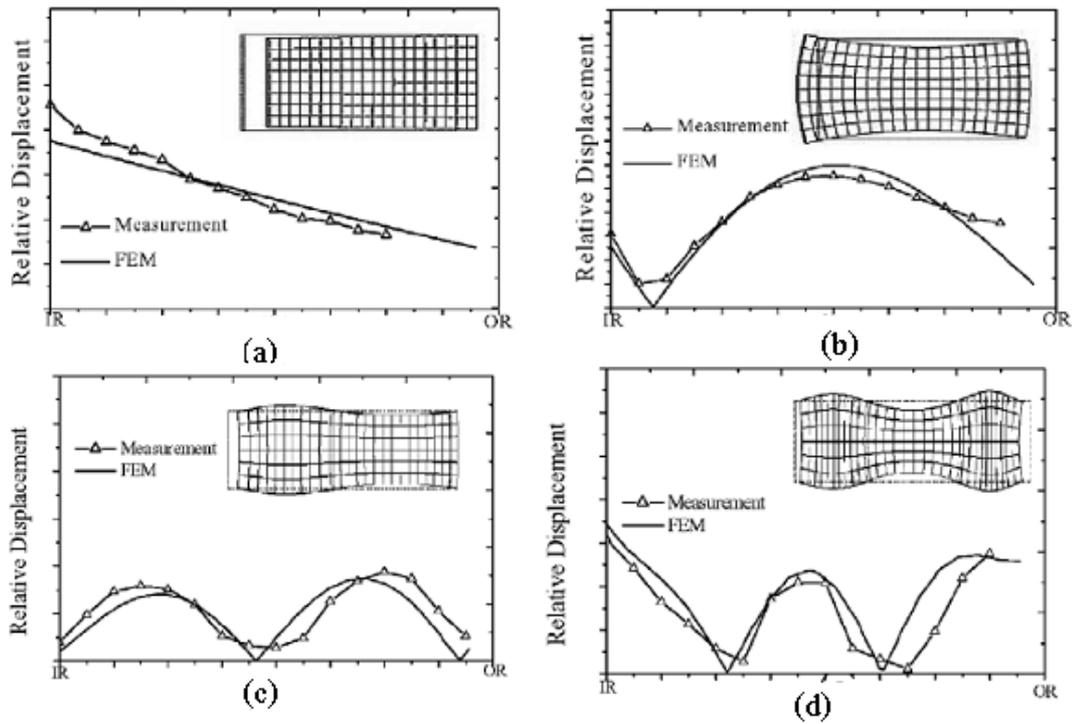
รูปที่ 1.5 แสดงแบบจำลองสามมิติหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบวงแหวน

(Leung et al., 2004)

ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ได้ใช้โปรแกรม ANSYS ในการวิเคราะห์ และได้เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ กับผลการทดลองและผลทางทฤษฎี ดังแสดงในตารางที่ 1.2 ซึ่งเปรียบเทียบค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกของโหมดการสั่นต่างๆ รูปที่ 1.6 แสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปทรง และระยะที่มีการเปลี่ยนของตำแหน่งต่างๆที่โหมดการสั่นต่างๆ

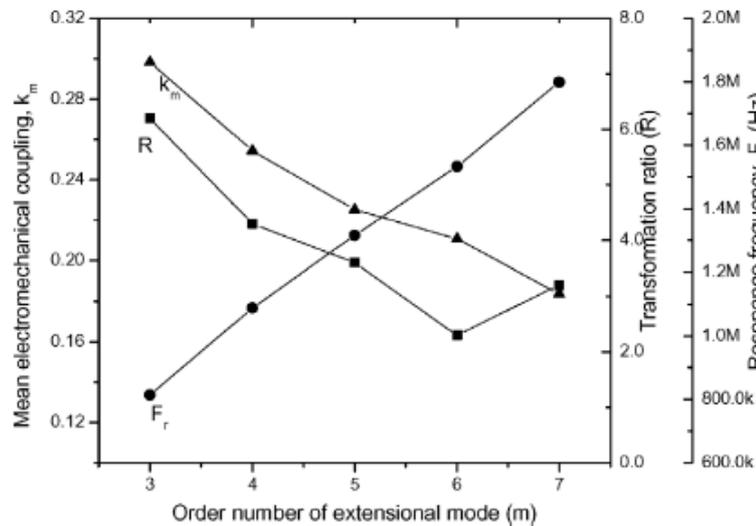
ตารางที่ 1.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถี่เรโซแนนซ์ที่โหมดต่างๆ (Leung et al., 2004)

Order	Analytical (kHz)	Experiment (kHz)	FEM (kHz)
$m = 1$	103.2	119.7	118.2
$m = 2$	463.5	453.3	446.8
$m = 3$	838.2	818.0	815.2
$m = 4$	1141.1	1073.0	1087.1



รูปที่ 1.6 แสดงการลักษณะการเปลี่ยนรูปที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีของการสัน โหมดต่างๆ

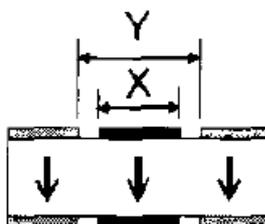
(Leung et al., 2004)



รูปที่ 1.7 แสดงความสัมพันธ์ของค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ อัตราส่วนการแปลง และความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่การทำงาน โหมดต่างๆ (Leung et al., 2004)

จากรูปที่ 1.7 พบว่าที่โหมดการสันสูงขึ้นค่าความถี่เรโซแนนซ์ก็จะเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ (k_m) และอัตราส่วนการแปลง (R) จะมีค่าลดลงเนื่องจากการสันในแนวความหนาส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

Y.C. Wang และคณะ (Wang et al., 2005) ศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกด้วยการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS และการทำการทดลอง หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีลักษณะเป็นคิสก์ และมีทิสโพลาริเซชันซึ่งตั้งตามความหนา ดังแสดงในรูปที่ 1.8 โดยที่อิเล็กโทรดปฐมภูมิคืออิเล็กโทรดที่อยู่ด้านนอก และอิเล็กโทรดทุติยภูมิคืออิเล็กโทรดที่อยู่ด้านใน



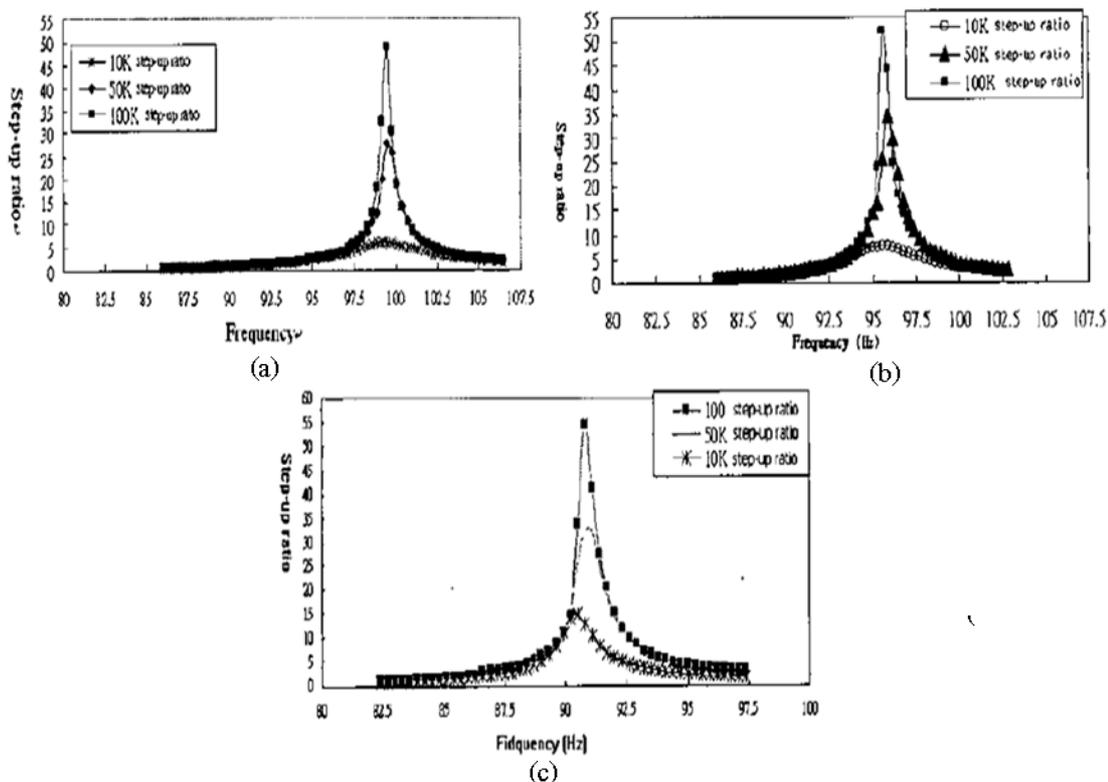
รูปที่ 1.8 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบคิสก์ (Wang et al., 2005)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก โดยแบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 1.3 จะเห็นว่าค่าอัตราส่วนการแปลงพลังงานจะมีค่าสูงเมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดมาก และอัตราส่วนการแปลงจะลดลงเมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดลดลง

ตารางที่ 1.3 แสดงขนาดและอัตราส่วนพื้นที่ของอิเล็กโทรดทั้ง 3 รูปแบบ (Wang et al., 2005)

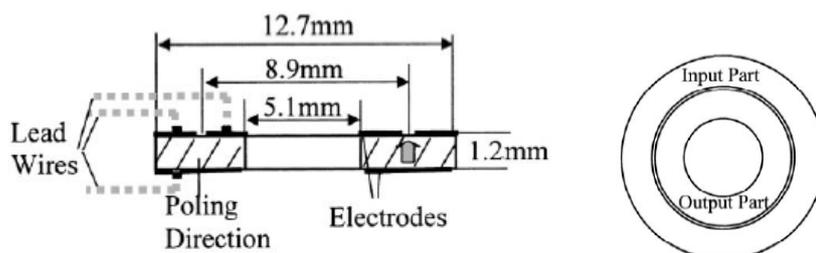
	PT1	PT2	PT3
X(mm)	8	12	16
Y(mm)	4	8	12
Electrode area ratio	32	6.75	2.22
Step-up ratio	High	Medium	Low

ในการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกทั้งสามรูปแบบที่โหลด 10 50 และ 100 กิโลโหม้มได้ผลดังแสดงในรูปที่ 1.9a ถึงรูปที่ 1.9c พบว่าที่โหลด 100 กิโลโหม้ม ค่าอัตราส่วนการแปลงไฟฟ้าจะมีค่าที่สูงที่สุด และจะลดต่ำลงเมื่อโหลดมีค่าลดลงตามลำดับ

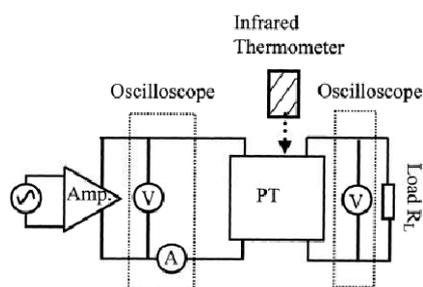


รูปที่ 1.9 แสดงค่าอัตราส่วนสัณยไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดต่างกัน (Wang et al., 2005)

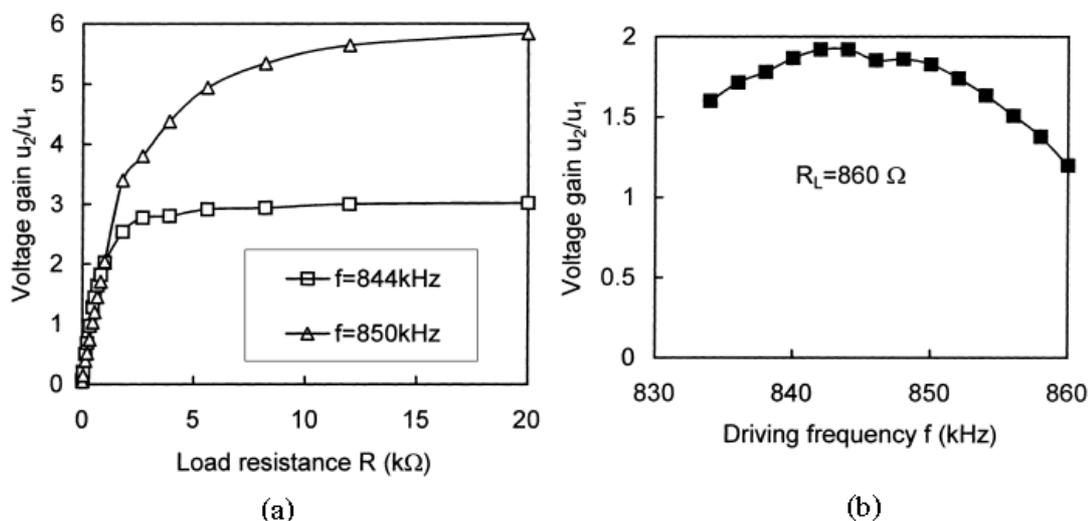
Jun Hui Hu และคณะ (Hu et al., 2001) ศึกษาคุณลักษณะและคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเป็นวงแหวน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5.1 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 12.7 มิลลิเมตร และมีความหนา 1.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.10 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ คือ เลดเซอร์โคเนตไททานเนต (Lead Zirconate Titanate, PZT) ชุดอุปกรณ์ทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก แสดงในรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.10 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเรเดียล (Hu et al., 2001)



รูปที่ 1.11 ชุดทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Hu et al., 2001)

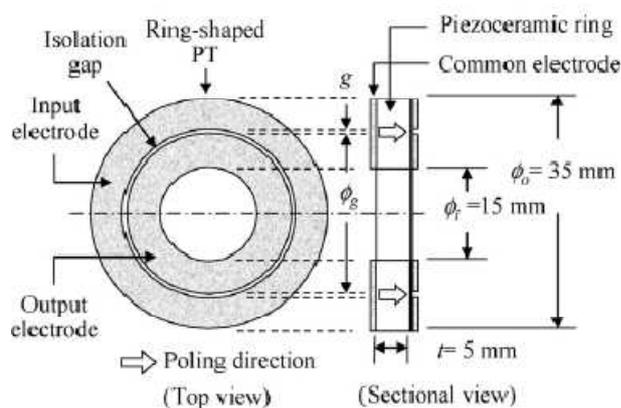


รูปที่ 1.12 (a) แสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากับค่าโหลด และ (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ (Hu et al., 2001)

จากรูปที่ 1.12a ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากับค่าโหลด พบว่าค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อค่าโหลดเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงโหลดค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างคงที่แม้ว่าค่าโหลดจะเพิ่มมากขึ้นก็ตาม ที่โหลดนี้เรียกว่าค่าโหลดที่เหมาะสม (Matching Load, $R_L=1/\omega C_d$) และในรูปที่ 1.12b แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ เมื่อมีโหลดที่เหมาะสมพบว่าที่ความถี่ 843 กิโลเฮิร์ตซ์ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ามีค่าสูงสุด ผลการทดสอบกำลังไฟฟ้าที่ได้ 1.8 วัตต์ พาวเวอร์เด้นซิตี 14.3 วัตต์ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ประสิทธิภาพร้อยละ 92.3 และความต่างศักย์ทุติยภูมิเป็น 1.9 เท่าของความต่างศักย์ปฐมภูมิ

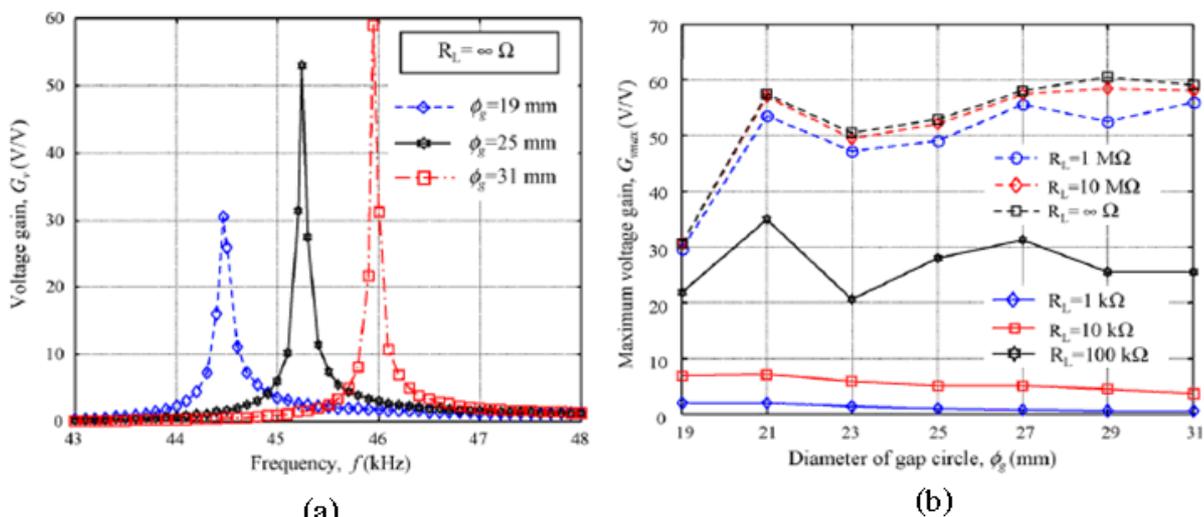
Kuo-Tsai Chang และคณะ (Chang et al., 2007) ศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีลักษณะเป็นวงแหวน ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 15 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 35 มิลลิเมตร และความหนา 5 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 1.13 โดยศึกษาค่า

อัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน โดยการเพิ่มค่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ_g) ของช่องว่างที่แบ่งอิเล็กโทรดออกเป็น ส่วนของอิเล็กโทรดปรัญญูมิ และอิเล็กโทรดทศยญญูมิ



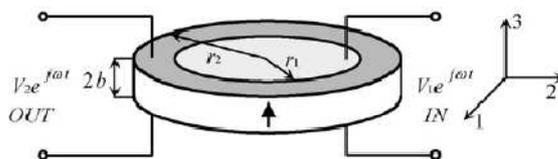
รูปที่ 1.13 แสดงขนาดและลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Chang et al., 2007)

จากรูปที่ 1.14a แสดงความค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างต่างกันที่ความถี่ต่างๆ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่าง (ϕ_g) มากหมายความว่าอิเล็กโทรดปรัญญูมิจะมีพื้นที่ลดลง จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างมากจะมีค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่สูงกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างน้อยกว่า รวมถึงค่าความถี่เรโซแนนซ์ด้วยเช่นกัน รูปที่ 1.14b แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องว่างกับค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเมื่อมีโหลดที่แตกต่างกัน พบว่าเมื่อโหลดเพิ่มขึ้นค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าก็สูงขึ้น

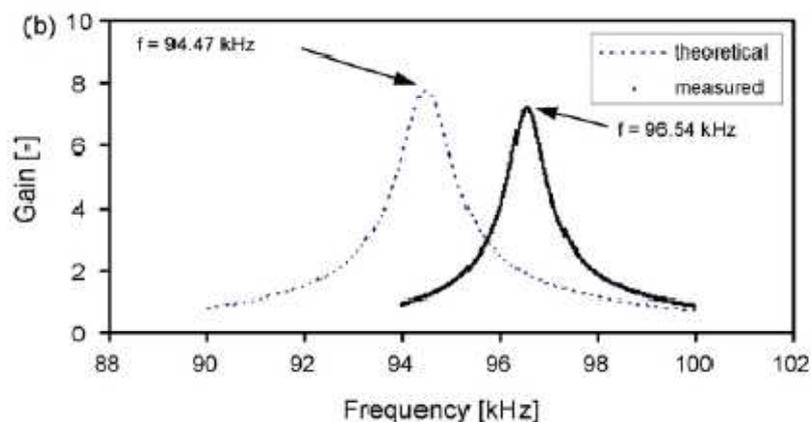


รูปที่ 1.14 (a) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค้ำยไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างต่างกัน (b) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค้ำยไฟฟ้ากับเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างที่โหลดต่างๆ (Chang et al., 2007)

Peter Pulpan และคณะ (Pulpan et al., 2007) ศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูปทรงแบบดิสก์และมีลักษณะอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 1.15 วัสดุที่ใช้เป็นเลดเซอร์โคเนตไททานเนต ในงานวิจัยได้ศึกษาค่าอัตราส่วนค้ำยไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดแตกต่างกัน โดยได้มีการเปรียบเทียบกันระหว่างผลจากการคำนวณกับผลที่ได้จากการทดลอง รูปที่ 1.16 แสดงการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับการทดลองของอัตราส่วนค้ำยไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดด้านปฐมภูมิต่อด้านทุติยภูมิเท่ากับ 0.3

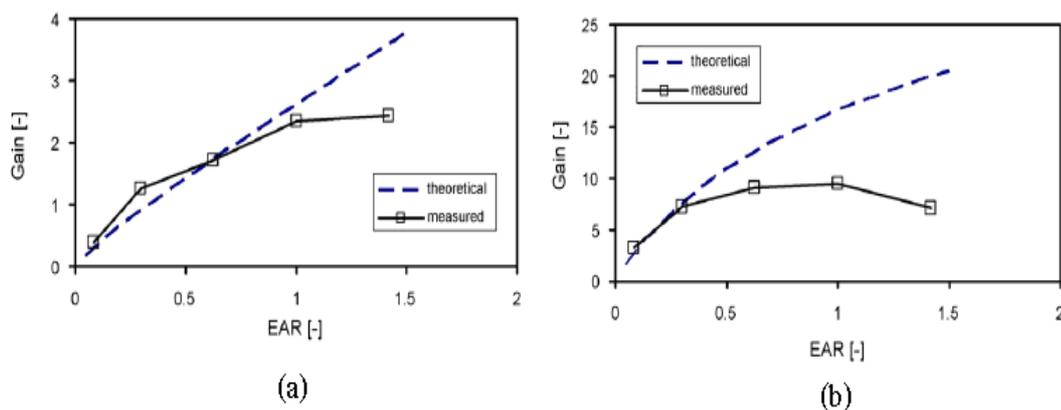


รูปที่ 1.15 แสดงลักษณะองค์ประกอบของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Pulpan et al., 2007)



รูปที่ 1.16 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า (Pulpan et al., 2007)

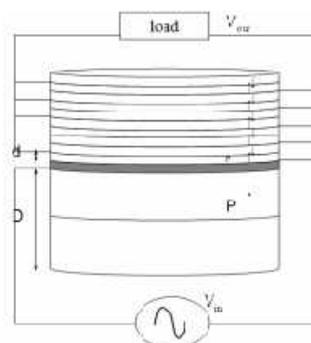
จากรูปที่ 1.17 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากับอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก พบว่าเมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน สำหรับในรูปที่ 1.17a แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าเมื่อโหลดมีค่า 1 กิโลโอห์ม และรูปที่ 1.17b แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าเมื่อโหลดมีค่า 10 กิโลโอห์ม



รูปที่ 1.17 แสดงความสัมพันธ์ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากับอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (a) เมื่อโหลดมีค่า 1 กิโลโอห์ม (b) เมื่อโหลดมีค่า 10 กิโลโอห์ม

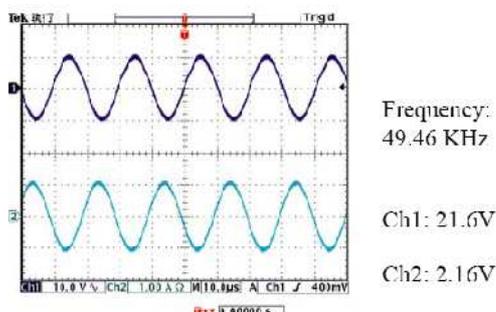
(Pulpan et al., 2007)

Chen-Yao Liu และคณะ (Liu et al., 2006) ศึกษาและออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสตีปดาวน์ที่มีรูปทรงแบบดิสก์ ดังแสดงในรูปที่ 1.18 ประกอบด้วยด้านปฐมภูมิและด้านทุดติยภูมิโดยมีฉนวนกั้นระหว่างกลาง ที่ด้านทุดติยภูมิถูกแบ่งออกเป็นชั้นทั้งหมดสิบชั้น ซึ่งแต่ละชั้นมีทิศของโพลาริเซชันสวนทางกัน



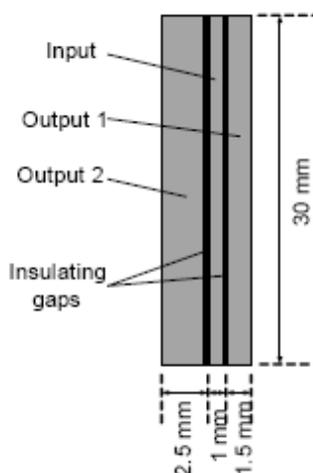
รูปที่ 1.18 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าแมคคิเลเยอร์เพียโซอิเล็กทริกแบบเสตีปดาวน์ (Liu et al., 2006)

จากรูปที่ 1.19 แสดงผลของการทดสอบหม้อแปลงเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า 21.6 V ที่ความถี่ 49.46 กิโลเฮิร์ตซ์ ได้สัญญาณไฟฟ้าด้านทุดติยภูมิ 2.16 โวลต์



รูปที่ 1.19 แสดงศักย์ไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และทุดติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Liu et al., 2006)

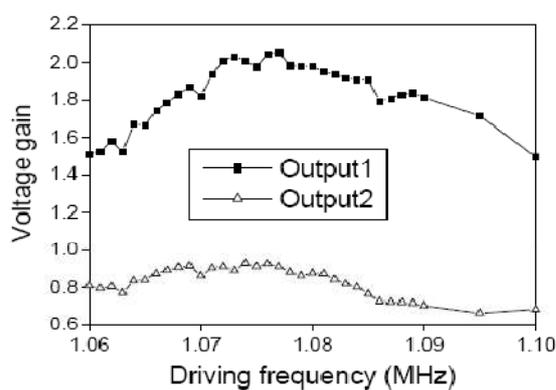
Jinlong Du และคณะ (Du et al., 2004) ออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีสองทุดติยภูมิ มีขนาดและรูปทรงของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ตามรูปที่ 1.20 วัสดุที่ใช้คือ เลคเซอร์โคเนตไททานต (PZT) มีรูปทรงแผ่นสี่เหลี่ยมขนาด 5x30 มิลลิเมตร ตารางที่ 1.4 แสดงค่าพารามิเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 3 ส่วน อิเล็กโทรด 1 ส่วนทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดปฐมภูมิ และเป็น อิเล็กโทรดทุดติยภูมิ 2 ส่วนรูปที่ 1.21 แสดงค่าการเปรียบเทียบอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของด้านทุดติยภูมิทั้ง 2 ที่ความถี่ต่างๆ ซึ่งมีทั้งแบบเสตีปอัพ และแบบเสตีปดาวน์



รูปที่ 1.20 แสดงขนาดและองค์ประกอบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Du et al., 2004)

ตารางที่ 1.4 แสดงค่าพารามิเตอร์ของด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ (Du et al., 2004)

	f_r (MHz)	f_a (MHz)	S (mm ²)	Q_m	γ
Input	1.036	1.070	30	227.8	15.2
Output	1.036	1.095	120	183.2	8.8
Output 1	1.045	1.090	45	307.9	11.8
Output 2	1.036	1.124	75	180	5.9



รูปที่ 1.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆของด้านทุติยภูมิทั้งสอง (Du et al., 2004)

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อออกแบบขนาด และลักษณะของพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกแบบเสตีปคาวน์

1.3.2 เพื่อทดสอบพฤติกรรมและคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริก และเปรียบเทียบกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์

1.3.3 เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อพฤติกรรม และคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกแบบเสตีปคาวน์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถอธิบายถึงหลักการการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริก และสามารถออกแบบชิ้นส่วนเพียงโซลิตริก สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริก เพื่อที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ได้

1.4.2 สามารถนำระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์มาใช้ในการวิเคราะห์ และออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกได้

1.4.3 ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริก เพื่อให้ทราบแนวทางการปรับปรุงการทำงานหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกให้ดีขึ้น

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

1.5.1 การศึกษาและวิเคราะห์หม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกมีรูปทรงวงแหวน และวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ เลดเซอร์โคเนตไททานต

1.5.2 ออกแบบลักษณะ และพื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกแบบเสตีปคาวน์ รวมถึงศึกษาตัวแปรที่ส่งผลต่อพฤติกรรม และคุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพียงโซลิตริก

1.5.3 ใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนท์เอลิเมนต์ในการวิเคราะห์ และยืนยันความถูกต้องด้วยการทดลอง

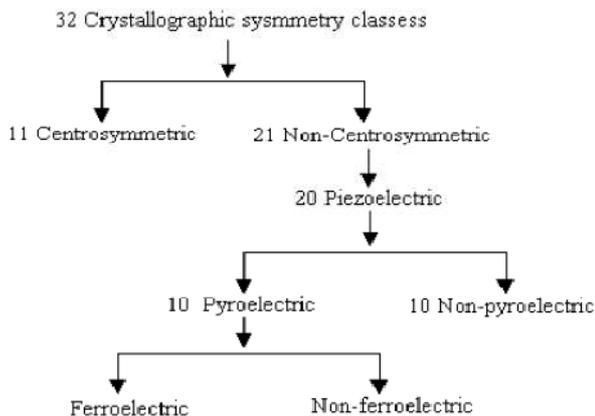
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

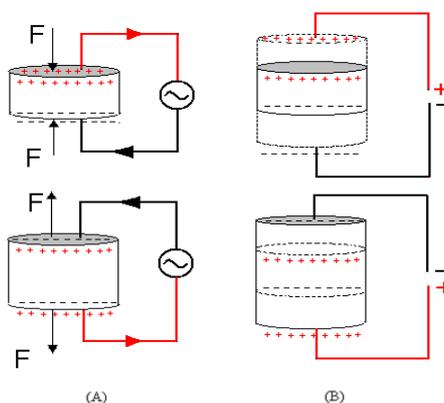
2.1.1 ประวัติและความเป็นมาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกค้นพบครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ. 1880 โดยพี่น้องปีแอร์ และ แจ็ค คูรีซึ่งทั้งสองแสดงให้เห็นว่า เมื่อให้แรงกดหรือแรงอัดแก่ผลึกควอทซ์ จะเกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของวัสดุโดยปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นนั้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงกดหรือแรงอัดที่กระทำต่อผลึกนั้น แต่เมื่อถอดแรงกดหรือแรงอัดที่กระทำต่อผลึกออก ประจุที่บริเวณผิวหน้าทั้งสองจะหายไป ซึ่งต่อมาปรากฏการณ์ดังกล่าวถูกเรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct piezoelectric effect) โดยคำว่า “Piezo” มาจากภาษากรีก ซึ่งหมายถึง “Press” การนำคำว่า “Piezo” มาใช้กับ “Electric” จึงทำให้เกิดคำว่า “Piezoelectric” ซึ่งเป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลและสมบัติเชิงไฟฟ้า แต่ ปีแอร์ และ แจ็ค คูรี ไม่ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบผันกลับในเวลานั้น สมบัติดังกล่าวได้จากการเขียนสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์เบื้องต้น โดย ลิปแมนน์ (Lippmann) ในปี ค.ศ. 1881 ซึ่งได้ใช้ทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ทำนายว่า มีปรากฏการณ์แบบผันกลับในวัสดุดังกล่าวเช่นกัน ในระยะต่อมาได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อวางรากฐานทางด้านเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งมีนักวิจัยและนักวิทยาศาสตร์หลายกลุ่มเข้ามามีส่วนร่วมในการวิจัยและพัฒนาปรับปรุงวางกฎเกณฑ์และทฤษฎีต่างๆ เช่น ลอร์ด เคลวิน (Lord Kelvin) โวลต์มาร์ วอยท์ (Woldemar Voigt) ร่วมกันคิดและตั้งกฎและทฤษฎีเพื่ออธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกนั้นขึ้นกับลักษณะสมมาตรของหน่วยเซลล์ โดยสารที่สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้นั้นจะต้องมีลักษณะของหน่วยเซลล์ที่ไม่มีศูนย์กลางความสมมาตร (Non centrosymmetry) ซึ่งการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของหน่วยเซลล์สามารถแบ่งกลุ่มผลึกออกเป็น 32 กลุ่ม โดยจะมีกลุ่มผลึกอยู่ 21 กลุ่มที่ไม่มีศูนย์กลางความสมมาตร และในจำนวน 21 กลุ่มนี้มี 20 กลุ่ม ที่สามารถแสดงสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริกได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการจัดกลุ่มผลึกตามความสมมาตรของผลึก (ที่มา: Lang and Gupta, 2000)

เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้รับแรงกดหรือความเค้นทางกลทำให้มีคู่ประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุลบและประจุบวกเกิดขึ้น และผลที่ตามมาทำให้เกิดสนามไฟฟ้าคร่อม ปรากฏการณ์นี้สามารถเกิดขึ้นในทำนองกลับกันได้ด้วยเช่นกัน จากรูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก เมื่อวัสดุถูกกระตุ้นด้วยสนามไฟฟ้า ตัววัสดุจะหดและขยาย หรือนัยหนึ่งสารสามารถเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกล และมีพฤติกรรมในทำนองกลับกันด้วย โดยปกติแล้ววัสดุเพียโซอิเล็กทริกตามธรรมชาติทิศทางของโพลาริเซชัน (polarization) หรือคู่ประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุลบและบวกที่มีอยู่ในวัสดุนั้นไม่ได้เรียงตัวในทิศทางเดียวกันซึ่งแตกต่างจากวัสดุเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectric) ดังนั้นเพื่อให้วัสดุมีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะต้องผ่านกระบวนการโพลิง (poling process) เพื่อให้คู่ประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุลบและบวกเรียงไปในทิศทางเดียวกัน โดยจะกล่าวถึงกระบวนการนี้ภายหลัง



รูปที่ 2.2 แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

2.1.2 หลักการและพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

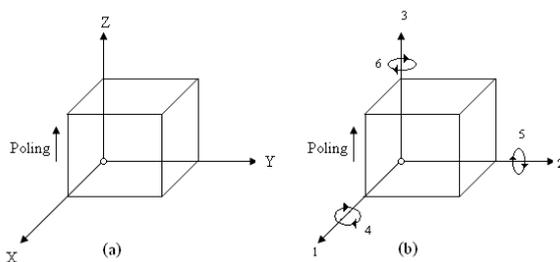
ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก กล่าวคือ เมื่อมีความเค้นทางกลกระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะก่อให้เกิดการกระจัดทางไฟฟ้าเกิดขึ้น พฤติกรรมนี้เรียกว่าสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบตรง (Direct effect) และในทางกลับกันเมื่อมีสนามไฟฟ้ากระทำต่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทำให้เกิดความเครียดเกิดขึ้นในเนื้อวัสดุเพียโซอิเล็กทริก พฤติกรรมนี้เรียกว่า สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบผกผันกลับ (Converse effect) พฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายด้วยสมการ (2.1) และ (2.2) ซึ่งเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางกลของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (2.1)$$

$$S = s^E T + dE \quad (2.2)$$

- เมื่อ D คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (electric displacement) C / m^2
 (มีความสัมพันธ์กับความเข้มของสนามไฟฟ้า (E) โพลาริเซชัน (P) ของวัสดุคือ $D = \varepsilon E + P$ เมื่อ ε คือสภาพการยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวเอง)
- T คือ ความเค้นทางกล (Mechanical Stress) N / m^2
- d คือ ค่าคงที่ของเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant) C / N
- E คือ สนามไฟฟ้า (electric field) N / C
- S คือ ความเครียดทางกล (mechanical strain)
- s^E คือ ค่าความยืดหยุ่น (electric compliance) ภายใต้สนามไฟฟ้าคงที่มีหน่วยเป็น m / N^2
- ε^T คือ สภาพการยอมรับได้ทางไฟฟ้าของตัวกลาง (permittivity) ภายใต้ความเค้น ๆ คงที่มีหน่วยเป็น F / m

สัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่มีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดและการกระจัดทางไฟฟ้าใน 3 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน จึงมีระบุตัวเลขห้อยท้าย 2 ตัว เช่น d_{33} d_{15} เป็นต้น โดยตัวเลขเหล่านี้หมายถึงทิศทางต่างๆ ดังรูป



รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องหมายของแกนสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

รูปที่ 2.3 (a) แสดงถึงลักษณะแกนหลัก 3 ทิศทาง ส่วนรูป 2.4 (b) ใช้สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้ตัวเลขเป็นตัวกำกับคือใช้เลข 1, 2 และ 3 ใช้แทนแนวแกน X แนวแกน Y และแนวแกน Z ตามลำดับ ส่วนเลข 4, 5 และ 6 แสดงถึงแกนเนือรอบแกน 1, 2 และ 3 ตามลำดับ เมื่อตัวเลขตัวแรก หมายถึงทิศทางโพลาริเซชัน ตัวเลขตัวที่สองจะหมายถึงทิศทางของความเครียด

2.1.3 ความถี่ธรรมชาติและโหมดการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าและในทางกลับกันก็สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปของการสั่นสะเทือนหรือการเปลี่ยนขนาด สำหรับลักษณะของโหมดการสั่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถแบ่งได้โดยทั่วไป 5 โหมดด้วยกันดังแสดงในตารางที่ 2.1 โดยที่ลูกศรในแต่ตัวอย่างหมายถึงทิศทางโพลาริเซชัน

ตารางที่ 2.1 แสดงรูปทรงและทิศทางการยึดหดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา:Laoratanakul et al., 2002)

Shape	Vibration mode	Electromechanical coupling factor	Frequency (Hz)						
			1k	10k	100k	1M	10M	100M	
	Radial mode: $d > 20$	k_D				█			
	Thickness mode for plate: $w1$ and $w2 > 10t$	k_{33}					█		
	Thickness shear mode for plate: $w1$ and $w2 > 10t$	k_{32}			█				
	Length or transverse mode for plate: $l > 10t$, $w > 3t$ and $l > 3w$	k_{31}			█				
	Length extensional: $t > w1$ and $w2$	k_{33}					█		

note: ↑ is poling direction and ↓ is displacement (direction)

ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency, Hz)

ความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับรูปทรง ขนาด และเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งความถี่ธรรมชาติมีได้หลายค่าทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของโหมดการสั่น สำหรับการสั่นแบบอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 ตามลำดับ และในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของ ชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริกสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) ส่วนลักษณะของโหมดการสั่นของ รูปทรงวงแหวน และรูปทรงแผ่นวงกลมสามารถหาได้จากสมการที่ (2.3) และ สมการที่ (2.4) ตามลำดับ

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[\frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{1/2}; i = 0,1,2,\dots, j = 0,1,2,\dots \tag{2.3}$$

เมื่อ a คือ รัศมีภายนอก (m) , b คือ รัศมีภายใน (m)

h คือ ความหนา (m), γ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

ν คือ Poisson's ratio

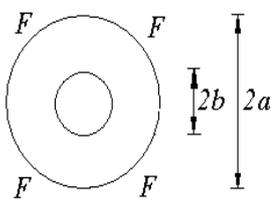
E คือ Modulus of elasticity (N/m^2)

รูปแบบโหมดการสั่นของวงแหวน (Mode shape of annular plate) (Blevins, 1979)

$$\tilde{Z}_{ij}(r, \theta) = \left[a_{ij} A_i \left(\frac{\lambda_{ij} r}{a} \right) + b_{ij} B_i \left(\frac{\lambda_{ij} r}{a} \right) + c_{ij} C_i \left(\frac{\lambda_{ij} r}{a} \right) + d_{ij} D_i \left(\frac{\lambda_{ij} r}{a} \right) \right] \cos i \theta; \quad (2.4)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

ตารางที่ 2.2 แสดงเงื่อนไข และค่าตัวแปรไร้มิติ λ_{ij}^2 ของรูปร่างวงแหวน (ที่มา: Blevins, 1979)

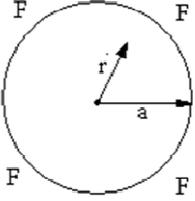
Description: Free-Free		λ_{ij}^2				
	i	j	b/a			
			0.1	0.3	0.5	0.7
	2	0	5.3	4.91	4.28	3.57
	0	1	8.77	8.36	9.32	13.2
	3	0	12.4	12.26	11.4	9.86
	1	1	20.5	18.3	17.2	22
	2	1	34.9	33	31.1	37.8
	v=0.3					

รูปแบบโหมดการสั่นของแผ่นวงกลม (Mode shape of circular plate) (Blevins, 1979)

$$\tilde{Z}_{ij}(r, \theta) = \left[a_{ij} A_i \left(\frac{\lambda_{ij} r}{a} \right) + b_{ij} B_i \left(\frac{\lambda_{ij} r}{a} \right) \right] \cos i \theta; \quad (2.5)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

ตารางที่ 2.3 แสดงเงื่อนไข และค่าตัวแปรไร้มิติ λ_{2ij} ของรูปร่างดิสก์ (ที่มา: Blevins, 1979)

Description:Free-Free	j	λ_{2ij}			
		i			
		0	1	2	3
	0	*	*	5.253	12.23
	1	9.084	20.52	35.25	52.91
	2	38.55	59.86	83.9	111.3
	3	87.8	119	154	192.1
	V=0.3				

เมื่อ $\lambda = f(\text{boundary condition, geometry, Poisson's ratio})$

$A_i =$ Bessel functions of first kind

$B_i =$ Bessel functions of second kind

$C_i =$ Modified Bessel functions of first kind

$D_i =$ Modified Bessel functions of second kind

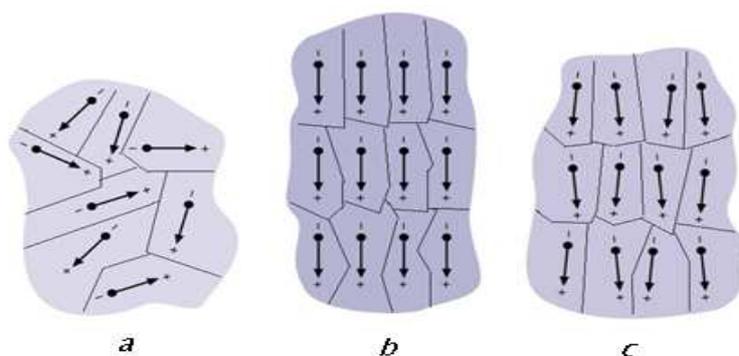
$r =$ รัศมีจากจุดศูนย์กลาง (m)

2.2 การทำโพลิงวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

การทำโพลิงแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่จะทำให้วัสดุมีคุณสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริก ในการทำโพลิงแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือขั้นตอนของฉาบอิเล็กโทรด และขั้นตอนกระบวนการโพลิง

2.2.1 กระบวนการโพลิง (Poling process)

สารเซรามิกโดยทั่วไปแล้วผลึกของสารจะประกอบไปด้วยโดเมนในหลายทิศทาง และถ้าทิศทางของโดเมนดังกล่าวมีการกระจายตัวแบบสุ่ม จะส่งผลให้สภาพการมีขั้วรวมเป็นศูนย์ หรือค่าโพลาไรเซชันสุทธิเท่ากับศูนย์แล้ว ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกก็หายไปจากการรวมโดเมนจะหักล้างกันหมดทำให้ไม่แสดงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริก สารเซรามิกจะมีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกได้เมื่อได้รับสนามไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเข้มสูงและที่อุณหภูมิสูงพร้อมกัน เพื่อเหนี่ยวนำทิศทางโพลาไรเซชันของแต่ละโดเมนเกิดการเรียงตัวใหม่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้า กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า กระบวนการโพลิง

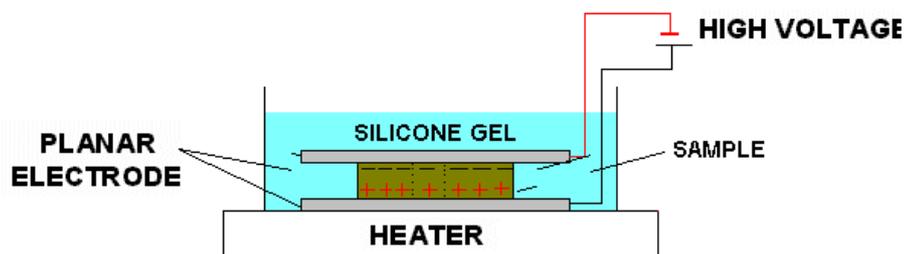


รูปที่ 2.4 a, b และ c แสดงทิศทางโพลาไรเซชันก่อนการโพลิง ขณะโพลิง และหลังการโพลิง ตามลำดับ (ที่มา: <http://www.physikinstrumente.com>)

กระบวนการโพลิงมีด้วยกันหลายประเภทซึ่งก็แบ่งตามความเหมาะสมกับชนิดของสาร และขนาดรูปร่างของสารที่นำมาทำการโพลิง โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลัก คือ

2.2.1.1 กระบวนการโพลิงแบบร้อน (Hot poling)

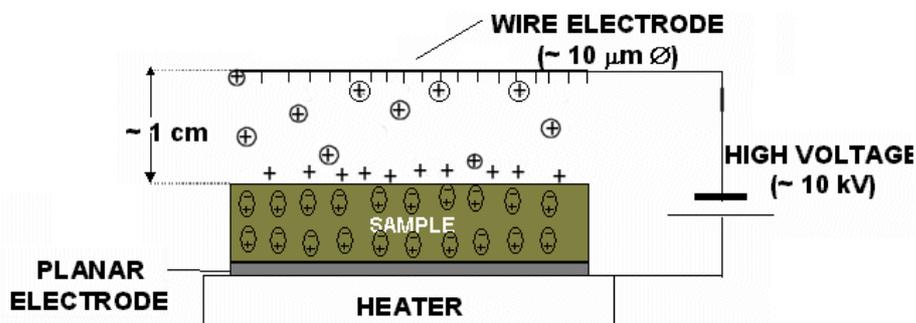
กระบวนการนี้เป็นการนำสารตัวอย่างไว้ภายใต้สนามไฟฟ้าตรงความเข้มสูง และแช่ไว้ในของเหลวอุณหภูมิสูงซึ่งส่วนมากจะนิยมแช่ไว้ในซิลิโคนเหลวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าหรือเท่ากับอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดประกายไฟจากสนามไฟฟ้าความเข้มสูงขณะทำการโพลิง การโพลิงวิธีนี้ใช้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มต่ำกว่ากระบวนการโพลิงวิธีอื่น เนื่องจากทิศทางของโดเมนนั้นสามารถปรับได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการ โพลิงแบบร้อน

2.2.1.2 โครนา โพลิง (Corona poling)

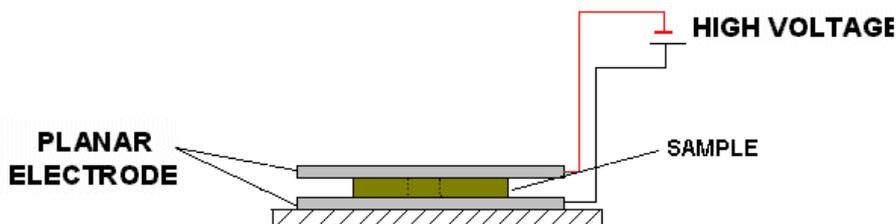
กระบวนการนี้เป็นการให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงโดยผ่านทางเข็มโลหะปลายแหลมไปยังวัสดุโดยที่ปลายเข็มจะอยู่ห่างจากวัสดุที่ทำการโพลิงประมาณ 1 เซนติเมตร สนามไฟฟ้าความเข้มสูงจะวิ่งจากปลายเข็มผ่านวัสดุไปสู่อิเล็กโทรดอีกด้านที่มีการให้ความร้อน ผลของการเหนี่ยวนำทำให้ทิศทางของโดเมนเกิดการเรียงตัวกันตามสนามไฟฟ้าที่ได้รับ กระบวนการนี้เหมาะสมกับวัสดุผสม และกระบวนการนี้สามารถใช้กับวัสดุที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ และชิ้นงานที่มีความหนาแน่นต่ำได้



รูปที่ 2.6 แสดงกระบวนการ โครนาโพลิง (ที่มา: optoweb.fis.uniroma2.it/.../coronapoling.html)

2.2.1.3 คอนเวนชันนอล โพลิง (Conventional poling)

กระบวนการโพลิงวิธีนี้เป็นกรให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงผ่านวัสดุที่มีแผ่นอิเล็กโทรดประกบอยู่ทั้งสองด้านเพื่อให้ทิศทางของโดเมนเรียงตัวกันไป ในทิศทางเดียวกัน โดยจะกระทำที่อุณหภูมิห้อง การโพลิงด้วยวิธีแบบนี้มักใช้สำหรับสารเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead zirconate titanate) ส่วนการโพลิงแบบร้อนไม่เหมาะสมกับสารนี้เพราะการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิคูรีทำให้ความต้านทานไฟฟ้าของสารลดลงส่งผลให้ความเป็นฉนวนไฟฟ้าต่ำลง



รูปที่ 2.7 แสดงกระบวนการโพลิงแบบคอนเวนชันนอล

2.2.2 การฉาบอิเล็กโทรด (Electroding)

กระบวนการโพลิงเป็นการทำให้ทิศโดเมนของวัสดุเรียงตัวกันในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าความเข้มสูงที่ให้แก่วัสดุซึ่งกระทำภายในซิลิโคนเหลวดังกล่าวมาในหัวข้อ 2.2.1 ดังนั้นเพื่อให้สนามไฟฟ้าความเข้มสูงสามารถไหลผ่านสารได้ พื้นผิวของสารจึงต้องมีการฉาบอิเล็กโทรดเพื่อเป็นตัวนำในการส่งผ่านสนามไฟฟ้าให้วัสดุจากผิวด้านหนึ่งไปยังผิวด้านหนึ่ง วัสดุที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดควรมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดี ซึ่งในงานอุตสาหกรรมอิเล็กโทรนิคส์และในงานวิจัยนั้นนิยมใช้ ทอง เงิน หรือแพลตินัม เพราะนอกจากสามารถนำไฟฟ้าได้ดีแล้ว โลหะเหล่านี้ไม่ทำปฏิกิริยาความชื้นในอากาศ ซึ่งทำให้ออกซิเจนในน้ำเกิดการทำปฏิกิริยาหรือทำอิเล็กโทรดสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ

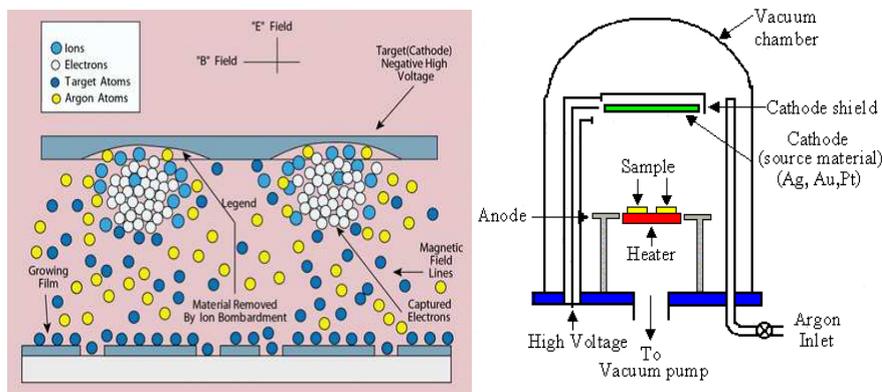
2.2.2.1 การฉาบอิเล็กโทรดด้วยการทา (Electrode painting)

วิธีการฉาบอิเล็กโทรดด้วยวิธีการนี้เป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก คือการทาดำนำไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของของสารละลายที่ผสมสารตัวนำในบริเวณที่ต้องการฉาบอิเล็กโทรดแล้วทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิสูงประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส เพื่อให้สารละลายตัวนำติดกับชิ้นงานคงทนมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นการไล่ฟองอากาศออกจากรอยต่อระหว่างผิวชิ้นงานกับชั้นอิเล็กโทรด

2.2.2.2 การฉาบอิเล็กโทรดด้วยกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering process)

วิธีสปัตเตอริง ทำได้โดยการใช้อิออนพลังงานสูงวิ่งชนสารตัวนำที่ต้องการฉาบให้หลุดออกมาในรูปของไอพุ่งเข้าจับชิ้นงานเป็นชั้นของฟิล์มบาง โดยเกิดขึ้นภายใต้ภาวะสุญญากาศ อาศัยหลักการดิสชาร์จไฟฟ้าแล้วทำให้สปัตเตอร์แก๊ส (แก๊สอาร์กอน) แดกตัวเป็นไอออน จากนั้นไอออนจะถูกเร่งให้เข้าชนแผ่นเป้าสารเคลือบ (target) ซึ่งต่ออยู่กับขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ทำให้อิออนของเป้าสารเคลือบที่ถูกชนด้วยไอออนของแก๊สอาร์กอน

หลุดและวิ่งด้วยความเร็วสูงเข้าชนและตกเคลือบบนผิววัสดุรองรับ (substrate) ในทุกทิศทางเนื่องจากพลังงานของอนุภาคสารเคลือบสูงมากเมื่อตกกระทบผิววัสดุรองรับก็จะฝังตัวลงในเนื้อวัสดุรองรับทำให้การยึดเกาะดีมาก



รูปที่ 2.8 แสดงกระบวนการสปีดเตอริง

2.3 การวัดสมบัติเพียโซอิเล็กทริกของวัสดุ (Characteristics measurement)

2.3.1 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant)

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกขึ้นกับลักษณะของผลึก ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกมีหลายค่าซึ่งกำหนดโดยใช้อักษร d,e,g,h เป็นสัญลักษณ์แทนค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกที่สำคัญคือ ค่า d ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโพลาริเซชันกับค่าความเค้นที่เกิดขึ้น และยังบอกถึงค่าความเครียด ที่เป็นผลจากสนามไฟฟ้าตามกฎของการอนุรักษ์พลังงาน โดยทั่วไปจะเขียนสัญลักษณ์เป็น d_{ij}

เมื่อ i หมายถึง ทิศทางของสนามไฟฟ้า

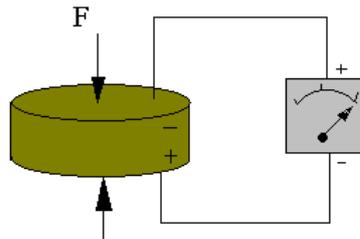
j หมายถึง ทิศทางการเปลี่ยนรูปร่างของสาร

ตัวอย่างเช่น d_{31} หมายถึง การเกิดโพลาริเซชันในแนวแกน Z (แกน3) เนื่องจากการบิดสนามไฟฟ้าทำให้เกิดความเค้นในแนวแกน X (แกน1)

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกเป็นค่าที่วัดได้ค่อนข้างง่าย และสมบัติดังกล่าวสามารถใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล สามารถวัดได้ด้วยหลายวิธีเช่น

2.3.1.1 วิธี Static และ วิธี Quasi-static

วิธี Static นี้เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว หลักการคือ การใช้แรงทางกลกระทำต่อผลึกหรือสารที่ต้องการวัด ซึ่งทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่บริเวณผิวของอิเล็กโทโรดซึ่งปริมาณประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณแรงทางกลที่กระทำต่อสาร



รูปที่ 2.9 แสดงชุดทดสอบค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธี static

แต่เนื่องจากประจุที่เกิดขึ้นนั้นมีปริมาณที่น้อยและอาจมีการสูญเสียก่อนที่จะทำการวัด ดังนั้นจึงได้มีการปรับปรุงแรงทางกลที่กระทำต่อสารเป็นฟังก์ชันไซน์ และวัดค่าชาร์จ์ (Q) ที่เกิดจากศักย์ไฟฟ้าผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้า (C) ที่ต่อขนานกับสารที่ต้องการวัดเรียกวิธีนี้ว่า วิธี Quasi-static ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d_{33}) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.6)

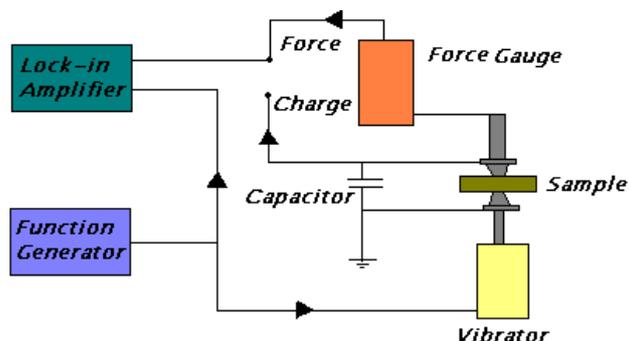
$$d_{33} = \frac{D_3}{\sigma_3} = \frac{Q}{F} = \frac{CV}{F} \quad (2.6)$$

เมื่อ Q คือ ค่าของชาร์จ์ที่เกิด

V คือ ศักย์ไฟฟ้า

F คือ แรงทางกลที่กระทำต่อสาร

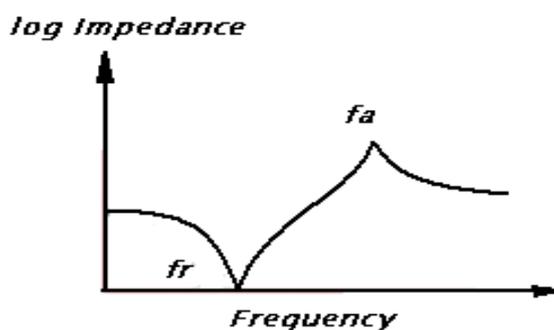
C คือ ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ



รูปที่ 2.10 แสดงชุดทดสอบค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธี Quasi-static
(ที่มา: Taunaumang, 1994)

2.3.1.2 วิธีการเรโซแนนซ์ (Resonance method)

วิธีการเรโซแนนซ์เป็นการพิจารณาการตอบสนองของสารเพียโซอิเล็กทริกต่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ เมื่อสารเพียโซอิเล็กทริกได้รับสนามไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้ภายในเนื้อสารเกิดการสั่นและทิศทางของการสั่นนั้นขึ้นกับรูปร่างและขนาดของสาร (ตารางที่ 2.1) และที่ความถี่ค่าหนึ่งจะทำให้สารเกิดการสั่นและมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลอย่างรวดเร็วมาก ซึ่งเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency, f_r) และเมื่อเพิ่มความถี่ไปเรื่อยๆ จนถึงความถี่อีกค่าหนึ่งที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของสารมีค่าสูงสุดทำให้การแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานได้น้อยที่สุด เรียกความถี่นี้ว่า ความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (Anti resonance frequency, f_a) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยค่าที่บ่งบอกถึงความสามาถในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นกลหรือในทางกลับกันนั้นคือ ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ (Coupling factor, k)



รูปที่ 2.11 แสดงความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์จากค่าอิมพีแดนซ์

ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์สามารถคำนวณได้จากความถี่เรโซแนนซ์และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ โดยค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ขึ้นกับลักษณะโหมดการสั่นและรูปร่างของสาร โดยค่าคัปปลิง

แฟกเตอร์ของสารที่มีรูปทรงแบบแผ่นหรือแผ่นจานกลม (ขนาดของผิวใหญ่เมื่อเทียบกับความหนา) หรือแบบแท่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) และ สมการที่ (2.8)

$$k_p^2 = \frac{2.51(f_a - f_r)}{f_a} - \left(\frac{f_a - f_r}{f_a}\right)^2 \quad (2.7)$$

$$k_t^2 = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f_r}{f_a}\right) \cot\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{f_r}{f_a}\right)\right) \quad (2.8)$$

$$k_t^2 = \frac{d_{33}^2}{S E \epsilon T} \quad (2.9)$$

เมื่อ k_p คือค่าคัปปลิงแฟกเตอร์สำหรับแผ่นหรือแผ่นจานกลมที่สั้นในแนวรัศมี

k_t คือค่าคัปปลิงแฟกเตอร์สำหรับการสั้นแนวความหนา

2.3.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) หรือค่าสภาพยอมรับได้สัมพัทธ์ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity, ϵ) ของวัสดุกับค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ (ϵ_0) ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกแสดงความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า หรือ ความจุไฟฟ้าของสาร อย่างไรก็ตามค่าคงที่ไดอิเล็กทริกจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่และอุณหภูมิขณะทำการวัด โดยสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องวิเคราะห์ความต้านทานเชิงซ้อน (Impedance analyzer) โดยทั่วไปจะทำการป้อนความถี่ในช่วงต่างๆ และวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าในระดับมิลลิโวลต์เพื่อวัดค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) แล้วทำการคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริกโดยใช้สมการ (2.10)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.10)$$

ซึ่ง ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

ϵ_0 คือค่าสภาพยอมรับได้ทางไฟฟ้าของสุญญากาศ ($8.854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)

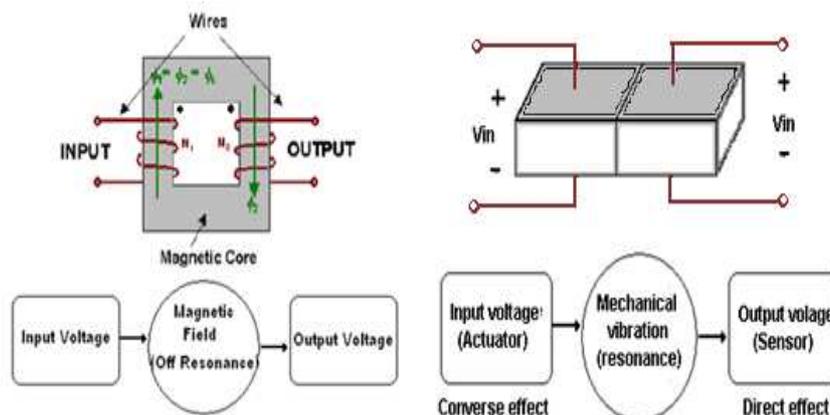
2.4 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

2.4.1 ประวัติและความเป็นมาของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกได้ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย โรเซน (C.A. Rosen) ในปี ค.ศ. 1954 และได้จดสิทธิบัตรในปี ค.ศ. 1958 และถูกเรียกว่า หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบโรเซนและหลังจากนั้นก็ได้มีการพัฒนาจากหลายๆบริษัทแต่ก็ยังคงประสบปัญหาในการพัฒนา เช่น การเสียหายของชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริก แต่เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมางานวิจัยด้านนี้ส่วนใหญ่ได้รับความสนใจ และศึกษากันมาในประเทศญี่ปุ่นทำให้มีผลการศึกษาและงานวิจัยค่อนข้างมาก ผลจากการศึกษาและวิจัยนี้ทำให้ในปัจจุบันหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีขนาดเล็กกะทัดรัด ประสิทธิภาพสูง และมีการนำไปประยุกต์อย่างหลากหลายส่งผลทำให้หม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกมีรูปทรงที่เปลี่ยนไปจากเดิม (ซึ่งเป็นทรงสี่เหลี่ยมเป็นเป็นวงกลมหรือวงแหวน) เพื่อความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้งาน อาทิเช่น นำมาใช้ในหลอด Cathode Fluorescent สำหรับจอภาพแบบ Liquid crystal display (LCD) สำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพา และในปัจจุบันได้มีการศึกษาที่นำมาใช้เป็นแหล่งแปลงพลังงานสำหรับคอมพิวเตอร์แบบพกพาด้วย

2.4.2 หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเกิดจากการประยุกต์คุณสมบัติเด่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก นั่นคือคุณสมบัติในการเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปของการสั่นสะเทือนซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผันกลับ และใช้คุณสมบัติการแปลงจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรงเข้ามาช่วย คุณสมบัติทั้งสองนี้ถูกใช้ประดิษฐ์หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก วัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นจะแทนที่ส่วนของขดลวดแกนแม่เหล็กในหม้อแปลงแบบทั่วไปซึ่งอาศัยหลักการของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดปฐมภูมิและขดลวดทุติยภูมิ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกนั้นประกอบด้วยสองส่วน คือส่วนที่เป็นตัวทำงาน (actuator) และส่วนที่เป็นตัวรับรู้ (sensor) ดังแสดงในรูป 2.12 โดยในส่วนของตัวทำงานนั้นจะเป็นปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบผันกลับซึ่งแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลแล้วการสั่นสะเทือนจะถ่ายเทไปยังชิ้นวัสดุในส่วนที่สองคือส่วนตัวรับรู้ซึ่งทำหน้าที่แปลงจากการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้าออกมาโดยอาศัยปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกแบบตรง



รูปที่ 2.12 แสดงการหลักการการทำงานของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก

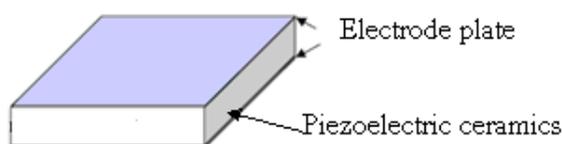
(ที่มา: <http://kirkof.psu.edu/Banff/202004/Uchino/20PiezoTransformer.pdf>)

ตารางที่ 2.4 แสดงการเปรียบเทียบคุณลักษณะระหว่างหม้อแปลงไฟฟ้าแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับหม้อแปลงไฟฟ้าแบบเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา:Laoratanakul, 2002)

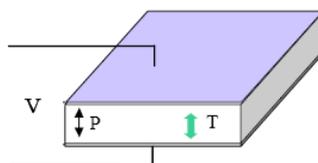
		Electromagnetic Transformers	Piezoelectric Transformers
Structure	Material	Magnetic & conductors	Piezoelectric ceramics
	Volume	Big	Small
	Weight	Heavy	Light
Performance	Step-up ratio	Several ten times	Several hundred times
	Output current	High	Low
	Driving Frequency	Wide	Low
	Insulation	Good	Superior
	Efficiency	80% or more	Above 90%
	Load dependence	Low	High
	Magnetic noise	High	No
	Combustibility	Flammable	Nonflammable

2.4.3 ชนิดและประเภทของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก มีหลักการทำงานโดยอาศัยหลักการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลในรูปของการสั่นสะเทือน และแปลงการสั่นสะเทือนเป็นพลังงานไฟฟ้า ในรูปของแรงดันไฟฟ้าด้วยคุณสมบัติพิเศษของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วยสองส่วน คือ ส่วนของด้านปฐมภูมิ และส่วนด้านทุติยภูมิ โดยทั้งสองส่วนนี้ประกอบด้วยชั้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และส่วนของอิเล็กทรอนิกส์ ดังรูปที่ 2.13 หม้อแปลงแบบเพียโซอิเล็กทริกสามารถทำงานได้ทั้งการสั่นแบบทรานส์เวิร์สโหมด และการสั่นแบบเรเดียลโหมด สำหรับการสั่นแบบทรานส์เวิร์สโหมดนั้น ทิศทางของการสั่นสะเทือนจะขนานกันกับทิศทางของโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 2.14 ส่วนการสั่นแบบเรเดียลโหมดนั้นทิศทางของการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะตั้งฉากกับทิศทางของโพลาริเซชัน ดังรูปที่ 2.15

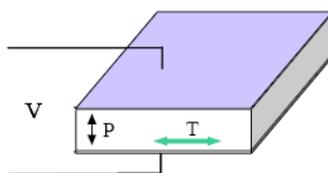


รูปที่ 2.13 เพียโซอิเล็กทริกอิเลเมนต์ (Piezoelectric Element) ประกอบด้วยส่วนของแผ่นอิเล็กทรอนิกส์ และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา:Lee Lin, 2001)



รูปที่ 2.14 ทรานส์เวิร์สโหมดเพียโซอิเล็กทริกอิเลเมนต์

(Transverse Mode Piezoelectric Element) (ที่มา:Lee Lin, 2001)

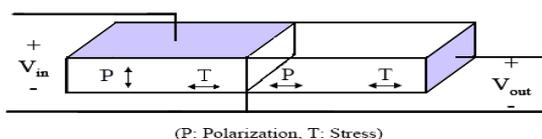


รูปที่ 2.15 เรเดียลโหมดเพียโซอิเล็กทริกอิเลเมนต์

(Radial Mode Piezoelectric Element) (ที่มา:Lee Lin, 2001)

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก สามารถแบ่งตามลักษณะของการสั่นสะเทือน ดังที่ได้กล่าวแล้วนั้นออกเป็น 3 ประเภทหลัก คือ

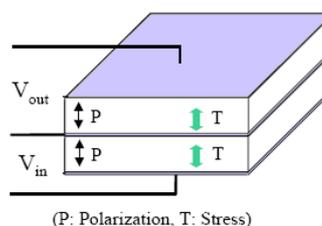
2.3.3.1 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบโรเซ็น (Rosen piezoelectric transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ประกอบด้วยด้านปฐมภูมิที่มีโหมดการสั่นแบบเรเดียล และด้านทุติยภูมิมีโหมดการสั่นในแบบทรานเวิร์ส



รูปที่ 2.16 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบโรเซ็นเพียโซอิเล็กทริก

(Rosen Piezoelectric Transformer) (ที่มา:Lee Lin, 2001)

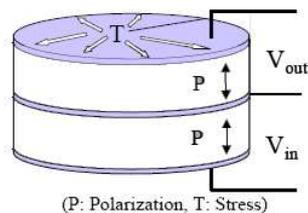
2.3.3.2 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบดิกเนสไวเบอร์ชันโหมด (Thickness vibration mode piezoelectric transformer) (Zaitzu et al., 1994) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ประกอบด้วยด้านปฐมภูมิที่มีโหมดการสั่นแบบทรานเวิร์ส และ ด้านทุติยภูมิมีโหมดการสั่นแบบทรานเวิร์ส



รูปที่ 2.17 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบดิกเนสไวเบอร์ชันโหมดเพียโซอิเล็กทริก

(Thickness Mode Piezoelectric Transformer) (ที่มา:Lee Lin, 2001)

2.3.3.3 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเรเดียลไวเบอร์ชันโหมด (Radial vibration mode piezoelectric transformer) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ประกอบด้วยประกอบด้านปฐมภูมิที่มีโหมดการสั่นแบบเรเดียล และ ด้านทุติยภูมิมีโหมดการสั่นแบบเรเดียล



รูปที่ 2.18 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเรเดียลโหมดเพียโซอิเล็กทริก

(Radial Mode Piezoelectric Transformer) (ที่มา:Lee Lin, 2001)

2.5 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการศึกษา วิเคราะห์ และออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element analysis) และการวิเคราะห์จากวงจรสมมูล (Equivalent circuit)

2.5.1 การออกแบบด้วยการจำลองด้วยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ได้เข้ามาเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการศึกษาวิจัยและออกแบบในงานต่างๆ รวมถึงในด้านไฟฟ้า-กล โดยใช้คอมพิวเตอร์ออกแบบและวิเคราะห์ควบคู่ไปกับการทำการทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบ สำหรับการศึกษาคำลองพฤติกรรมหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกนั้นในตอนเริ่มต้นได้มีการศึกษาด้วยการใช้วงจรสมมูล (Equivalent circuit) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ในหนึ่งมิติ (Jin et al., 1999) แต่ในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกจะมีการสั่นและเปลี่ยนรูปร่างในสามมิติดังนั้นการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จึงเหมาะสำหรับการวิเคราะห์มากกว่า โดยในการศึกษานี้ได้ใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ MSC.MARC ซึ่งมีทฤษฎีพื้นฐานของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก จากสมการสมดุลทางกลดังแสดงในสมการที่ (2.11) (MSC.Marc : theory and user information)

$$\int_V \sigma : \delta \epsilon dV = \int_{\Gamma} t \cdot \delta u dA + \int_V f \cdot \delta u dV \tag{2.11}$$

และสมการสมดุลทางไฟฟ้าสถิตของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแสดงดังสมการที่ (2.12) กล่าวคือ

$$\int_V D \cdot \delta E dV = \int_{\Gamma} \delta \phi D \cdot n dA + \int_V \rho_V \delta \phi dV \tag{2.12}$$

เมื่อ σ	คือ เทนเซอร์ความเค้น (N/m^2)
ε	คือ เทนเซอร์ความเครียด
t	คือ ความเค้นที่จุดบนพื้นผิว (N/m^2)
u	คือ การกระจัด (m)
f	คือ แรงที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (N/m^3)
D	คือ การกระจัดทางไฟฟ้า (C/m^2)
E	คือ สนามไฟฟ้า (N/C)
ρ	คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

โดยทั่วไปความสัมพันธ์เชิงเส้นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรงและทางอ้อมถูกเขียนเพื่ออธิบายพฤติกรรมทางกลดังสมการที่ (2.13)

$$\sigma = L^E : \varepsilon - e \cdot E \quad (2.13)$$

และพฤติกรรมทางไฟฟ้าสถิตสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.14)

$$D = e^T : \varepsilon + \xi^E \cdot E \quad (2.14)$$

เมื่อ L คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่น (N/m^2)

e คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (C/m^2)

ξ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (F/m)

โดยที่ด้วย E และ ε หมายถึงค่าสัมประสิทธิ์นั้นวัดที่สนามไฟฟ้าคงที่และความเครียดคงที่ตามลำดับ ในกรณีของค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก e สามารถเขียนสมการแม่บทแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกลกับสมบัติทางไฟฟ้าได้สมการที่ (2.9) และ (2.10) จากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนิยามค่าของการกระจัดและค่าศักย์ทางไฟฟ้าได้ ดังนี้

$$u = N_u U \quad (2.15)$$

และ $\varphi = N_\phi \Phi$ (2.16)

เมื่อ u คือ การกระจัดทางกล

$$u = \sum_{i=1}^n [\bar{u}_i \bar{v}_i \bar{w}_i]^t$$

คือ ศักยภาพทางไฟฟ้า

$$\varphi = \sum_{i=1}^n [\bar{\varphi}_i]^t$$

N คือ ฟังก์ชันรูปทรง

$$N_u = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix}$$

$$N_\phi = \sum_{i=1}^n [N_i] = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ \dots \ N_n]$$

ความเครียดสามารถนิยามด้วยอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของเวกเตอร์การกระจัด (u) โดยใช้เมทริกซ์โอเปอเรเตอร์ $[L_u]$ ส่วนสนามไฟฟ้านิยามด้วยศักย์ไฟฟ้า (φ) โดยใช้เกรเดียนโอเปอเรเตอร์,

$(E = -\nabla\varphi)$ ดังนั้นความเครียด (ε) และ สนามไฟฟ้า (E) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.17) และ (2.18)

$$\varepsilon = B_u U \tag{2.17}$$

และ $E = B_\phi \Phi$ (2.18)

เมื่อ

$$[B_u] = [L_u][N_u] = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \partial N_i / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial N_i / \partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial N_i / \partial z \\ 0 & \partial N_i / \partial z & \partial N_i / \partial y \\ \partial N_i / \partial z & 0 & \partial N_i / \partial x \\ \partial N_i / \partial y & \partial N_i / \partial x & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B_\phi] = \nabla[N_\phi] = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} \partial N_i / \partial x \\ \partial N_i / \partial y \\ \partial N_i / \partial z \end{bmatrix}$$

$$[L_u] = \begin{bmatrix} \partial / \partial x & 0 & 0 \\ 0 & \partial / \partial y & 0 \\ 0 & 0 & \partial / \partial z \\ 0 & \partial / \partial z & \partial / \partial y \\ \partial / \partial z & 0 & \partial / \partial x \\ \partial / \partial y & \partial / \partial x & 0 \end{bmatrix}$$

นำสมการที่ (2.13) และ (2.17) แทนลงในสมการที่ (2.11) และให้ δU และ $\delta \Phi$ แทน การกระจัดเสมือน และศักย์ไฟฟ้าเสมือน จะได้

$$\begin{aligned} \int_V \delta \varepsilon^T \sigma dV &= \int_V \delta U^T B_u^T \sigma dV = \int_\Gamma t \delta U dA + \int_V f \delta U dV \\ \int_V \delta U^T B_u^T L B_u dV + \int_V \delta U^T B_u^T e B_\phi \Phi dV &= \int_\Gamma t \delta U dA + \int_V f \delta U dV \quad (2.19) \\ \delta U^T K_{uu} U + \delta U^T K_{u\phi} \Phi &= \delta U^T F_u \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันแทนสมการที่ (2.14) และ (2.18) ลงในสมการที่ (2.12) จะได้

$$\begin{aligned} \int_V \delta E^T D dV &= \int_V -\delta \Phi^T B_u^T D dV = \int_\Gamma \delta \Phi D n dA + \int_V \rho_V \delta \Phi dV \\ - \int_V \delta \Phi^T B_u^T e B_u U dV + \int_V \delta \Phi^T B_u^T \xi B_u \Phi dV &= \int_\Gamma \delta \Phi D n dV + \int_V \rho_V \delta \Phi dV \\ -\delta \Phi^T K_{\phi u} U + \delta \Phi^T K_{\phi\phi} \Phi &= \delta \Phi^T \rho_\phi \quad (2.20) \end{aligned}$$

ซึ่งทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ -K_{\phi u} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \Phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_u \\ \rho_\phi \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$$K_{uu} = \int_V B_u^T L B_u dV$$

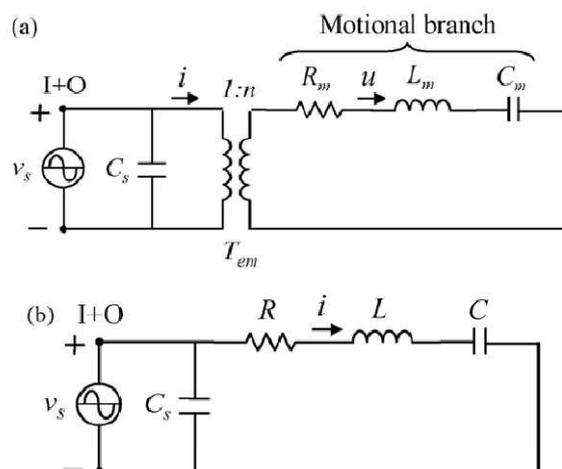
$$K_{u\phi} = \int_V B_u^T e B_\phi dV$$

$$K_{\phi u} = \int_V B_\phi^T e B_u dV$$

$$K_{\phi\phi} = \int_V B_\phi^T \xi B_\phi dV$$

2.5.2 การออกแบบด้วยวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

การศึกษาวิเคราะห์เกี่ยวกับคุณสมบัติ การทำงานและการออกแบบของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกสามารถทำได้โดยการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูล (Equivalent circuit) ของหม้อแปลงไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพฤติกรรมทั้งทางกลและทางไฟฟ้าการจำลองพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกให้เป็นซึ่งวงจรสมมูลสามารถนำเสนอได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงวงจรสมมูลของชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา: Chang และคณะ, 2007)

จากวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ ประกอบด้วย R_m , L_m และ C_m เปรียบได้กับการสูญเสียจากการสั่นทางกลที่เกิดขึ้น มวลและความยืดหยุ่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตามลำดับ ค่าของการสูญเสียเนื่องจากความเป็นฉนวนนั้นสามารถละได้เมื่อหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับสามารถหาจากสมการ (2.22) (Chang และคณะ, 2007)

$$Y_{in} = j\omega_s C_s + \frac{1}{R + j(\omega_s L - 1/\omega_s C)} = |Y_{in}| \angle \theta_{in} \quad (2.22)$$

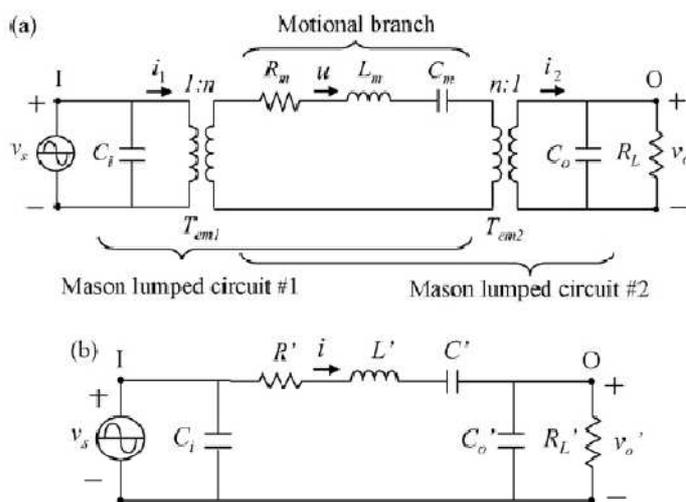
เมื่อ $|Y_{in}|$ คือ ขนาดของสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับ

θ_{in} คือ มุมเฟสของสภาพนำไฟฟ้ากระแสสลับ

ความถี่เรโซแนนซ์ (F_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ (F_a) ของชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริกหาได้จากสมการ (2.23) (Chang และคณะ, 2007) และสมการ (2.24) (Chang และคณะ, 2007)ตามลำดับ

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.23)$$

$$F_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{LCC_s/(C+C_s)}} \quad (2.24)$$



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรสมมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (ที่มา: Chang และคณะ, 2007)

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกประกอบด้วย 2 ส่วนคือส่วนปฐมภูมิและทุตติยภูมิ ซึ่งสามารถจำลองแทนด้วยวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.20 ตัวแปรในวงจรสามารถหาได้จากสมการ (2.25) ถึงสมการ (2.30) (Chang และคณะ, 2007)

$$R' = \frac{R_m}{n_1^2} \quad (2.25)$$

$$L' = \frac{L_m}{n_1^2} \quad (2.26)$$

$$C' = n_1^2 C_m \quad (2.27)$$

$$R' = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 R_L \quad (2.28)$$

$$C_o' = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 C_o \quad (2.29)$$

$$V_o' = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) V_o \quad (2.30)$$

เมื่อ C_i, C_o คือ Damped capacitance ของด้านปฐมภูมิ และทุตติยภูมิ (Farads)

n_1, n_2 คือ Turn ratio

R_m คือ ค่าความต้านทาน (Ohm) เทียบได้กับความสูญเสียของหม้อแปลงไฟฟ้า

เพียโซอิเล็กทริก

L_m คือ ค่าความเหนี่ยวนำ (Henry) เทียบได้กับมวลของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

C_m คือ ค่าการเก็บประจุ (Farads) เทียบได้กับความยืดหยุ่นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

สำหรับค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของด้านทุติยภูมิต่อด้านปฐมภูมิสามารถหาได้จากสมการที่ (2.31) (Chang และคณะ, 2007)

$$G_v = \frac{V_o}{V_s} = \frac{V_o V_o'}{V_o' V_s} = \frac{n_1 |Z_o|}{n_2 |Z_m|} \quad (2.31)$$

$$\text{เมื่อ } Z_m = R' + j\omega L' + \frac{1}{j\omega C'} + \frac{R'_L}{1} + j\omega R'_L C'_o$$

$$Z_o = \frac{R'_L}{(1+j\omega R'_L C'_o)}$$

V_s, V_L คือ ศักย์ไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ และด้านทุติยภูมิตามลำดับ

จากการศึกษาคุณสมบัติของด้านทุติยภูมินั้นมีความสัมพันธ์กับภาวะโหลด (R_L) ที่กระทำและความถี่เรโซแนนท์ นั่นคือประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะสูงสุดเมื่อภาวะโหลด (R_L) มีค่าที่เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ด้านทุติยภูมิ ซึ่งที่ภาวะโหลดที่เหมาะสมนี้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสั้นสะเทือนนั้นจะมีค่าน้อยที่สุด และการถ่ายเทพลังงานสูงสุดซึ่งภาวะโหลด (R_L) สามารถคำนวณได้จาก

$$R_L = \frac{1}{\omega C_o} \quad (2.32)$$

ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\eta = \frac{R_L}{R\{1+(\omega R_L C_o)^2 N^2\} R_L} \quad (2.33)$$

ในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกนั้นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงนั้น นอกจากภาวะโหลดที่เหมาะสมที่กระทำต่อด้านทุติยภูมิแล้ว ยังต้องคำนึงถึงตัวแปรที่มีผลต่อ

แรงดันไฟฟ้าด้านทุติยภูมิ นั้นคือลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ และพื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์ เพราะว่าพื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อค่าความต้านทานของด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิ ถ้าพื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์ด้านปฐมภูมิเพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่ด้านทุติยภูมิลดลงยังผลให้ค่าความต้านทานด้านปฐมภูมิ (R_{in}) ลดลง และความต้านทานด้านทุติยภูมิ (R_{out}) เพิ่มขึ้น

การเปลี่ยนแปลงของความต้านทานด้านปฐมภูมินี้ทำให้อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้า (γ) มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือถ้าค่าความต้านทานไฟฟ้าด้านปฐมภูมิมียค่ามาก อัตราส่วนแรงดันไฟฟ้าจะลดลงสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$\gamma \propto \sqrt{\frac{R_L}{R_{in}}}$$

เมื่อ R_L คือ ค่าภาระด้านทานที่เหมาะสม

ตารางที่ 2.5 แสดงการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทางไฟฟ้ากับทางกล (Laoratanakul, 2002)

<i>Mechanical parameter</i>	<i>Symbol</i>	<i>Electrical parameter</i>
<i>Force</i>	$F \leftrightarrow V$	<i>Voltage</i>
<i>Velocity</i>	$v=\dot{u} \leftrightarrow i=\dot{q}$	<i>Current</i>
<i>Displacement</i>	$u \leftrightarrow q$	<i>Charge</i>
<i>Mass</i>	$m \leftrightarrow L$	<i>Inductance</i>
<i>Compliance</i>	$1/k \leftrightarrow C$	<i>Capacitance</i>
<i>Structural Damping</i>	$c \leftrightarrow R$	<i>Resistance</i>

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการทำวิจัย ซึ่งรวมถึง วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย และขั้นตอนในการทำวิจัย

3.1 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกส์

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทำการทดสอบในงานวิจัยนี้เป็นของบริษัท SPK ELECTRONICS (Sec.5 Chung Hsiao E. Rd., Taipei, Taiwan) คือ

-ลด เซอร์โคเนต ไททานต-4 (Lead zirconate tatanate -4,PZT-4)

-ลด เซอร์โคเนต ไททานต-4ดี (Lead zirconate titanate-4D,PZT-4D)

ตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (SPK ELECTRONICS CO.,LTD.)

Material types		PZT-4	PZT-4D
Properties			
Coupling Coefficients	K_p	0.58	0.62
	K_{33}	0.68	0.71
	K_{31}	0.33	0.33
Piezoelectric Charge Constants (PC/N)	d_{33}	310	360
	d_{31}	-125	-145
Piezoelectric voltage constants ($\times 10^{-3}$ Vm/N)	g_{33}	23.5	31.7
	g_{31}	-11.4	-12.8
Dielectric constants	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1150	1280
Elastic constants ($\times 10^{10}$ N/m ²)	Y_{11}^E	7.9	7.5
	Y_{33}^E	6.6	6.2
Mechanical Quality factor	Q_m	750	1200
Poison's ratio	ν^E	0.33	0.35
Curie temp. (°C)	T_c	308	310
Density (g/cm ³)	ρ	7.7	7.7
Dimension(mm)	ODxIDxT	20x9x0.8	20x9x0.8

3.2 เครื่องมือสำหรับการวิจัย

3.2.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function generator, GW INSTEK :GFG-8210) ใช้กำเนิดสัญญาณฟังก์ชันไซน์เพื่อกระตุ้นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ความถี่ต่างๆ

3.2.2 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope, GW INSTEK:GDS-806S) ใช้วัดความถี่และศักย์ไฟฟ้าของด้านทุติยภูมิและด้านปฐมภูมิขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกทำงาน

3.2.3 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter) ใช้วัดกระแสไฟฟ้าของด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ

3.2.4 เครื่องระเหยแบบสูญญากาศ (Vacuum evaporator) ใช้ในกระบวนการฉาบอิเล็กโทรดด้วยวิธีการระเหยสาร โดยการให้ความร้อนกับโลหะเงินทำให้เกิดการระเหยเป็นไอภายใต้ระบบสูญญากาศ และไอของโลหะเงินจะเคลือบที่ผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อเป็นอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

3.2.5 เครื่องให้ความร้อน (Heater) ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่ซิลิโคนเหลวในกระบวนการโพลิง

3.2.6 เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance/Gain-Phase analyzer, HP 4194A) ใช้ในการทดสอบเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ (Fr) ความต้านทานไฟฟ้า (R) ความเหนี่ยวนำไฟฟ้า (L) ความจุไฟฟ้า (C) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

3.2.7 เครื่องกำเนิดสนามไฟฟ้าความเข้มสูง (High voltage supply) ใช้เป็นแหล่งจ่ายศักย์ไฟฟ้าในกระบวนการโพลิง

3.3 อุปกรณ์สำหรับการวิจัย

3.3.1 สายไฟ

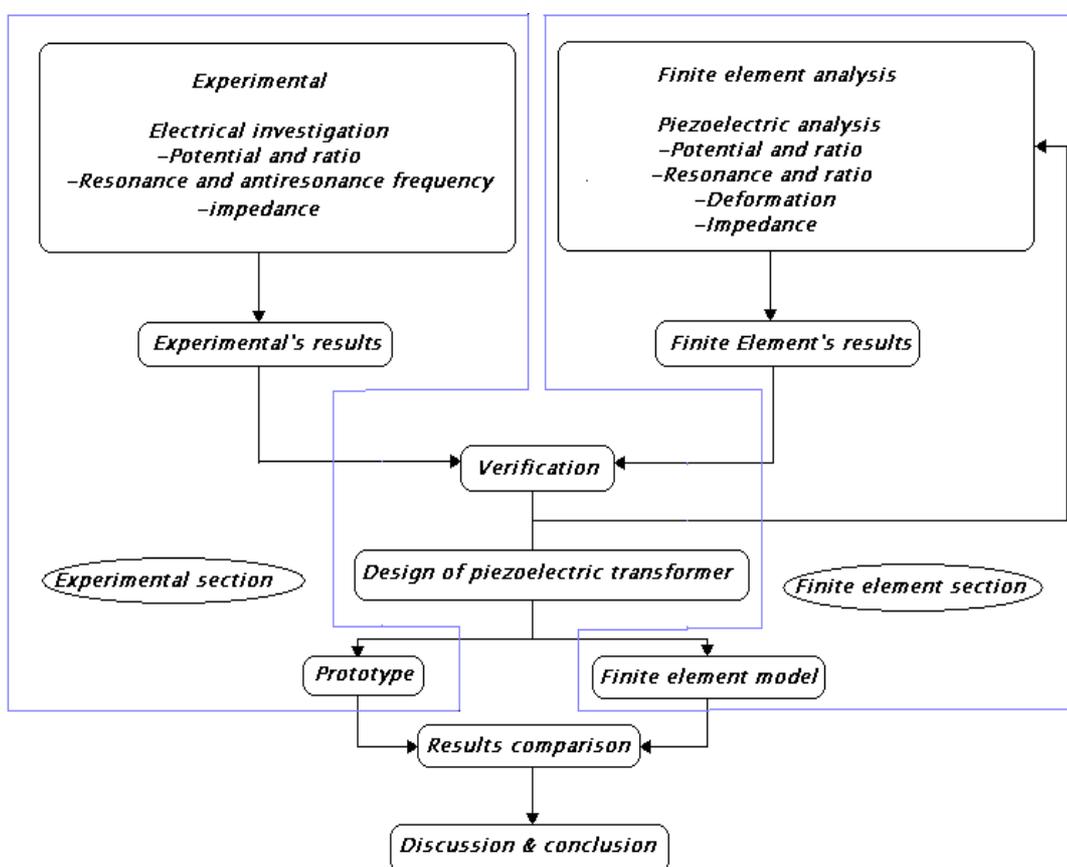
3.3.2 ปากกานำไฟฟ้า (Conductive pen) ใช้สำหรับทาผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรด ก่อนที่จะทำการโพลิง

3.3.3 กาวนำไฟฟ้า (Conductive glue) เนื่องจากสามารถนำไฟฟ้าได้จึงนำมาใช้เป็นตัวเชื่อมระหว่างสายไฟกับอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

3.3.4 ซิลิโคนเหลว (Silicone gel) ใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าในกระบวนการโพลิง โดยในกระบวนการโพลิงจะแช่วัสดุที่ต้องการโพลิงในซิลิโคนเหลวเพื่อป้องกันการลัดวงจร

3.4 ขั้นตอนและวิธีวิจัย

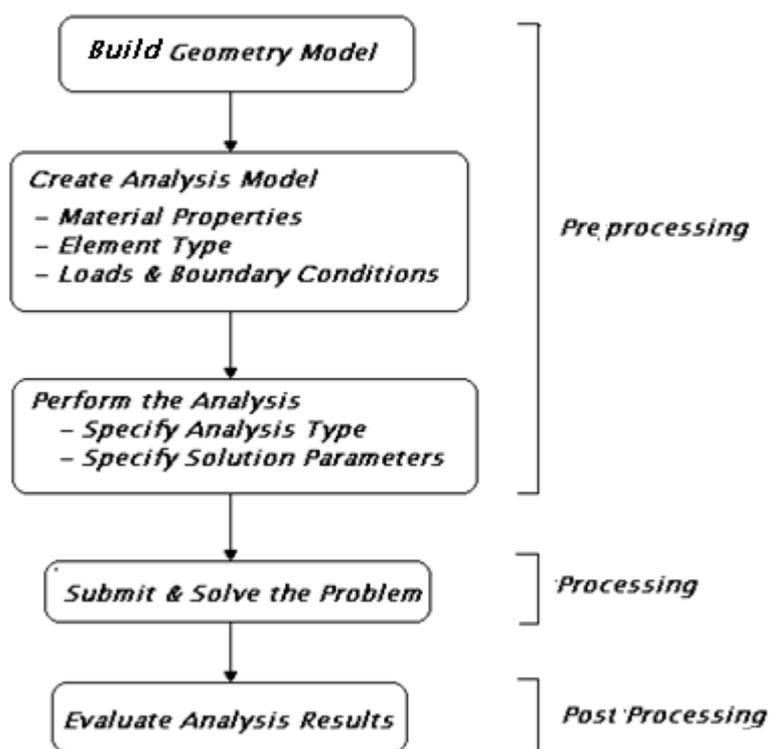
ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกด้วยการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยตัวแปรที่มุ่งเน้นศึกษาคือ ลักษณะพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่ฉาบบริเวณผิวของชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริก แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ที่สร้างขึ้นจะต้องตรวจสอบความถูกต้องด้วยการทดลอง งานวิจัยนี้ได้งานออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของการทดสอบ และส่วนของการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงถึงกระบวนการและขั้นตอนการทำงานของการวิจัยโดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิแสดงขั้นตอนและกระบวนการในการวิจัย

3.4.1 การวิเคราะห์และออกแบบด้วยแบบจำลองด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์

พฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าถูกศึกษาเพื่อเป็นข้อมูลนำไปสู่การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกแบบเสถียรด้วย โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ดังแสดงในรูปที่ 3.2

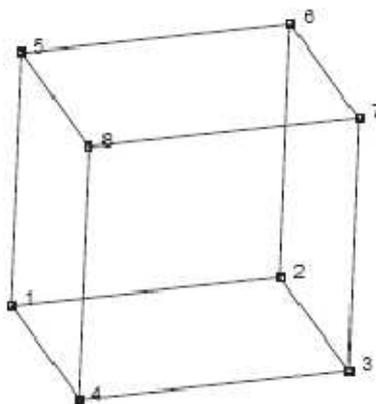


รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์

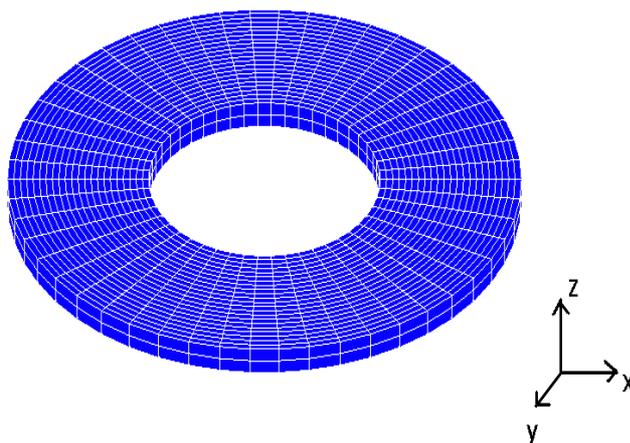
จากแผนภาพกระบวนการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริก แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนของก่อนประมวลผล (Pre processing) ส่วนของการประมวลผล (Processing) และหลังการประมวลผล (Post processing) ซึ่งในแต่ละส่วนก็ประกอบด้วยขั้นตอนย่อยซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 เป็นการสร้างแบบจำลองสามมิติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริก งานวิจัยนี้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซลิตริกได้เลือกลักษณะชิ้นส่วนเพียงโซลิตริกเป็นแบบวงแหวน จากนั้นทำการแบ่งชิ้นวงแหวนออกเป็นเอลิเมนต์ โดยกำหนดให้เอลิเมนต์เป็นแบบ Hex 8 ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ต่อมาปรับพิกัดของการเขียนแบบ และการคำนวณจากพิกัดฉากให้เป็นพิกัด

ทรงกระบอกเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะรูปทรงของชิ้นส่วนเพียโซอิเล็กทริกที่มีลักษณะเป็นวงแหวน



รูปที่ 3.3 แสดงประเภทของเอลิเมนต์แบบ Hex8



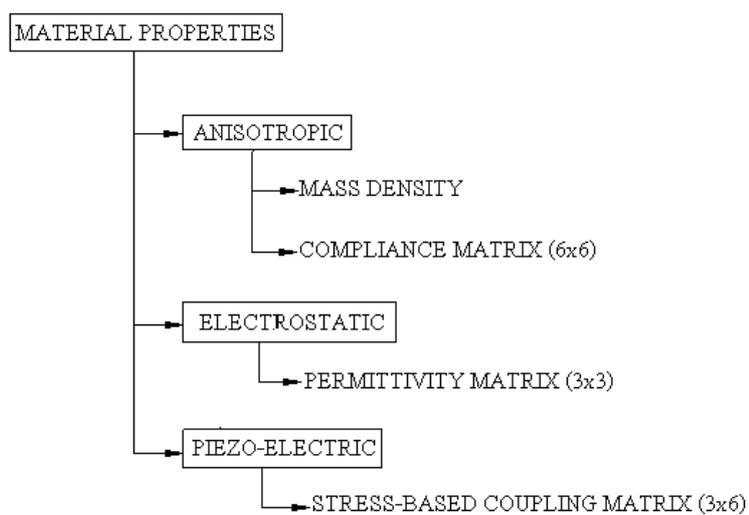
รูปที่ 3.4 แสดงรูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการกำหนดคุณสมบัติและคุณลักษณะต่างๆให้กับแบบจำลองสำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด เลดเซอร์โคเนต ไททานเนต 4 (Lead zirconate titanate-4, PZT-4) ซึ่งเป็นของบริษัท เอส พี เค อิเล็กทรอนิกส์ (SPK ELECTRONICS) โดยมีคุณสมบัติของวัสดุแสดงในตารางที่ 3.1 แต่เนื่องจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่กำหนดในการวิเคราะห์จึงต้องถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์ และคุณสมบัติของวัสดุที่จำเป็นในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constants, d_{ij}) ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity, ϵ) และค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (Elastic modulus, E_{ij}) รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติวัสดุในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์

The permittivity matrix:
$$\begin{bmatrix} 3.298 & 0 & 0 \\ 0 & 3.298 & 0 \\ 0 & 0 & 3.641 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ F/m}$$

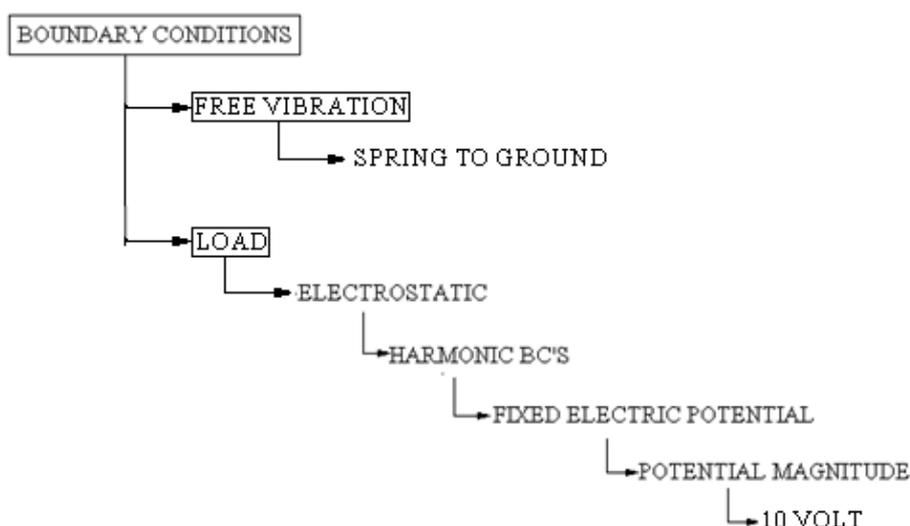
The piezoelectric constant matrix:
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.3814 \\ 0 & 0 & -4.3814 \\ 0 & 0 & 17.5683 \\ 0 & 15.6515 & 0 \\ 15.6515 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ C/m}^2$$

The stiffness matrix:
$$\begin{bmatrix} 12.621 & 6.681 & 6.369 & 0 & 0 & 0 \\ 6.681 & 12.621 & 6.369 & 0 & 0 & 0 \\ 6.369 & 6.369 & 10.804 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.97 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.97 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$



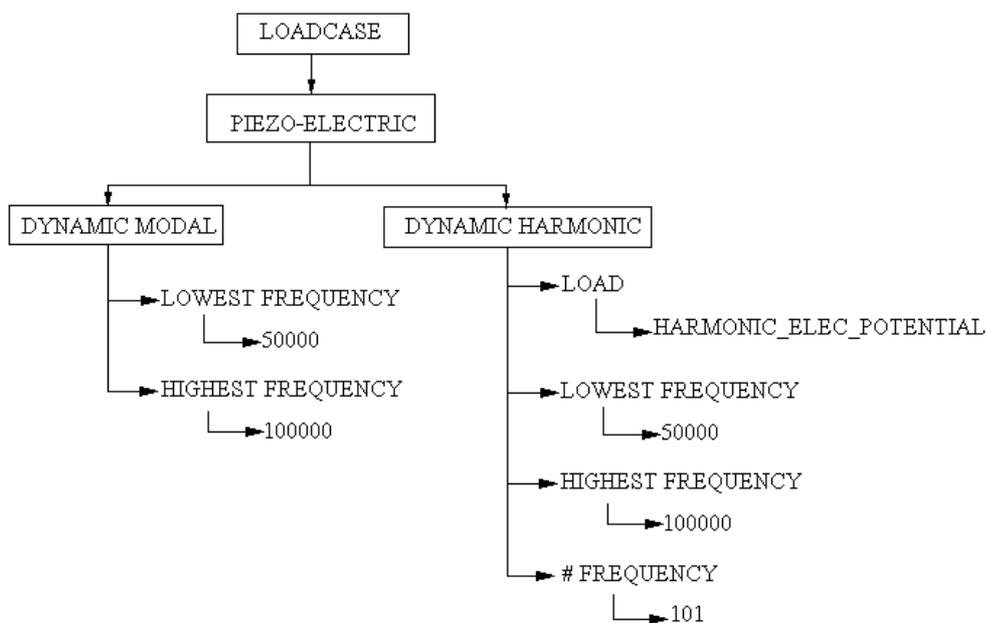
รูปที่ 3.5 แสดงขั้นตอนการกำหนดคุณสมบัติวัสดุในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

หลังจากการกำหนดคุณสมบัติของวัสดุแล้ว ขั้นตอนต่อไป เป็นการกำหนดชนิดของเอลิเมนต์ โดยกำหนดให้เป็นเอลิเมนต์หมายเลข 163 (Three dimensional piezoelectric arbitrary distorted brick) เอลิเมนต์ชนิดนี้เหมาะสำหรับงานการวิเคราะห์ด้านเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากสามารถคำนวณเกี่ยวกับการเปลี่ยนจากสมบัติทางไฟฟ้าเป็นสมบัติทางกลหรือในทางกลับกัน เอลิเมนต์ชนิดนี้มีพื้นฐานจากเอลิเมนต์หมายเลข 7 (Three dimensional arbitrarily distorted brick) ซึ่งมี 3 องศาอิสระ(Degree of freedom) แต่สำหรับเอลิเมนต์หมายเลข 163 จะมี 4 องศาอิสระ ซึ่งองศาอิสระที่เพิ่มเข้าเป็นตัวระบุศักย์ทางไฟฟ้า ลำดับต่อมากำหนดเงื่อนไข (Boundary conditions) ในการคำนวณได้กำหนดให้เป็นการสั่นแบบอิสระ (Free vibration) โดยใช้คำสั่ง Spring to ground เพื่อไม่ให้เกิดการเลื่อนของแบบจำลองในทิศทาง x y และ z (Rigid body translation) โดยในการจำลองนี้แรงที่มากระทำต่อชิ้นงานเป็นศักย์ไฟฟ้า (Electrical potential) แบบกระแสสลับที่บริเวณผิวอิเล็กโทรดของหม้อแปลงด้านหนึ่ง โดยกำหนดให้เป็นแบบฮาร์โมนิกส์ เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ส่วนผิวอิเล็กโทรดอีกด้านถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเป็นศูนย์เพื่อทำหน้าที่เป็นกราวด์ การกำหนดเงื่อนไขการคำนวณในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3.6



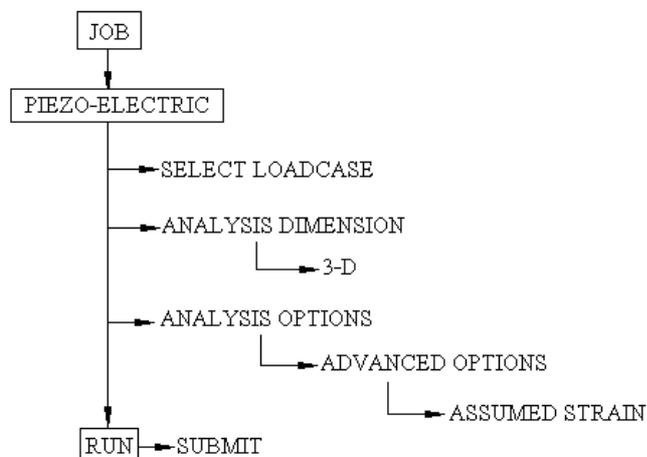
รูปที่ 3.6 แสดงขั้นตอนการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณใน โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 3 เป็นการกำหนดประเภท และการคำนวณ ซึ่งในงานวิจัยได้ศึกษาพฤติกรรมของแบบจำลองด้วยกัน 3 อย่าง คือ (1) การวิเคราะห์แบบโมดอล (Modal analysis) เป็นการคำนวณเพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของการสั่นในแต่ละโหมดการสั่น รวมถึงลักษณะของโหมดการสั่น เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แบบฮาร์โมนิกส์ต่อไป (2) การวิเคราะห์แบบฮาร์โมนิกส์ (Dynamic harmonics analysis) เป็นการคำนวณเพื่อศึกษาการตอบสนองของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกเมื่อถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีความถี่ต่างๆ และ(3) การวิเคราะห์แบบทรานเซียนท์ (Dynamics transient analysis) เป็นการศึกษาพฤติกรรมการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยแรงหรือศักย์ไฟฟ้าที่มากระทำจะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับเวลา ขั้นตอนการกำหนดประเภทการคำนวณในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์แสดงในรูปที่ 3.7



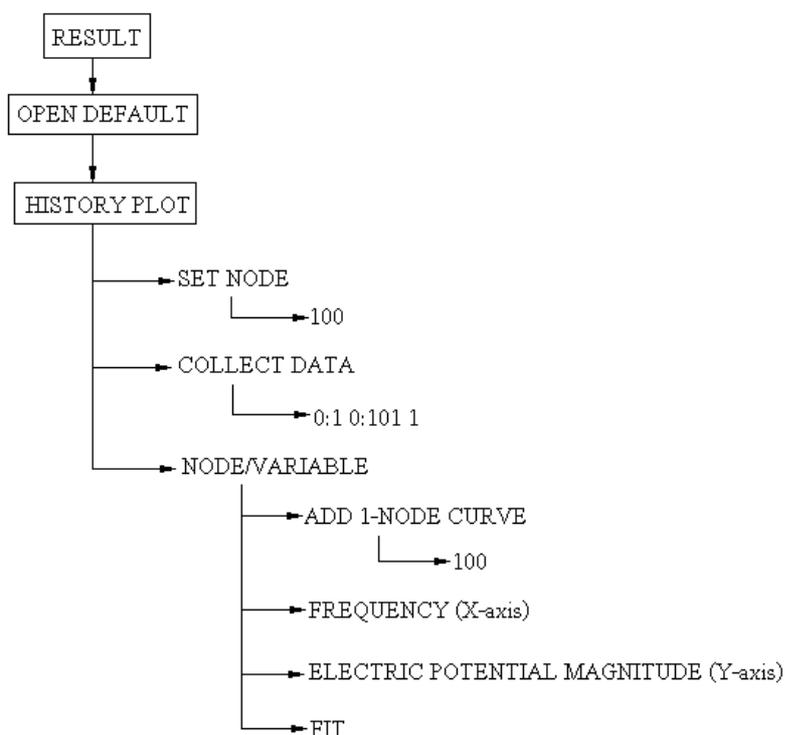
รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนการกำหนดประเภทการคำนวณในโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์

ขั้นตอนที่ 4 เป็นการสั่งการให้โปรแกรมคำนวณตามข้อมูลและเงื่อนไขที่ได้กำหนดมาข้างต้น มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.8 เวลาที่ใช้ในการประมวลผลขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของปัญหารวมถึงจำนวนของเอลิเมนต์



รูปที่ 3.8 แสดงขั้นตอนการสั่งให้โปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์คำนวณ

ขั้นตอนที่ 5 เป็นการแสดงผลที่ได้จากการคำนวณโดยในการศึกษานี้ จะสนใจผลของศักย์ไฟฟ้า การเปลี่ยนรูปทรง การเปลี่ยนแปลงการกระจัดรวมถึงความเค้นที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานขณะทำงานที่ความถี่ต่างๆ รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการแสดงผลของการคำนวณของโปรแกรม



รูปที่ 3.9 แสดงขั้นตอนการแสดงผลของการคำนวณของโปรแกรม

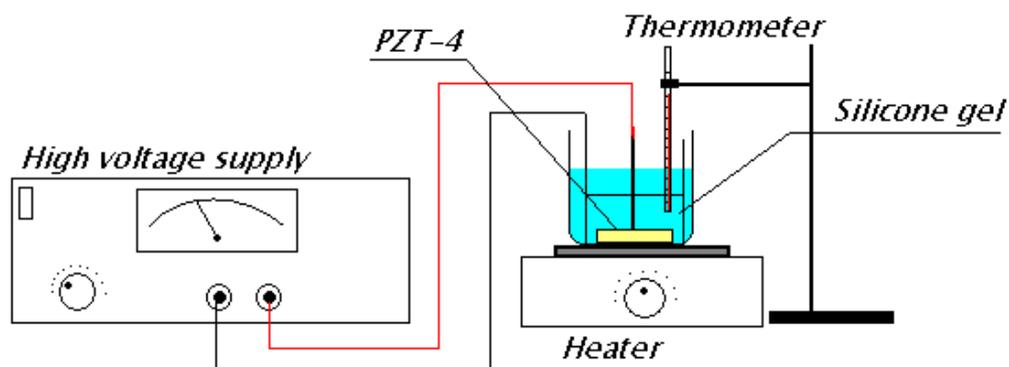
3.4.2 กระบวนการการทดลอง

ในกระบวนการนี้นั้นเป็นการทำการทดลองเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลการคำนวณที่ได้จากการจำลองแบบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถแบ่งได้เป็นสองขั้นตอนคือขั้นตอนของการสร้างหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก และขั้นตอนของการทดสอบคุณสมบัติของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก โดยแต่ละขั้นตอนนี้มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.4.2.1 การสร้างหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการวิจัยคือ เลดเซอร์โคเนต ไททานด-4 (PZT-4) มีลักษณะเป็นวงแหวน ผลิตโดยบริษัท SPK ELECTRONICS แต่ยังไม่ผ่านกระบวนการโพลิง ดังนั้นชิ้นงานจึงไม่แสดงคุณสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริก ด้วยเหตุนี้จึงต้องทำการโพลิง แต่ก่อนที่จะสามารถทำการโพลิงได้จะต้องมีการทำอิเล็กโทรดหรือการทำขั้วให้กับชิ้นงานดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.2 โดยการทาด้วยสารนำไฟฟ้า รูปแบบของอิเล็กโทรดที่เรามีพื้นที่แตกต่างกัน เพื่อศึกษาถึงผลของพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่มีต่อพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนของกระบวนการทำโพลิงเพื่อให้สารมีสมบัติความเป็นเพียโซอิเล็กทริก โดยใช้กระบวนการโพลิงแบบร้อน (Hot poling) ซึ่งได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 2.2.1.1 แต่ได้มีการปรับรูปแบบชุดเครื่องมือเพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ที่มีอยู่ดังแสดงในรูปที่ 3.10 สำหรับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการโพลิงคือ 120 องศาเซลเซียส และใช้เวลา 20 นาที ค่าสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทำโพลิงเท่ากับ 2 กิโลโวลต์ ซึ่งคำนวณมาจาก

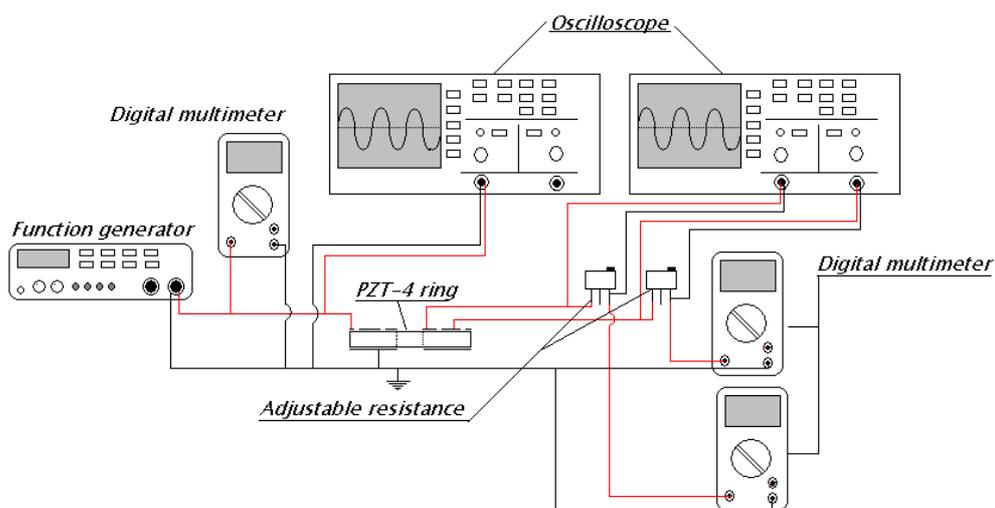
$$\begin{aligned} Electric\ field &= 2.5(kV/mm) \times Thickness\ (mm) \\ &= 2.5\ (kV/mm) \times 0.8\ mm \\ &= 2\ kV \end{aligned}$$



รูปที่ 3.10 แสดงชุดการทำโพลิง

3.4.2.2 การทดสอบคุณสมบัติหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

ในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ทำเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองทางไฟไนท์เอลิเมนต์ และนำไปสู่การออกแบบต่อไป อีกทั้งยังเป็นการศึกษาถึงตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานและพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรด และเงื่อนไขการทำงานที่แตกต่างกัน ชุดทดสอบดังแสดงในรูปที่ 3.11 ประกอบด้วย เครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า (Function generator) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่างๆ เพื่อไปกระตุ้นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ในการทดสอบนี้ จะทำการวัดค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า (อัตราส่วนของศักย์ไฟฟ้าด้านทุติยภูมิต่อศักย์ไฟฟ้าด้านปฐมภูมิ) โดยการใช้วัดศักย์ไฟฟ้าด้วยออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) ส่วนค่ากระแสไฟฟ้าด้านปฐมภูมิและด้านทุติยภูมิจะวัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital multimeter)



รูปที่ 3.11 ชุดทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

3.4.3 การยืนยันความถูกต้อง (Verification)

ในการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ เนื่องจากการจำลองสถานการณ์ดังนั้น ผลที่ได้จึงจำเป็นที่จะต้องได้รับการยืนยันความถูกต้องด้วยการทดลองหรือการคำนวณทางทฤษฎี ในการวิจัยนี้ในการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะถูกยืนยันด้วยผลการทดลอง โดยได้ออกแบบการออกแบบการทดลองที่มีเงื่อนไขเดียวกันกับการสร้างแบบจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ การยืนยันความถูกต้องทำโดยอาศัยการเปรียบเทียบตัวแปรคุณสมบัติทางไฟฟ้า และพฤติกรรมการตอบสนอง ได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆ และค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า

3.4.4 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

แบบจำลองที่ผ่านการยืนยันผลแล้ว จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสถียรคาวาน์ โดยในการออกแบบจะศึกษาถึงพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าหรืออัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้า เพื่อให้ได้พื้นที่ของอิเล็กโทรดที่ทำให้อัตราส่วนการแปลงไฟฟ้าระหว่างขาเข้าต่อขาออกมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และขั้นตอนกระบวนการในการทำการวิจัย โดยแบ่งออกเป็น ขั้นตอนการทำการทดลอง และขั้นตอนในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนคือ ส่วนของก่อนการประมวลผล (Pre processing) การประมวลผล (processing) และขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post processing) สำหรับในบทต่อไปจะนำเสนอถึงผลการทดลอง และผลการคำนวณของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อศึกษาค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของ 1) หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน 2) หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีรูปแบบอิเล็กโทรดต่างกัน 3) หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดต่างกัน

บทที่ 4

ผลการทดลอง

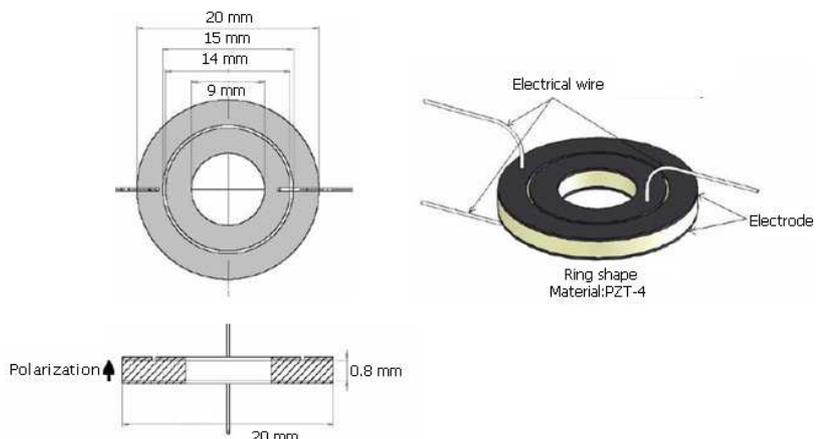
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการทำการวิจัย แบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ผลที่ได้จากการทดลอง และผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ โดยจะนำเสนออัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าขาเข้าต่อศักย์ไฟฟ้าขาออกของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดแตกต่างกัน รายละเอียดมีดังต่อไปนี้

4.1 การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์

4.1.1 ความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก (Resonance frequency)

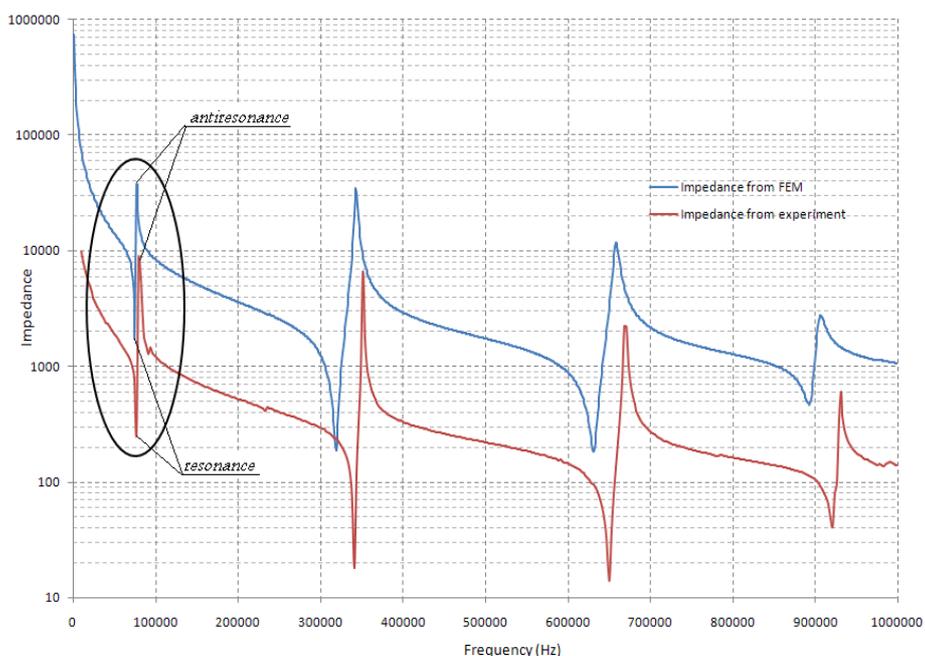
หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกอาศัยคุณสมบัติพิเศษของที่สามารถเปลี่ยนแปลงจากพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลในรูปของการสั่นสะเทือน และสามารถแปลงจากการสั่นสะเทือนกลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้าในอัตราส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม นั่นคือหากหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าจนเกิดการสั่นสะเทือนที่มากส่งก็จะส่งผลทำให้สามารถแปลงให้เป็นศักย์ไฟฟ้าที่สูงด้วย ดังนั้นเมื่อสัญญาณไฟฟ้าหรือศักย์ไฟฟ้าที่มากระตุ้นซึ่งานควรที่จะมีความถี่ที่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำงาน พฤติกรรมที่เกิดขึ้นเมื่อวัสดุถูกกระตุ้นที่ความถี่ธรรมชาติเรียกว่า เรโซแนนซ์ ความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับรูปทรง ขนาด และคุณสมบัติทางกล และทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก จำเป็นต้องทราบความถี่ธรรมชาติของชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งสามารถทราบได้จากการวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ (Impedance analyzer) เมื่ออิมพีแดนซ์ คือความต้านทานไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ หรือได้จากการคาดการณ์จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์

ในการวิจัยนี้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีรูปทรงวงแหวน (Hui et al., 2001) ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ทิศของโพลาริเซชันชี้ขึ้นตามแนวความหนา โดยถูกออกแบบให้ทำงานในโหมดเรเดียล นั่นคือทิศทางการเปลี่ยนรูปหรือทิศทางความเค้นตั้งฉากกับทิศของโพลาริเซชัน ความถี่ธรรมชาติของเรเดียลโหมดสามารถทราบได้จากแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งผลตอบสนองต่อความถี่ของแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ถูกแสดงในรูปที่ 4.2



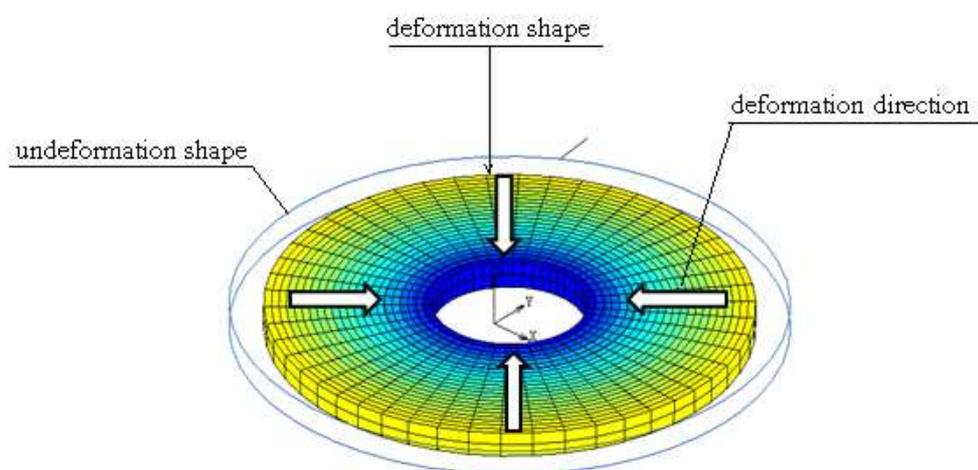
รูปที่ 4.1 แสดงขนาดและทิศโพลาริเซชันของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

การหาความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ทำได้โดยการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ต่างๆ เป็นการวิเคราะห์แบบการสั่นอิสระจากรูปที่ 4.2 แสดงค่าอิมพีแดนซ์ของด้านป้อนของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ถูกการกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าในช่วงความถี่ 0-1 เมกะเฮิร์ตซ์ เปรียบเทียบกับค่าอิมพีแดนซ์ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.2 แสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ของแต่ละโหมดการสั่น

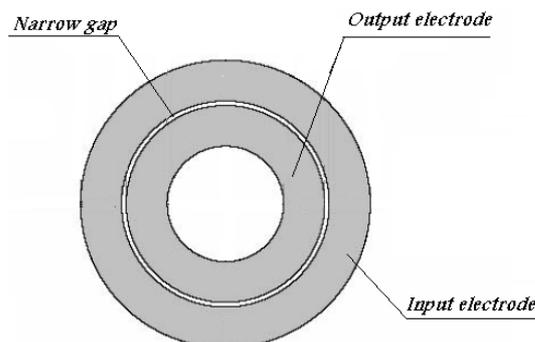
ความถี่เรโซแนนซ์และแอนติเรโซแนนซ์ สามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์ เมื่อป้อนสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ ความถี่เรโซแนนซ์คือความถี่ที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลอย่างรวดเร็ว และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ คือความถี่ที่ทำให้ค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดและมีค่ามากที่สุดที่นี่ จากรูปที่ 4.2 ค่าความถี่เรโซแนนซ์สำหรับโหมดแรกของการสั่นแบบเรเดียลคือ 75 กิโลเฮิร์ตซ์ รูปแบบการสั่นในโหมดนี้ ถูกแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการสั่นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกในเรเดียลโหมด

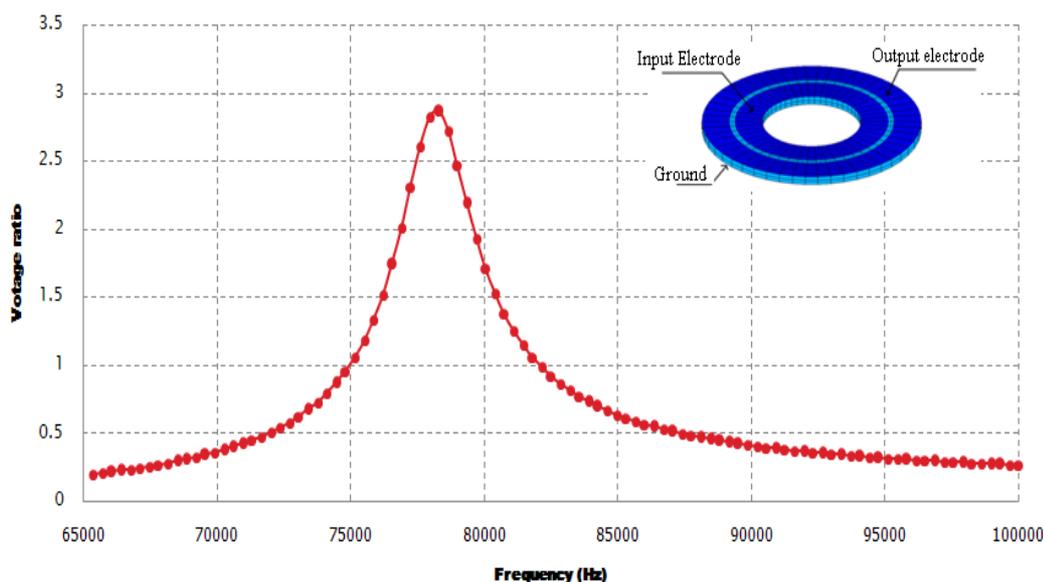
4.1.2 อัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

คุณสมบัติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มุ่งศึกษา คืออัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าระหว่างศักย์ไฟฟ้าขาออกต่อศักย์ไฟฟ้าขาเข้า โดยจะทำการศึกษาดังกล่าวโดยใช้โปรแกรมทางไฟไนท์เอลิเมนต์ควบคู่ไปกับการทำการทดลองเพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของผลที่ได้ และจะนำข้อมูลที่ได้ไปเป็นแนวทางออกแบบลักษณะอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก การวิเคราะห์เริ่มด้วยการจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่

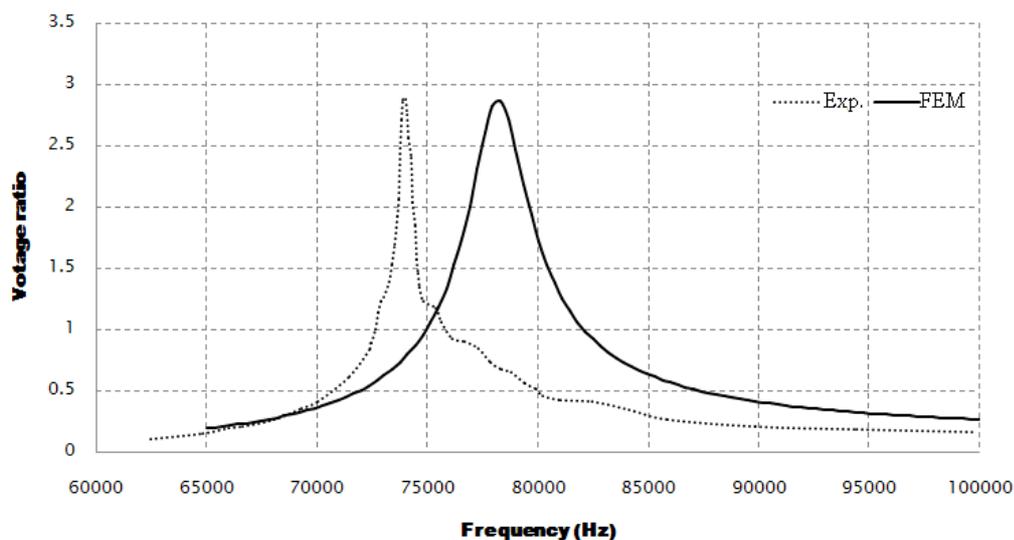


รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

ในรูปที่ 4.5 แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนท์เอลิเมนต์ เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ ในช่วงความถี่ 65 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าสูงสุด 2.86 ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 78.3 กิโลเฮิร์ตซ์ และในรูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง พบว่าความถี่เรโซแนนซ์ของโหมดเรเดียล (Baker et al., 2005) (Sakurai et al., 1998) (Laoratanakul et al., 2004) (Pajewski et al., 1998) มีค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ออกแบบ และศึกษาอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีลักษณะของอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน



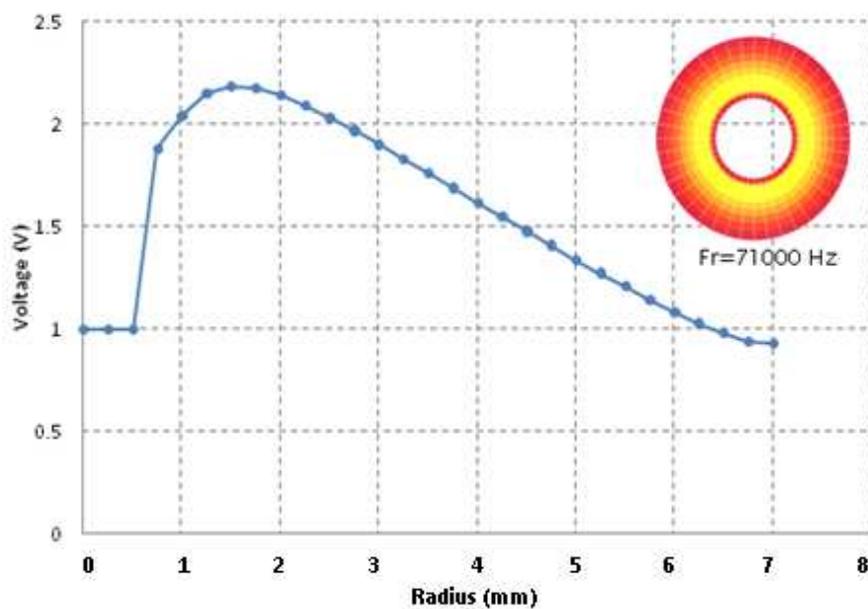
รูปที่ 4.5 แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆที่ได้จากการวิเคราะห์ทางไฟไนท์เอลิเมนต์



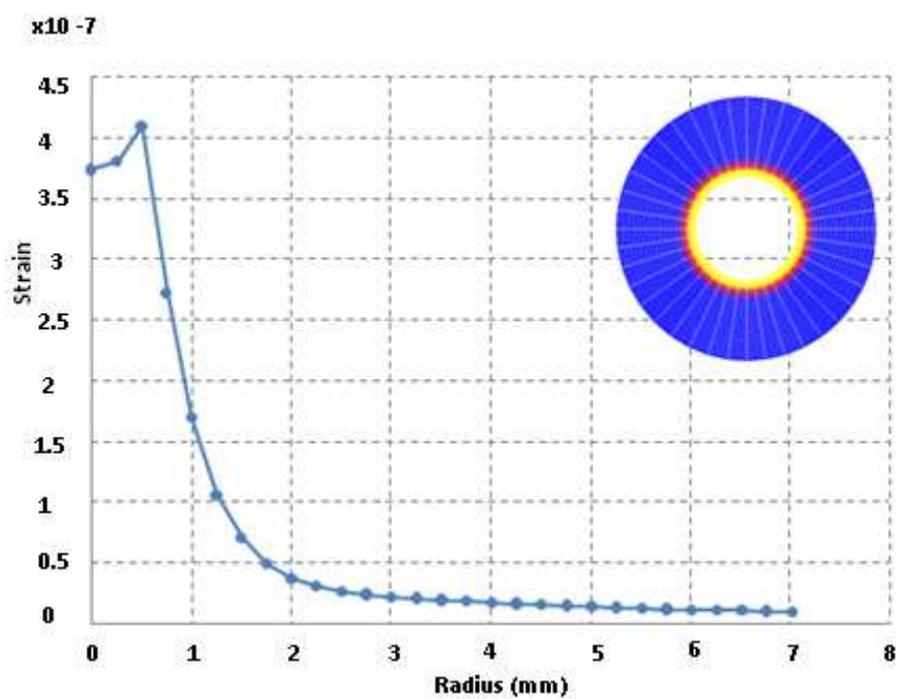
รูปที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และศักย์ไฟฟ้า

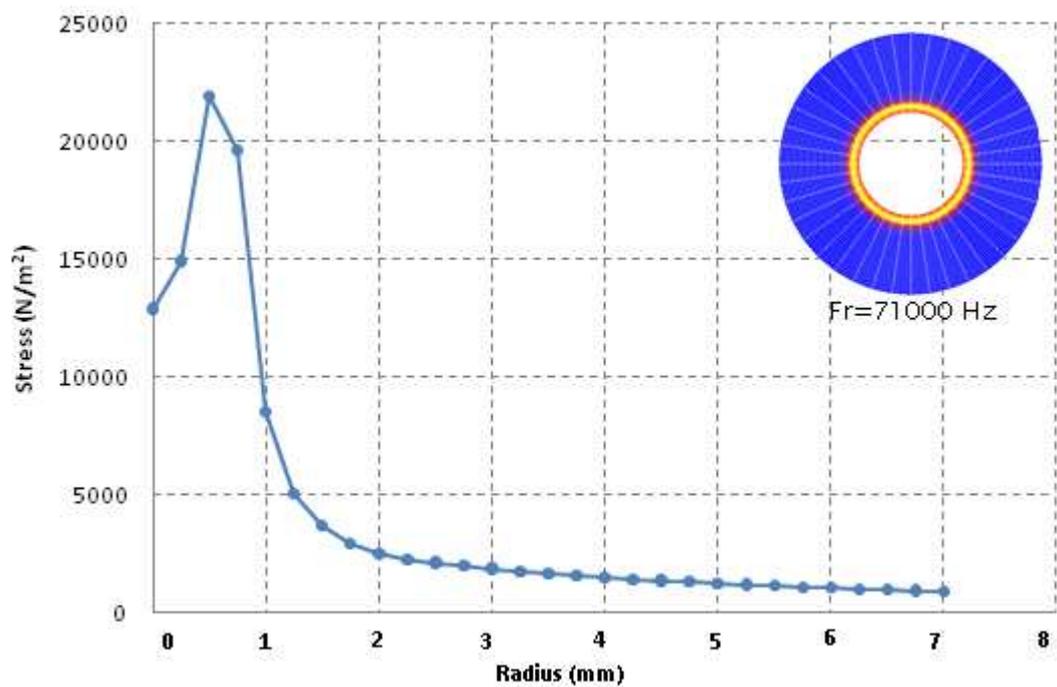
จากที่ได้กล่าวมาแล้วถึงหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่อาศัยหลักการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นกลในรูปของการสั่นสะเทือนและแปลงจากการสั่นสะเทือนเป็นศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของความเค้นและความเครียด ตามสมการที่ (2.1) และ (2.2) และผลการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์มีผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่ออัตราคมีค่าเพิ่มขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าลด เช่นเดียวกับกับค่าความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงเมื่ออัตราคมีเพิ่มมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ 4.9 ตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เมื่อบริเวณที่เกิดความเค้นหรือความเครียดมากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็มีแนวโน้มที่มากเช่นเดียวกัน และจากรูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้ากับความเค้น และความเครียดตามลำดับ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เมื่อบริเวณที่เกิดความเค้นหรือความเครียดมากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็มีแนวโน้มที่มากเช่นเดียวกัน โดยแต่ละโหมดการสั่นลักษณะความเค้นเกิดขึ้นก็จะแตกต่างกันไป



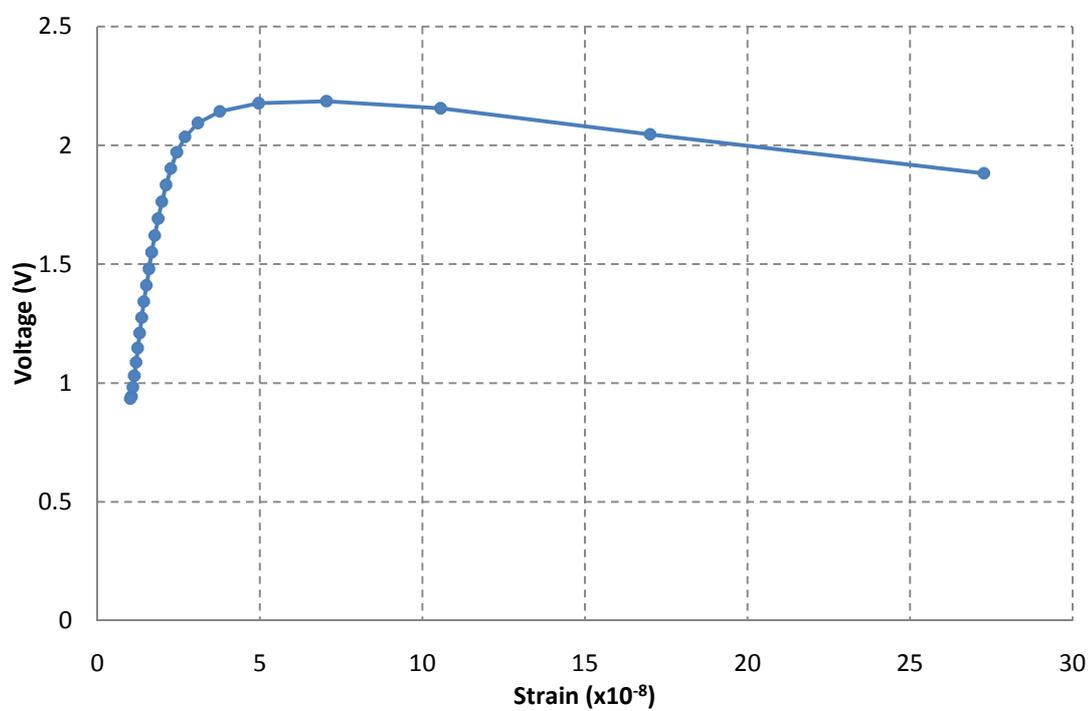
รูปที่ 4.7 แสดงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก



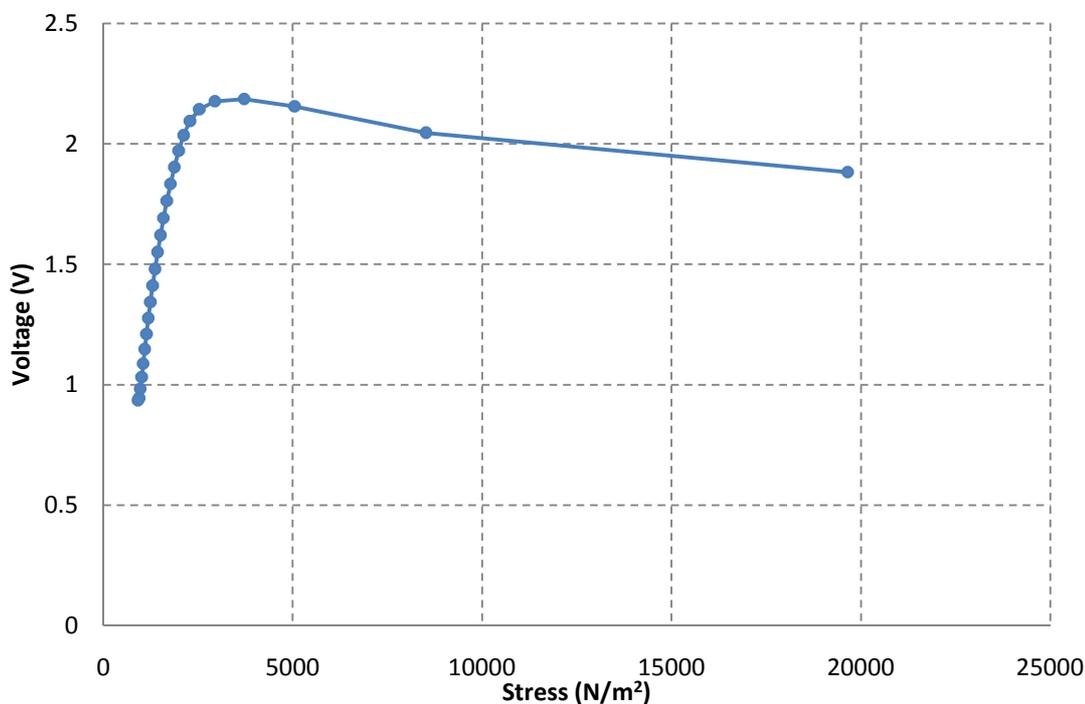
รูปที่ 4.8 แสดงความเครียดที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.9 แสดงความเค้นที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเครียดกับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

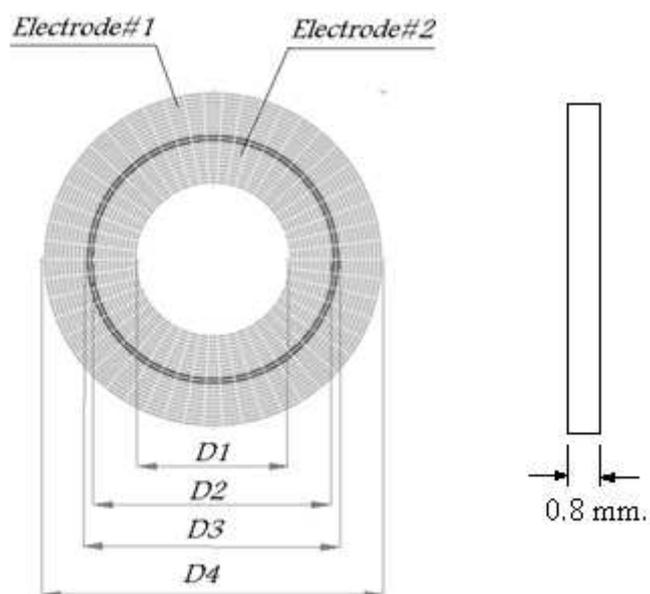


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโซ่อิเล็กทรอนิกส์

4.3 ผลกระทบของพื้นที่อิเล็คโทรดต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า

หัวข้อนี้ได้ศึกษาถึงความสัมพันธ์ของพื้นที่อิเล็คโทรดที่มีต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าโดยการเปลี่ยนค่ารัศมีของของเส้นแบ่งอิเล็คโทรดระหว่าง อิเล็คโทรดที่ 1 ที่อยู่ด้านนอก อิเล็คโทรดที่ 2 ที่อยู่ด้านในดังรูปที่ 4.12 โดยที่ความหนาของเส้นแบ่งอิเล็คโทรดทั้งสองยังคงมีค่าเท่าเดิม และที่ผิวด้านล่างฉาบอิเล็คโทรดเต็มพื้นผิวทำหน้าที่เป็นกราวด์ เพื่อศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ของอิเล็คโทรดต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า (ศักย์ไฟฟ้าด้านทุติยภูมิต่อด้านปฐมภูมิ)

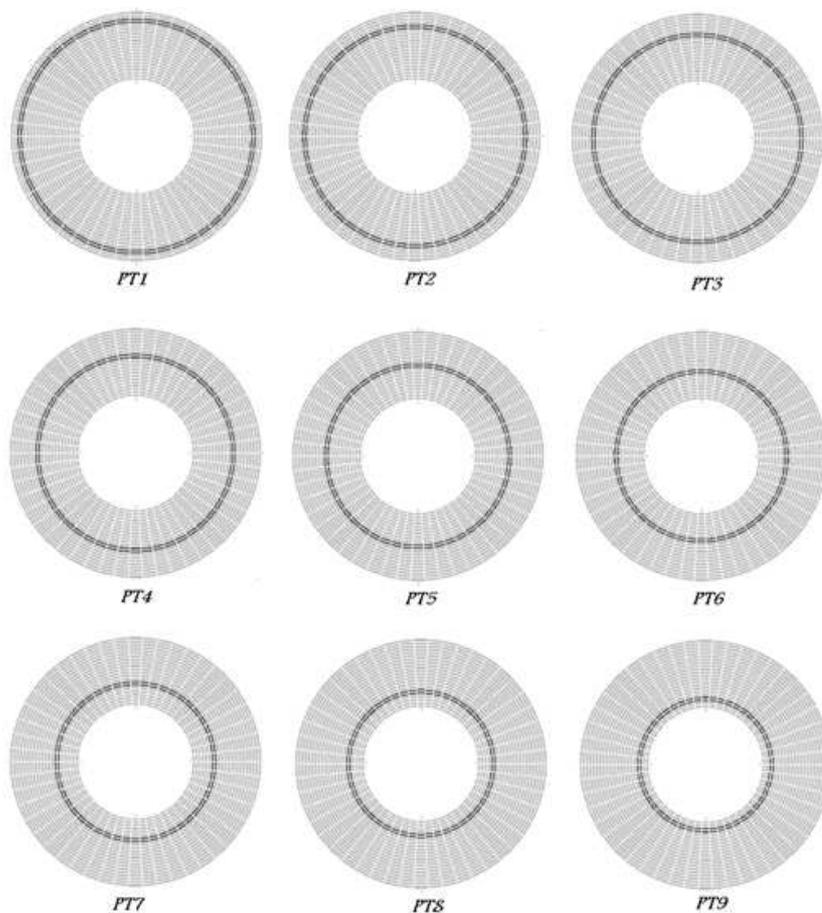
ในการศึกษาได้แบ่งลักษณะของอิเล็คโทรดออกเป็น 9 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 4.13 โดยแต่ละรูปแบบมีขนาดของอิเล็คโทรดที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 และได้เลือกกำหนดอิเล็คโทรดออกเป็นสองกรณี คือ กรณีที่ 1 อิเล็คโทรดด้านปฐมภูมิ (อิเล็คโทรดที่ถูกกระตุ้น) จะเป็นอิเล็คโทรดที่อยู่วงนอก (อิเล็คโทรดหมายเลข 1) โดยมีอิเล็คโทรดด้านทุติยภูมิ (อิเล็คโทรดที่นำสัญญาณออก) เป็นอิเล็คโทรดที่อยู่วงใน (อิเล็คโทรดหมายเลข 2) และกรณีที่ 2 อิเล็คโทรดด้านปฐมภูมิจะเป็นอิเล็คโทรดที่อยู่วงใน (อิเล็คโทรดหมายเลข 2) โดยมีอิเล็คโทรดด้านทุติยภูมิเป็นอิเล็คโทรดที่อยู่วงนอก (อิเล็คโทรดหมายเลข 1) ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.17 ตามลำดับ



รูป 4.12 แสดงการแบ่งพื้นที่อิเล็กโทรดของตัวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กโทรดวงแหวน

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของอิเล็กโทรดบนหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กโทรดแบบวงแหวน

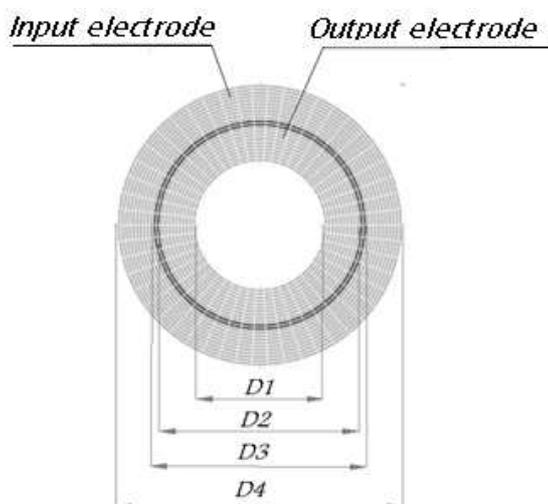
PT No.	Dimension of electrode			
	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)
PT1	9	18	19	20
PT2	9	17	18	20
PT3	9	16	17	20
PT4	9	15	16	20
PT5	9	14	15	20
PT6	9	13	14	20
PT7	9	12	13	20
PT8	9	11	12	20
PT9	9	10	11	20



รูปที่ 4.13 แสดงพื้นที่อิเล็คโตรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟียโซอิเล็คทริกทั้ง 9 รูปแบบ

4.3.1 กรณีที่ 1: การกำหนดอิเล็คโตรดปฐมภูมิวงนอกและอิเล็คโตรดทุติยภูมิวงใน

ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของอาคารการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์แบบฮาร์โมนิกส์ เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟียโซอิเล็คทริกที่ถูกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่กระตุ้นหม้อแปลงไฟฟ้าเฟียโซอิเล็คทริก บริเวณอิเล็คโตรดด้านปฐมภูมิ (อิเล็คโตรดวงนอก) มีค่า 10 โวลต์ ในความถี่ 60-90 กิโลเฮิร์ตซ์ ส่วนอิเล็คโตรดวงในทำหน้าที่เป็นอิเล็คโตรดด้านทุติยภูมิ และอิเล็คโตรดที่อยู่ด้านล่างทำหน้าที่เป็นกราวด์



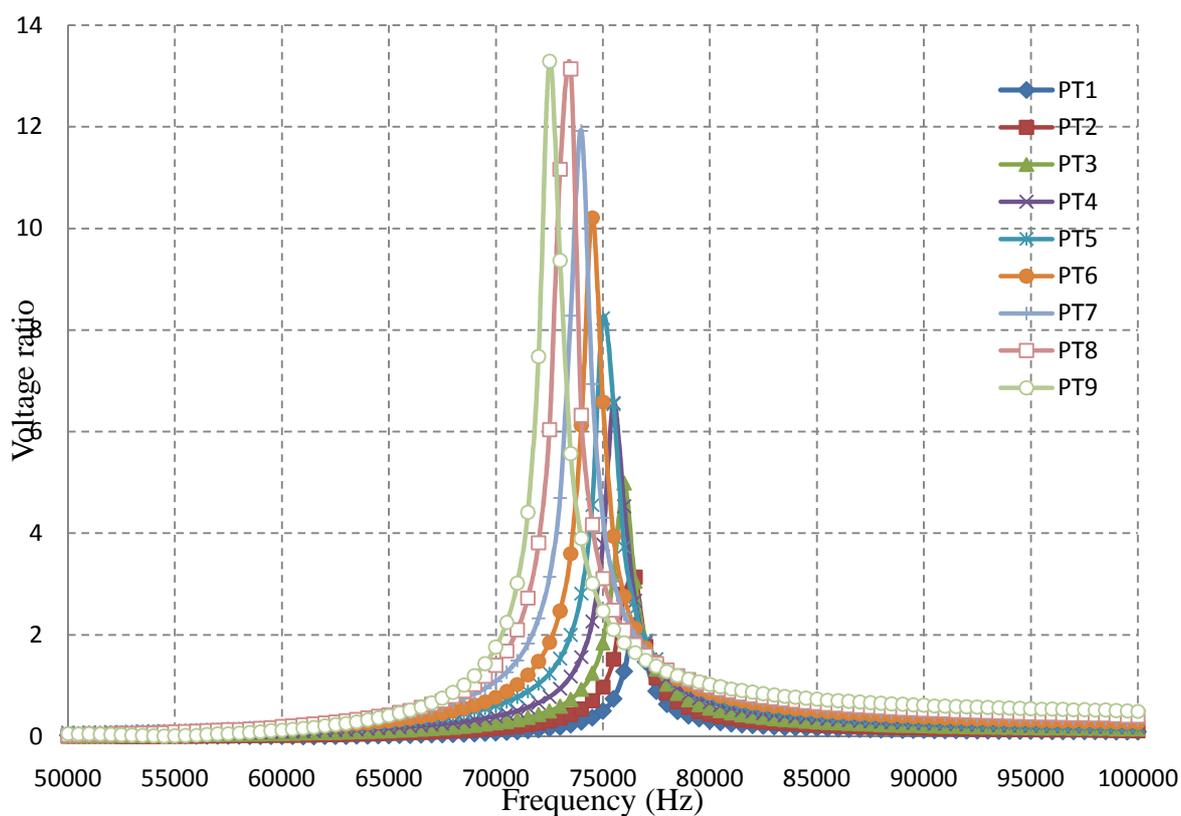
รูปที่ 4.14 แสดงอิเล็กโทรดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในการวิเคราะห์กรณีที่ 1

ตารางที่ 4.2 แสดงพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้เลือกทริกในกรณีที่ 1

PT No.	Input : Electrode#1, Output : Electrode#2		
	Output area (mm ²)	Input area (mm ²)	Area ratio
PT1	190.85	36.63	6.23
PT2	163.36	59.69	2.73
PT3	137.44	87.17	1.57
PT4	113.09	113.09	1
PT5	90.32	137.44	0.65
PT6	69.11	160.22	0.43
PT7	49.48	181.42	0.27
PT8	31.41	201.06	0.15
PT9	14.92	219.12	0.06

ตารางที่ 4.2 แสดงรูปแบบ และพื้นที่ของอิเล็กโทรดที่แตกต่างกัน รูปแบบที่ 1 จนถึงรูปแบบที่ 9 มีอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด (อัตราส่วนของพื้นที่อิเล็กโทรดด้านทุติยภูมิต่ออิเล็กโทรดด้านปฐมภูมิ) ลดลง จากผลการคำนวณทางไฟไนท์เอลิเมนต์พบว่า อัตราส่วนของพื้นที่อิเล็กโทรดที่ลดลงทำให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้เลือกทริกมีค่าเพิ่มขึ้น

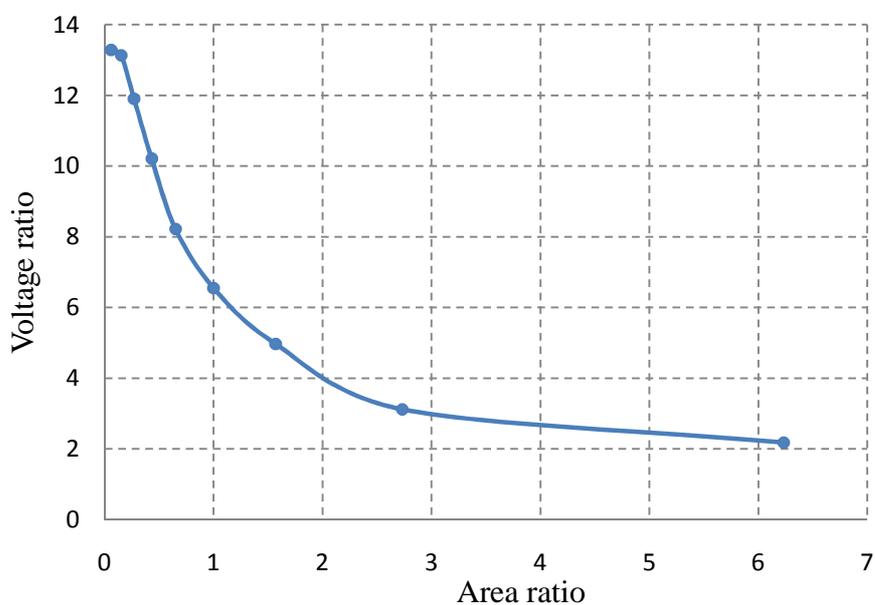
ดังแสดงในรูปที่ 4.15 นั้นแสดงว่าถ้าพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ทรานสดันปรวมภูมิมากขึ้นจะส่งผลให้อัตราส่วนคักย์ไฟฟ้ามากขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้อัตราส่วนพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ทรานสดจะมีผลต่อค่าอัตราส่วนคักย์ไฟฟ้าแล้วยังมีผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์ด้วย กล่าวคือคือค่าความถี่เรโซแนนซ์จะต่ำลงเมื่ออัตราส่วนพื้นที่มีค่าลดลง



รูปที่ 4.15 แสดงค่าอัตราส่วนคักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 9 รูปแบบของการวิเคราะห์ในกรณีนี้ที่ 1

ตารางที่ 4.3 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณฟิโนทอเลลิเมนต์กรณีที่ 1

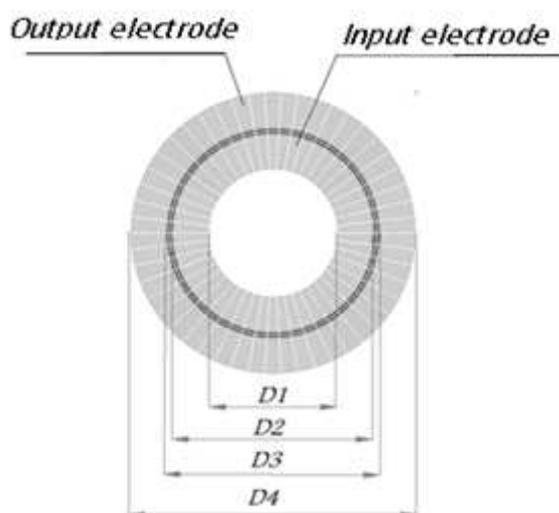
PT No.	Input : Electrode#1, Output : Electrode#2		
	Area ratio	Resonance freq.	Voltage ratio
PT1	6.23	76500	2.19
PT2	2.73	76500	3.13
PT3	1.57	76000	4.98
PT4	1	75500	6.56
PT5	0.65	75000	8.23
PT6	0.43	74500	10.21
PT7	0.27	74000	11.91
PT8	0.15	73500	13.14
PT9	0.06	72500	13.29



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดกับอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าจากการวิเคราะห์กรณีที่ 1

4.3.2 กรณีที่ 2: การกำหนดอิเล็กโทรดปฐมภูมิวงในและอิเล็กโทรดทุติยภูมิวงนอก

สำหรับการศึกษากรณีที่ 2 นี้เงื่อนไข และการคำนวณฟลักซ์อิเล็กตรอนยังคงเหมือนกับการศึกษากรณีที่ 1 แตกต่างกันเพียงการกำหนดอิเล็กโทรดปฐมภูมิเป็นอิเล็กโทรดหมายเลข 2 (อิเล็กโทรดวงใน) ส่วนอิเล็กโทรดทุติยภูมิคืออิเล็กโทรดหมายเลข 1 (อิเล็กโทรดวงนอก) ดังแสดงในรูปที่ 4.17

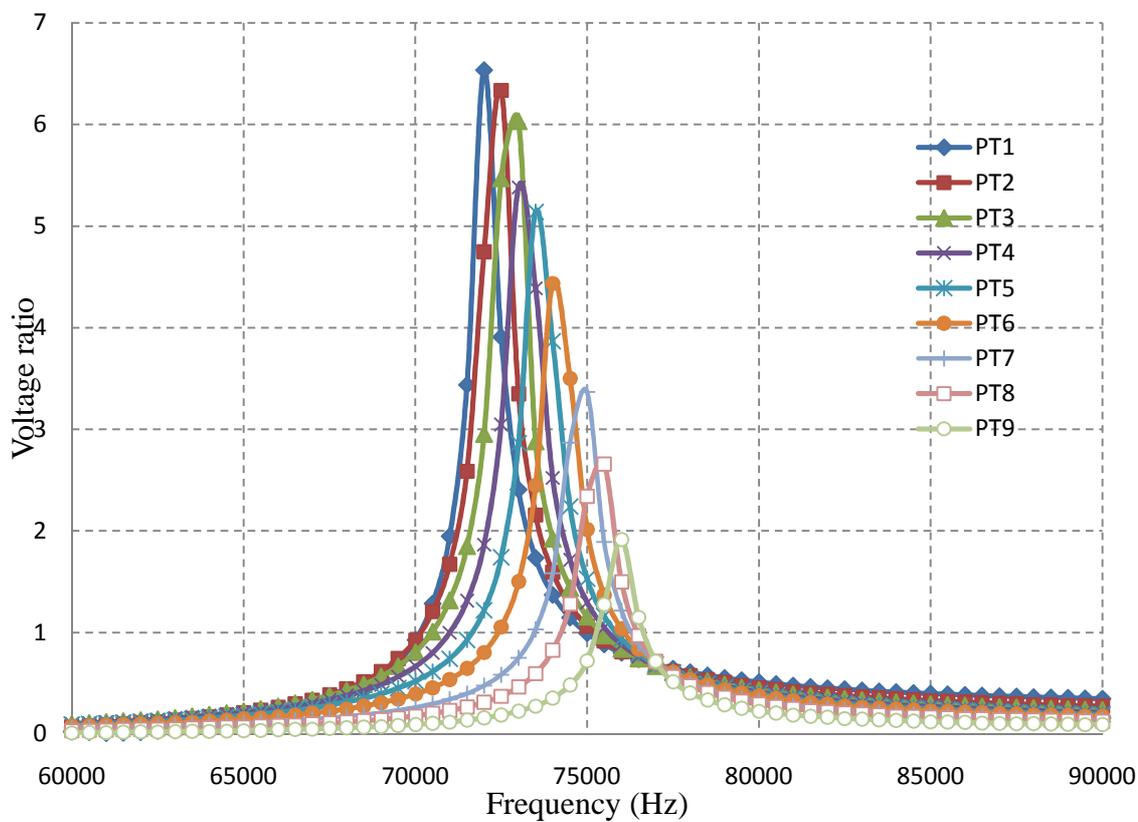


รูปที่ 4.17 แสดงอิเล็กโทรดด้านปฐมภูมิและทุติยภูมิในการวิเคราะห์กรณีที่ 2

ตารางที่ 4.4 แสดงพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กตรอนในกรณีที่ 2

PT No.	Input :Electrode#2, Output :Electrode#1		
	Output area (mm ²)	Input area (mm ²)	Area ratio
PT1	36.63	190.85	0.16
PT2	59.69	163.36	0.36
PT3	87.17	137.44	0.63
PT4	113.09	113.09	1
PT5	137.44	90.32	1.52
PT6	160.22	69.11	2.31
PT7	181.42	49.48	3.67
PT8	201.06	31.41	6.4
PT9	219.12	14.92	14.68

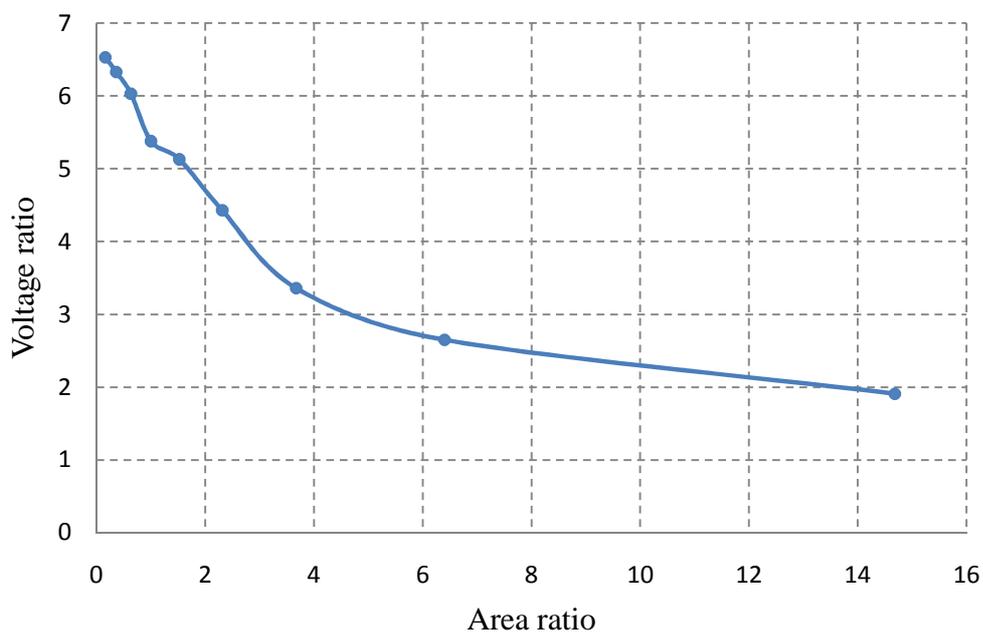
สำหรับการศึกษาการสลับกันระหว่างอิเล็กโทรดปฐมภูมิกับอิเล็กโทรดทุติยภูมิในกรณีที่ 2 ส่งผลอัตราส่วนพื้นที่ของอิเล็กโทรดของทั้ง 9 รูปแบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ ผลที่ได้จากการคำนวณ พบว่าเมื่ออัตราส่วนของพื้นที่อิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นทำให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าลดลง และส่งผลต่อค่าความถี่เรโซแนนซ์มีค่าต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งสอดคล้องกันกับการศึกษากรณีที่ 1



รูปที่ 4.18 แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 9 รูปแบบของการศึกษากรณีที่ 2

ตารางที่ 4.5 แสดงผลที่ได้จากการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์กรณีที่ 2

PT No.	Input : Electrode#2 , Output : Elctrode#1		
	Area ratio	Resonance freq.	Voltage ratio
PT1	0.16	72000	6.53
PT2	0.36	72500	6.33
PT3	0.63	73000	6.03
PT4	1	73000	5.38
PT5	1.52	73500	5.13
PT6	2.31	74000	4.43
PT7	3.67	75000	3.36
PT8	6.4	75500	2.65
PT9	14.68	76000	1.91



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดกับอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าจากการศึกษากรณีที่ 2

4.3.3 การเปรียบเทียบผลการศึกษาของทั้งสองกรณี

ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบผลที่ได้จากค่าคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษาไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 9 รูปแบบ

ตารางที่ 4.6 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟไนท์เอลิเมนต์ทั้งสองกรณี

PT No.	Area ratio		Resonance freq.		Voltage ratio	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
PT1	6.23	0.16	76500	72000	2.19	6.53
PT2	2.73	0.36	76500	72500	3.13	6.33
PT3	1.57	0.63	76000	73000	4.98	6.03
PT4	1	1	75500	73000	6.56	5.38
PT5	0.65	1.52	75000	73500	8.23	5.13
PT6	0.43	2.31	74500	74000	10.21	4.43
PT7	0.27	3.67	74000	75000	11.91	3.36
PT8	0.15	6.4	73500	75500	13.14	2.65
PT9	0.06	14.68	72500	76000	13.29	1.91

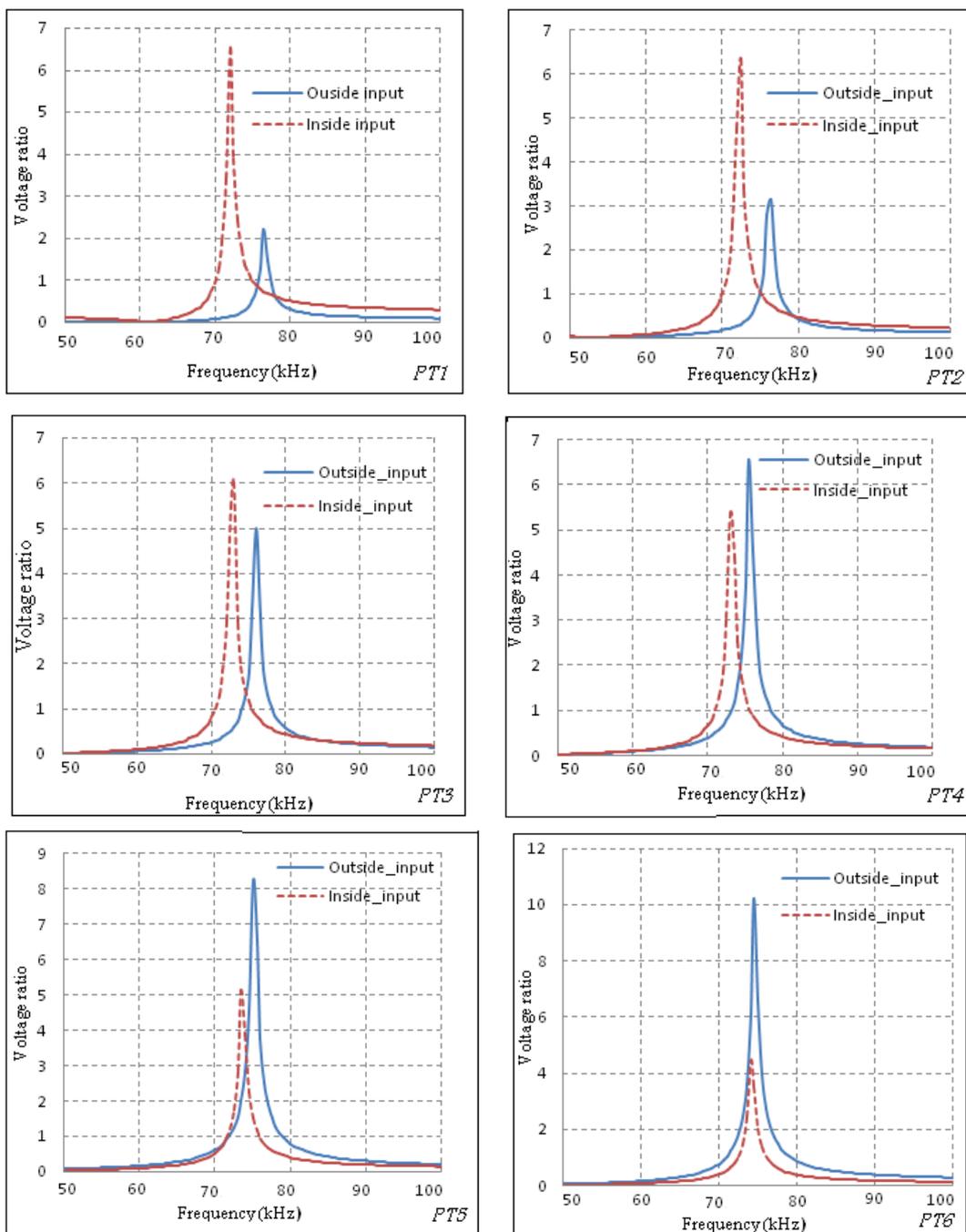
เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนพื้นที่ที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 คือหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 1 ถึงรูปแบบที่ 3 ในกลุ่มนี้ อัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของกรณีที่ 1 มีค่ามากกว่า กรณีที่ 2 พบว่าค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของลักษณะที่ 2 มีค่ามากกว่า ลักษณะที่ 1

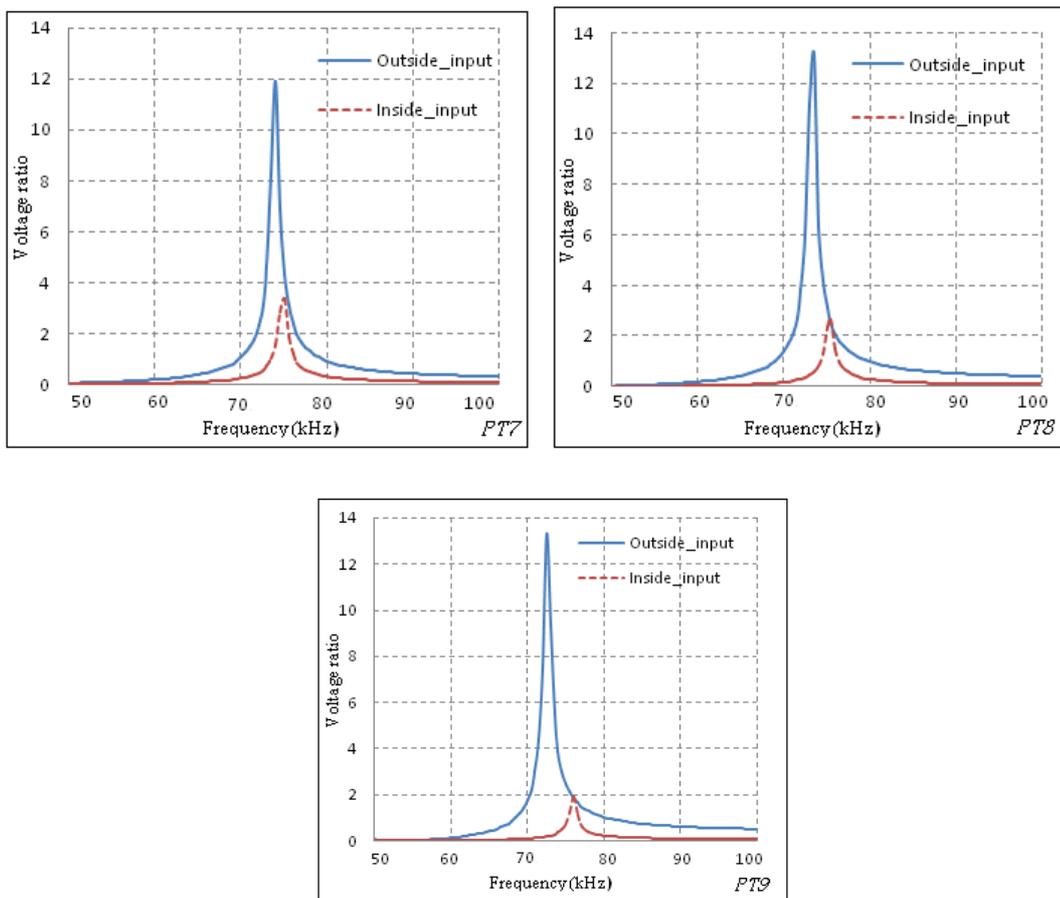
กลุ่มที่ 2 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 5 ถึงรูปแบบที่ 9 อัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของกรณีที่ 1 มีค่ามากกว่ากรณีที่ 2 ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ากรณีที่ 1 มากกว่ากรณีที่ 2

กลุ่มที่ 3 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 4 อัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดของทั้งสองกรณีมีค่าเท่ากัน แต่ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของกรณีที่ 1 มีค่ามากกว่ากรณีที่

ในรูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าค้ำยไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกของทั้งสองลักษณะในแต่ละรูปแบบ จะเห็นว่าในรูปแบบที่ 4 ที่มีอัตราส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดมีค่าเท่ากัน แต่ค่าอัตราส่วนค้ำยไฟฟ้ามีค่าต่างกัน แสดงว่า ตำแหน่งของการกระตุ้นก็มีผลต่อค้ำยไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเช่นกัน



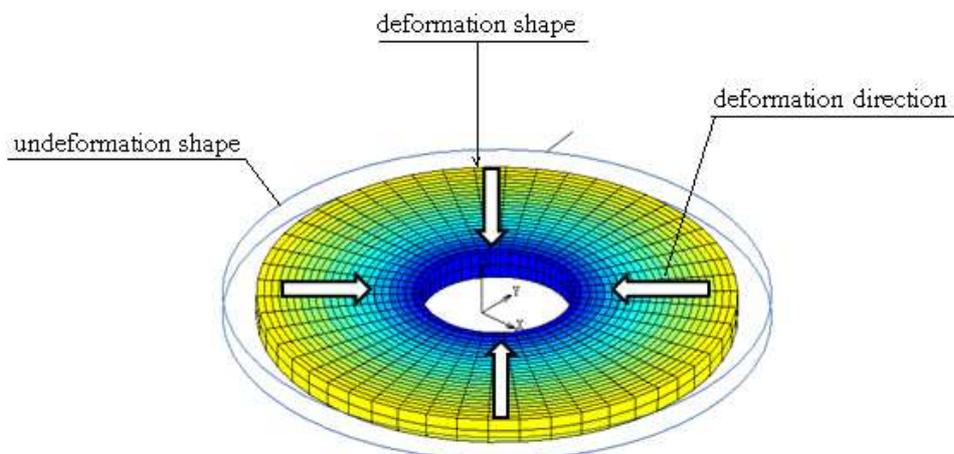
รูปที่ 4.20 แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนค้ำยไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.20 (ต่อ) แสดงการเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อโซลิตริก

4.4 การออกแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อโซลิตริกแบบเสตีปดาว

วัตถุประสงค์หนึ่งในงานวิจัยนี้ คือศึกษาออกแบบลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อแบบเสตีปดาว ทำให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ามีน้อยกว่า 1 ซึ่งในการสั้นสะเทือนของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อโซลิตริกแต่ละตำแหน่งบนชั้นวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาดที่ไม่เท่ากัน นั้นหมายความว่า ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของหม้อแปลงเพื่อโซลิตริกแต่ละจุดบนชั้นวัสดุจะมีค่าที่แตกต่างกันด้วยขึ้นอยู่กับลักษณะของโหมดการสั้นสะเทือนของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อโซลิตริก

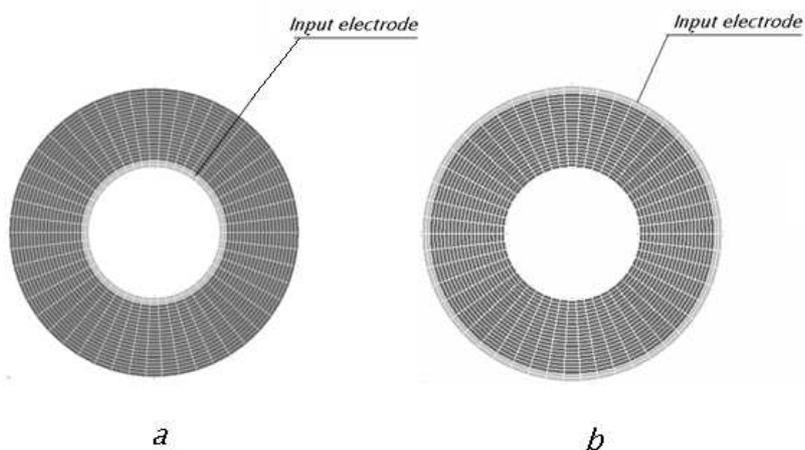


รูปที่ 4.21 แสดงลักษณะและทิศทางการเปลี่ยนรูปทรงของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกในโหมดเรเดียล

สำหรับงานวิจัยนี้ศึกษาารูปทรงของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเป็นวงแหวน และที่มีการสั่นสะเทือนแบบเรเดียล คือมีการเปลี่ยนรูปทรงตามแนวรัศมี ดังแสดงในรูปประกอบที่ 4.21 ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวจะมีค่าที่แตกต่างกันตามแนวรัศมี อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนของขนาดหรือความเครียดต่างกันตามแนวรัศมี

4.4.1 การเกิดศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

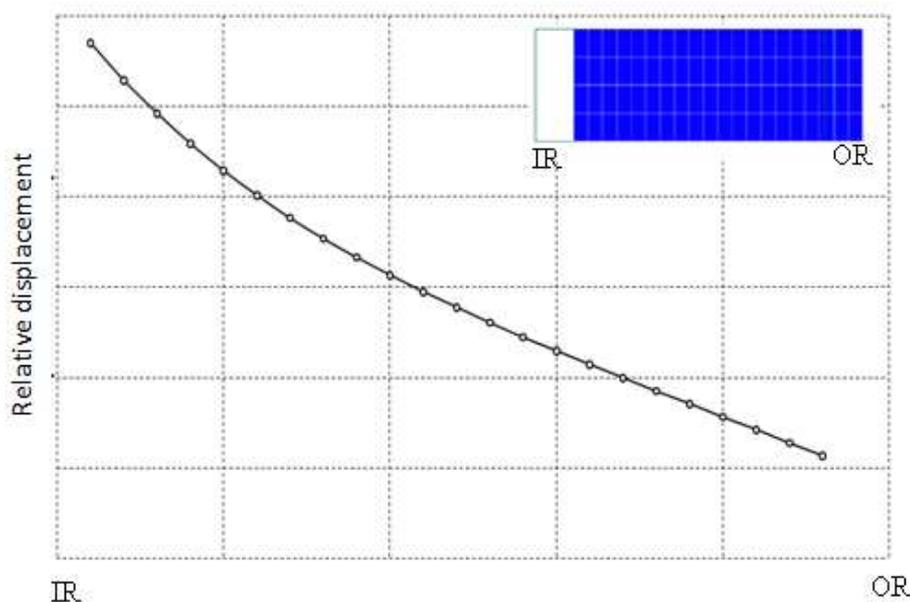
ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาแนวโน้มของศักย์ไฟฟ้าบนชิ้นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยได้สร้างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ขึ้นมา 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 แสดงแบบจำลองเพื่อศึกษาการเกิดศักย์ไฟฟ้าบนหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโอเล็กทริก

จากรูปที่ 4.22a แสดงลักษณะโอเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบที่ 1 ซึ่งมีโอเล็กทริกสำหรับด้านปฐมภูมิที่อยู่บริเวณด้านในของวงแหวนเท่านั้น ไม่มีโอเล็กทริกด้านทุติยภูมิ ทั้งนี้เพื่อสังเกตศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนชิ้นงาน ส่วนลักษณะโอเล็กทริกของหม้อแปลงไฟฟ้ารูปแบบที่ 2 จะมีโอเล็กทริกสำหรับด้านปฐมภูมิที่อยู่บริเวณด้านนอกของวงแหวนเท่านั้น ส่วนด้านทุติยภูมิไม่มีโอเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 4.22b เหตุที่ไม่มีการกำหนดพื้นที่โอเล็กทริกทุติยภูมินั้น เพราะโอเล็กทริกจะเฉลี่ยค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งในแนวรัศมีทำให้ไม่ทราบว่าเป็นแต่ละจุดบนชิ้นงานมีศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเท่าไร

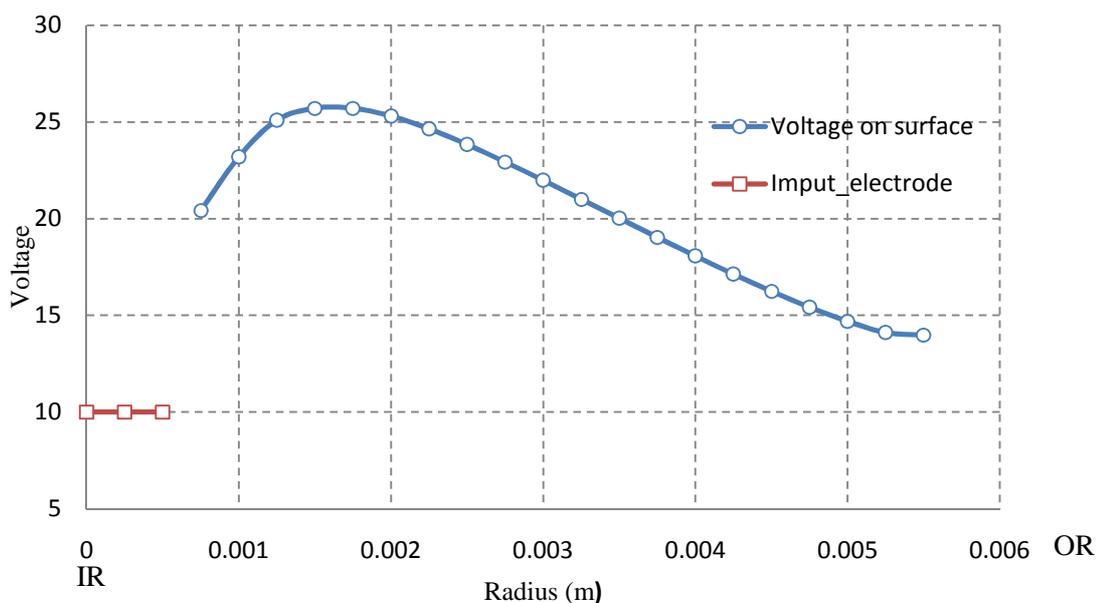
จากรูปที่ 4.23 จะเห็นว่าการเปลี่ยนรูปหรือขนาดของการสั่นจะมีค่าไม่เท่ากันในแนวรัศมี คือขนาดของการสั่นจะมีค่าลดลงตามแนวรัศมี



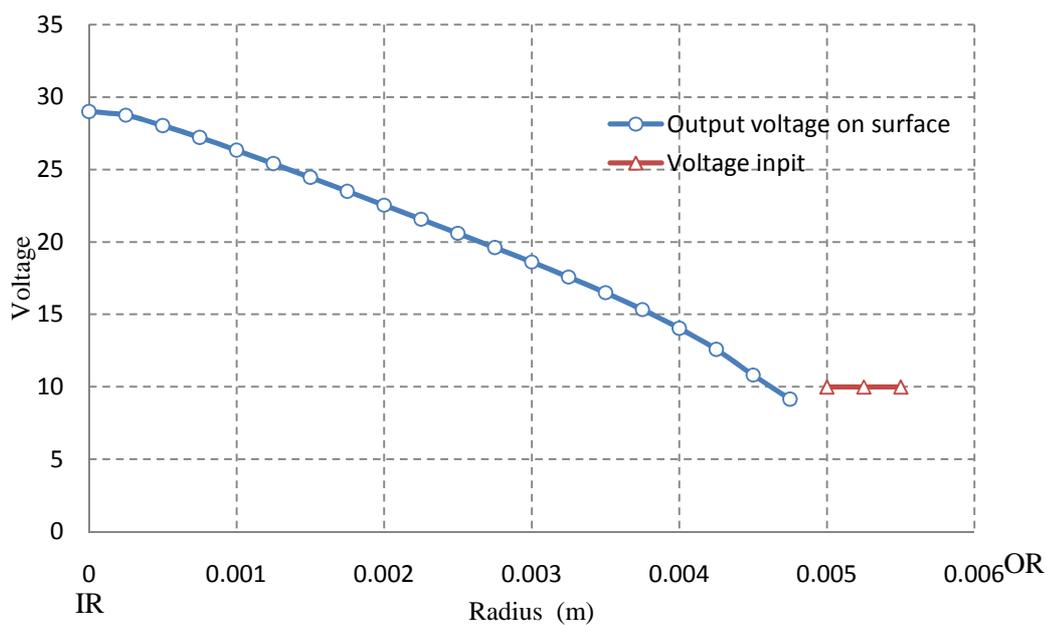
รูปที่ 4.23 แสดงค่าการเปลี่ยนรูปของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโอเล็กทริกตามแนวรัศมี

จากรูปที่ 4.24 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียงโอเล็กทริกแบบที่ 1 เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 76.15 กิโลเฮิรตซ์ พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงตามแนวรัศมี และศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งมีค่ามากกว่า 10 โวลต์ นั้นหมายความว่า ไม่มีตำแหน่งใดๆตามแนวรัศมีที่ทำให้เกิดหม้อแปลง

ไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสต็ปดาว์น เช่นเดียวกับกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 2 ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้น และไม่มีตำแหน่งใดเลยที่มีศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.24 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก
รูปแบบที่ 1

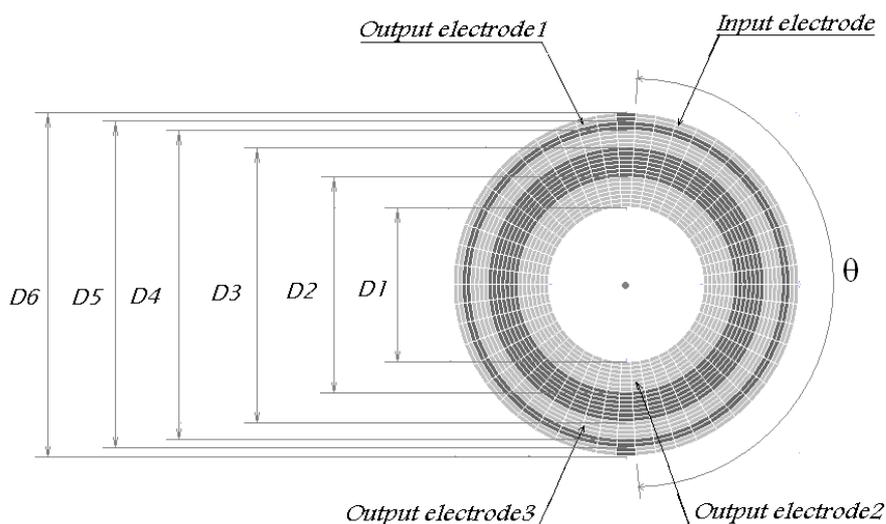


รูปที่ 4.25 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามแนวรัศมีของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

รูปแบบที่ 2

4.4.2 การออกแบบอิเล็กโทรด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อออกแบบลักษณะ และพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก เพื่อให้ได้อัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าแบบสเต็ปดาว (Yao Liu et al., 2006) ซึ่งจากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นแล้วว่า ลักษณะและพื้นที่ของอิเล็กโทรดมีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้า โดยปกติแล้วค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกได้เนื่องจากการสั่นสะเทือนของชิ้นงาน อันเนื่องมาจากการกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้าที่มีความถี่ที่มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการสั่นเป็นพลังงานไฟฟ้า ผลการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ผ่านมาของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดมีลักษณะเป็นแบบวงแหวน พบว่าไม่มีรูปแบบใดที่ทำให้เกิดอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าแบบสเต็ปดาว จึงมีแนวความคิดที่จะเปลี่ยนลักษณะของอิเล็กโทรดเป็นรูปแบบอื่น 7 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 ตามรายละเอียดในตารางที่ 4.7 โดยที่รูปแบบที่ 1 จะมีลักษณะเหมือนกับรูปแบบที่ 7 เพียงแค่สลับกันระหว่างอิเล็กโทรดปฐมภูมิกับอิเล็กโทรดทุติยภูมิหมายเลข 1 เช่นเดียวกันกับรูปแบบที่ 2 ก็จะมีลักษณะเหมือนกับรูปแบบที่ 6 และรูปแบบที่ 3 ก็จะมีลักษณะเหมือนกับรูปแบบที่ 5

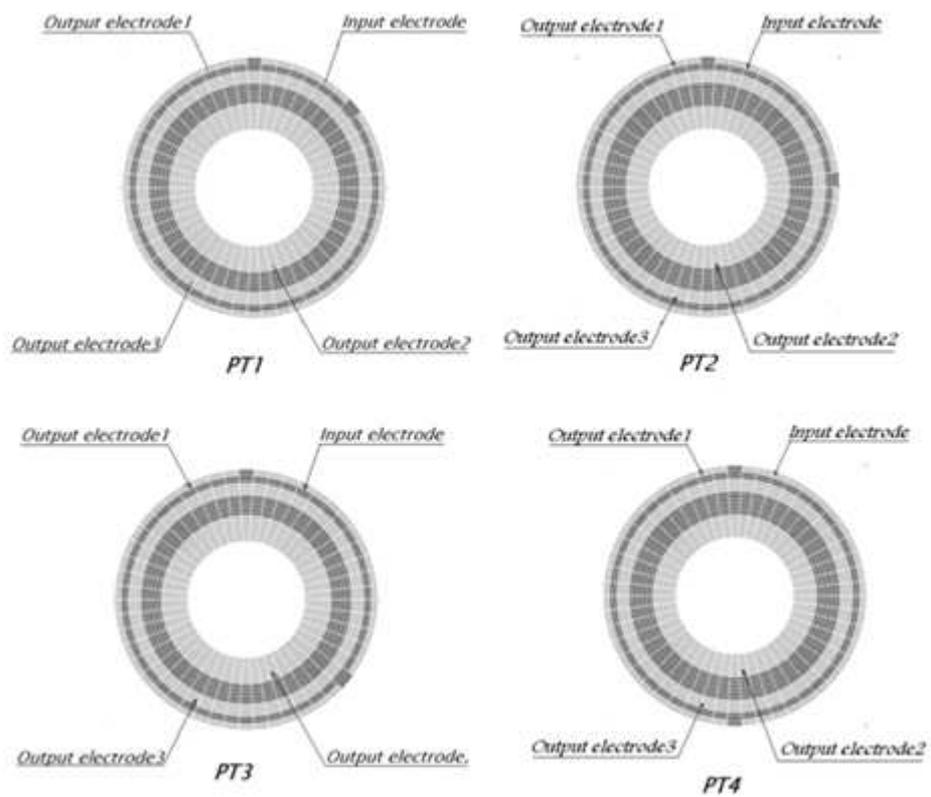


รูปที่ 4.26 แสดงลักษณะและขนาดอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

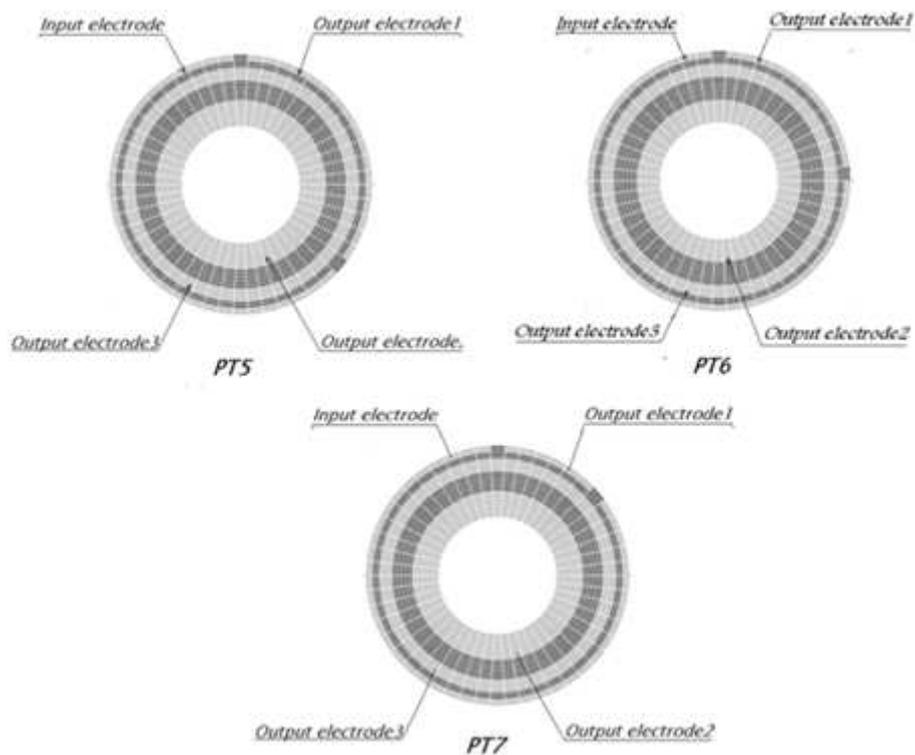
ตารางที่ 4.7 แสดงขนาดของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงแต่ละรูปแบบ

PT No.	D1(mm)	D2(mm)	D3(mm)	D4(mm)	D5(mm)	D6(mm)	$\theta(\text{rad})$
PT1	9	13	16	18	19	20	$7\pi/4$
PT2	9	13	16	18	19	20	$6\pi/4$
PT3	9	13	16	18	19	20	$5\pi/4$
PT4	9	13	16	18	19	20	π
PT5	9	13	16	18	19	20	$3\pi/4$
PT6	9	13	16	18	19	20	$\pi/2$
PT7	9	13	16	18	19	20	$\pi/4$

จากรูปที่ 4.26 หม้อแปลงไฟฟ้าเฟสไอเล็กทริกประกอบด้วยอิเล็กโทรด 4 ส่วน ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดปฐมภูมิ 1 ส่วน และอิเล็กโทรดทุติยภูมิ 3 ส่วน ข้อแตกต่างกันของทั้ง 7 รูปแบบคือ อิเล็กโทรดปฐมภูมิ และอิเล็กโทรดทุติยภูมิหมายเลข 1 ดังแสดงในรูปประกอบที่ 4.27

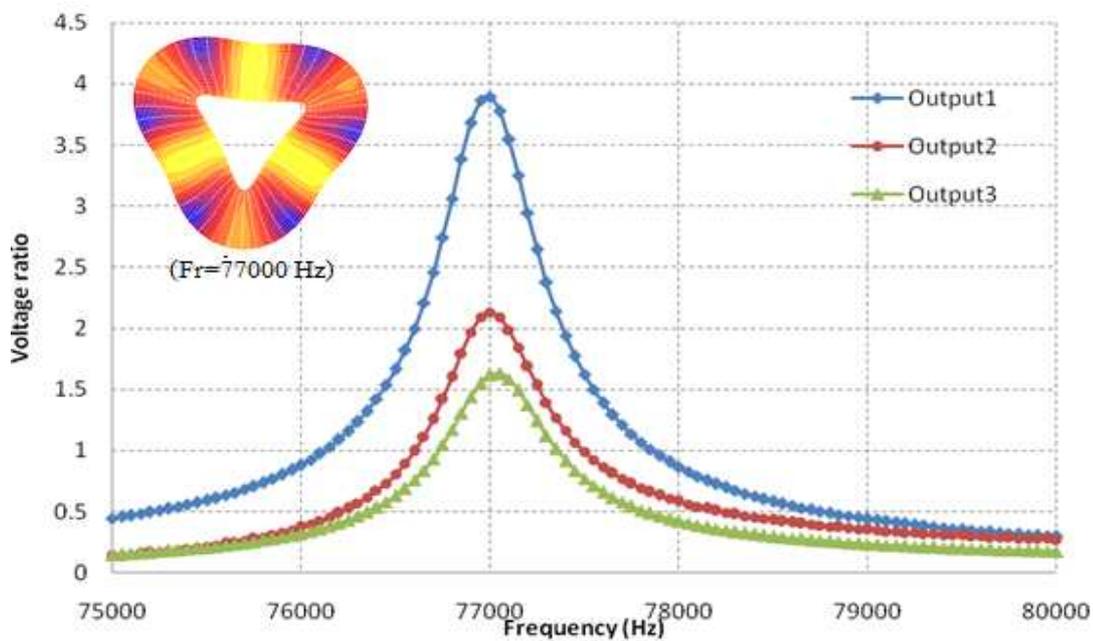


รูปที่ 4.27 แสดงลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเฟสเดียวชนิดทริก
รูปแบบที่ 1-4

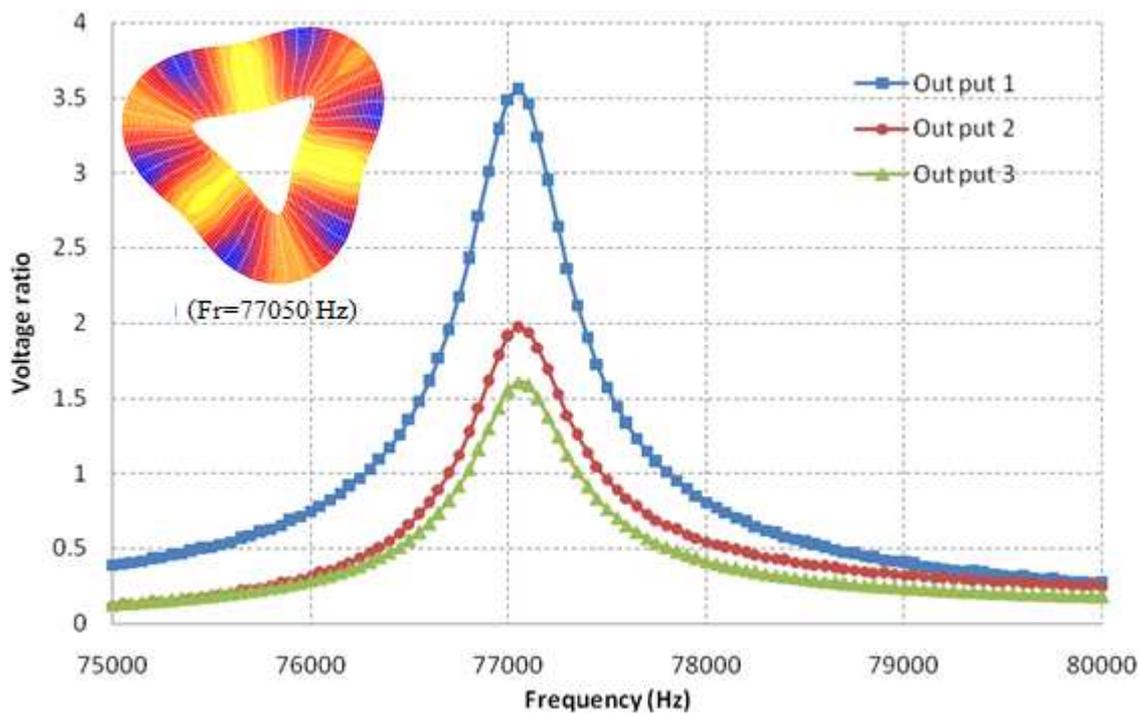


รูปที่ 4.27 (ต่อ) แสดงลักษณะของอิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์
รูปแบบที่ 5-7

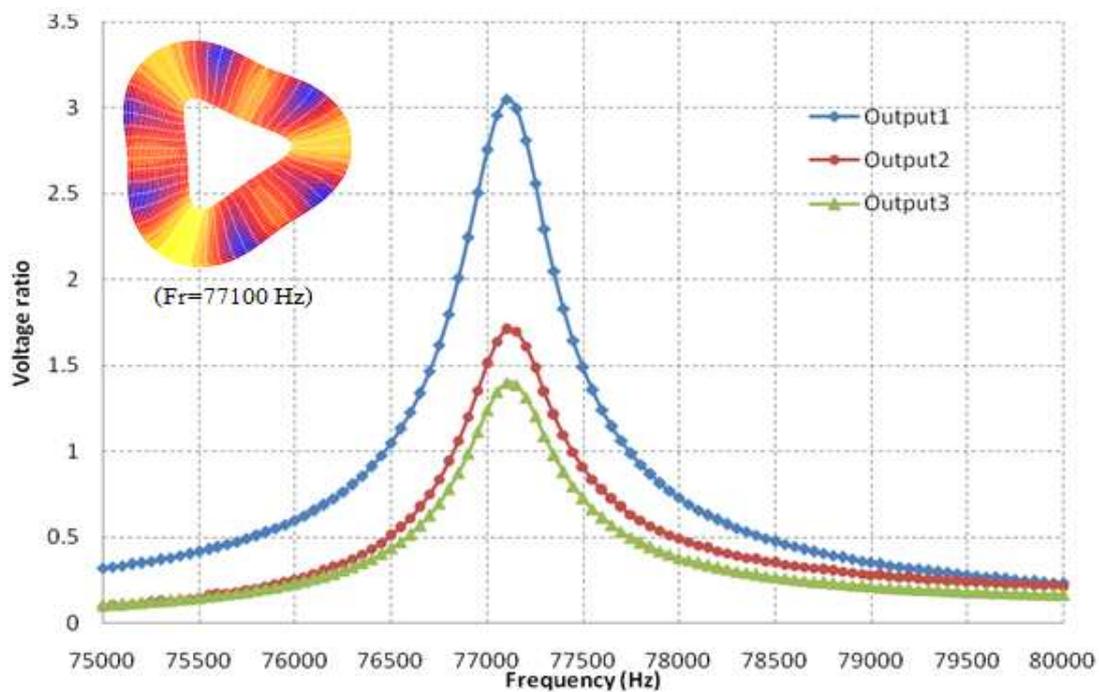
ในการศึกษาแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ ใช้การวิเคราะห์แบบฮาโมนิกส์
ศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้นมีค่า 10 โวลต์ ในช่วงความถี่ 75-80 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยจะกระตุ้นที่อิเล็กโทรดปฐม
ภูมิ และผลที่ได้จากการคำนวณถูกแสดงในรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.34 ซึ่งการแสดงความสัมพันธ์
ระหว่างอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นกับอิเล็กโทรดทุติยภูมิแต่ละส่วนที่ความถี่ต่างๆ ของหม้อ
แปลงไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์ทั้ง 7 รูปแบบ รวมถึงแสดงลักษณะการเปลี่ยนรูปของหม้อแปลง
ไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่มุมด้านซ้ายของภาพ



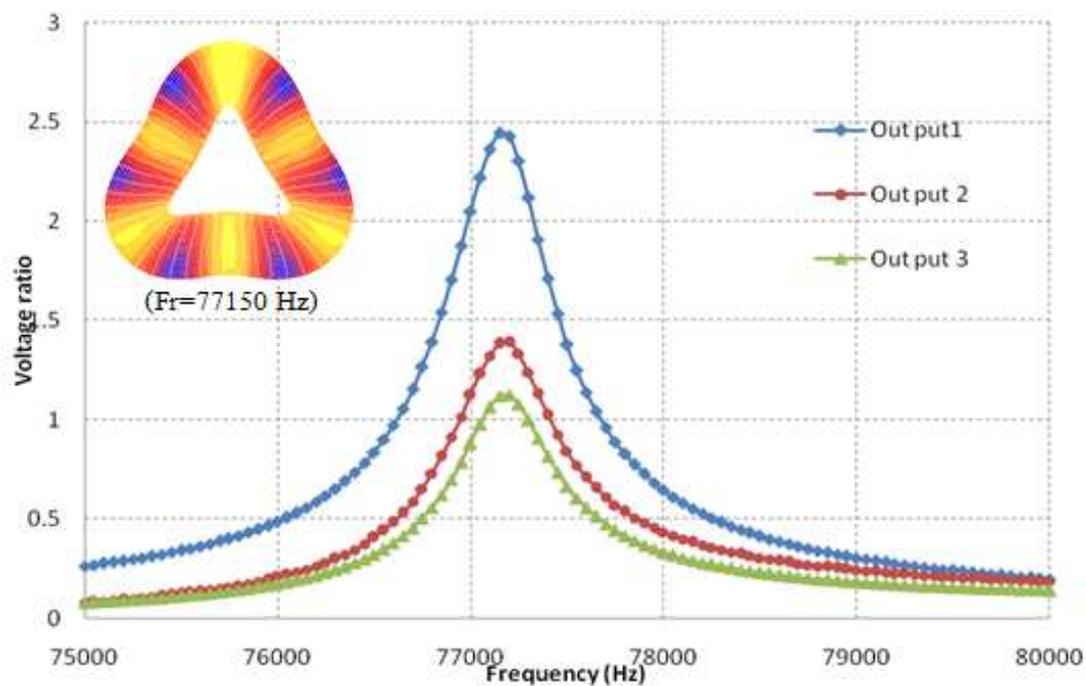
รูปที่ 4.28 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรแบบที่ 1 ($F_r = 77000$ Hz)



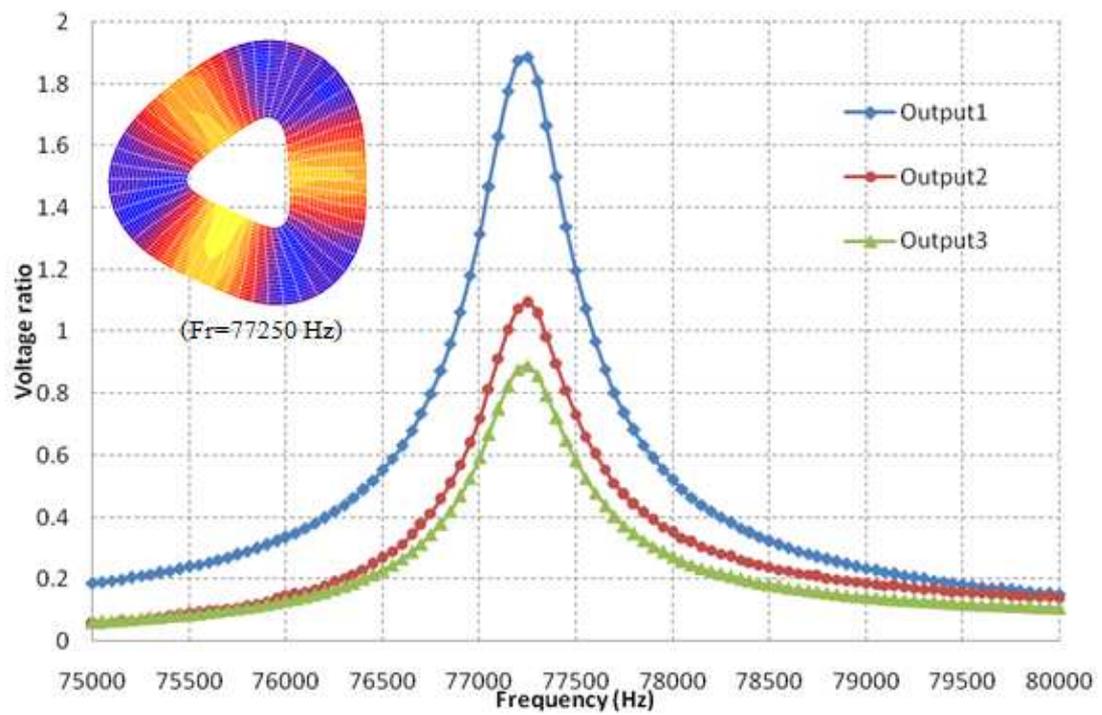
รูปที่ 4.29 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรแบบที่ 2 ($F_r = 77050$ Hz)



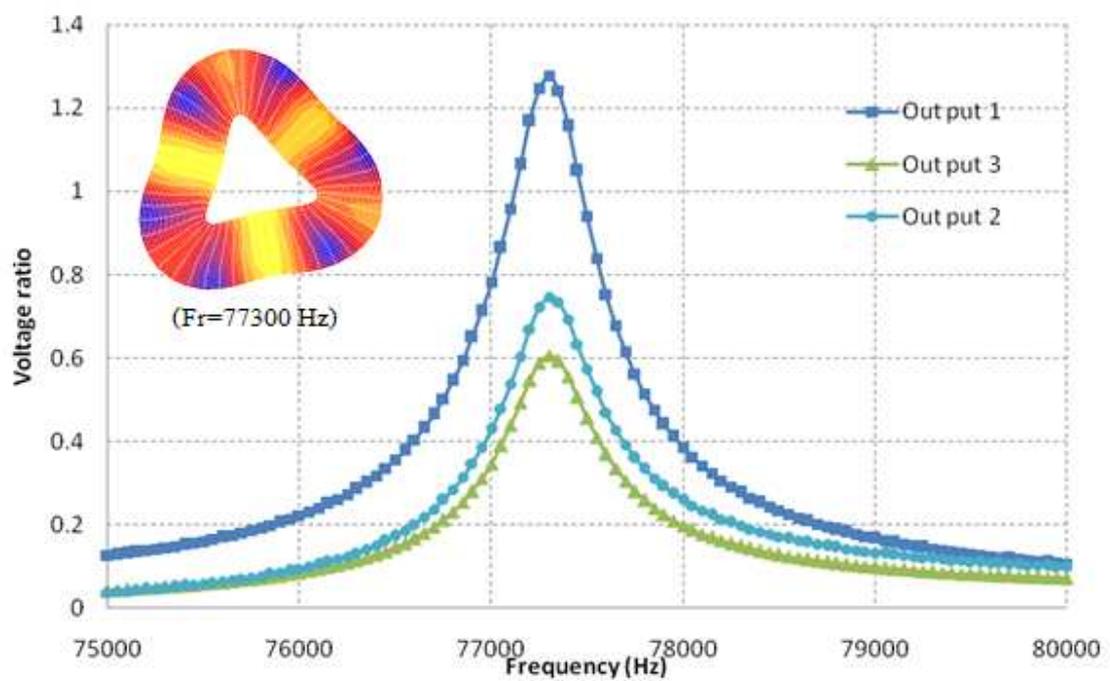
รูปที่ 4.30 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรดรูปแบบที่ 3 ($Fr=77100$ Hz)



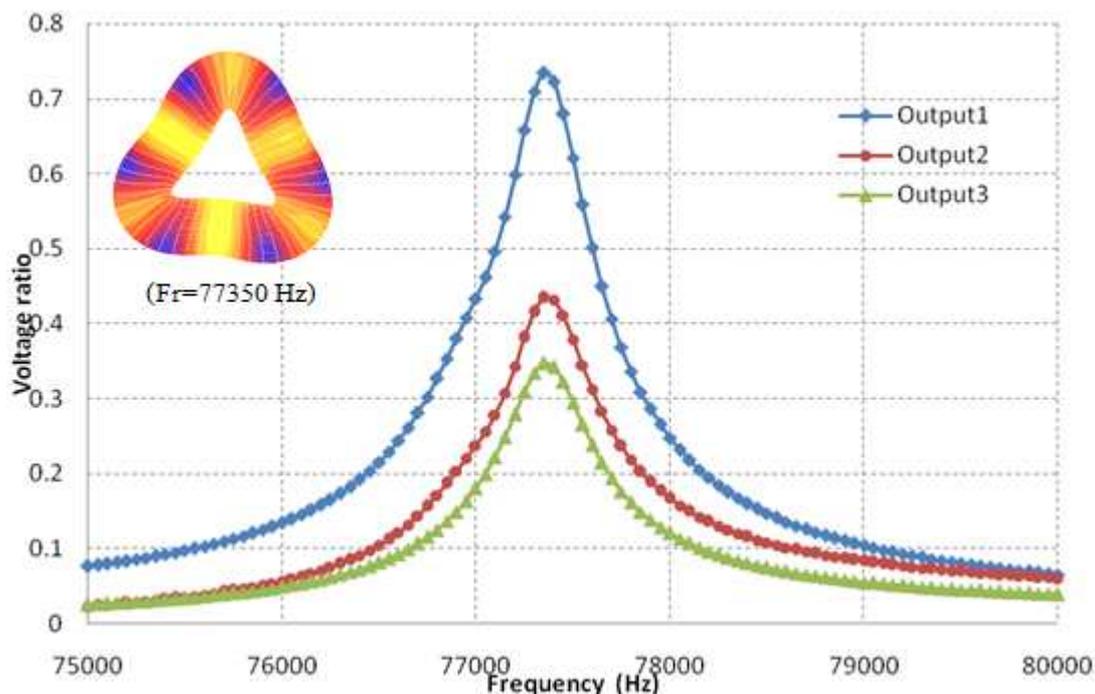
รูปที่ 4.31 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรดรูปแบบที่ 4 ($Fr=77150$ Hz)



รูปที่ 4.32 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรอดรูปแบบที่ 5 ($F_r=77250$ Hz)



รูปที่ 4.33 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิล็กโทรอดรูปแบบที่ 6 ($F_r=77300$ Hz)



รูปที่ 4.34 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิลเล็กโทรดรูปแบบที่ 7 ($F_r=77350$ Hz)

จากรูปที่ 4.28 ถึงรูปที่ 4.34 พบว่าค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่อิลเล็กโทรดทุติยภูมิทั้งสามอิลเล็กโทรดทั้ง 7 รูปแบบมีค่าที่แตกต่างกัน อิลเล็กโทรดทุติยภูมิที่ 1 จะให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่สูงที่สุดต่อมาอิลเล็กโทรดทุติยภูมิที่ 2 มีค่าที่ต่ำรองลงมา และอิลเล็กโทรดทุติยภูมิที่ 3 จะมีค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำที่สุด

สำหรับอิลเล็กโทรดรูปแบบที่ 1 2 3 และ 4 จะให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่อิลเล็กโทรดทุติยภูมิทั้งสามส่วนมีค่ามากกว่า 1 หมายความว่าทั้งหมดเป็นการเสตีปอัพ ส่วนอิลเล็กโทรดรูปแบบที่ 5 และ 6 ให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่าที่มากกว่า 1 และน้อยกว่า 1 แสดงว่าอิลเล็กโทรดรูปแบบที่ 5 และ 6 สามารถใช้ได้ทั้งการเสตีปอัพ และเสตีปดาวน์ และสำหรับอิลเล็กโทรดรูปแบบที่ 7 ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของอิลเล็กโทรดทุติยภูมิทั้งสามส่วนมีค่าที่น้อยกว่า 1 แสดงว่าเป็นการเสตีปดาวน์เพียงอย่างเดียว

หม้อแปลงไฟฟ้าเพียอิลเล็กทริกทั้ง 7 รูปแบบพื้นที่ของอิลเล็กโทรดปฐมภูมิแตกต่างกัน ดังนั้นค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าจึงแตกต่างกันโดยมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของอิลเล็กโทรดปฐมภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆ

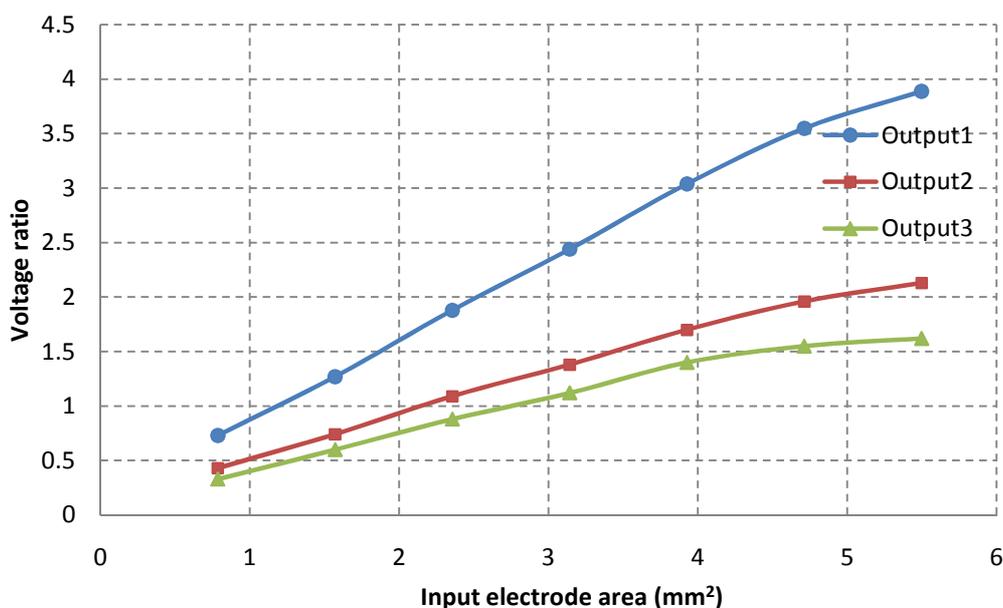
PT No.	Input area (mm ²)	Resonance freq. (Hz)	Voltage ratio (V)		
			Output1	Output2	Output3
PT1	5.4977	77050	3.89	2.13	1.62
PT2	4.7123	77000	3.55	1.96	1.55
PT3	3.9269	77100	3.04	1.7	1.4
PT4	3.1415	77150	2.44	1.38	1.12
PT5	2.3561	77250	1.88	1.09	0.88
PT6	1.5707	77300	1.27	0.74	0.6
PT7	0.7853	77350	0.73	0.43	0.33

จากรูปที่ 4.35 จะเห็นว่าเมื่อพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้พื้นที่อิเล็กทรอนิกส์จะมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าแล้วยังมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้อิเล็กทรอนิกส์ด้วย กล่าวคือความถี่เรโซแนนซ์มีค่าลดลงเมื่อพื้นที่ด้านปฐมภูมิมีค่าลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และในตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์กับผลที่ได้จากการทำการทดลอง

ตารางที่ 4.9 แสดงการเปรียบเทียบอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์รูปแบบต่างๆของผลที่ได้จากการคำนวณไฟไนท์เอลิเมนต์กับผลการทดลอง

PT No.	Voltage ratio					
	Output1		Output2		Output3	
	FEM	Experiment	FEM	Experiment	FEM	Experiment
PT1	3.89	3.74	2.13	2.1	1.62	1.12
PT2	3.55	3.5	1.96	1.94	1.55	1.46
PT3	3.04	2.76	1.7	1.5	1.4	1.05
PT4	2.44	2.26	1.38	1.36	1.12	0.98
PT5	1.88	1.78	1.09	1.09	0.88	0.78

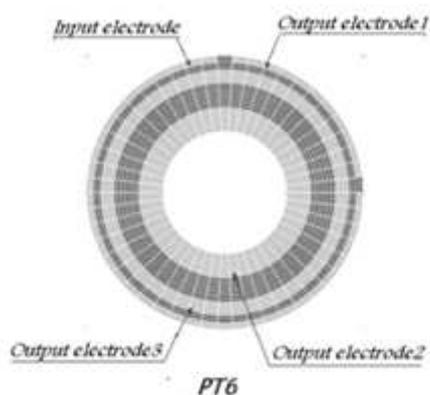
PT6	1.27	1.17	0.74	0.6	0.6	0.53
PT7	0.73	0.72	0.43	0.41	0.33	0.32



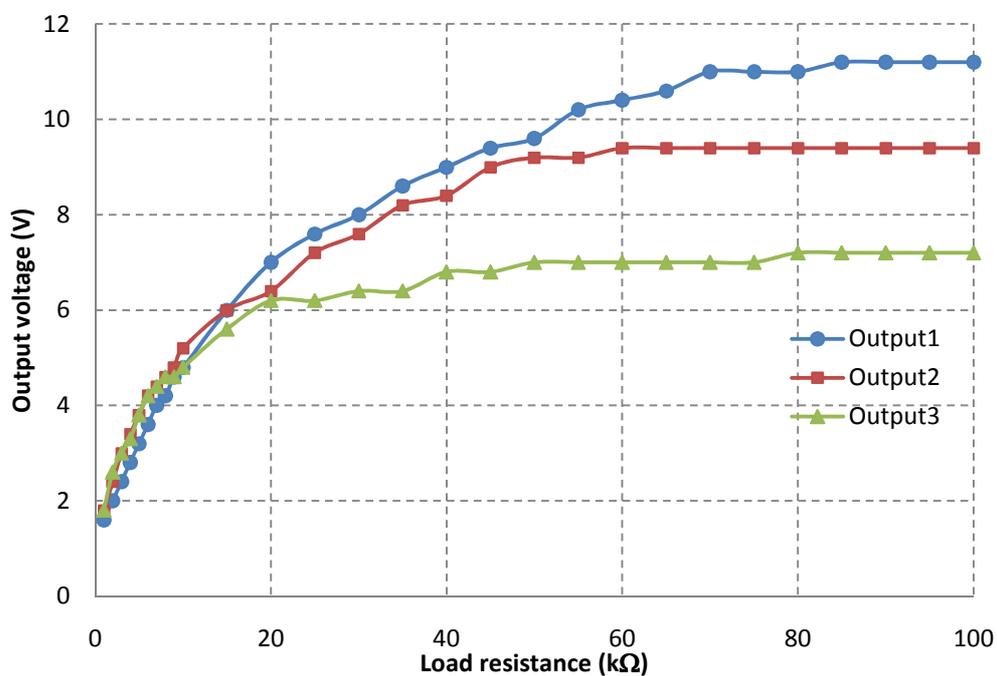
รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่อิเล็กโทรดปฐมนุมกับอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า

4.4.3 พลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

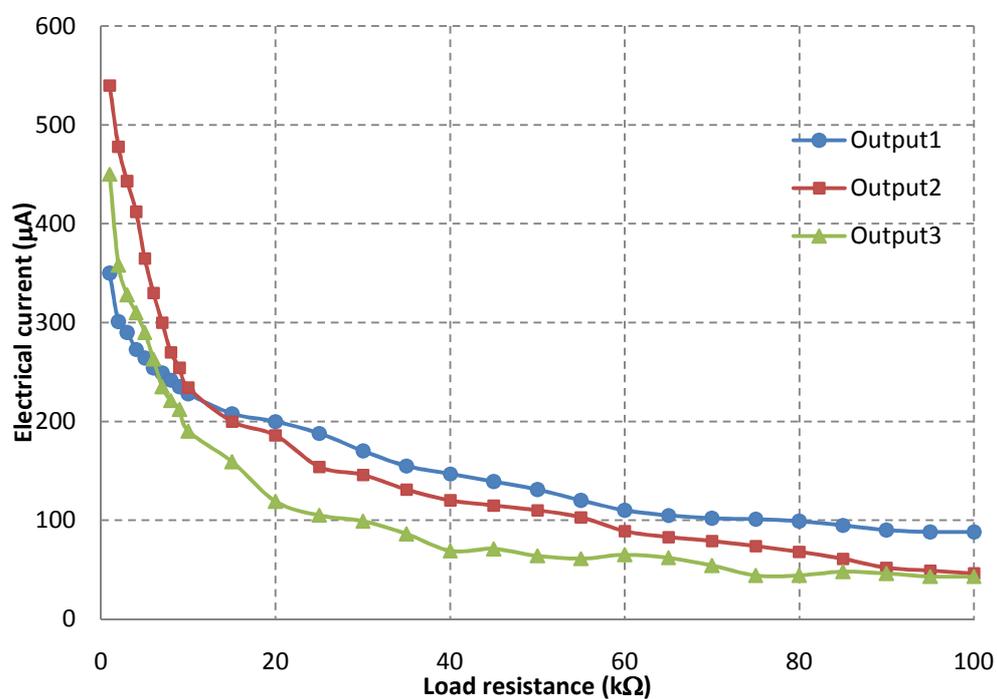
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงพลังงานไฟฟ้า และประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้า โดยได้เลือกหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.36 ในการทดสอบศักย์ไฟฟ้าที่กระดุนมีค่า 10 โวลต์ ที่ความถี่เรโซแนนซ์ 77.3 กิโลเฮิร์ตซ์ เมื่อไหลลงทางไฟฟ้าที่มากกระทำเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.37



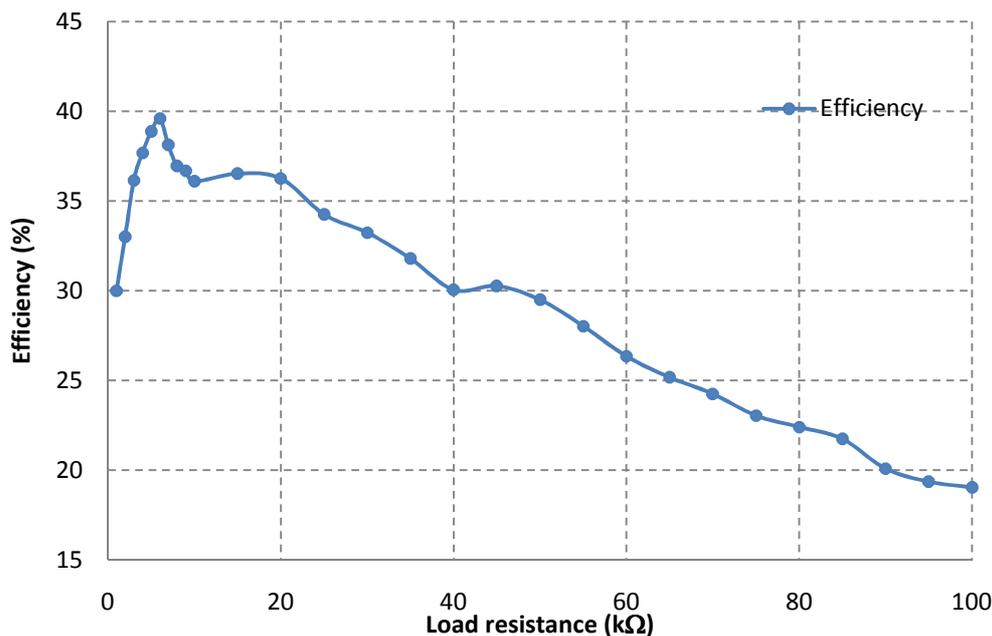
รูปที่ 4.36 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 4.37 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าของสามอิเล็กทรอนิกส์ที่ค่าโหลดไฟฟ้าต่างๆ



รูปที่ 4.38 แสดงกระแสไฟฟ้าของสามอิเล็กทรอนิกส์ที่ค่าโหลดไฟฟ้าต่างๆ

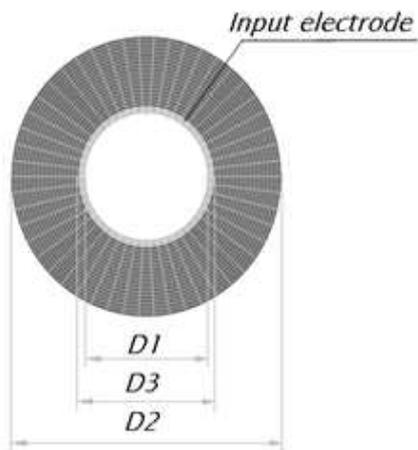


รูปที่ 4.39 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ค่าโหลดไฟฟ้าต่างๆ

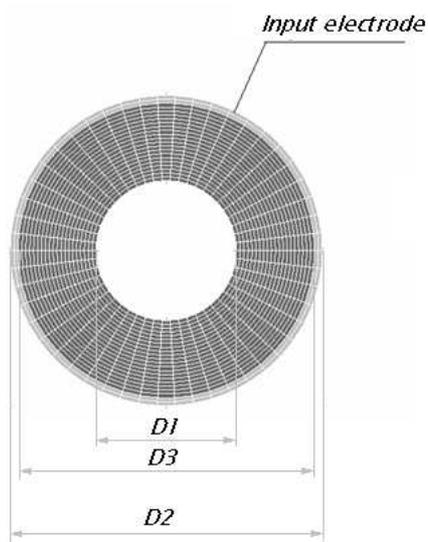
จากผลการทดสอบ เมื่อค่าโหลดทางไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น พบว่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีค่ามากขึ้นจนกระทั่งโหลดทางไฟฟ้ามีค่าประมาณ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีความคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.37 ซึ่งมีแนวโน้มที่สวนทางกับกระแสไฟฟ้าที่มีค่าลดลงเมื่อโหลดไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น จนถึงที่โหลดไฟฟ้ามีค่าประมาณ 80 กิโลเฮิร์ตซ์ กระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มคงที่ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และรูปที่ 4.39 แสดงประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่โหลดไฟฟ้าต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดคือ 40 เปอร์เซ็นต์ที่โหลดไฟฟ้าประมาณ 5 กิโลโห์ม

4.5 ผลของขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า

การวิเคราะห์ที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของลักษณะและพื้นที่อิเล็กโทรดที่มีต่อศักย์ไฟฟ้า โดยที่ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกไม่มีการเปลี่ยนแปลง ในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของขนาดหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีต่อศักย์ไฟฟ้า เพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสถียรปดาวน์ โดยได้สร้างแบบจำลองการ 2 ลักษณะ ดังนี้ ลักษณะที่ 1 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดเฉพาะบริเวณส่วนในของวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 4.40 ลักษณะที่ 2 เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดเฉพาะบริเวณส่วนนอกของวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 แสดงแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะที่ 1



รูปที่ 4.41 แสดงแบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้วิเคราะห์ลักษณะที่ 2

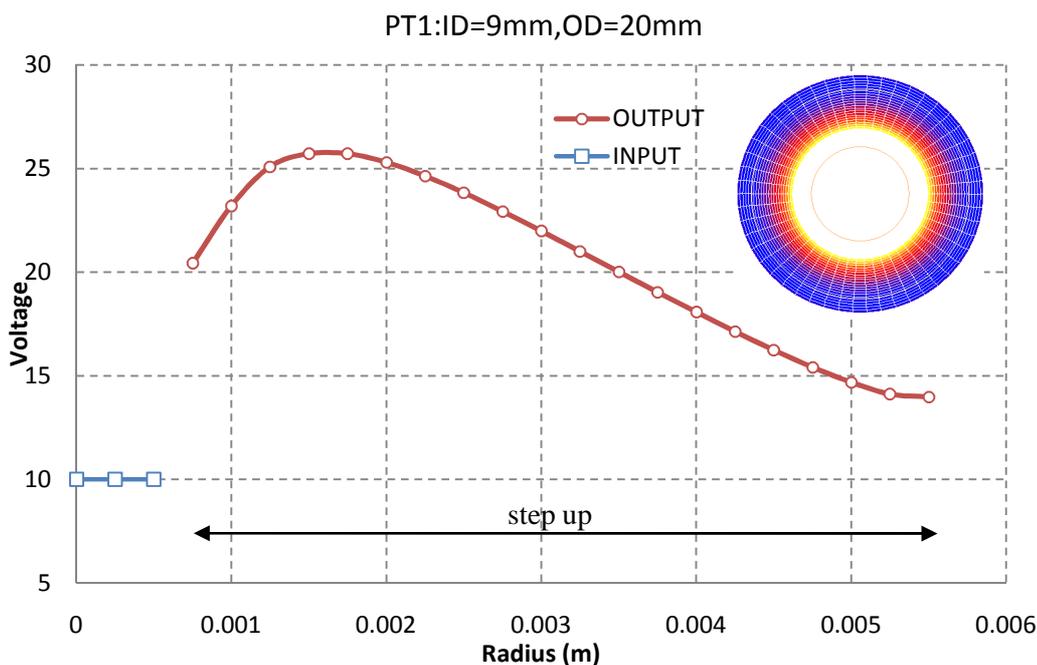
ตารางที่ 4.10 แสดงขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อใช้วิเคราะห์ที่ใช้ในการคำนวณ

PT No.	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	
			case1	case2
PT1	9	20	10	19
PT2	9	23	10	22
PT3	9	26	10	25
PT4	9	30	10	29

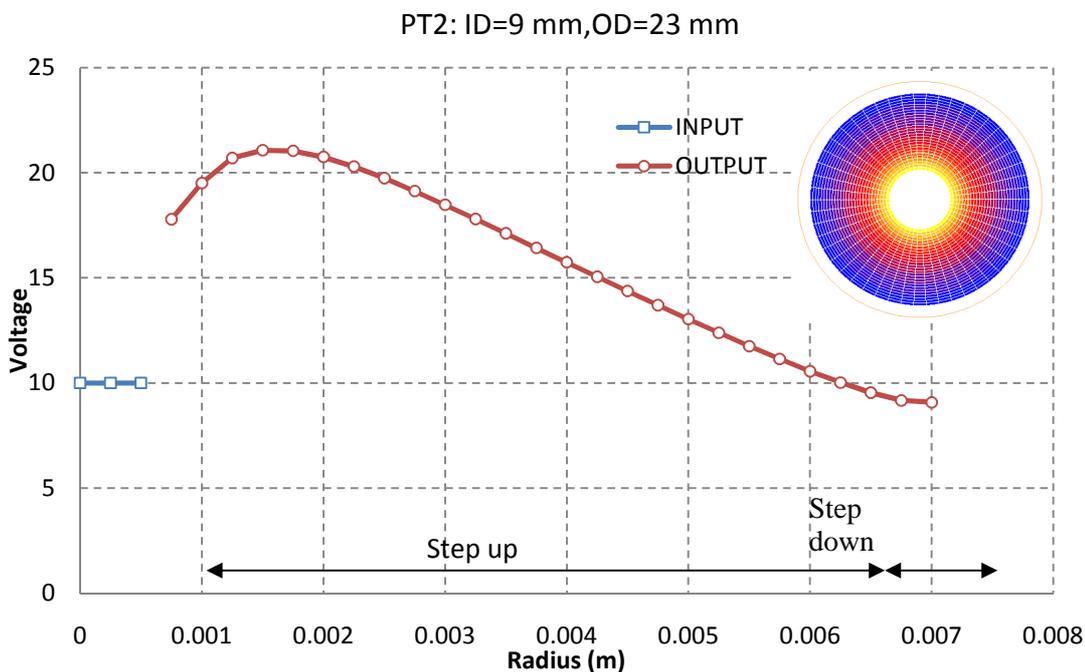
PT5	9	34	10	33
-----	---	----	----	----

ในการศึกษานี้ได้สร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดที่แตกต่างกัน 5 ขนาดดังแสดงในตารางที่ 4.10 หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกหม้อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในที่เท่ากัน แต่ต่างกันที่ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของอิเล็กโทรดและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

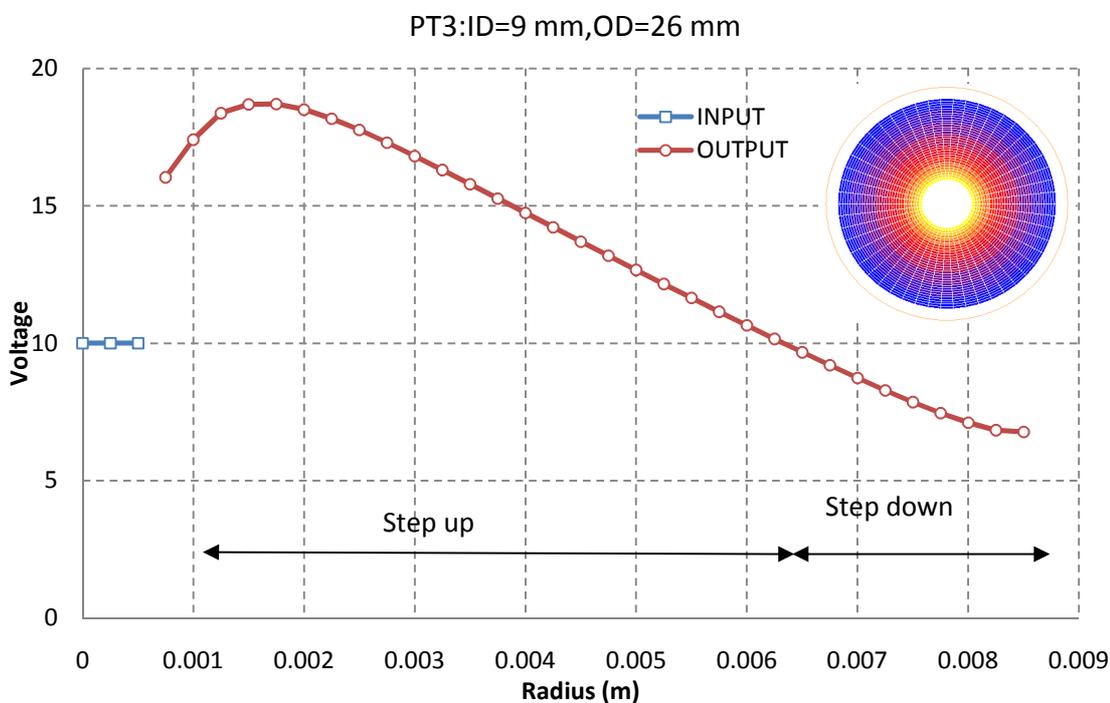
ในการศึกษาแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ที่ใช้การวิเคราะห์แบบฮาโมนิกส์ ศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้นมีค่า 10 โวลต์ ในช่วงความถี่ 50-100 กิโลเฮิร์ตซ์ การกำหนดตำแหน่งของอิเล็กโทรดดังแสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41 นั้นเพื่อศึกษาศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดต่างกัน และจากการวิเคราะห์จะทำให้ทราบบริเวณใดที่ให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าแบบสเต็ปดาวน์ หรือสเต็ปอัพ ซึ่งผลการคำนวณที่ได้ถูกแสดงในรูปที่ 4.42 ถึง รูปที่ 4.46



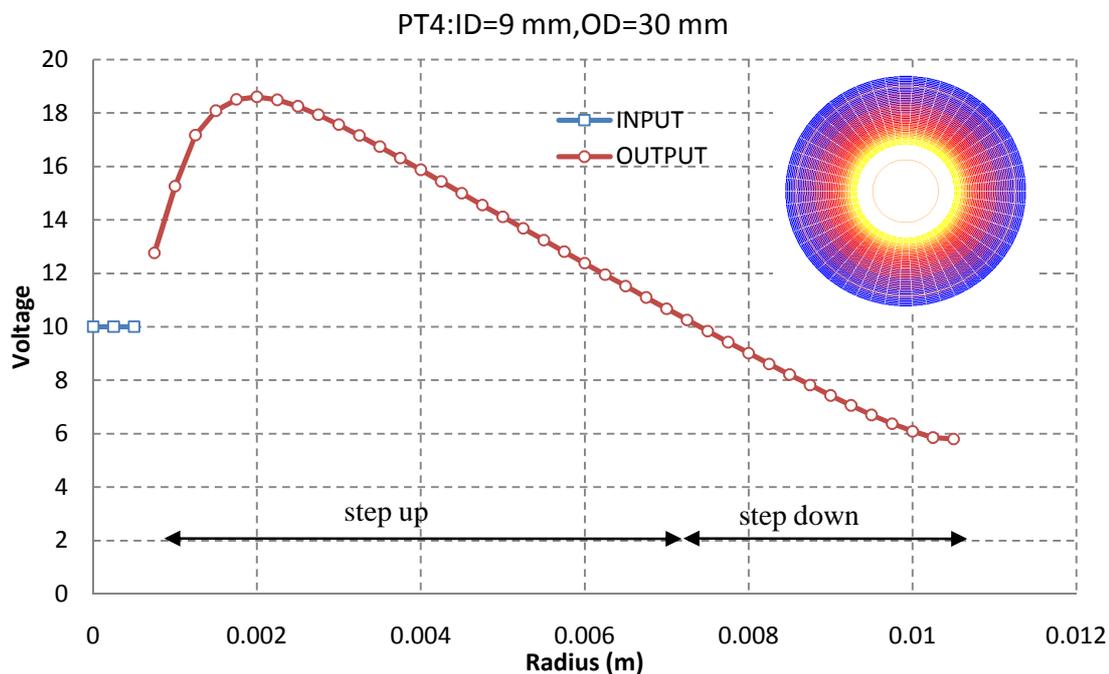
รูปที่ 4.42 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิขอบด้านใน



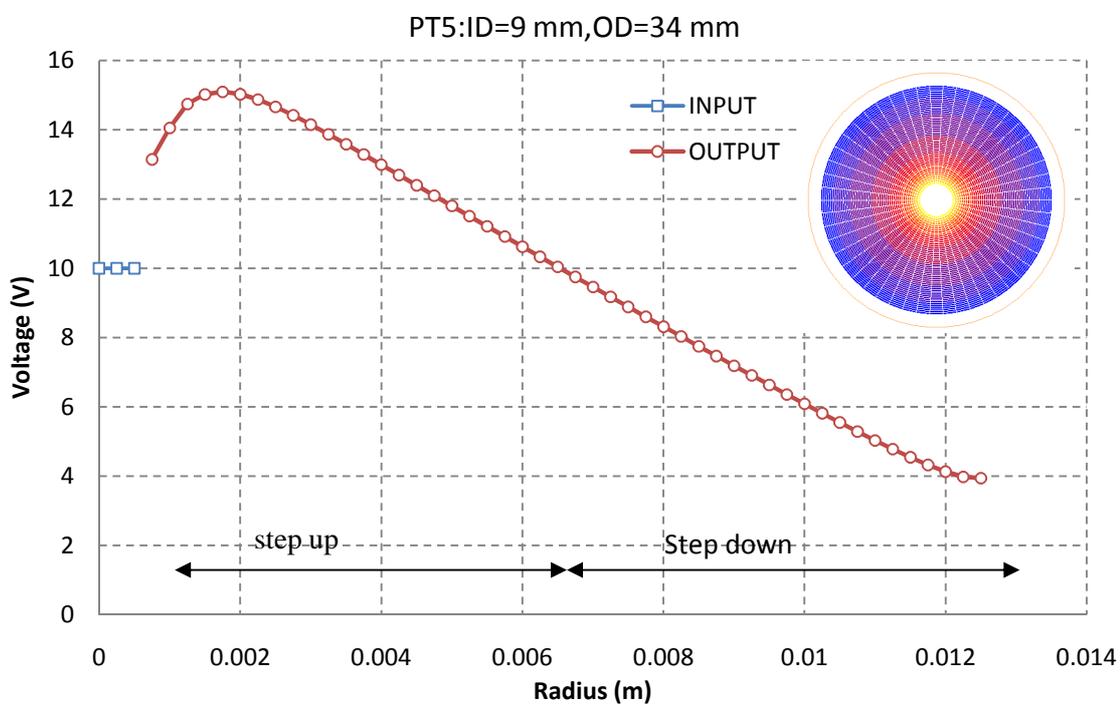
รูปที่ 4.43 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิขอบด้านใน



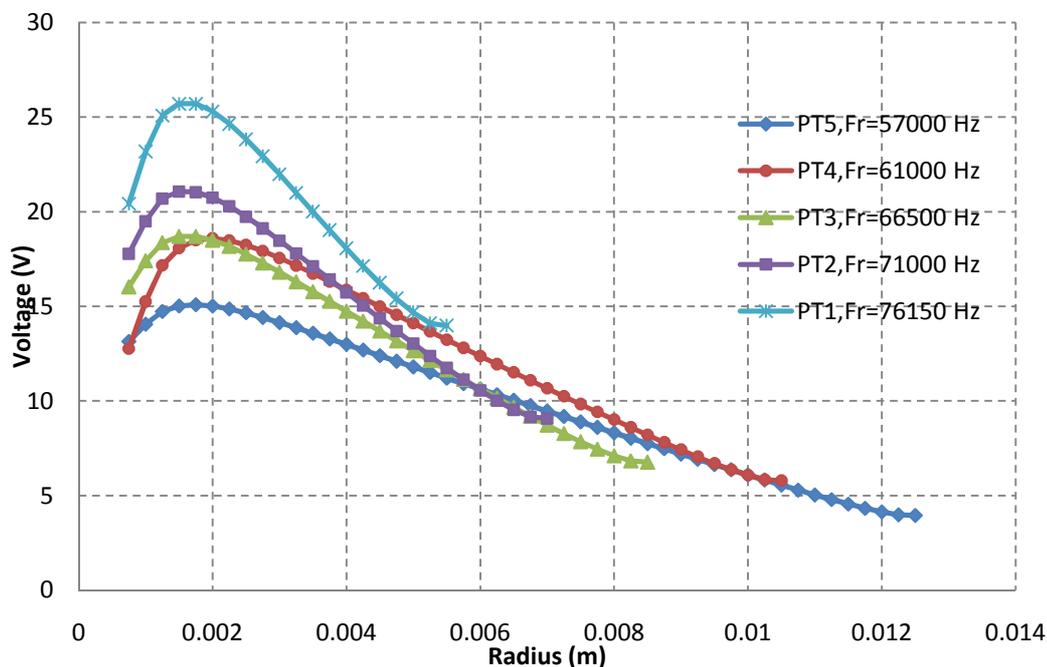
รูปที่ 4.44 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิขอบด้านใน



รูปที่ 4.45 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านใน



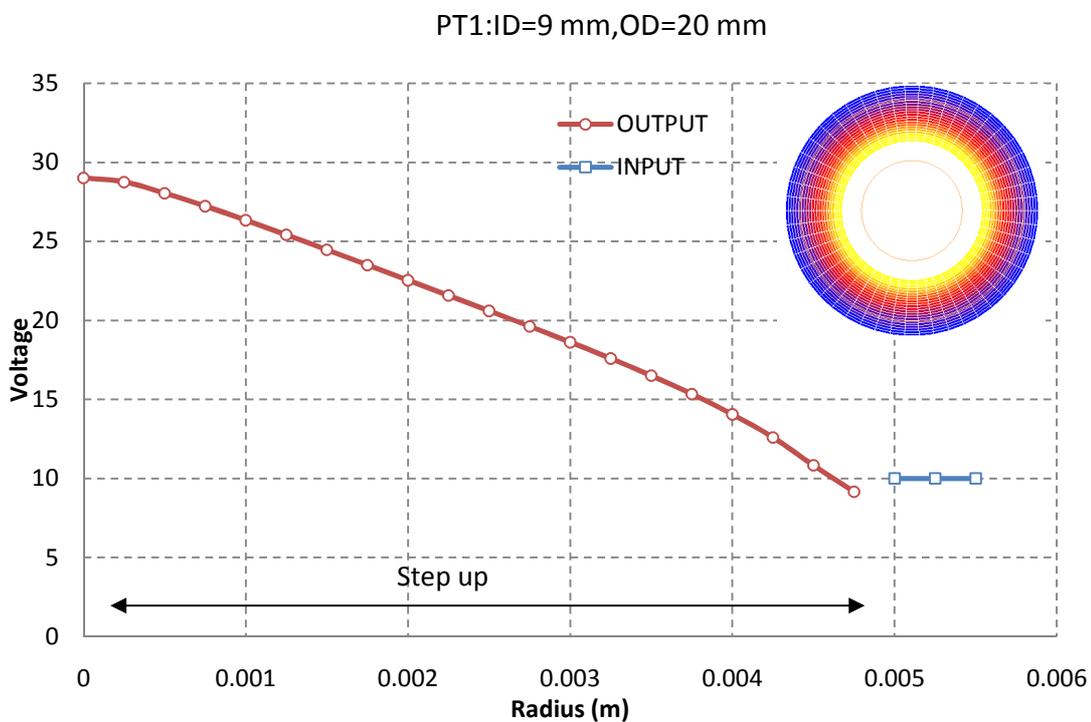
รูปที่ 4.46 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านใน



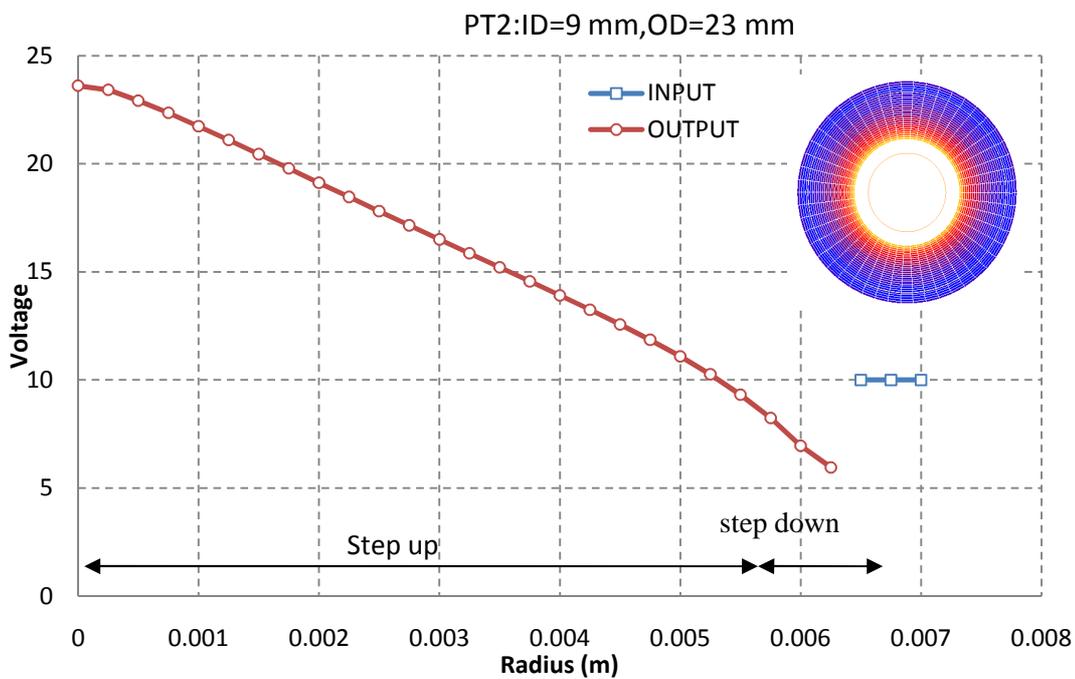
รูปที่ 4.47 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกขนาดต่างๆที่มีอิเล็กโทรดปฐมภูมิที่ขอบด้านใน

ผลการคำนวณที่แสดงในรูปที่ 4.42 ถึง รูปที่ 4.46 ได้แสดงศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดแตกต่างกัน เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้า 10 โวลต์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ ที่อิเล็กโทรดปฐมภูมิบริเวณขอบรัศมีด้านในเท่านั้น (ลักษณะที่ 1) พบว่าเมื่อขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกใหญ่ขึ้น จะทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีแนวโน้มลดลงตามแนวรัศมี เมื่อรัศมีเพิ่มขึ้นบริเวณที่เกิดการเสด็จปดาวน์จะมากขึ้น และในทางกลับกันบริเวณที่เกิดการเสด็จปัดพ์จะน้อยลง รวมถึงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เสด็จปัดพ์ก็ลดลงเช่นกัน นอกจากนี้ขนาดที่เปลี่ยนแปลงยังส่งผลต่อความถี่เรโซแนนซ์อีกด้วย กล่าวคือมีค่าต่ำลงเมื่อรัศมีนอกของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้น

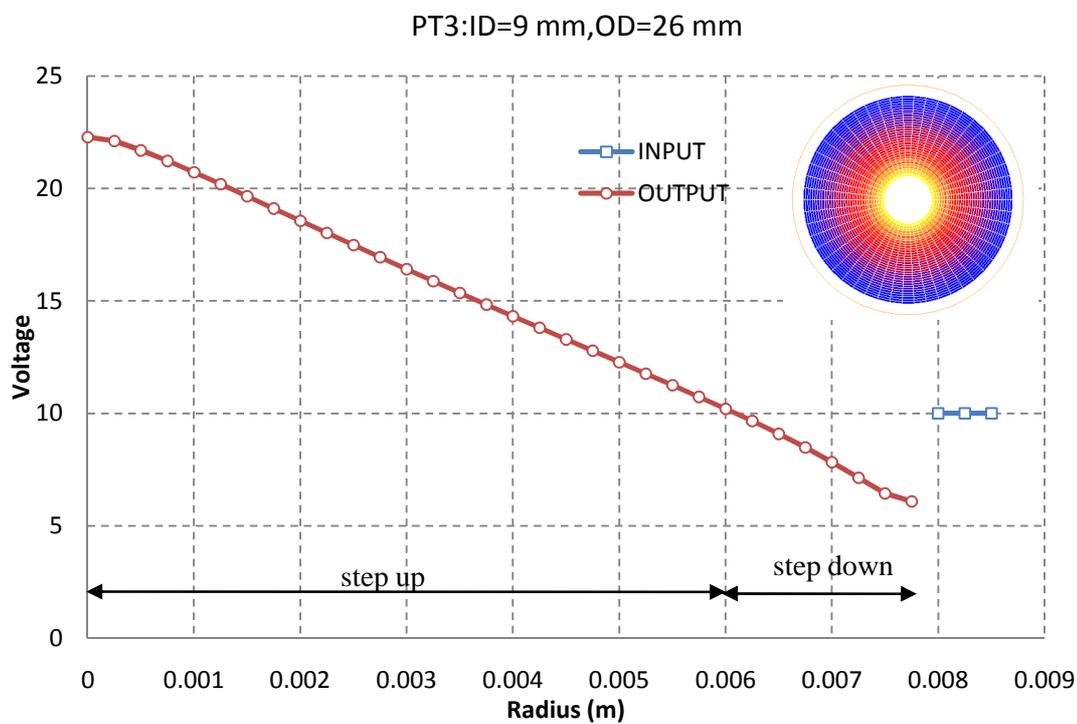
สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกลักษณะที่ 2 ที่ถูกกระตุ้นด้วยศักย์ไฟฟ้าที่ความถี่เรโซแนนซ์ที่บริเวณอิเล็กโทรดปฐมภูมิที่อยู่บริเวณขอบด้านนอกของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ผลการคำนวณถูกแสดงในรูปที่ 4.48 ถึงรูปที่ 4.52 พบว่าผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับลักษณะที่ 1 นั่นคือ เมื่อขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพิ่มมากขึ้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆมีค่าลดลง และพื้นที่การเกิดเสด็จปัดพ์น้อยลง แต่ในทางกลับกันพื้นที่การเกิดเสด็จปดาวน์เพิ่มมากขึ้น



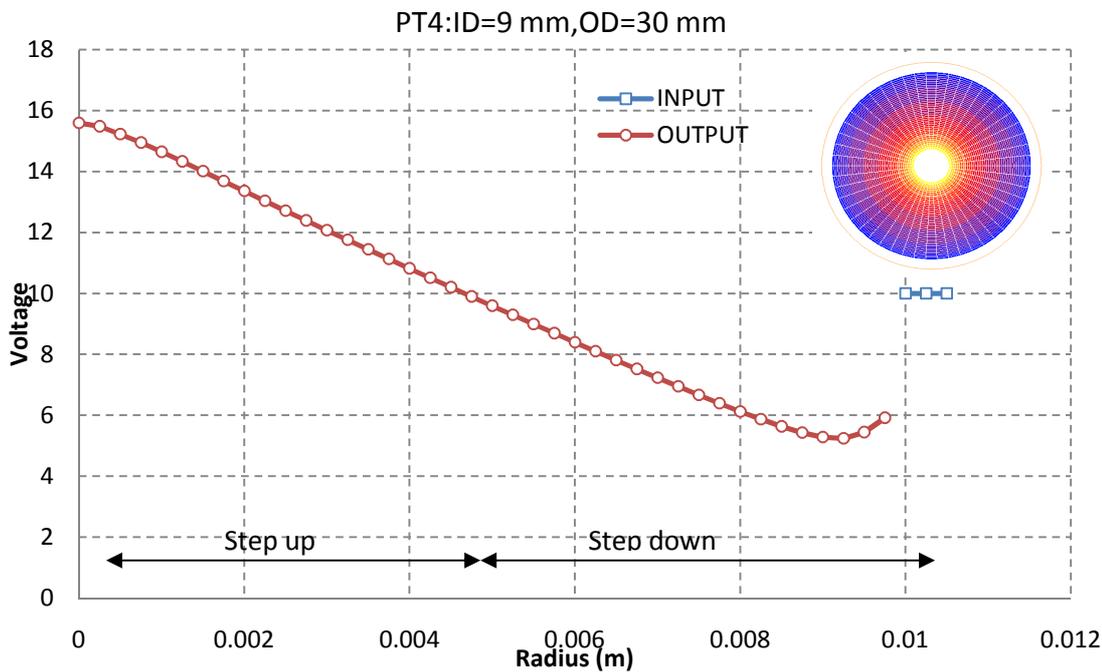
รูปที่ 4.48 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านนอก



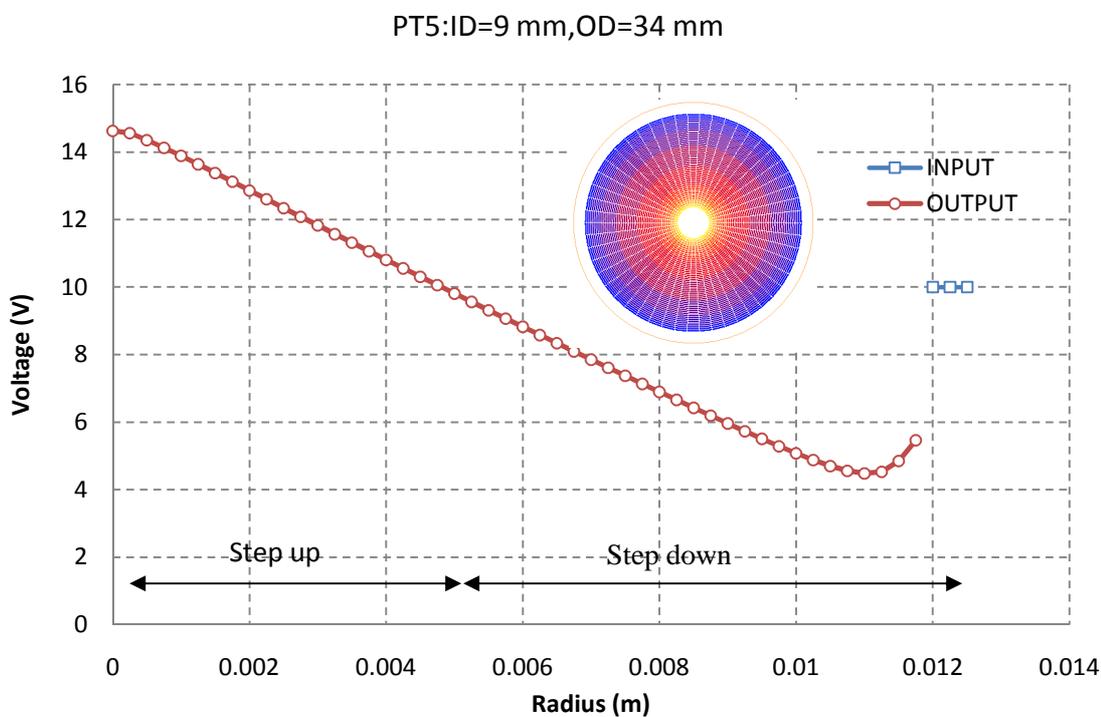
รูปที่ 4.49 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 23 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านนอก



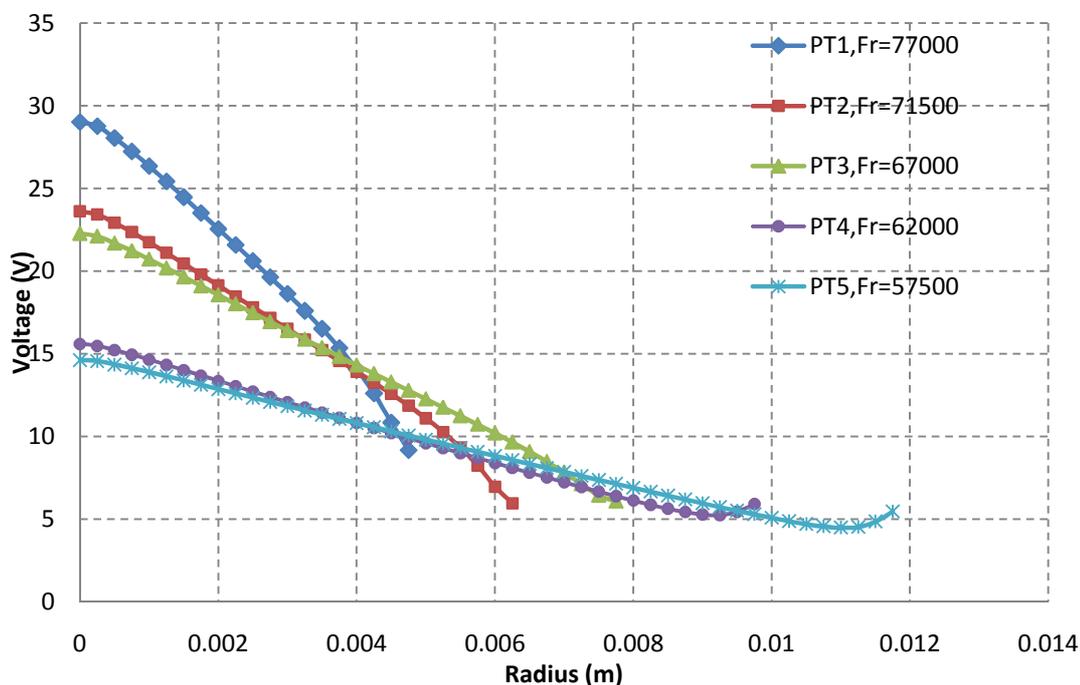
รูปที่ 4.50 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านนอก



รูปที่ 4.51 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านนอก

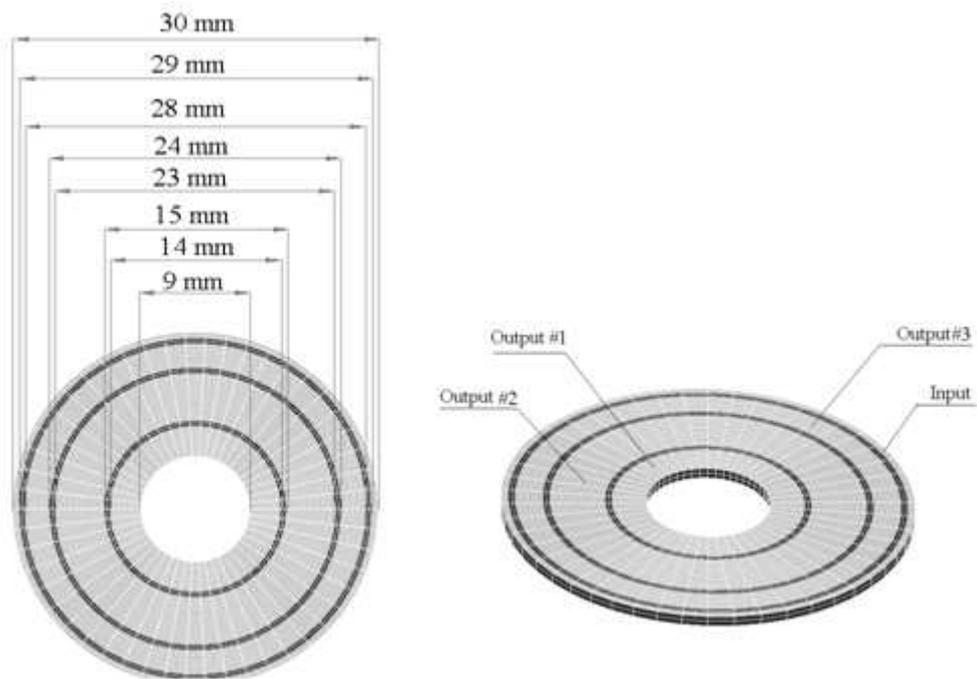


รูปที่ 4.52 แสดงศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มิลลิเมตรที่มีอิเล็กโทรดขอบด้านนอก

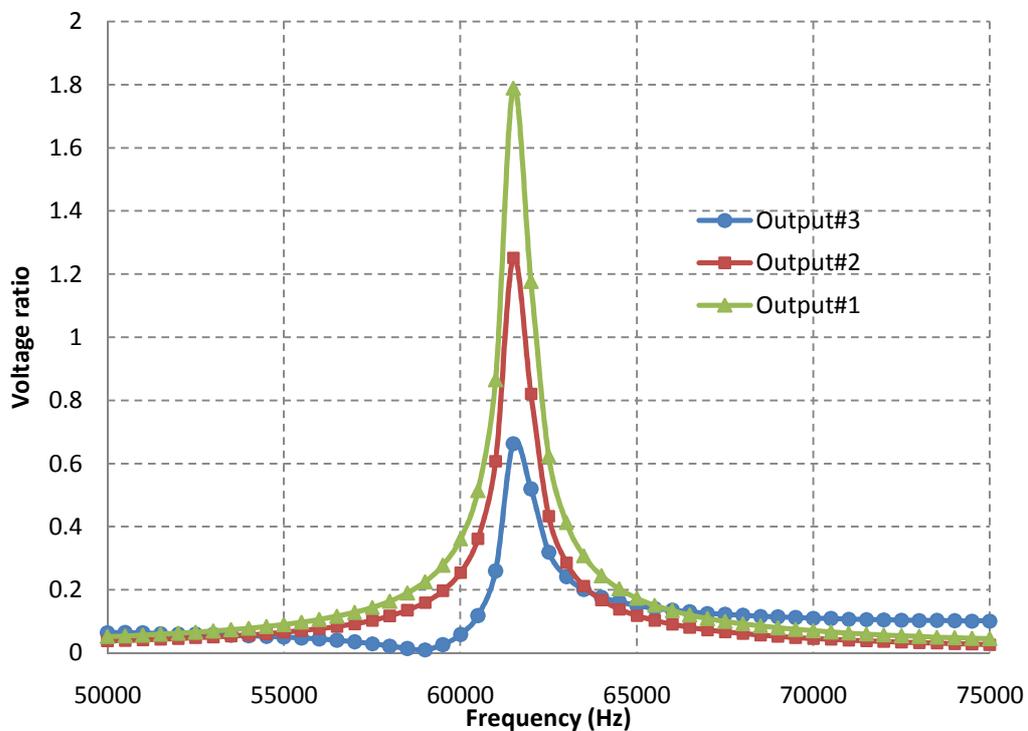


รูปที่ 4.53 แสดงการเปรียบเทียบการเกิดศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงเพียโซอิเล็กทริกขนาดต่างๆที่มี อิเล็กโทรดปฐมภูมิที่ขอบด้านนอก

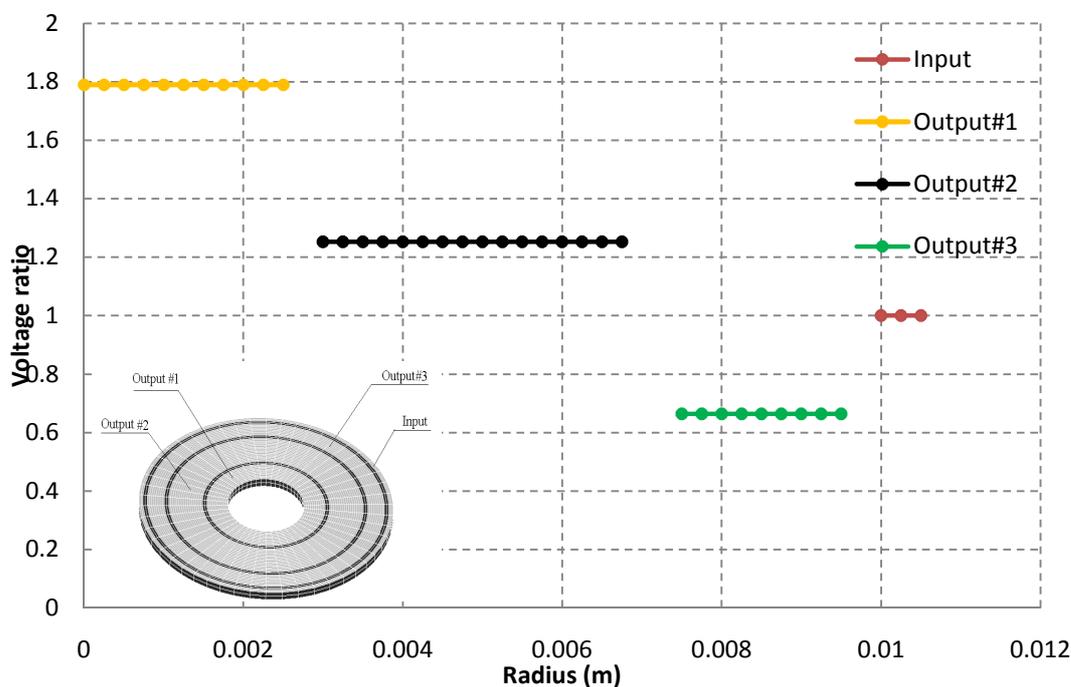
จากการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ลักษณะของอิเล็กโทรด ขนาดพื้นที่อิเล็กโทรด และขนาดของตัวหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น และมีค่าแตกต่างกัน ในแต่ละตำแหน่งบนผิวชิ้นงาน บางตำแหน่งเกิดการเสตีปัทพ์ และบางตำแหน่งเกิดการเสตีปดาวน ดังนั้น อิเล็กโทรดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกสามารถออกแบบให้มีทั้งที่เป็นเสตีปดาวน และเสตีปัทพ์ได้ในหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกตัวเดียว ยกตัวอย่างเช่นในรูปที่ 4.54 ซึ่งเป็นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดเท่ากับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบจำลองที่ 4 มีอิเล็กโทรดทุติยภูมิสามส่วน ซึ่งอิเล็กโทรดแต่ละส่วนอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นต่างกันดังแสดงในรูปที่ 4.55 จะเห็นได้ว่ามีทั้งที่เป็นการเสตีปัทพ์ และการเสตีปดาวน หม้อแปลงนี้มีความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 61500 Hz และในรูปที่ 4.56 ได้แสดงค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของอิเล็กโทรดแต่ละส่วนในแนวนอน



รูปที่ 4.54 แสดงขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.55 แสดงอัตราส่วนคิกย์ไฟฟ้าของอิเล็กทรอนิกส์ที่แต่ละส่วนความถี่ต่างๆ

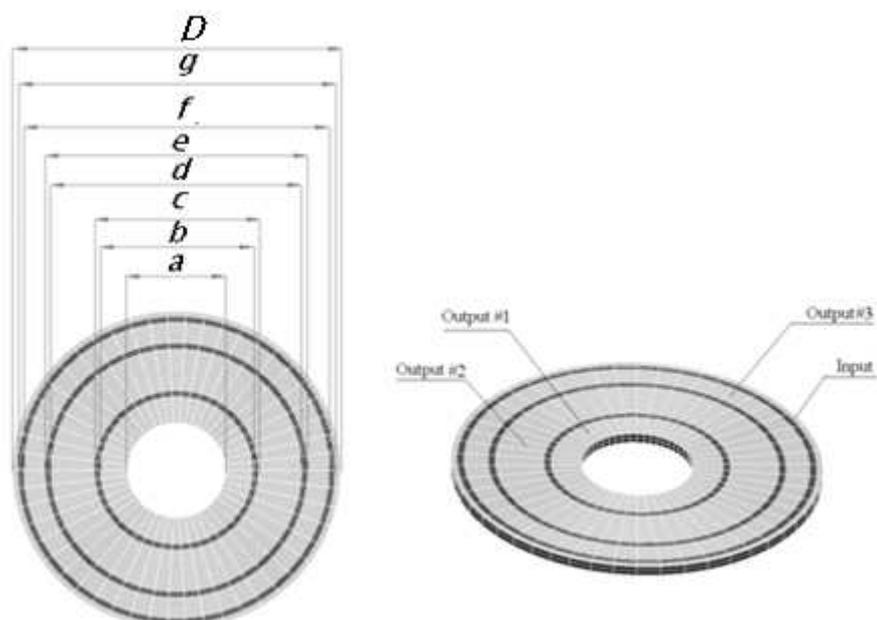


รูปที่ 4.56 แสดงอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งของอิเล็กโทรดตามแนวรัศมีเมื่อ กระตุ้นด้วยความถี่เรโซแนนซ์

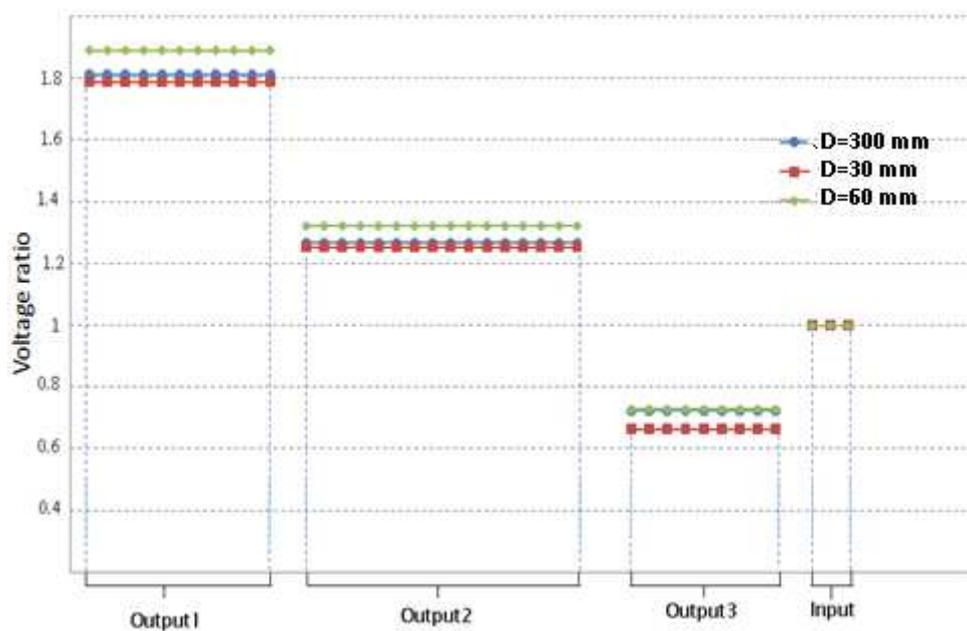
จากการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถสรุปการแบบออกอิเล็กโทรดของ หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีทั้งสเต็ปดาวน์และสเต็ปอัพได้ในหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกตัวเดียว ดังแสดงในตารางที่ 4.11 ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงด้วยตัวแปรไร้มิติ และสามารถนำไปใช้กับหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขนาดต่างๆได้ โดยขนาดนั้นจะต้องเป็นสัดส่วนเดียวกัน ดังแสดงตัวอย่างในการคำนวณศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาด $D=$ เท่ากับ 300 60 และ 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ในรูปที่ 4.85

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าตัวแปรไร้มิติสำหรับการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

Dimensionless parameter for design multi-output piezoelectric transformer						
a	b	c	d	e	f	g
0.3D	0.467D	0.5D	0.75D	0.8D	0.93D	0.967D
material: PZT-4						
Vibration mode: 1st radial mode						



รูปที่ 4.57 แสดงโครงสร้างและตัวแปรไร้มิติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก



รูปที่ 4.58 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่ขนาดต่างๆ

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 หัวข้อของการวิจัย

ในการวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมและตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งในการศึกษาและวิจัยได้แบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

บทที่ 1 ได้กล่าวถึงความสำคัญและที่มาของการวิจัย รวมถึงการศึกษาค้นคว้าเอกสารและบทความทางวิชาการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ทำให้ทราบถึงแนวโน้มของงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งเป็นที่ของแนวทางและขอบเขตในการทำการวิจัยนี้

บทที่ 2 ได้กล่าวถึงประวัติความเป็นมา พฤติกรรม หลักการทำงาน และชนิดหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก รวมถึงการวิเคราะห์คุณลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ซึ่งแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (การวิเคราะห์ในสามมิติ) และการวิเคราะห์ด้วยวงจรสมมูล (การวิเคราะห์ในหนึ่งมิติ) โดยได้แสดงถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

บทที่ 3 ได้กล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย และขั้นตอนกระบวนการในการทำการวิจัย โดยแบ่งออกเป็น ขั้นตอนการทำการทดลอง และขั้นตอนในการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอนคือ ส่วนของก่อนการประมวลผล (Pre processing) การประมวลผล (processing) และขั้นตอนหลังการประมวลผล (Post processing)

บทที่ 4 ได้กล่าวถึงผลการศึกษา และการวิเคราะห์ทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การสร้างแบบจำลองหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีพื้นที่อิเล็กโทรดแตกต่างกัน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่อิเล็กโทรดกับค่าศักย์ไฟฟ้า 2) เป็นการวิเคราะห์เพื่อออกแบบตำแหน่งอิเล็กโทรด และขนาดพื้นที่อิเล็กโทรดที่ทำให้เกิดการเสด็จปดาวน์เมื่อของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีขนาดคงที่ และ 3) การวิเคราะห์ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกกับศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งต่างๆ บนผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกเพื่อการออกแบบอิเล็กโทรดที่เหมาะสม

5.2 สรุปผล

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก โดยอาศัยการวิเคราะห์ทางฟิสิกส์ในทฤษฎีอิเล็กทริก เพื่อจำลองพฤติกรรมการตอบสนองของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ดังนั้นผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์จึงจำเป็นต้องได้รับการยืนยันความถูกต้องเพื่อที่จะได้นำเอาแบบจำลองและกระบวนการจำลองไปใช้ในการออกแบบต่อไป ในการยืนยันความถูกต้องผลการคำนวณถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลการทดลองที่เงื่อนไขเดียวกัน ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนกันเล็กน้อย อันเนื่องมาจากการที่ไม่ทราบคุณสมบัติของบางอย่างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดลอง เช่น ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d_{15}) จึงต้องประมาณค่าของคุณสมบัตินั้นเพื่อใช้ในการคำนวณของแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ หรือคุณสมบัติที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตอาจมีค่าคลาดเคลื่อนกับคุณสมบัติของชิ้นงานจริง

จากหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่อาศัยคุณสมบัติเด่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกซึ่งสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล และในทางกลับกันก็สามารถแปลงจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยปริมาณของพลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นแปรผันตามขนาดของการสั่นสะเทือน กล่าวคือที่การสั่นสะเทือนมากก็จะทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้าที่มากเช่นกัน ด้วยเหตุนี้ศักย์ไฟฟ้าที่มากกระตุ้นจะต้องมีความถี่ที่ตรงหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก จึงสามารถทำให้หม้อแปลงทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในการศึกษาการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีอิเล็กโทรดที่ต่างกันจึงต้องมีการหาค่าความถี่ธรรมชาติของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกก่อน

5.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น ความเครียด และศักย์ไฟฟ้า

จากที่ได้กล่าวมาแล้วถึงหลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าที่อาศัยหลักการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นกลในรูปของการสั่นสะเทือนและแปลงจากการสั่นสะเทือนเป็นศักย์ไฟฟ้า ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับขนาดของการสั่น ซึ่งการสั่นสะเทือนในของวัสดุทำให้เกิดความเค้น และความเครียด จึงสามารถกล่าวได้ว่าค่าศักย์ไฟฟ้าจึงมีความสัมพันธ์กับความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เมื่อบริเวณที่เกิดความเค้นหรือความเครียดมากค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก็มีแนวโน้มที่มากเช่นเดียวกัน โดยแต่ละโหมดการสั่นลักษณะความเค้นเกิดขึ้นก็จะแตกต่างกันไป ดังนั้นในการออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อให้เกิดการเสด็จปาว์ครอกรูปแบบให้อิเล็กโทรดปฐมภูมิ และ

หูดติดยุอยู่ในตำแหน่งที่มีความเค้นเกิดขึ้นน้อย หรือถ้าต้องการให้เกิดการเสด็จ้อพื่อเล็กโตรดก็ควรอยู่ในตำแหน่งที่มีความเค้นมาก สรุปได้ว่าการออกแบบอเล็กโตรดควรอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ได้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอเล็กทริกแบบเสด็จ้อพ หรือเสด็จ้อปาวน์ รวมถึงทั้งสองแบบในหนึ่งเดียว

5.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่อเล็กโตรดกับศักย์ไฟฟ้า

เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงได้สร้างแบบจำลองไฟไนท์เอลิเมนต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอเล็กทริกที่มีอเล็กโตรดแตกต่างกัน 9 รูปแบบ ดังได้แสดงไปแล้วในรูปที่ 4.8 ทั้ง 9 รูปแบบมีอเล็กโตรดที่ผิวด้านบนซึ่งอเล็กโตรดถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยช่องว่างระหว่างอเล็กโตรดทั้งสอง เพื่อทำหน้าที่เป็นอเล็กโตรดปฐมภูมิ และอเล็กโตรดหูดติดยุ ซึ่งอเล็กโตรดทั้งสองมีพื้นที่ที่ไม่เท่ากัน โดยแสดงในค่าของอัตราส่วนของพื้นที่อเล็กโตรดด้านหูดติดยุต่อพื้นที่อเล็กโตรดด้านปฐมภูมิไว้ในตารางที่ 4.2 และได้แบ่งการกำหนดอเล็กโตรดออกเป็น 2 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอเล็กทริกทั้ง 9 รูปแบบมีค่าที่แตกต่างกัน สำหรับการกำหนดอเล็กโตรดทั้งสองลักษณะ ผลที่ได้มีแนวโน้มที่เดียวกัน คือหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอเล็กทริกที่มีค่าอัตราส่วนพื้นที่อเล็กโตรดหูดติดยุต่อพื้นที่อเล็กโตรดปฐมภูมิมาก จะได้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำ และเมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่อเล็กโตรดมีค่าที่ลดลงส่งผลทำให้ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น การกำหนดอเล็กโตรดนอกจากจะส่งผลต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าแล้วยังมีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอเล็กทริกทำให้ค่าความถี่เรโซแนนซ์ต่ำลงเมื่อค่าอัตราส่วนพื้นที่อเล็กโตรดต่ำลงด้วยเหตุนี้จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วนพื้นที่อเล็กโตรด

$$\text{อัตราส่วนศักย์ไฟฟ้า} \propto \frac{1}{\text{อัตราส่วนพื้นที่อเล็กโตรด}}$$

เมื่อเปรียบเทียบการกำหนดอเล็กโตรดสองลักษณะของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอเล็กทริกที่มีอัตราส่วนพื้นที่อเล็กโตรดเท่ากัน (รูปแบบที่ 4) พบว่าค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าของการกำหนดอเล็กโตรดปฐมภูมิมักจะมีค่าสูงกว่าการกำหนดให้อเล็กโตรดปฐมภูมิมองนอก ทั้งนี้เนื่องมาจากขนาดของการสั้นที่ไม่เท่ากันตามแนวรัศมี รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณรัศมีภายในมีการเปลี่ยนรูปที่มากและลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 5.1 แสดงการเปรียบเทียบผลการศึกษารูปแบบอิเล็กทรอนิกส์โทรคของหม้อแปลงไฟฟ้าเพื่อโซลิตริกแบบต่างๆ

	Fr. (Hz)	Area ratio	Voltage ratio	Type of PT
Case1				
PT1	76500	6.23	2.19	Step up
PT2	76500	2.73	3.13	Step up
PT3	76000	1.57	4.98	Step up
PT4	75500	1	6.56	Step up
PT5	75000	0.65	8.23	Step up
PT6	74500	0.43	10.21	Step up
PT7	74000	0.27	11.91	Step up
PT8	73500	0.15	13.14	Step up
PT9	72500	0.06	13.29	Step up
Case2				
PT1	72000	0.16	6.53	Step up
PT2	72500	0.36	6.33	Step up
PT3	73000	0.63	6.03	Step up
PT4	73000	1	5.38	Step up
PT5	73500	1.52	5.13	Step up
PT6	74000	2.31	4.43	Step up
PT7	75000	3.67	3.36	Step up
PT8	75500	6.4	2.65	Step up
PT9	76000	14.68	1.91	Step up

5.2.3 การออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทรอนิกส์แบบสเต็ปดาวน

5.2.3.1 ลักษณะอิเล็กทรอนิกส์

จากการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่าพื้นที่ของอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อค่าศักย์ไฟฟ้า และจากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าศักย์ไฟฟ้าที่ผิวของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ในแต่ละตำแหน่งมีค่าที่แตกต่างกัน นั่นเพราะการสั้นในแต่ละตำแหน่งมีค่าที่ไม่เท่ากัน ขึ้นกับรูปแบบของการสั้นสะท้อน ในงานวิจัยนี้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ทำงานที่โหมดการสั้นแบบเรเดียล ซึ่งขนาดการสั้นจะสูงบริเวณรัศมีด้านในมีค่าสูง และจะลดลงตามแนวรัศมีที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าจึงมีค่าไม่เท่ากันตามแนวรัศมีและมีแนวโน้มเช่นเดียวกับขนาดสั้น ด้วยเหตุนี้จึงได้ออกแบบอิเล็กทรอนิกส์ที่มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.21 แต่ละรูปแบบประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิ 1 ส่วน และ อิเล็กทรอนิกส์ทุติยภูมิ 3 ส่วน จากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นว่าที่อิเล็กทรอนิกส์ทุติยภูมิแต่ละส่วนมีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน คืออิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ด้านนอกให้ค่าศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่าอิเล็กทรอนิกส์ตรงกลางและด้านในตามลำดับ ซึ่งมีทั้งแบบสเต็ปอัพ และแบบสเต็ปดาวน ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ สามารถออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าให้เหมาะสมตามการใช้งาน และยังสามารถออกแบบอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ค่าศักย์ไฟฟ้าออกมาได้หลายค่า ซึ่งก็เป็นได้ทั้งแบบสเต็ปอัพ และแบบสเต็ปดาวน ทำให้สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลาย

ตารางที่ 5.2 แสดงการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทรอนิกส์ที่มีพื้นที่อิเล็กทรอนิกส์ปฐมภูมิต่างกัน

PT No.	Fr. (Hz)	Input area (mm ²)	Output1		Output2		Output3	
			Voltage ratio	Type	Voltage ratio	Type	Voltage ratio	Type
PT1	77050	5.4977	3.89	Step up	2.13	Step up	1.62	Step up
PT2	77000	4.7123	3.55	Step up	1.96	Step up	1.55	Step up
PT3	77100	3.9269	3.04	Step up	1.7	Step up	1.44	Step up
PT4	77150	3.1415	2.44	Step up	1.38	Step up	1.12	Step up
PT5	77250	2.3561	1.88	Step up	1.09	Step up	0.88	Step down
PT6	77300	1.5707	1.27	Step up	0.74	Step down	0.6	Step down
PT7	77300	0.7853	0.73	Step down	0.43	Step down	0.33	Step down

5.2.3.2 ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

นอกจากพื้นที่อิเล็กโทรดจะมีผลต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าแล้ว ขนาดของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกก็มีผลต่อค่าอัตราส่วนศักย์ไฟฟ้าด้วย และจากการวิเคราะห์แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า เมื่อรัศมีภายนอกของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่เพิ่มขึ้น ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวรัศมีมีค่าที่เปลี่ยนไป โดยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อตามแนวรัศมีที่เพิ่มมากขึ้น และมีบริเวณที่เกิดการเสด็จปดาวน์เพิ่มมากขึ้นดังได้สรุปในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกที่มีขนาดต่างกัน

PT No.	Outer diameter (mm)	Fr.(Hz)		Step-up area (%)		Step-down area (%)	
		case1	case2	case1	case2	case1	case2
PT1	20	76150	77000	100	100	0	0
PT2	23	71000	71500	83.33	84	16.67	16
PT3	26	66500	67000	71.43	77.42	28.57	22.58
PT4	30	61000	62000	63.16	42.11	36.84	57.89
PT5	34	57000	575000	47.83	37.5	52.17	62.5

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาและการวิเคราะห์ผลในงานวิจัยนี้ ตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกนอกเหนือจากขนาดและลักษณะอิเล็กโทรดแล้ว ยังมีตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

5.3.1 คุณสมบัติของวัสดุ

- ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant)

สำหรับการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเซ็นเซอร์ (Sensor) และแอคทูเอเตอร์ (Actuator) คุณสมบัติที่ต้องคำนึงถึงคือค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric strain coefficient, d_{ij}) และค่าสัมประสิทธิ์ศักย์ไฟฟ้า (Piezoelectric voltage coefficient, g_{ij}) วัสดุที่มีค่าคงที่สัมประสิทธิ์ความเครียดเพียโซอิเล็กทริก (d) สูงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นตัวทำงาน วัสดุที่มีค่าคงที่ค่าสัมประสิทธิ์ศักย์ไฟฟ้า (g) สูงเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเซ็นเซอร์ เพราะสามารถแปลงความเค้นที่ได้รับเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ดี สำหรับการประยุกต์ใช้เป็นทรานส์ดิวเซอร์วัสดุควรมีค่าคงที่ค่าสัมประสิทธิ์ศักย์ไฟฟ้า และค่าคงที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดเพียโซอิเล็กทริกที่สูง และการประยุกต์ใช้เป็นหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสต็ปอัพวัสดุควรมีค่าสัมประสิทธิ์ความเครียด (d) และค่าสัมประสิทธิ์ศักย์ไฟฟ้า (g) สูง และสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสต็ปดาวน์วัสดุควรมีค่าสัมประสิทธิ์ความเครียด (d) และค่าสัมประสิทธิ์ศักย์ไฟฟ้า (g) ต่ำ ดังนั้นในการออกแบบควรเลือกวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

- ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์ (Electromechanical coupling factor, k)

ค่าคัปปลิงแฟกเตอร์บ่งบอกถึงความสามารถในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือในทางกลับกัน วัสดุที่มีค่าคัปปลิงแฟกเตอร์สูงจะสามารถแปลงจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือในทางกลับกันได้ดี โดยขนาดของค่าคัปปลิงแฟกเตอร์จะขึ้นกับรูปทรงและโหมดการสั่นของวัสดุนั้น (ตารางที่ 2.1) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกควรมีค่าคัปปลิงแฟกเตอร์สูงจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกสูง

- ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric constant, K)

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบอุปกรณ์เพียโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับ การประยุกต์ใช้งาน โดยที่วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำจะทำให้ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกมีค่าสูง ส่วนวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจะทำให้ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกมีค่าต่ำดังแสดงในสมการที่ (5.1) และ (5.2) สำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสต็ปอัพวัสดุควรมีค่าคงที่ไดอิเล็ก

เล็กทรอนิกส์ และสำหรับหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกแบบเสถียรควรมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกต่ำ

$$g_{ij} = d_{ij} / \epsilon \quad (5.1)$$

$$\epsilon = K\epsilon_0 \quad (5.2)$$

5.3.2 โหมดการสั่น และความถี่ในการทำงาน

ในการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกนั้น ศักย์ไฟฟ้าที่กระตุ้นต่อหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกควรมีความถี่ที่มีค่าตรงหรือใกล้เคียงกับค่าความถี่เรโซแนนซ์ เพราะจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนของวัสดุสูง และสามารถแปลงเป็นพลังงานได้ดีที่สุด ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกมีค่าต่ำสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกขึ้นอยู่กับขนาด รูปทรง และโหมดการสั่นของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก

5.3.3 ค่าภาระด้านทุดติยภูมิ (Load Resistance)

ค่าภาระด้านทุดติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกจะต้องมีค่าที่เหมาะสมกับความสามารถของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก นั่นคือจะต้องมีค่าสอดคล้องกับค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริก ที่สภาวะนี้หม้อแปลงไฟฟ้าเพียโซอิเล็กทริกจะมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (5.3)

$$R_{\text{optimum}} = \frac{1}{\omega C_{d2}} \quad (5.3)$$

เมื่อ ω คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (rad/sec)

C_{d2} คือ ค่าความจุไฟฟ้าด้านทุดติยภูมิ (F)

เอกสารอ้างอิง

- A. M. Sanchez, M. Sanz, R. Prieto, J. A. Olicer and J. A. Cobos, 2003, "Mixed analytical and numerical design method for piezoelectric transformer", IEEE, pp. 841-846.
- A. M. Sanchez, R. Prieto, M. Sanz, J. A. Oliver and J. A. Cobos, 2005, "Modeling and design of piezoelectric transformer for low power applications", IEEE, pp. 15-20.
- Burhanettin Koc, Sedat Alkoy and Kenji Uchino, 1999, "A circular piezoelectric transformer with crescent shape input electrodes", IEEE Ultrasonics symposium, pp. 931-934.
- Chen-Yao Liu, Yuan-Chen Chien and Kuo-Bin Liu, 2006, "Design and modeling of the step down piezo transformer", EPAC, pp. 2691-2693.
- C. A. Rosen, 1956, "Ceramic transformer and filter", Electronic Comp. Symp. Proc., pp. 205-211.
- Eric M. Baker, Weixing Huang and Dan Y. Chen, 2005, Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent lamp ballast applications", IEEE transactions on Power electronics, Vol. 20, pp.1213-1220.
- F. Boukazouha and F. Boubenider, 2008, "Piezoelectric transformer: Comparison between a model and an analytical verification", Computer and Structures, pp. 374-378.
- Feilong Feng, Jianzhong Shen and Jingjun Deng, "A 2D equivalent circuit of piezoelectric ceramic ring for transducer design", 2006, Ultrasonics 44, pp. 723-726.
- Hing Leung Li, Jin Hui Hu and Helen Lai Wah Chan, 2002, "finite element analysis on piezoelectric ring transformer", IEEE ultrasonic symposium, pp.1177-1180.
- Hyun-Woo Joo, Chang-Hwan Lee and Hyun-Kyo Jung, 2001, Analysis of piezoelectric transformer by using finite element method and equivalent-circuit considering load variation", IEEE Ultrasonics symposium, pp. 459-462.
- Hyun-Woo Joo, Chang-Hwan Lee, Jomg-Seok Rho and Hyun-Kyi Jung, 2003, "Identification of material constants for piezoelectric transformers by Three-dimensional, finite-Element method and design-sensitivity method", IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol. 50, pp. 965-971.
- Jinlong Du, Junhui Hu and King jet Tseng, 2004, "A platw-shape high power-density piezoelectric transformer with dual outputs", Ceramics interational 30, pp. 1797-1801.

- Jun Hui Hu, Hing Leung Li, Helen Lai, Wah Chan and Chung Loong Choy, 2001, "A ring-shape piezoelectric transformer operating in the third symmetric extensional vibration mode, *Sensor and Actuator*, pp. 79-86.
- Jung-Moo Seo, Hyun-Woo Joo and Hyun-Kyo Jung, 2005, "Optimal design of piezoelectric transformer for high efficiency and high power density", *Sensor and Actuators*, pp. 520-526.
- Jinlong Du, Junhui Hu and King Jet Tseng, 2004, "Modeling of the dual-output piezoelectric transformer operating at thickness shear vibration mode", *IEEE International ultrasonics, ferroelectric and frequency control*, pp. 225-228.
- Jinlong Du, Junhui Hu and King Jet Tseng, 2004, "High-power, multioutput piezoelectric transformer operating at the thickness-shear vibration mode", *IEEE transactions on Ultrasonics, ferroelectric and frequency control*, Vol. 51, pp. 502-509.
- K. Sakurai, S. Dhindou and Y. Tomikawa, 1998, "Piezoelectric ceramic transformer using radial vibration mode disks", *IEEE Ultrasonics symposium*, pp. 939-944.
- Kuo-Tsai Chang, Hsuang-Chang Chiang and Kua-Sheng Lyu, 2008, "Effects of electrode layouts in voltage gain characteristics for ring-shaped piezoelectric transformer", *Sensor and Actuator*, pp. 166-172.
- M. Sanz, P. Alou, A. Soto, R. Prieto, J.A. Cobos and J.Uceda, 2003, "Magnetic-less converter based on piezoelectric transformers for step-down DC/DC and low power application", *IEEE*, pp. 615-621.
- Micheal Morris, Orla Slattery, Gerald Duffy, Paddy Byrne and Andrew Connell, 2005, "Simulation piezoelectric transformer for lighting applications", *Thermal mechanical and multiphysics simulation and experiments in micro-electronics and micro system*, pp. 346-352.
- M. J. Prieto, J. Diaz, J. A. Martin and F. Nuno, 2001, "A very simple DC/DC converter using piezoelectric transformer", *IEEE*, pp. 1755-1760.
- Myounghwan Ryu, Sungjin Choi, Sangmin Lee and Bo H. Cho, 2006, "A new piezoelectric transformer drive topology for universal input AC/DC adapter using a constant frequency PWM control", *IEEE*, pp. 1314-1317.

- M. Yamamoto, Y. Sasaki, T. Inoue, A. Ochi and S. Hmamura, 2002, "Piezoelectric transformer for 30W output AC-DC converter", IEEE, pp. 347-350.
- Pitak Laoratanakul and Kenji Uchino, 2004, "Designing a radial mode laminated piezoelectric transformer for high power applications", IEEE Ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, pp. 229-232.
- Pitak Laoratanakul, 2002, "Design and characterization of piezoelectric transformer for high power application", Thesis The Pennsylvania State University.
- Peter Pulpan and Jiri Erhart, 2007, "Transformer ratio of ring-dot planar piezoelectric transformer", Sensor and Actuators, pp. 215-224.
- Reinhard Lerch, 1990, "Simulation of piezoelectric devices by two and three dimensional finite element", Ultrasonics ferroelectrics and frequency control, Vol. 37, pp.233-247.
- Ray-Lee Lin, Hsu-Ming Shih, Chen-Yao Liu and Kuo-Bin Liu, 2006, "Piezoelectric transformer based continuous-conduction-mode voltage source charge-pump power factor correction electronic ballast", EPAC, pp. 2694-2696.
- Robert D. Blevins, 1979, "Formulas for natural frequency and mode shape", Van nostrand reinhold company Inc., Canada.
- Suwan Manuspiya, Pitak Laoratanakul and Kenji Uchino, 2003, "Integration of a piezoelectric transformer and an ultrasonic motor", Ultrasonics, pp. 83-87.
- S. Hirose, N.Takita and S.Takahashi, 1998, "New design method of piezoelectric transformer considering high-power characteristics of various composition ceramics", IEEE ultrasonics symposium, pp. 953-958.
- S. Kawashima, O. Ohnishi, H. Hakamata, S. Tagami, A. Fukuoka, T. Inoue and S. Hirose, 1994, "Third order longitudinal mode piezoelectric ceramic transformer and its application to high-voltage power inverter", Ultrasonics symposium, pp.525-530.
- Taunaumang H. and Guy I.L, 1994, "Electromechanical properties of 1-3 piezoelectric ceramic/piezoelectric polymer composites, J.Appl. Phys., Vol. 76, pp.484-489.
- Taeil Kim, Sungjin Choi, Sangmin Lee and B. H. Cho, 2005, "New piezoelectric transformer adapter with universal input voltage range", IEEE PEDS, pp. 1223-1227.

- Takao Tsuchiya, Yukio Kagawa, Naoto Wakatsuki and Hiroki Okamura, 2001, "Finite element simulation of piezoelectric transformers", IEEE transaction on Ultrasonics, ferroelectrics and frequency control, Vol. 48, pp. 872-878.
- T. Zaitso, O. Ohnishi, T. Inoue, M. Shoyama, T. Ninomiya, F.C. Lee and G.C. Hua, 1994, "Piezoelectric transformer operating in thickness extensional vibration and its application to switching converter", IEEE, pp. 585-589.
- Torsten Bove, Wanda Wolny, Erling Ringgaard and Klaus Breboel, 2001, "New type of piezoelectric transformer with very high power density", IEEE, pp. 321-324.
- T. Hemsel and S. Priya, 2006, "Model based analysis of piezoelectric transformer", Ultrasonics, pp. 741-745
- W. Pajewski, P. Kielezynski and M. Szalewski, 1998, "Resonant piezoelectric ring transformer", IEEE Ultrasonics symposium, pp. 977-980.
- Y. Jin, C.F.Foo and W.G. Zhu, 1999, "Three dimensional simulation of piezoelectric transformer for the switching power supply", IEEE, pp. 295-299
- Y. C. Wang, J. J. He, Y. P. Liu, Jeremy Wu, C. K. Lee, Y.T. Haung and C. K. Lee, 2005, "Theory and experiment of high voltage step-up ratio disk type piezoelectric transformer for LCD-TV", IEEE international conference on Mechatronics, pp. 284-287.
- Zupei Yang, Lili Yang, Xiaolian Chao, Rui Zhang and Yaoqiang Chen, 2006, "Electrical characteristics of central driving type piezoelectric transformer with different electrode distributing", Sensor and actuators.

ภาคผนวก

The 2nd Regional Conference on Artificial Life and Robotics
14 – 15 July, 2006, Songkhla, Thailand

Natural Frequencies and Vibration Mode Shapes of Piezoelectric Elements in Piezoelectric Transformers

Treesoon Kotchaplayuk, Pruittikorn Smithmaitrie
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University,
Hat Yai, Songkhla 90112
E-mail: s4812021@psu.ac.th

Abstract

This paper presents an investigation of natural frequencies and vibration mode shapes of piezoelectric elements in the radial vibration mode piezoelectric transformer by using finite element method. In the case study, a ring-shape and disk-shape piezoelectric elements were studied.

Keywords: Piezoelectric transformer, Natural frequency, Radial vibration mode, Vibration mode shape

1. Introduction

Miniaturizing the switching power supply system has been an important issue in recent years. Since the electromagnetic transformer is one of the largest components in the power supply system, its volume should be reduced to achieve a compact size for the whole system. A piezoelectric transformer (PT) is one of the components to fulfill this requirement. Instead of coupling the magnetic field that occurs between the primary and secondary windings in a conventional magnetic core transformer, the piezoelectric element couples the electro-mechanical effect to transform the input voltage to the output voltage. Usually, there are two type of piezoelectric transformer base on the vibration mode. One is the transverse mode piezoelectric element (the direction of the vibration is parallel to the polarization direction) and another one is the radial mode piezoelectric element (the direction of vibration is perpendicular to the polarization direction).

The objective of this research is to investigate natural frequencies and mode shapes for radial mode piezoelectric transformer. The analysis of natural frequency is based on the three-dimensional (3D) finite element model [1-5].

2. Piezoelectric Transformer

The concept of piezoelectric transformer was first proposed by Rosen in 1957. There have been many piezoelectric investigations. Most of them are used for the high voltage transformer [6-7]. A few works have been done on the switch power supply application [8-9].

The piezoelectric transformer is the coupling of structural and electrical fields, which is a natural property of materials such as quartz and ceramics. Applying a voltage to a piezoelectric material creates a displacement, and vibrating a piezoelectric material generates a voltage. It has many advantages over the conventional electromagnetic transformer such as compact size, simple structure, no windings, and no electromagnetic noise.

The electro-mechanical constitutive equations for linear material behavior are [2],

$$\{T\} = [c]\{s\} - [e]\{E\} \quad (1)$$

$$\{D\} = [e]^T \{s\} + [\varepsilon]\{E\} \quad (2)$$

where

$\{T\}$ = stress vector

$\{D\}$ = electric flux density vector

$\{s\}$ = strain vector

$\{E\}$ = electric field vector

$[c]$ = elasticity matrix (evaluated at constant electrical field)

$[e]$ = piezoelectric stress matrix

$[\varepsilon]$ = dielectric matrix (evaluated at constant mechanical strain)

The piezoelectric transformer is an electro-mechanical device that transfers the electrical energy through the mechanical vibration by means of the special properties of piezoelectric materials. Applying an electric input near the natural frequency causes mechanical vibration due to the converse piezoelectric effect, and then the vibration is transmitted to be the electrical output which produced due to the direct piezoelectric effect.

The natural frequencies of circular and annular plates [10] are given in equation (3):

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[\frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$; i = 0, 1, 2, \dots; j = 0, 1, 2, \dots$$

where a is the radius of circular plate or outside radius of annular plate; b is the inside radius of annular plate; h is the thickness of plate; E is the modulus of elasticity; γ is the mass per unit area of plate; ν is Poisson's ratio; λ is the dimensionless parameter.

The dimensionless parameter λ is generally a function of the boundary condition on the plate, the plate geometry and Poisson's ratio as:

$\lambda = f(\text{boundary condition, geometry, Poisson's ratio})$

The dimensionless parameter λ is determined by setting the determinant of the characteristic matrix to zero to impose the desired boundary condition on general solution.

3. Simulation of Piezoelectric Transformer

The analytical methods were introduced mostly based on equivalent circuits [11-12]. The equivalent circuits are derived from one-dimensional (1D) models. However, for piezoelectric transformer used in switching power supply, the piezoelectric deformation in three dimensions (3D). Therefore, the other two dimensions should not be neglected.

A radial vibration mode piezoelectric element is chosen as the case study. In this research, the Lead Zirconate Titanate Type-4 (PZT-4) is selected as the element material; the properties are shown in Table 1. There are two shapes of piezoelectric element, i.e., a disk shape [6] and ring shape [5,13]. The dimensions of each of piezoelectric element are illustrated below, The disk shape: $a = 25$ mm, $h = 2.5$ mm

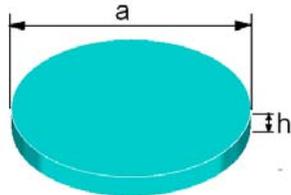


Figure 1. The disk-shape piezoelectric element.

The ring shape piezoelectric element dimension: $a = 25$ mm, $b = 15$ mm, $h = 2.5$ mm.

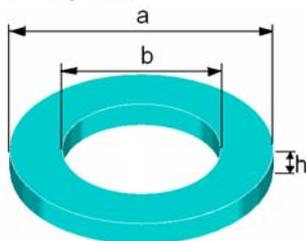


Figure 2. The ring-shape piezoelectric element.

In the simulation, the modal analysis was used for investigating the natural frequencies and vibration mode shapes at operating frequency range of 10,000-100,000 Hz and expanded up to 20 modes.

Table 1 The PZT-4 material properties [14].

Dielectric constant, $\epsilon \times 10^{-9}$ (F/m)
$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \epsilon_{33} = 7.124$
Piezoelectric constant, e (C/m ²)
$e_{13} = e_{23} = -4.1, e_{33} = 14.1, e_{32} = e_{61} = 10.5$
Stiffness constant, $c \times 10^{10}$ N/m ²
$c_{11} = c_{22} = 13.2, c_{12} = 7.1, c_{13} = c_{23} = 7.3$
$c_{33} = 11.5, c_{44} = 3.0, c_{55} = c_{66} = 2.6$

3. Finite Element Results

Based on the finite element results of the piezoelectric ring element, there are two type of vibration modes, i.e., transverse modes and radial modes. Each one has its own natural frequency. Figure 3 shows the first to the fifth radial vibration modes. Figure 4 shows the first to the sixth transverse vibration modes

The maximum deformation in the radial direction is the 3rd radial vibration mode shape (mode number 16) as shown in Figure 5. The natural frequency is 73959 Hz (Figure 6).

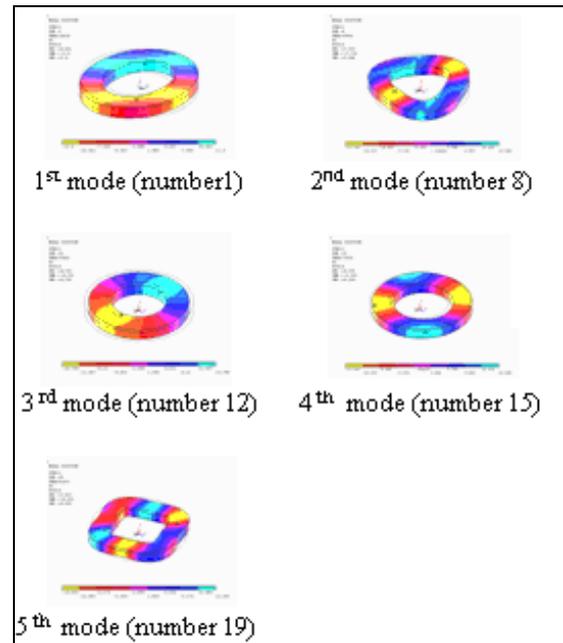


Figure 3. The radial vibration modes of the piezoelectric ring element.

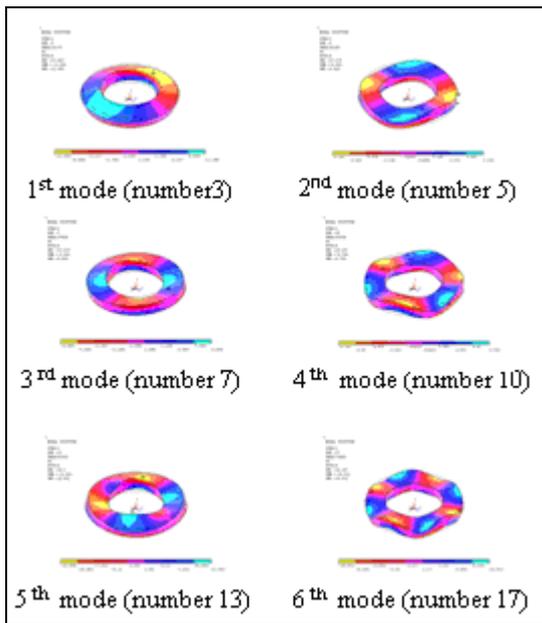


Figure 4. The transverse vibration modes of the piezoelectric ring element.

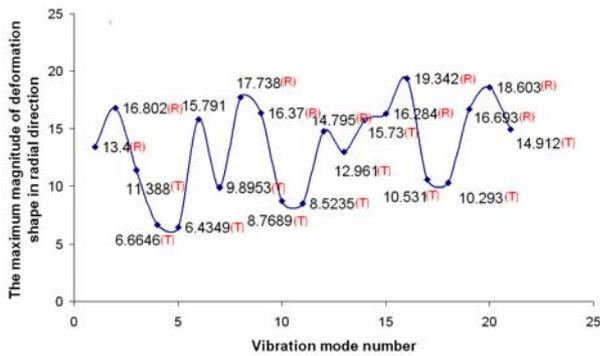


Figure 5. The maximum magnitude of deformation in the radial direction of the piezoelectric ring element.

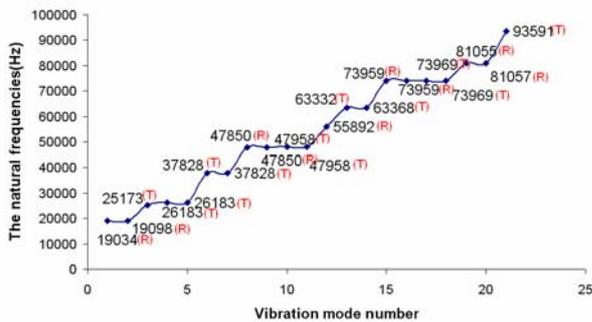


Figure 6. The mode number and natural frequency of the piezoelectric ring element.

For the disk shape piezoelectric element within the same frequency range, there are three mode shapes of radial vibration mode are show in figure 7 and eight mode shapes of transverse vibration are show in figure 8.

As shown in Figure 9, the 2nd radial mode has maximum deformation shape in the radial direction (mode number 13). The natural frequency of the 2nd radial mode is 72520 Hz as illustrated in Figure 10.

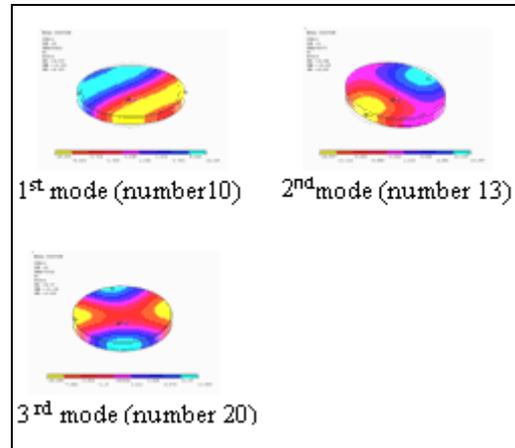


Figure 7. The radial vibration modes of the piezoelectric disk element.

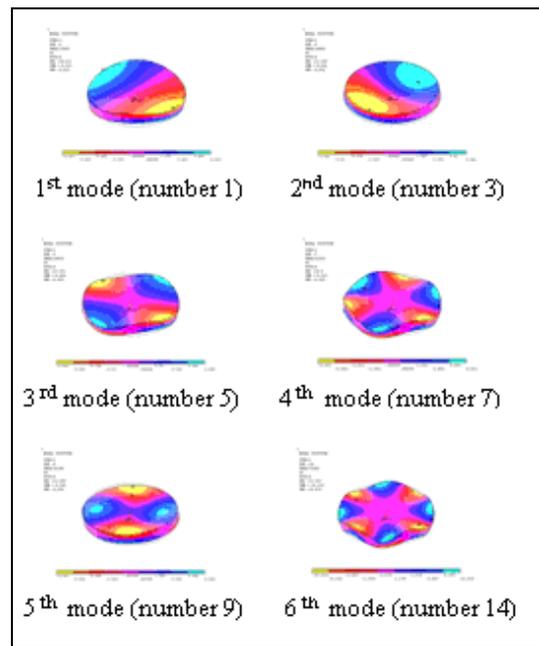


Figure 8 The transverse vibration modes of the piezoelectric disk element.

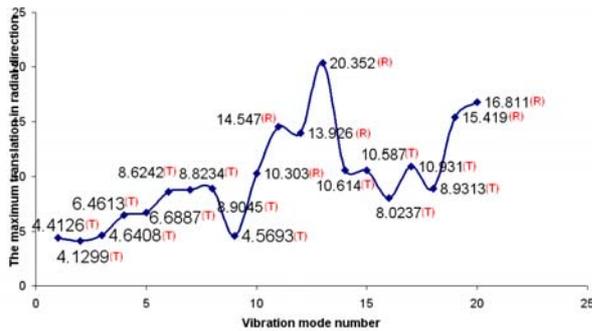


Figure 9. The maximum magnitude of deformation in the radial displacement of the piezoelectric disk element.

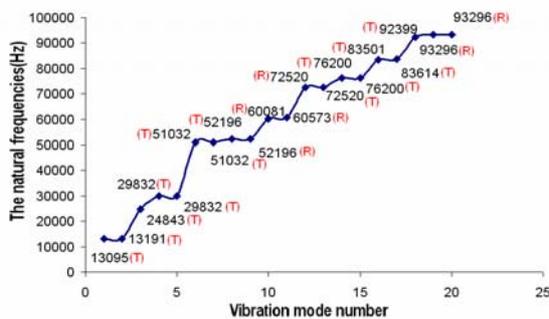


Figure 10. The mode number and natural frequency of the piezoelectric disk element.

4. Conclusion

For the radial mode piezoelectric element, its vibration mode shape should have the most deformation displacement in the radial direction.

The radial vibration mode number 16 of the ring element at the natural frequency of 73959 Hz has the maximum radial deformation displacement. For the disk element, the radial vibration mode number 13 at the natural frequency of 72520 Hz has the maximum radial deformation displacement.

The piezoelectric transformer is an electro-mechanical device that transfers the electrical energy through mechanical vibration and then transfers the vibration to the voltage output. Therefore, the output voltage is changed through the magnitude of vibration. The high vibration amplitude offers high output voltage. Hence, the frequency of the input voltage should be applied near the natural frequency. The coupling of the deformation displacement and the electrical field when applying the input voltage closed to the natural frequency of each mode shape has an effect on the vibration amplitude and output voltage.

5. References

- [1] Takao Tsuchiya, Yukio Kagawa, "Finite Element Simulation of Piezoelectric Transformers", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol.48, No.4, 2001, pp. 872-878
- [2] Y. Jin, C.F. Foo and W.G. Zhu, "Three Dimensional Simulation of Piezoelectric Transformer for the Switching Power Supply", The 25th Annual Conference of the IEEE (Industrial Electronics Conference), 29 Nov.-3 Dec.1999, Vol.1, pp. 295-299.
- [3] Hing Leung Li, Jun Hui Hu and Helen Lai Wah Chan, "Finite Element Analysis on Piezoelectric Ring Transformer", Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2004, Vol.51, pp. 1247-1254.
- [4] Hyun-Woo Joo, Chang Hwan Lee, Jong-Seok Rho and Hyun Kyo Jung, "Identification of Material Constants for Piezoelectric Transformer by Three-Dimensional, Finite element Method and Design-Sensitivity Method", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.50, No. 8, 2003, pp. 965-971.
- [5] Hing Leung Li, Jun Hui Hu, "Finite Element Analysis on Piezoelectric Ring Transformer", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.51, No. 10, 2004, pp. 1247-1254.
- [6] K.Sakurai, S. Shindou, K. Ohnishi and Y. Tomikawa, "Piezoelectric Ceramic Tranformer Using Radial Vibration Mode Disks", IEEE Ultrasonics Symposium, 1998, Vol.1, pp. 939-944.
- [7] S. Hirose and H. Shimizu, "An Advance Design of Piezoelectric Ceramic Transformer for High Voltage Source", IEEE Ultrasonics Symposium, 1989, pp. 471-475.
- [8] T. Zaitzu, O. Ohnishi, T. Inoue, M.Shoyama, T.Ninimiya, F.C.Lee and G.C.Hua, "Piezoelectric Transformer Operating in Thickness Extensional Vibration and Its Application to Switching Converter", IEEE PESC Record, 1994, pp. 585-589.
- [9] M. Sanz, P. Alou, A. Soto, R. Prieto, J.A. Cobos and J. Uceda, "Magnetic Less Converter Based on Piezoelectric Transformers for Step-Down DC-DC Converter and Low Power Applications", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 9-13 Feb. 2003, Vol.2, pp. 615-621.
- [10] Robert D. Blevins, Formula for Natural Frequency and Mode Shape, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1979, pp. 239-252.
- [11] S. Hirose, N. Takita and S. Takahashi, "New Design Method of Piezoelectric Transformer Considering High-Power Characteristics of Various Composition Ceramics", IEEE Ultrasonics Symposium, 1998, pp.953-958.
- [12] Torsten Bove, Wanda Wolny, Erling Ringgard, Klaus Breboel, "New Type of Piezoelectric Transformer with Very High Power Density", IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, 2000, pp. 321-324.
- [13] ANSYS Inc., "ANSYS, Verification Manual 175, Release 8.1".

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายตรีสุต คชพลายุกต์
 รหัสประจำตัวนักศึกษา 4812021
 วุฒิกการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2548

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนยกเว้นค่าเล่าเรียนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีการศึกษา
 2/2548 1/2549 และ 2/2549

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Treesoon Kotchaplayuk and Pruittikorn Smithmaitrie, 2006, "Natural Frequencies and
 Vibration Mode Shapes of Piezoelectric Elements in Piezoelectric Transformers",
 The 2nd Regional Conference on Artificial Life and Robotics, 14 – 15 July, 2006,
 Songkhla, Thailand