



รหัสโครงการ SUT 7 708-54-12-58

รายงานวิจัย

บัลลาสต์ไพเอโซและการควบคุมแสงสว่างในงานอุตสาหกรรม (Piezoelectric Ballast and Lighting Control in Industry)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รายงานวิจัย

เรื่อง

บัลลาสต์ไพเอโซและการควบคุมแสงสว่างในงานอุตสาหกรรม
(Piezoelectric Ballast and Lighting Control in Industry)

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศรีหล่มสัก

นักวิจัยร่วม

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัดชัย กุลวรรณิขพงษ์

ดร.พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล

ทุนสนับสนุนการวิจัยปี 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

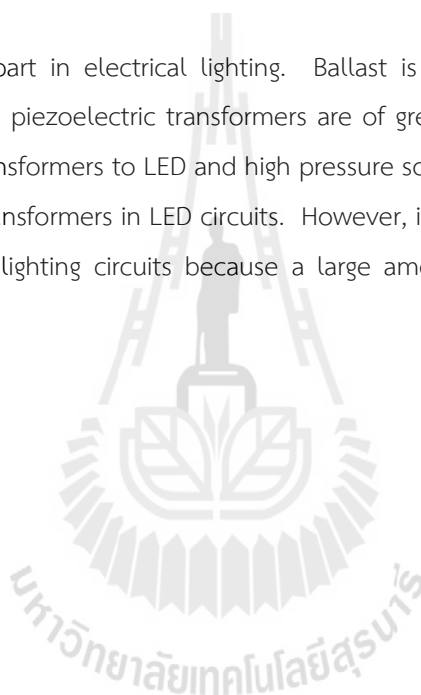
บทคัดย่อ

Abstract

บัลลาสต์ไพโซและ การควบคุมแสงสว่างในงานอุตสาหกรรม
(Piezoelectric Ballast and Lighting Control in Industry)

บัลลาสต์ (ballast) เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในวงจรไฟฟ้าจุดหลอดไฟฟ้า บัลลาสต์มักจะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้าด้วย บางครั้งจึงเรียกบัลลาสต์ว่าหม้อแปลง (transformer) หม้อแปลงมีหลายชนิดชนิดที่กำลังอยู่ในความสนใจสูงขึ้นมาคือหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริก งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการนำหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกไปใช้ในวงจรไฟฟ้าของหลอด LED และหลอดโซเดียมความดันสูง ผลการศึกษาปรากฏว่าสามารถนำหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกไปใช้ในวงจรหลอด LED ได้ แต่ไม่สามารถนำหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกไปใช้ในวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงได้เพราะเกิดความร้อนสูงสะสมบนตัวหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริก

Ballast is an important part in electrical lighting. Ballast is a voltage transformer. There are several types of transformers and piezoelectric transformers are of great interest. This research studied an application of piezoelectric transformers to LED and high pressure sodium lighting. Results show that it is possible to use piezoelectric transformers in LED circuits. However, it was not possible to use this type transformer in sodium electrical lighting circuits because a large amount of heat accumulated in the transformer.



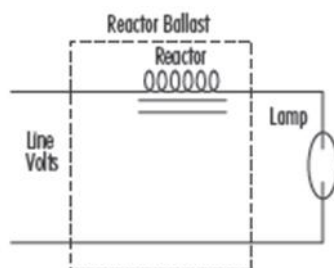
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	1
สารบัญ.....	2
บทที่	
1. บทนำ.....	3
1.1. หม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริก (Piezoelectric transformers).....	5
1.2. หลอดโซเดียมความดันสูง.....	9
1.3. หลอด LED.....	9
1.4. Lead Zirconate Titanate.....	10
2. วิธีการทดลอง.....	17
2.1. การนำไพเอโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอด LED.....	17
2.2. การนำไพเอโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง.....	31
3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	34
3.1. การนำไพเอโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอด LED.....	34
3.2. การนำไพเอโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง.....	41
4. การสรุปผลการทดลอง.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	49
กิตติกรรมประกาศ.....	51

บทที่ 1 บทนำ

บัลลาสต์ (ballast) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญต่อการทำงานของวงจรจุดหลอดไฟฟ้ายางแสดงในรูปที่ 1.1 ซึ่งใช้งานกันในอาคารสำนักงาน ตลอดจนที่พักอาศัยอย่างแพร่หลาย เพื่อให้การทำงานของหลอดมีเสถียรภาพหลอดประจุก๊าซจะทำงานร่วมกับบัลลาสต์หรือตัวรักษาเสถียรภาพ หน้าที่หลักของบัลลาสต์ คือ ช่วยจำกัดกระแสที่ไหลผ่านหลอดให้มีค่าเท่ากับค่าพิกัดบัลลาสต์ที่ใช้ควรจะมีประสิทธิภาพที่ดี การสูญเสียต่ำ ไม่มีผลต่ออายุการใช้งานของหลอด และช่วยรักษาเสถียรภาพในการทำงานของหลอดโดยเฉพาะในช่วงแรงดันเกิดเปลี่ยนแปลงประมาณ $\pm 10\%$ จากพิกัด บัลลาสต์มีหลายชนิด จำแนกได้ดังนี้

- **บัลลาสต์ชนิดตัวต้านทาน (resistor ballast)** ใช้ตัวต้านทานสำหรับจำกัดกระแส เป็นบัลลาสต์ที่มีประสิทธิภาพต่ำ เกิดการสูญเสียในรูปความร้อนสูง
- **โซ้กหรือบัลลาสต์ชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ (choke หรือ inductor ballast)** เป็นบัลลาสต์ที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย กำลังงานสูญเสียในขดลวดมีค่าต่ำกว่าแบบความต้านทาน อย่างไรก็ตามกำลังสูญเสียประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของทั้งวงจรเกิดขึ้นที่บัลลาสต์นี้
- **บัลลาสต์ชนิดตัวเก็บประจุ (capacitor ballast)** ตัวเก็บประจุไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ทำบัลลาสต์ที่แหล่งจ่ายไฟ 50 Hz เนื่องจากผลของการคายประจุทำให้เกิดกระแสกระชากในช่วงเวลาสั้น ๆ ทำให้เกิดการกระพริบของหลอดสำหรับกรณีที่หลอดทำงานที่ความถี่สูง กระแสจะเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ตัวเก็บประจุอาจจะถูกนำมาใช้งานได้
- **บัลลาสต์ชนิดโซ้กต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ (series choke-capacitor ballast)** ถึงแม้ว่าตัวเก็บประจุไม่สามารถจะนำมาใช้เป็นบัลลาสต์ได้ที่แหล่งจ่ายไฟความถี่ 50 Hz แต่วงจรอนุกรมของตัวเก็บประจุและโซ้ก โดยที่ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุมีค่าประมาณ 2 เทาของค่ารีแอคแตนซ์ของโซ้กจะทำให้รูปคลื่นแรงดันเป็นที่น่าพอใจ และช่วยเพิ่มอายุการทำงานให้กับหลอดไฟฟ้ายางด้วย อย่างไรก็ตามผลจากการใช้บัลลาสต์แบบนี้จะทำให้ตัวประกอบกำลังของวงจรจะมีค่าประมาณ 0.7 นำหน้า
- **บัลลาสต์ชนิดหม้อแปลง (transformer ballast)** โดยปกติแรงดัน (220 โวลต์) ไม่เพียงพอที่จะใช้ในการจุดหลอดหม้อแปลงสามารถนำมาใช้แปลงแรงดันที่จ่ายให้กับหลอดให้มีค่าสูงขึ้นถึงค่าที่เหมาะสม นอกจากนี้ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (leakage-reactance) ของหม้อแปลงยังทำหน้าที่เหมือนโซ้กบัลลาสต์อีกด้วย บางครั้งอาจจะเรียกบัลลาสต์นี้ว่า (leakage-reactance transformer ballast)

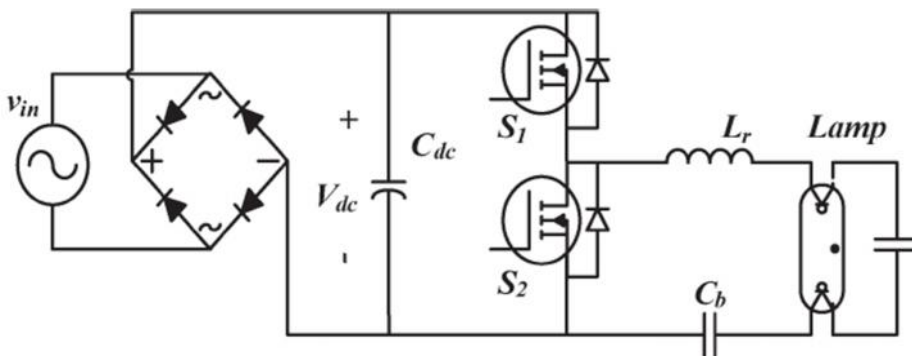


รูปที่ 1.1 วงจรบัลลาสต์ชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ

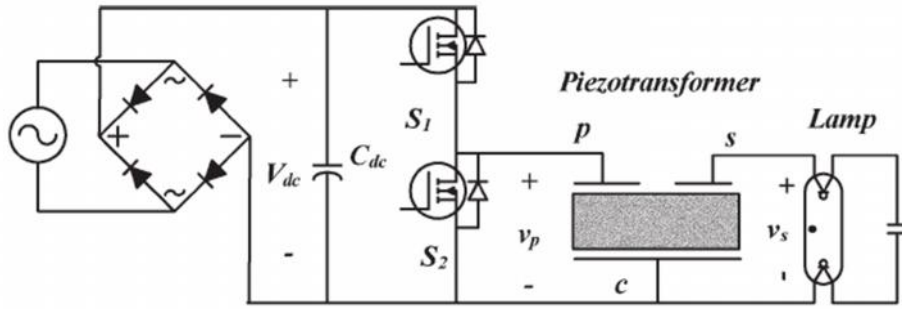
วัสดุที่มีสมบัติแม่เหล็ก เช่น หม้อแปลง หรือ โฉก เมื่อทำงานโดยใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะทำให้เกิดคลื่นรบกวน (noise) อาจจะทำให้เกิดเสียงฮัม (hum) อันเนื่องมาจากการทำงานของหลอดไฟฟ้าสำหรับมาตรฐานอังกฤษ (BS2818) กำหนดไว้ว่าการใช้งานบัลลาสต์ชนิดขดลวดจะต้องให้เสียงรบกวนไม่เกิน 30 dB นอกจากนี้ หลอดไฟฟ้าอาจใช้ องค์ประกอบของบัลลาสต์ที่แตกต่างออกไป เช่น ใช้โครงสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เรียกว่า บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (electronic ballast) ดังรูปที่ 1.2 ซึ่งใช้อุปกรณ์โซลิดสเตต (solid-state devices) เพื่อประกอบเป็นวงจรสำหรับจ่ายไฟให้กับ หลอดไฟฟ้า การจ่ายไฟถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ทั้งในขณะจุดหลอดและขณะทำงานในสภาวะคงตัว ความถี่ในการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์จะมีความถี่สูงกว่าความถี่กำลัง อาจจะสูงกว่า 20 kHz ประสิทธิภาพในการทำงานที่ความถี่ประมาณ 10 kHz มีความถี่สูงกว่าประสิทธิภาพการทำงานที่ความถี่ 50 Hz ปกติประมาณ 9% นอกจากนี้ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา และมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าบัลลาสต์แบบแกนเหล็ก การทำงานที่ความถี่สูงของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีข้อดีที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ สามารถนำตัวเก็บประจุมาใช้เป็นคาร์เรอแคแทนซ์เพื่อจำกัดกระแสในวงจรได้ การสูญเสียของตัวเก็บประจุมีค่าน้อยกว่าขดลวดเหนี่ยวนำมากเมื่อพิจารณาที่สภาวะการทำงานเดียวกัน โครงสร้างการทำงานของบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบด้วยวงจรคอนเวอร์เตอร์หลายส่วนเนื่องจากหลอดไฟฟ้าใช้งานเพื่อให้แสงสว่างในอาคาร สำนักงาน โรงงาน หรือที่พักอาศัย ดังนั้น วงจรจ่ายไฟทั้งชนิดที่ใช้บัลลาสต์แบบแกนเหล็กและบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ต้องรับไฟกระแสสลับ 50 Hz ส่วนของวงจรเรียงกระแส (rectifier) เป็นองค์ประกอบแรก และเพื่อวัตถุประสงค์ในการควบคุมระดับแรงดันกระแสตรงที่ได้จากวงจรเรียงกระแส วงจรแปลงผันแรงดันกระแสตรงไปเป็นกระแสตรงหรือที่เรียกว่าวงจรดีซีชอปเปอร์ (DC chopper) อาจจะถูกนำมาใช้งาน ส่วนสุดท้ายเป็นตัวแปลงไฟกระแสตรงไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงรูปคลื่นที่ได้ไม่จำเป็นต้องเป็นรูปคลื่นไซน์ เรียกว่า วงจรอินเวอร์เตอร์ อย่างไรก็ตาม วงจรอินเวอร์เตอร์มีหลายรูปแบบ ทั้งอินเวอร์เตอร์ชนิดโหมดการสวิตช์ (switched-mode inverter) และชนิดรีโซแนนซ์ (resonant inverter) ก็ได้ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์มีข้อดีและข้อเสียสรุปโดยสั้น ๆ คือ บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์สามารถลดความสูญเสียประมาณ 10-12 วัตต์ต่อหลอดเมื่อเทียบกับบัลลาสต์ธรรมดา แต่จะมีราคาแพงกว่าสำหรับระยะเวลาการคืนทุนและผลประหยัดที่จะได้รับนั้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชั่วโมงการเปิดใช้งานของหลอดไฟ

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการผลิตหม้อแปลงไฟโซโอดีอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้งานร่วมกับหลอดโซเดียมความดันสูง (high pressure sodium lamp) และหลอดแอลอีดี (light emitting diode) อนึ่งหลอดโซเดียมความดันสูงเป็นหลอดไฟฟ้าที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งในสวนอาคารโรงงานหลังคาสูง โฟลตอน ลานจอดรถ เป็นส่วนการให้แสงสว่างที่สิ้นเปลืองพลังงาน ส่วนหลอดแอลอีดีเป็นหลอดที่กำลังเป็นที่นิยมและถูกนำมาใช้ในการให้แสงสว่างมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะประหยัดพลังงานได้มาก

รูปที่ 1.1 เป็นวงจรบัลลาสต์ชนิดขดลวดเหนี่ยวนำที่ใช้กับหลอดไฟฟ้า รูปที่ 1.2 แสดงวงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ และรูปที่ 1.3 เป็นวงจรบัลลาสต์ไฟโซโอดีอิเล็กทรอนิกส์ ข้อดีบัลลาสต์ไฟโซโอดีอิเล็กทรอนิกส์คือ การสูญเสียต่ำ น้ำหนักเบา และมีขนาดเล็ก ไม่ติดไฟ เป็นต้น

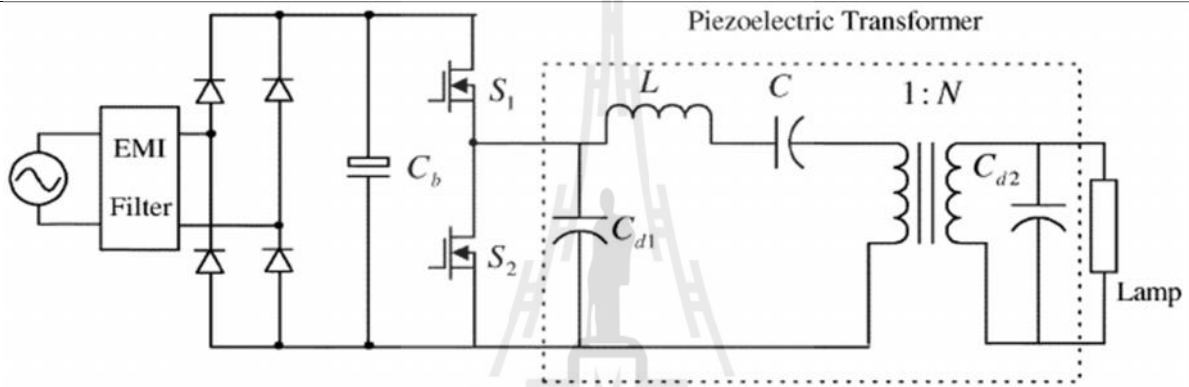


รูปที่ 1.2 วงจรบัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์

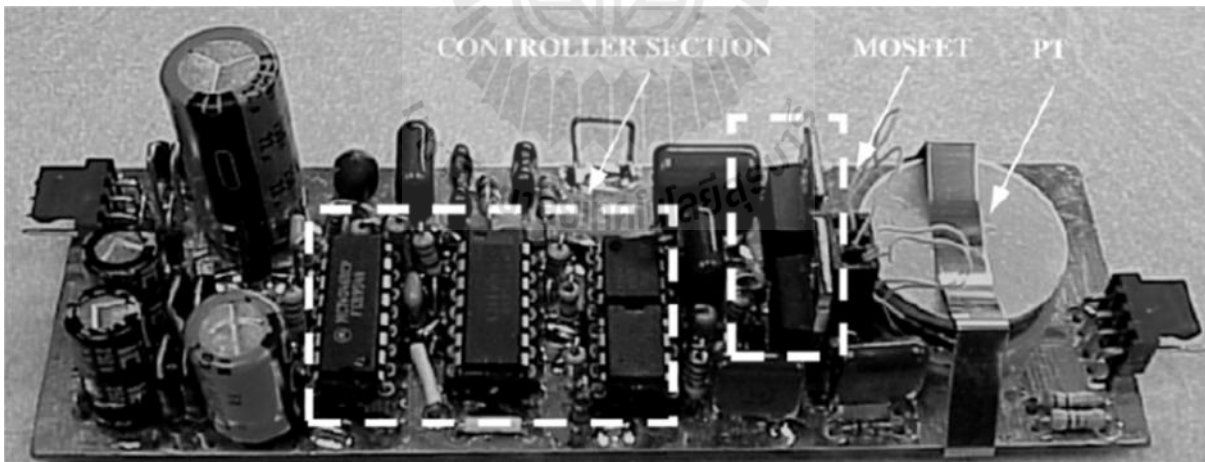


รูปที่ 1.3 วงจรบัลลาสต์ไพโซโซอิลิกทรินิก [1]

บัลลาสต์ไพโซโซอิลิกทรินิกนี้มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ หม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรินิก (piezo-transformer: PZT) ทำหน้าที่ขยายแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่สูง มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบาว่าบัลลาสต์แกนเหล็กมาก รูปที่ 1.4 และ 1.5 แสดงไดอะแกรมและวงจรต้นแบบเพื่อการทดสอบบัลลาสต์ไพโซโซอิลิกทรินิก



รูปที่ 1.4 ไดอะแกรมวงจรบัลลาสต์ไพโซโซอิลิกทรินิก



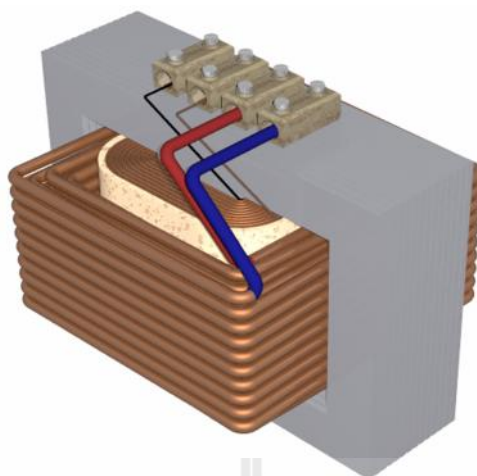
ข) วงจรต้นแบบเพื่อการทดสอบ

รูปที่ 1.5 ไดอะแกรมและวงจรต้นแบบเพื่อการทดสอบบัลลาสต์ไพโซโซอิลิกทรินิก [2]

หม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรินิก (Piezoelectric transformers)

หม้อแปลง หรือ หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า ที่ใช้ในการส่งผ่านพลังงานจากวงจรไฟฟ้าหนึ่งไปยังอีกวงจรโดยอาศัยหลักการของแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's Law) ที่กล่าวว่า “เมื่อขดลวดได้รับแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ จะทำให้ขดลวดมีการเปลี่ยนแปลงเส้นแรงแม่เหล็กตามขนาดของรูปคลื่นไฟฟ้า

กระแสสลับ และทำให้มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้นที่ขดลวดนี้” รูปที่ 1.6 แสดงหม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวด โดยปกติแล้วหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้เชื่อมโยงระหว่างระบบไฟฟ้าแรงสูง และไฟฟ้าแรงต่ำ ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในระบบส่งกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 1.6 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบขดลวด [3]

หม้อแปลงไฟฟ้าแบบไพเอโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transformer, PT) ถูกค้นพบโดย C. A. Rosen ในปี 1954 เป็นหม้อแปลงที่ผลิตจากวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกที่มีคุณสมบัติพิเศษเฉพาะตัว คือ สามารถเปลี่ยนพลังงานจากกลเป็นไฟฟ้าหรือเปลี่ยนพลังงานจากไฟฟ้าเป็นกลได้ มีหลักการการทำงานโดยเมื่อให้ไฟฟ้ากระแสสลับที่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance Frequency) ของด้านป้อนพลังงานหม้อแปลงไฟฟ้าแบบไพเอโซอิเล็กทริกจะเกิดการสั่นทำให้เกิดปรากฏการณ์ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเรียกว่า “ปรากฏการณ์แบบกลับของไพเอโซอิเล็กทริก (Converse Piezoelectric Effect)” และพลังงานกลที่เกิดจากการสั่นดังกล่าวจะเคลื่อนที่ไปยังด้านจ่ายพลังงาน และจะถูกแปลงกลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงของพลังงานจากพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเรียกว่า “ปรากฏการณ์แบบตรงของไพเอโซอิเล็กทริก (Direct Piezoelectric Effect)”

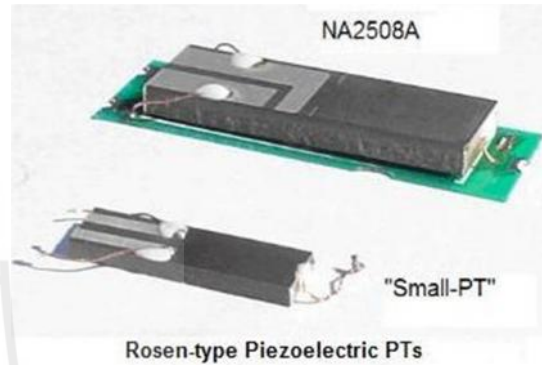
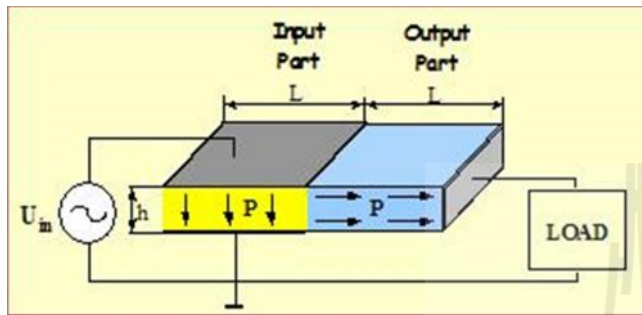
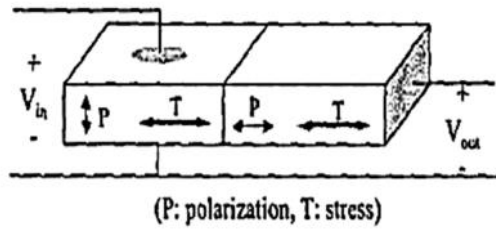
หม้อแปลงแบบไพเอโซอิเล็กทริกได้ถูกนำมาใช้ทดแทนหม้อแปลงแบบเก่า เพราะหม้อแปลงแบบไพเอโซอิเล็กทริกนั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องความร้อนจากแกนเหล็ก หรือการทำให้เกิดการเหนี่ยวนำรั่วไหล มีประสิทธิภาพการทำงานสูงในการใช้งานได้ที่ความถี่สูงๆ ไม่ไวไฟเมื่อเกิดการลัดวงจร มีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาทำให้ง่ายต่อการออกแบบในวงจรอีกด้วย แบ่งหม้อแปลงไฟฟ้าแบบไพเอโซอิเล็กทริกที่ใช้กันอยู่ตามลักษณะของหม้อแปลงได้เป็น 4 แบบ คือ

- 1) Rosen-type
- 2) Thickness vibration mode
- 3) Radial vibration mode
- 4) Circular unipoled disk-type หรือ Ring-dot type

1) Rosen-type piezoelectric transformer

หม้อแปลงไฟฟ้าไพเอโซอิเล็กทริกแบบ Rosen-type ใช้หลักการการทำงานของ Transverse mode Piezoelectric Actuator คือการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นการสั่นแนวขวาง ร่วมกับ Longitudinal mode Piezoelectric Transducer คือการเปลี่ยนพลังงานการสั่นแนวยาวเป็นไฟฟ้า เนื่องจากมีการสั่นในช่วงความถี่เรโซแนนซ์สูง จึงมีการใช้งานที่ศักย์สูง (high-voltage) และความต้านทานสูง (high impedance resistance load ($\sim 100 \text{ k}\Omega$)) บางครั้งอาจเรียกหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกชนิดนี้ว่า **high-voltage piezoelectric transformers** ตัวอย่างการใช้งานได้แก่ high-voltage, high impedance lamps เช่น

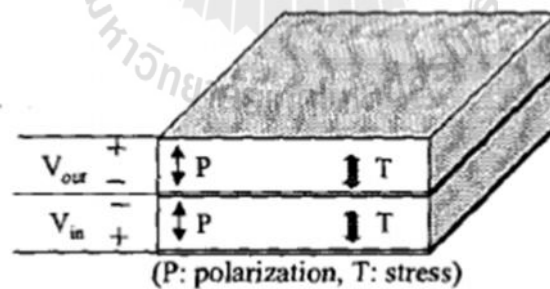
cold cathode fluorescent lamps หรือใช้เป็น back-light source ในจอ LCD ของ Notebook Computer รูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้างและตัวอย่างของหม้อแปลงไฟโซลิตริกชนิดนี้



รูปที่ 1.7 Rosen-type Piezoelectric Transformer จาก [4,5]

2) Thickness vibration mode piezoelectric transformer

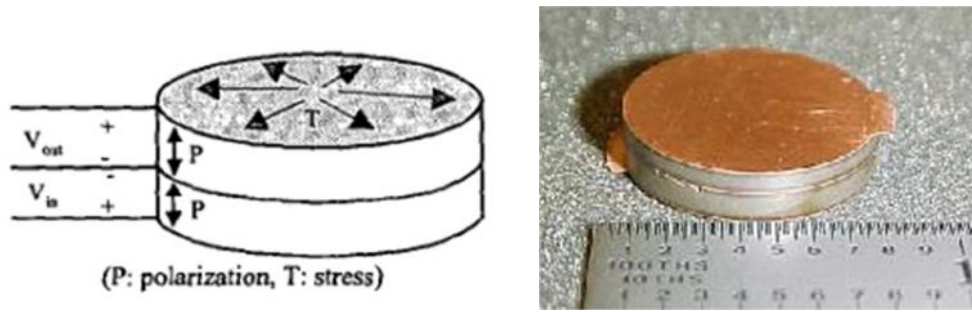
หม้อแปลงไฟฟ้าโซลิตริกแบบ Thickness vibration mode ใช้หลักการของ longitudinal mode piezoelectric actuator (สั่นในแนวยาว) ร่วมกัน การสั่นในแนวยาว (longitudinal mole ของ piezoelectric ceramic transducer ดังแสดงในรูปที่ 1.8 หม้อแปลงไฟฟ้าแบบนี้เหมาะกับการใช้งานที่ low voltage กับ low resistance ($\approx 10 \Omega$)



รูปที่ 1.8 Thickness vibration mode piezoelectric transformer [4]

3) Radial vibrational mode piezoelectric transformer

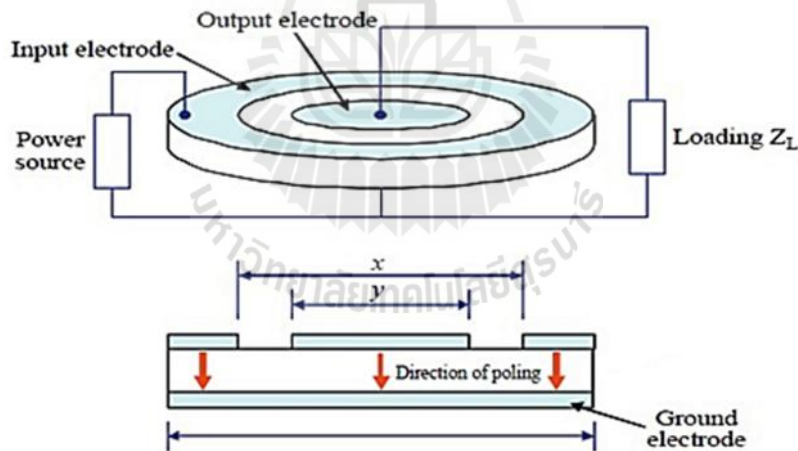
เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า transoner ใช้หลักการทำงานของ transverse ดังแสดงในรูปที่ 1.9 transformer ชนิดนี้เป็น step down transformer ใช้ใน ballast, adapter และ converter: transformer ชนิดนี้เหมาะสมมากที่ใช้กับ linear fluorescent lamp หรือ compact fluorescent lamp ซึ่งมีความต้านทานในช่วง 200Ω ถึง $1k \Omega$



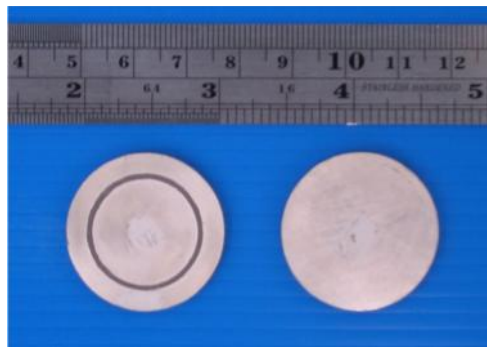
รูปที่ 1.9 Radial vibrational mode piezoelectric transformer [4,6]

4) Unipoled disk-type piezoelectric transformer (Ring-dot type)

ข้อดีของหม้อแปลงไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริกแบบนี้คือขั้ว input และ output มีโพลาไรเซชัน (Polarization) ในทิศทางเดียวกัน ทำให้ช่วยลดความซับซ้อนในการขึ้นรูปและการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้ว (การ poling) โดยขั้ว input และ output จะอยู่ด้านบนของหม้อแปลง และกราวด์ (ground) จะอยู่ด้านล่างของหม้อแปลง ซึ่งจะต่อจาก ขั้ว input และ output พร้อมกัน รูปที่ 1.10 และ 1.11 แสดงหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกชนิดนี้ หลักการทำงานของหม้อแปลงไฟฟ้าไพโซอิเล็กทริกชนิดนี้คือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้า input เข้ามาที่ริมหรือวงแหวนด้านนอก (external ring) แล้วหม้อแปลงจะเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้เป็นการสั่นซึ่งเริ่มต้นจากที่ริมแล้วสั่นไปทั่วทั้งแผ่นไพโซอิเล็กทริก จากนั้นไพโซอิเล็กทริกก็จะเปลี่ยนการสั่นที่บริเวณตรงกลางของแผ่น (internal ring) ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า output เนื่องจากการสั่นที่บริเวณริมแผ่นซึ่งเป็น input และตรงกลางซึ่งเป็น output ไม่เท่ากัน ดังนั้น voltage ที่ออกไปจากด้าน output จึงไม่เท่ากับ voltage ที่จ่ายเข้าไปด้าน input



รูปที่ 1.10 Ring dot หรือ unipoled disk type piezoelectric transformer [7]



รูปที่ 1.11 Ring dot หรือ unipoled disk type piezoelectric transformer

คนไทยที่ศึกษาหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกชนิดนี้คนแรกๆ คือ ดร. พิทักษ์ เหล่ารัตนกุล จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ [8] ต่อมาสุธรรม และคณะ [9], [10] ได้ทดลองทำหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกชนิดนี้ให้มีรูปทรงแบบหกเหลี่ยม แต่ก็สู้หม้อแปลงที่มีรูปร่างแบบวงกลมอย่างเดิมไม่ได้ ต่อมา สุธรรม ศรีหล่มสักและคณะ[11] ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดด้าน input ต่อพื้นที่ด้าน output และความหนาของหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกแบบวงแหวนต่อค่าสัดส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้าน output ต่อแรงดันไฟฟ้าด้าน input ซึ่งเรียกว่า V_{gain} พบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรดด้าน input V_{gain} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด แต่ V_{gain} จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เมื่อเปลี่ยนความหนาของหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกในช่วง 2-3 มม. ในงานวิจัยเดียวกันนี้ผู้วิจัยได้ทดลองนำหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกไปจุดหลอดฟลูออเรสเซนต์ขนาด 40 W ได้สำเร็จ

หลอดโซเดียมความดันสูง (Sodium High Pressure Bulk)

ปัจจุบันมีการสัญจรเดินทางบนท้องถนนมากขึ้น การเดินทางในเวลากลางคืนบนท้องถนนที่มีตึกๆ มีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุมาก จึงจำเป็นต้องติดไฟฟ้าให้แสงสว่างให้เหมาะสมเพื่อลดอุบัติเหตุ หลอดไฟฟ้าที่ใช้ติดบนท้องถนนส่วนใหญ่เป็นหลอดไฟฟ้าประเภท หลอด Sodium High Pressure ดังแสดงในรูปที่ 1.12 ในวงจรไฟฟ้าของหลอดประเภทนี้มีหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบ ซึ่งส่วนใหญ่แล้วทำมาจากขดลวดทองแดง ข้อเสียของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ทำมาจากขดลวดทองแดงคือเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปเป็นเวลานานๆ จะทำให้สารเคลือบขดลวดที่เป็นฉนวนร้อนและเสื่อม ทำให้ต้องเปลี่ยนหม้อแปลงทุกๆ ระยะเวลาที่กำหนด (ประมาณ 10ปี) เนื่องจากที่ผ่านมานักวิจัยหลายท่านสามารถนำหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกไปใช้กับหลอดฟลูออเรสเซนต์ได้แล้ว [9-15] จึงได้มีการคิดค้นที่จะทำหม้อแปลงไฟฟ้าไอโซอิเล็กทริกเพื่อนำไปใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง



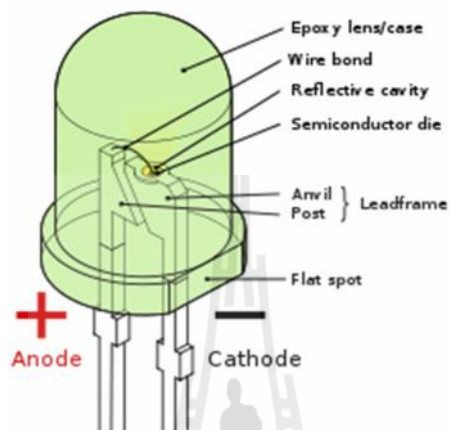
รูปที่ 1.12 หลอด Sodium High Pressure และการนำไปใช้งาน

หลอด LED (Light Emitting Diode)

LED หรือ Light Emitting Diode (รูปที่ 1.13) ถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1962 โดย นิก โฮโลยัค (Nick Holonyak Jr.) แห่งบริษัท เจเนรัล อิเล็กทริก (General Electric Company) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประเภทสารกึ่งตัวนำอย่างหนึ่ง จัดอยู่ในจำพวกไดโอด (Diode) เมื่อถูกไบอัสทางไฟฟ้าในทิศทางไปข้างหน้า จะสามารถเปล่งแสงได้ใกล้ช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงที่มองเห็น และช่วงอินฟราเรด สีของแสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุกึ่งตัวนำที่ใช้ ปรากฏการณ์นี้อยู่ในรูปของ electroluminescence [16-18]

LED นับว่าเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีประสิทธิภาพในการส่องสว่างสูงเมื่อเทียบกับหลอดไฟฟ้าแบบเดิม หรือแบบหลอดฟลูออเรสเซนต์ ทั้งยังเป็นอุปกรณ์ที่ประหยัดพลังงานโดยมีการใช้พลังงานของหลอด LED เป็นเพียงหนึ่งในสิบของหลอดไฟฟ้าและมีอายุการใช้งานนานกว่า 10-50 เท่า นอกจากนี้หลอด LED ยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะวัสดุที่ผลิตไม่ได้

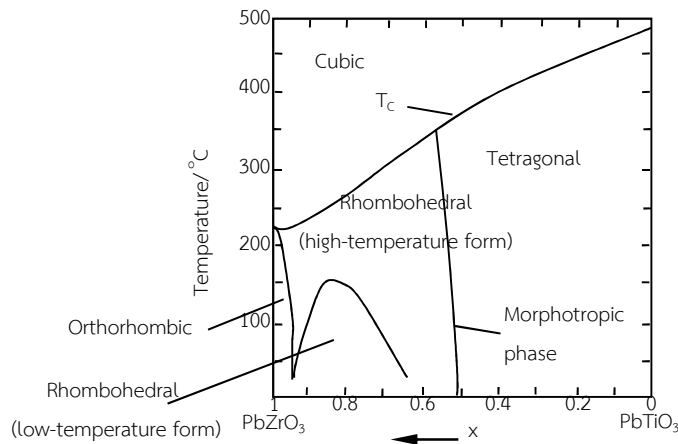
ทำมาจากสารที่เป็นอันตรายอย่างเช่น ปรอทที่ใช้ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ และหลอด LED นั้นมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงแทนหลอดแบบดั้งเดิม ซึ่งในการใช้งานเป็นแหล่งกำเนิดแสงหรือหลอดไฟ ต้องมีตัวแปลงและควบคุมกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น DC-DC converters ปัจจุบันในด้านการตลาดของหลอดไฟฟ้าที่ให้แสงสว่างมีการแข่งขันสูง แต่มีความต้องการสินค้าที่ราคาต่ำ ในการผลิตหลอดไฟฟ้าและป้อนเข้าสู่ตลาดให้มีต้นทุนการผลิตที่ต่ำลงจึงเป็นความท้าทายอย่างมาก แต่เนื่องจากหลอด LED เป็นหลอดส่องสว่างที่มีประสิทธิภาพสูงและยังมีต้นทุนการผลิตต่ำ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจึงทำให้หลอด LED เป็นตัวเลือกที่ถูกใช้ในการให้แสงสว่างแทนหลอดไฟฟ้าแบบเก่า และเป็นที่นิยมใช้กันมากขึ้นอย่างแพร่หลาย [16-18]



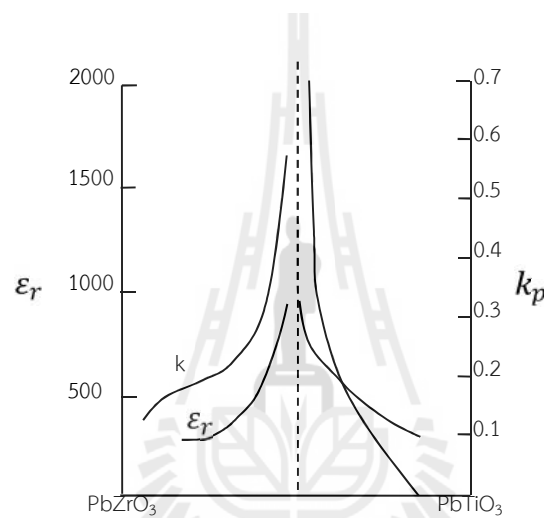
รูปที่ 1.13 ส่วนประกอบของหลอด LED [16]

Lead Zirconate Titanate (PZT)

เป็นวัสดุเซรามิกที่มีสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกสูงสุด เกิดจากการนำ PbTiO_3 (Curie point = 495°C) กับ PbZrO_3 (Curie point 234°C) มาผสมกันในสัดส่วนต่างๆ จะได้ $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ที่มีกราฟ phase diagram ดังแสดงในรูปที่ 1.14 (Moulson) ตรงกลาง ๆ ของกราฟ (บริเวณที่ x มีค่าประมาณ $x = 0.52$) เป็นบริเวณที่เกิด tetragonal-rhombohedral transformation เป็นบริเวณที่มีความพิเศษและสำคัญมากเพราะเส้น phase boundary บริเวณนี้เกือบจะเป็นเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแกน x แสดงว่า $\text{Pb}(\text{Ti}_{1-x}\text{Zr}_x)\text{O}_3$ ที่ซึ่ง $x = 0.52$ สามารถเกิด tetragonal-rhombohedral transformation เกิดได้ทุกๆ อุณหภูมิ เรียกเส้น phase boundary บริเวณนี้ว่า morphotropic phase boundary (MPB) เป็นช่วงที่ PZT เปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างทันทีโดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ นักวิทยาศาสตร์พบว่าบริเวณนี้เป็นบริเวณที่ PZT มีสมบัติ piezoelectric สูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 1.15 เชื่อกันว่าสาเหตุที่ PZT มีสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกสูงสุดในช่วง MPB เพราะช่วงนี้ PZT เกิดอย่างเสถียรได้พร้อมกัน 2 phases คือ tetragonon และ rhombohedron ซึ่งมี polarization 6 และ 8 ทิศทางตามลำดับ ดังนั้นเมื่อนำ PZT ที่มีส่วนผสมบริเวณนี้ไปเหนี่ยวนำให้เกิดขั้ว (pole) มันจึงจัดเรียง domain ในตัวมันตามทิศของสนามไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำได้มากกว่า PZT ที่มีส่วนผสมบริเวณอื่น เพราะ PZT ที่มีส่วนผสมบริเวณอื่นมีทิศทาง polarization น้อยกว่า polarization ของ PZT ที่บริเวณอื่นจึงหันทิศไปตามทิศของสนามไฟฟ้าที่ pole ได้น้อยกว่า ดังนั้น PZT ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไปมักจะมีส่วนผสมทางเคมีใกล้ๆ กับส่วนผสมที่ MPB คือ $\text{Pb}(\text{Ti}_{0.48}\text{Zr}_{0.52})\text{O}_3$ เขียนแทนด้วย PZT



รูปที่ 1.14 เฟสต่างๆ ในระบบ $Pb(Ti_{1-x}Zr_x)O_3$ [19]



รูปที่ 1.15 Coupling coefficient k_p และ relative permittivity (ϵ_r) ของ PZT ที่มีส่วนผสมต่างๆ [19]

Soft Ceramic versus hard Ceramics

อาจจะปรับปรุง PZT ที่มีส่วนผสมใกล้ๆ MPB ให้มีสมบัติดีขึ้นด้วยการแทนที่ ion บางตัวใน PZT ด้วย ion ชนิดอื่น การแทนที่ ion ใน PZT ด้วย ion ชนิดอื่นที่มี valency เท่ากันเรียกว่า isovalent doping หรือแทนที่ ion ใน PZT ด้วย ion ชนิดอื่นที่มี valency ไม่เท่ากันเรียกว่า aliovalent doping ตัวอย่าง isovalent doping เช่น การแทนที่ Pb^{2+} ใน PZT ด้วย Ba^{2+} , Sr^{2+} , Co^{2+} หรือการแทนที่ Ti^{4+} ใน PZT ด้วย Sn^{4+} หรือ การแทนที่ Zr^{4+} ใน PZT ด้วย Hf^{4+} ส่วนตัวอย่างของ aliovalent doping เช่น การแทนที่ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} บางตัวใน $Pb(Zr^{4+},Ti^{4+})O_3$ ด้วย Nb^{5+} การทำ aliovalent doping ยังแบ่งออกเป็น 2 ชนิด กล่าวคือ 1) donor doping เกิดจากการแทนที่ ion เดิมในสารประกอบตั้งต้นด้วย ion ที่มี valency มากกว่า ตัวอย่างเช่น การแทนที่อะตอมของ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} บางตัวใน PZT ด้วย Nb^{5+} การ dope แบบนี้จะได้ PZT จำพวก soft PZT 2) acceptor doping เกิดจากการแทนที่ ion เดิมในสารประกอบตั้งต้นด้วย ion ที่มี valency น้อยกว่า ตัวอย่างเช่นการแทนที่ Zr^{4+} , Ti^{4+} บางตัวใน PZT ด้วย Mn^{2+} การ dope แบบนี้จะได้ PZT จำพวก hard PZT

Donor doped ทำให้เกิดสถานะที่มีประจุบวกเกินใน soft PZT ซึ่งจะช่วยให้วัสดุ soft PZT หาทางปรับประจุไฟฟ้าในตัวให้สมดุลโดยการเกิด metal vacancy ซึ่งจะช่วยให้ domain เกิดการจัดเรียงตัวได้ดียิ่งขึ้นเมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยสนามไฟฟ้าจากภายนอก ดังนั้นวัสดุจำพวก soft PZT จึงมักจะมีสมบัติทางไพโซอิเล็กทริก เช่น planar coupling factor

(k_p), piezoelectric charge constant (d_{33}), relative permittivity (ϵ_r), loss tangent ($\tan\delta$) ที่มีค่าสูง ๆ มี Quality factor ต่ำ ๆ และมีสมบัติ poor linearity ดังแสดงในตารางที่ 1.1 วัสดุพวกนี้มักจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วในตัว (polarization) และทำลายขั้วในตัว (depolarization) ได้ง่ายและมี hysteresis loop ใหญ่ เนื่องจาก soft PZT มี ϵ_r และ $\tan\delta$ ที่มีค่าสูง ๆ มันจึงไม่ค่อยถูกนำไปใช้งานในด้านที่ต้องใช้ความถี่สูง ๆ หรืองานที่ต้องใช้สนามไฟฟ้าสูงมาก ๆ (เพราะจะทำให้เกิด loss สูงและร้อน) ดังนั้น soft PZT มักถูกใช้งานเป็น sensor

ในทางตรงกันข้ามการแทนที่ host ion ด้วย acceptor dope ใน hard PZT ทำให้เกิดสภาพขาดบวก ดังนั้นจึงต้องสมดุลประจุโดยเกิด oxygen vacancy ตาราง 1.1 แสดงสมบัติของ hard PZT จากตารางจะเห็นว่า hard PZT มีสมบัติเกือบจะตรงกันข้ามกับ soft PZT วัสดุจำพวก hard PZT จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วในตัวได้ยากกว่า soft PZT แต่เมื่อเกิดขั้วสำเร็จแล้วก็จะถูกทำลายขั้วได้ยากกว่าด้วย นอกจากนี้จากตารางจะเห็นได้ว่าวัสดุ hard PZT จะมี d_{33} , k_p , $\tan\delta$ และ ϵ_r ต่ำกว่า soft PZT แต่ hard PZT จะมี Mechanical quality factor (Q_M) สูงกว่า soft PZT ส่วนใหญ่พวก hard PZT จะถูกใช้งานด้าน high voltage และ high mechanical load

ตารางที่ 1.1 สมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกแบบ hard และแบบ soft [20]

Characteristic	Soft Ceramic	Hard Ceramic
Piezoelectric Charge Constants (d)	larger	smaller
Relative Permittivity (ϵ_r)	higher	lower
Planar Coupling Factors (k_p)	larger	smaller
Electrical Resistance	very high	lower
Loss Tangent ($\tan\delta$)	high	low
Mechanical Quality Factors (Q_M)	low	high
Coercive Field	low	higher
Linearity	poor	better
Polarization/Depolarization	easier	more difficult

PZT ที่ใช้กันมากในเชิงการค้า และอุตสาหกรรมมี 4 ตัวตั้งชื่อตาม specification ของ US-Navy ดังนี้ 1) PZT-4 (Navy I) 2) PZT 5 บางทีเรียก PZT 5A (Navy II) 3) PZT - 5H (Navy IV) และ 4) PZT-8 (Navy III) PZT แต่ละตัวก็เหมาะกับการใช้งานต่างๆ กันดังนี้

PZT - 4 มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า hard PZT เป็น PZT ที่ทำขึ้นโดยการ dope PZT ด้วย Sr มีสูตรเคมีว่า $(Pb_{0.94}Sr_{0.06})(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ PZT ชนิดนี้มี dielectric loss หรือ loss tangent ต่ำ และทนทานต่อการถูก depoled ได้มากถึงแม้จะถูกกดด้วย mechanical stress สูงก็ไม่ depole ดังนั้นจึงมักจะทำ PZT ชนิดนี้ไปใช้ทำ acoustic transducer สำหรับเรือดำน้ำที่อยู่ใต้น้ำลึก ๆ และใช้ทำ electrical power generator เช่น ที่จุดเตาแก๊ส

PZT-5A มีสมบัติดี 3 อย่างคือ 1) high sensitivity คือ sensitive มากเพราะถูกสะกดเบาๆ ก็ส่งสัญญาณออกมาได้; 2) high time stability คือ สมบัติไพโซอิเล็กทริกไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา (หรือ aging ต่ำ); 3) resistivity to elevate temperature คือทนต่ออุณหภูมิสูง ดังนั้นจึงมักถูกใช้ทำ hydrophone

PZT-5H มี sensitivity และ dielectric constant สูงกว่า PZT-5A ; มี Curie point ต่ำ จึงถูกใช้งานที่อุณหภูมิไม่สูงนัก

PZT-8 มีสมบัติคล้าย ๆ PZT-4 แต่ PZT-8 จะมี dielectric loss ต่ำกว่ามาก และทนทานต่อการถูก depole มากกว่า นอกจากนี้ PZT-8 ยังมี dielectric constant (K') หรือ relative permittivity (ϵ_r) และ Coupling factor (k_p) ต่ำกว่า PZT-4 อีกด้วย

ตารางที่ 1.2 แสดงสมบัติ (ที่อุณหภูมิห้อง) ของ PZT ทั้ง 4 ชนิด เปรียบเทียบกันโดยถือเอาสมบัติของวัสดุที่มีค่าสูงสุดเป็น 100% (คัดจากหนังสือ Piezoelectric Technology Data for Designer ของ บ. Clevite Cooperation) อนึ่ง Cer B ในตารางคือ BaTiO₃ เป็นเซรามิกอีกชนิดหนึ่งที่มีสมบัติไพเอโซอิเล็กทริกแต่ไม่มากเท่า PZT

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบสมบัติ (ที่อุณหภูมิห้อง) ของ PZT ทั้ง 4 ชนิด [21]

	Cer. B	PZT-4	PZT-5A	PZT-5H	PZT-8
	% of Highest Rated Ceramic				
Coupling	51	89	92	100	77
Short circuit sensitivity (d ₃₃)	25	49	63	100	36
Open circuit sensitivity (d ₃₃)	54	100	95	75	94
Relative permittivity (ε _r) or dielectric constant (K'), free	35	38	50	100	29
Compliance (S ₃₃)	44	75	91	100	67
Field for dissipation factor = 4%	17	40	5	3	100
Strain (non resonant) @ field for dissipation factor = 4%	12	54	8	8	100
Mechanical Q	40	50	8	7	100
Curie Point	115°C	328°C	365°C	193°C	300°C
Approximate maximum operating temp	70°C	200°C	250°C	125°C	175°C

ผง PZT สำเร็จรูป

เพื่อความสะดวกแก่การนำ PZT ไปใช้ ปัจจุบันมีบริษัทที่มีอาชีพหลายบริษัทในต่างประเทศที่ผลิตผง PZT สำเร็จรูปออกมาจำหน่าย ทำให้นักวิจัยที่ทำงานทางด้านไพเอโซอิเล็กทริกไม่ต้องสังเคราะห์ผง PZT ขึ้นมาใช้เอง ตัวอย่างบริษัทผู้ผลิตผง PZT สำเร็จรูปขึ้นมาจำหน่าย เช่น บริษัท APC International, Ltd.(USA) ได้ผลิตผง PZT หลายชนิด และแต่ละชนิดมีสมบัติที่ต่างกันดังแสดงในตารางที่ 1.3 และแต่ละชนิดก็เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต่างกันด้วย โดยตารางที่ 1.4 แสดงให้เห็นว่าผง PZT ชนิดใดเหมาะสมกับการใช้งานด้านใด สำหรับงานวิจัยนี้เนื่องจากเป็นการนำ PZT ไปใช้งานทางด้าน transformer ผง PZT ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือผง APC 840, 841, 842 และ 844

การออกแบบบัลลาสต์ไพเอโซอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้ มุ่งเน้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานกับหลอด LED และใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูงขนาดกำลังงานตั้งแต่ 50 100 125 250 และ 400 วัตต์ ทำงานที่ขนาดแรงดัน 220 โวลต์ ความถี่ 50 เฮิร์ตซ์

ตารางที่ 1.3 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุโพซิเล็กทริกที่ผลิตจากผง APC เบอร์ต่างๆ [22]

APC Material:	840	841	850	855	880
Navy Equivalent	Navy I	--	Navy II	Navy VI	Navy III
Relative Dielectric Constant					
K^T	1250	1350	1900	3300	1000
Dielectric Dissipation Factor (Dielectric Loss(%))*					
$\tan \delta$	0.40	0.35	1.40	1.30	0.35
Curie Point (°C)**					
T_c	325	320	360	250	310
Electromechanical Coupling Factor					
k_p	0.59	0.60	0.63	0.68	0.50
k_{33}	0.72	0.68	0.72	0.76	0.62
k_{31}	0.35	0.33	0.36	0.40	0.30
k_{15}	0.70	0.67	0.68	0.66	0.55
Piezoelectric Charge Constant (10^{-12} C/N or 10^{-12} m/V)					
d_{33}	290	300	400	630	215
$-d_{31}$	125	109	175	276	95
d_{15}	480	450	590	720	330
Piezoelectric Voltage Constant (10^{-3} Vm/N or 10^{-3} m²/C)					
g_{33}	26.5	25.5	24.8	21.0	25.0
$-g_{31}$	11.0	10.5	12.4	9.0	10.0
g_{15}	38.0	35.0	36.0	27.0	28.0
Young's Modulus (10^{10} N/m²)					
Y_{11}^E	8.0	7.6	6.3	5.9	9.0
Y_{33}^E	6.8	6.3	5.4	5.1	7.2
Frequency Constants (Hz*m or m/s)					
N_L (longitudinal)	1524	1700	1500	1390	1725
N_T (thickness)	2005	2005	2040	2079	2110
N_P (planar)	2130	2055	2080	1920	2120
Density (g/cm³)					
ρ	7.6	7.6	7.6	7.7	7.6
Mechanical Quality Factor					
Q_m	500	1400	80	65	1000

The values listed above pertain to test specimens. They are for reference purposes only and cannot be applied unconditionally to other shapes and dimensions. In practice, piezoelectric materials show varying values depending on their thickness, actual shape, surface finish, shaping process and post-processing.

Note: measurements made 24 hours after polarization.
 Maximum voltage: 5-7 VAC /mil for 850, 851, 855, Type VI VDC ~2X.
 9-11 VAC /mil for 840, 841, 842, 844, 880, 881 VDC ~2X.
 *At 1 kHz, low field.
 **Maximum operating temperature = Curie point/2.

Standard Tolerances
 (Tighter tolerances available on request)
 - Capacitance: $\pm 20\%$
 - d_{33} Value: $\pm 20\%$
 - Frequency: $\pm 5\%$ (to $\pm 0.5\%$ on request)

ตารางที่ 1.3 1(ต่อ) สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุโพซิโตรีกที่ผลิตจากผง APC เบอร์ต่างๆ [22]

APC Material:	842	844	851	Type VI	881
Relative Dielectric Constant					
K^T	1375	1500	1950	3400	1030
Dielectric Dissipation Factor (Dielectric Loss(%))*					
$\tan \delta$	0.45	0.40	1.50	1.70	0.40
Curie Point (°C)**					
T_c	325	320	360	180	310
Electromechanical Coupling Factor					
k_p	0.65	0.68	0.71	0.77	0.58
k_t	0.48	0.48	0.51	0.52	0.46
Piezoelectric Charge Constant (10^{-12} C/N or 10^{-12} m/V)					
d_{33}	300	300	400	650	220
Piezoelectric Voltage Constant (10^{-3} Vm/N or 10^{-3} m²/C)					
g_{33}	26.3	24.5	24.8	20.9	26.7
Young's Modulus (10^{10} N/m²)					
Y_{11}^E	8.0	7.6	6.3	5.9	9.0
Y_{33}^E	6.8	6.3	5.4	5.1	7.2
Frequency Constants (Hz*m or m/s)					
N_T (thickness)	2050	2050	2040	2040	2050
N_p (planar)	2230	2250	2080	1980	2300
Density (g/cm³)					
ρ	7.6	7.7	7.6	7.6	7.6
Mechanical Quality Factor					
Q_m	600	1500	80	65	1000

The values listed above pertain to test specimens. They are for reference purposes only and cannot be applied unconditionally to other shapes and dimensions. In practice, piezoelectric materials show varying values depending on their thickness, actual shape, surface finish, shaping process and post-processing.

Note: measurements made 24 hours after polarization.

Maximum voltage: 5-7 VAC /mil for 850, 851, 855, Type VI VDC ~2X.

9-11 VAC /mil for 840, 841, 842, 844, 880, 881 VDC ~2X.

*At 1 kHz, low field.

**Maximum operating temperature = Curie point/2.

Standard Tolerances

(Tighter tolerances available on request)

- Capacitance: ±20%

- d_{33} Value: ±20%

- Frequency: ±5% (to ±0.5% on request)

Updated: Nov, 2013

QF-MP Rev. 2

ตารางที่ 1.4 การนำวัสดุ APC ไปใช้งาน [22]

Application	840 (842)	841 (844)	880 (881)	850 (851)	855 (Type VI)
accelerometers				✓	✓
bilaminar actuators				✓	✓
cryogenic SEMs			✓		
flow meters				✓	✓
gas ignitors, impact-type				✓	✓
gas ignitors, squeeze-type	✓	✓			
high frequency transducers	✓	✓			
high power actuators	✓	✓			
high stress pressure sensors	✓	✓			
hydrophones				✓	✓
level sensors				✓	✓
medical monitoring /medical diagnostic				✓	✓
microphones				✓	✓
motors, vibratory	✓	✓		✓	✓
precise movement control				✓	✓
pressure sensors				✓	✓
thickness gauges				✓	✓
transformers	✓	✓			
ultrasonic atomizers	✓	✓			
ultrasonic cleaners	✓	✓			
ultrasonic micro-bonding	✓	✓			
ultrasonic mixing / dispersion			✓		
ultrasonic surgery			✓		
ultrasonic welding			✓		
underwater echo sounders	✓	✓			

บทที่ 2 วิธีการทดลอง

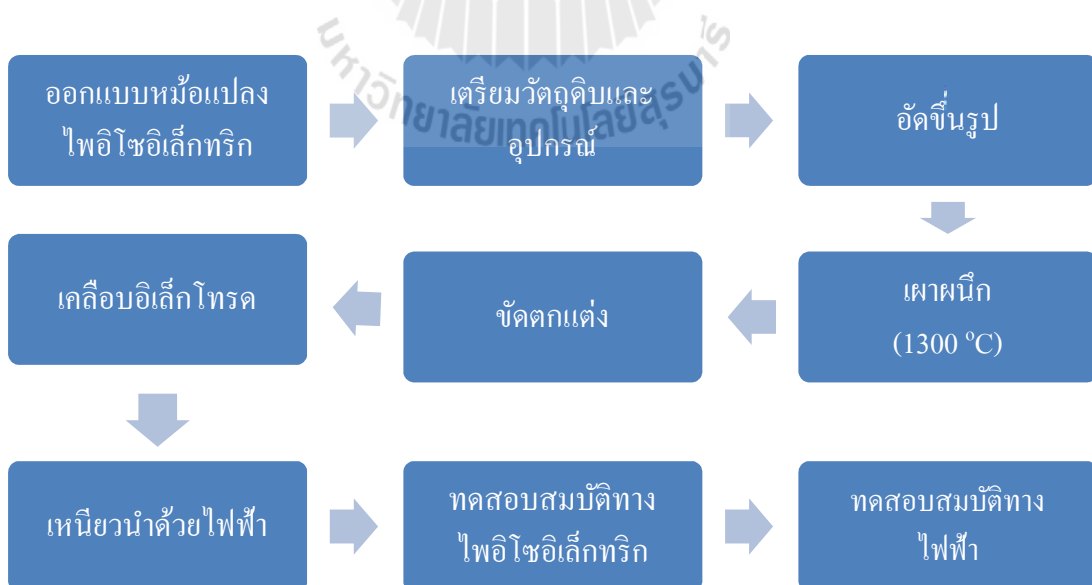
แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 เป็นการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอด LED และส่วนที่ 2 เป็นการนำวัสดุไพโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

ส่วนที่ 1 การนำไพโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอด LED

ระเบียบวิธีวิจัย

มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ออกแบบและสร้างหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริก
 - 1.1. เตรียมผงวัสดุดิบ
 - 1.2. อัดขึ้นรูป
 - 1.3. เผาผนึก
 - 1.4. ชัดให้ได้ขนาด
 - 1.5. เคลือบอิเล็กโทรด
 - 1.6. เหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดการจัดเรียงขั้ว (Pole)
2. วัดสมบัติทางไพโซอิเล็กทริก
 - 2.1. Piezoelectric charge constant d_{33}
 - 2.2. Dielectric constant (K') หรือ Relative permittivity (ϵ_r)
3. ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า
 - 3.1. ออกแบบวงจรสำหรับวัดค่าความถี่ และแรงดัน
 - 3.2. ศึกษา V_{gain} และ resonance frequency
 - 3.3. ทดสอบการนำไปใช้จุดหลอด LED



รูปที่ 2.1 แผนผังขั้นตอนการทดลอง

อุปกรณ์และเครื่องมือ

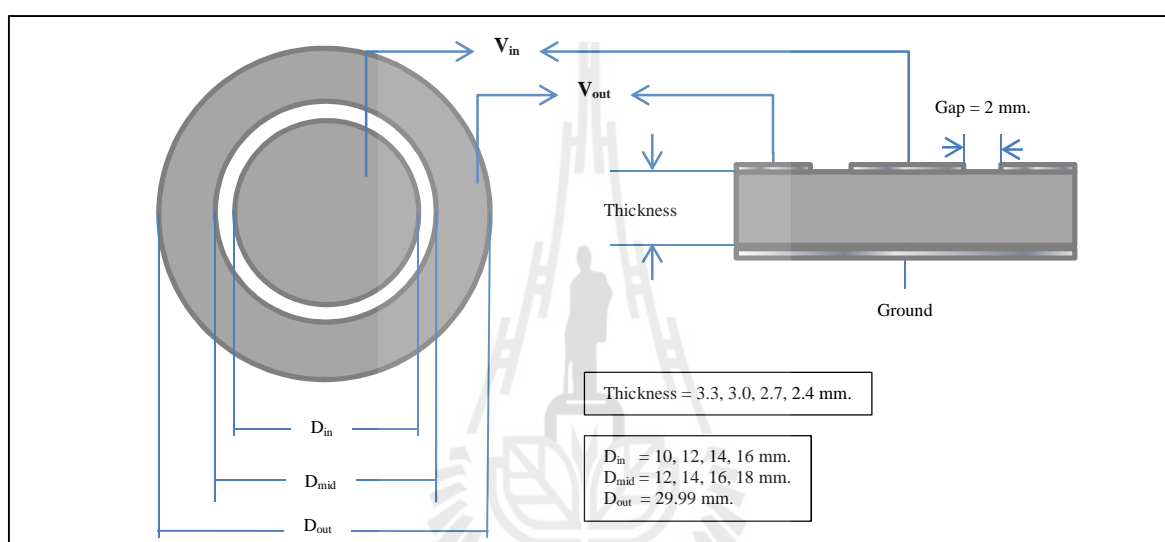
1. เครื่องชั่งน้ำหนักยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น ML 204/01
2. เวอร์เนียคาร์ลิเปอร์ ยี่ห้อ MITUTOYO 0.05 mm.
3. Mold สำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นงาน (D =19 mm. และ 34 mm.)
4. Alumina Double Crucible
5. อะลูมินาพูน
6. แผ่นรองเผา SiC
7. กระดาษทราย ชนิด SiC เบอร์ 100, 180, 320, 400, 800, 1000 และ1500
8. เครื่อง Ultrasonic cleaner ยี่ห้อ ULTRASONIK รุ่น 28H ความถี่ 44-48 kHz
9. เครื่อง Hydraulic Press (Dry press) ยี่ห้อ CARVER รุ่น 2702-227
10. เตาเผาไฟฟ้า 1400 °C ยี่ห้อ NABERTHERM
11. เครื่องอุ่นน้ำมัน ยี่ห้อ HUBON รุ่น Polystat cc1
12. เครื่องจัดเรียงขั้ว
13. Sample holder สำหรับจัดเรียงขั้ว (Pole)
14. (Power Supply) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบบปรับความถี่ได้ ยี่ห้อ TECHMICOM
15. วงจรสำหรับทดสอบสมบัติ (หลอด LED ,แผ่นวงจร, ตัวต้านทาน ฯลฯ)
16. อุปกรณ์บัดกรียี่ห้อ MITSUMI
17. เครื่องวัดค่า d_{33} (d_{33} Meter) ยี่ห้อจาก รุ่น S5865 d_{33} METER จาก APC International, Ltd.(USA)
18. เครื่อง Precision LCR meter ยี่ห้อ HP รุ่น Hewlett Packard 4284A (20 Hz – 1MHz) และ เครื่อง LCR meter Mini system 3100
19. เครื่อง Oscilloscope ยี่ห้อ Tektronix รุ่น TDS 1001 และ Digital Multi Miter ยี่ห้อ FLUKE รุ่น 289 True-RMS Digital Multi Meter
20. Function generator ยี่ห้อ TECHMICOM 4623685 (0.1 Hz – 2.0 MHz)

สารเคมี

1. ผง PZT APC 841 (จากบริษัท APC International, Ltd.(USA))
2. สารตัวนำ (Electrode) ยี่ห้อ DuPont รุ่น 7095 Silver Palladium (60% Au-40%Pd) ชนิด Fire on electrode
3. Isopropanol
4. Acetone
5. ผงอะลูมินา
6. น้ำมันซิลิโคน
7. น้ำมันพืช
8. กาวน้ำ

1. การออกแบบหม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรริก

การออกแบบหม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรริกแสดงดังรูปที่ 2.2 โดยมีรูปแบบเหรียญ (disc) หน้า 2.4, 2.7, 3.0 และ 3.3 มม. และเคลือบอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน โดยด้านบนจะเคลือบเป็นสองวง 1) วงในเป็นขั้ว output เพื่อให้ได้หม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรริกที่มีความหลากหลายงานวิจัยนี้จึงออกแบบหม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรริกให้มีเส้นผ่าศูนย์กลางวงใน (D_{in}) ซึ่งเป็นขั้ว output หลายขนาดซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10, 12, 14 และ 16 มม. 2) วงนอกเป็นขั้ว input ทาอิเล็กโทรดวงนอกเป็นรูปร่างวง โดยที่วงแหวนด้านในมีเส้นผ่าศูนย์กลาง (D_{mid}) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางหลายขนาดคือ 12, 14, 16 และ 18 มม. และวงแหวนด้านนอก (D_{out}) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 29.99 มม. ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ส่วนด้านล่างของหม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรริกจะเป็น ground ซึ่งเคลือบอิเล็กโทรดทั่วทั้งพื้นผิว



รูปที่ 2.2 แบบหม้อแปลงไพโซโซอิลิกทรริกที่ใช้ในการทดลองนี้

2. การอัดขึ้นรูป

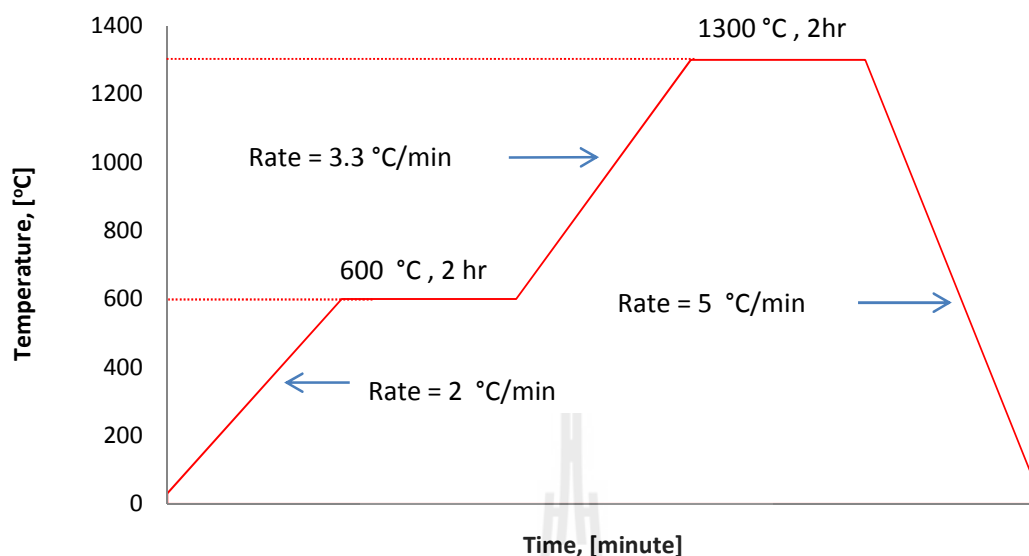
1. อัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัดไฮดรอลิกแบบ uniaxial press รูปที่ 2.3 โดยใช้แม่แบบสำหรับอัด (mold) ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 34 มม. ทำความสะอาดแม่แบบสำหรับอัด (mold) ด้วย Isopropanol ทุกครั้งก่อนอัดขึ้นตัวอย่างแต่ละชั้น
2. ใช้ผง PZT APC 841 น้ำหนักประมาณ 18.85 กรัม ในการอัดขึ้นตัวอย่างแต่ละชั้น
3. อัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกที่แรงดันสูงสุด 18 ตัน โดยอัดเป็นสองจังหวะดังนี้
 - a. จังหวะที่ 1 ให้แรงอัดจนถึง 6 ตัน แล้วแช่แรงอัดไว้ 1 นาที
 - b. จังหวะที่ 2 ให้แรงอัดอย่างช้าๆจนถึง 18 ตันแช่ไว้ 3 นาที แล้วนำชิ้นงานออก
4. ทำความสะอาด Mold ด้วย Isopropanol แล้วอัดขึ้นงานชิ้นต่อไป
5. ทำซ้ำแบบเดิมจนได้จำนวนชิ้นงานตามต้องการ หลังอัดเสร็จแล้วปล่อยให้ชิ้นงานแห้ง 1 วัน



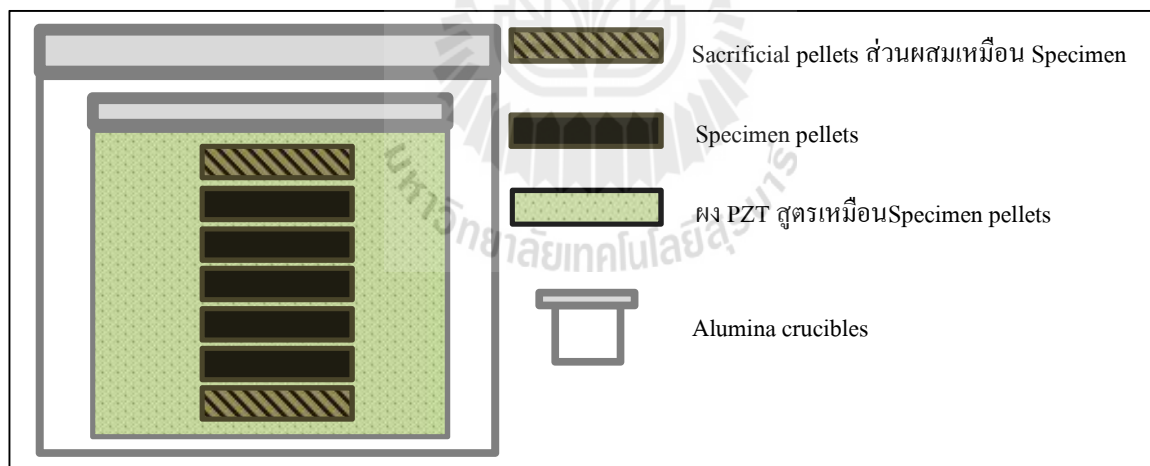
รูปที่ 2.3 เครื่องอัดขึ้นรูปแบบ Dry press ยี่ห้อ CARVER รุ่น 2702-227

3. การเผาชิ้นงาน

เผาโดยใช้ firing profile ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยใช้ชิ้นงานที่อัดแล้วไว้ใน crucible alumina ซ้อนกัน 2 ชั้นเพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่ว โดยวางกองชิ้นงานซ้อนทับกันขึ้นไปเป็นแนวตั้งดังแสดงในรูปที่ 2.5 ชั้นบนและล่างสุดของกองเป็น sacrificial pellets ที่มีสูตรผสมเหมือนกันกับชิ้นงาน ระหว่างชิ้นงานแต่ละชั้นและระหว่างชิ้นงานกับ sacrificial pellet โรยผง PZT ที่มีส่วนผสมเหมือนชิ้นงานเอาไว้กันไม่ให้ชิ้นงานกับชิ้นงานและชิ้นงานกับ sacrificial pellets ติดกัน ฝาปิดของชิ้นงานผง PZT ที่มีส่วนผสมเหมือนกับชิ้นงาน เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกั่วระเหยออกไปจากชิ้นงาน (เพราะตะกั่วจะระเหยออกไปจากผงได้ง่ายกว่าที่จะระเหยออกไปจาก pellet และเมื่อไอระเหยตะกั่วอิมพัลใน alumina crucible แล้วมันก็จะหยุดระเหยต่อไป) การระเหยของตะกั่วออกไปจากชิ้นงานจะทำให้ส่วนผสมไม่เป็นไปตามที่ซึ่งผสมไว้และอาจเป็นสาเหตุทำให้สมบัติทางไพโซอิเล็กทริกของชิ้นงานลดลง เมื่อใส่ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 2.5 และฝาปิดชิ้นงานเสร็จแล้วให้ปิดฉนวน alumina crucible ชั้นใน แล้วนำ alumina crucible ชั้นในไปใส่ลงใน alumina crucible ชั้นนอกด้วยความระมัดระวัง อย่าขยับหรือเอียง alumina crucible เพราะอาจทำให้ชิ้นงานที่จัดเรียงไว้แล้วข้างใน alumina crucible ชั้นในเคลื่อนล้มได้ ต่อจากนั้นเผาชิ้นงานขึ้นไปที่ 1300°C ด้วย firing profile ดังแสดงในรูปที่ 2.4 แล้วเอาชิ้นงานออกจากเตาเผา



รูปที่ 2.4 Firing profile ในการเผาผนึก โดยมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มจากเผาชิ้นงานจากอุณหภูมิห้องขึ้นไปจนถึงที่อุณหภูมิที่ 600 °C ด้วยอัตราการเผา 2 °C/นาที และแช่อุณหภูมิไว้ที่ 600 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงเพื่อกำจัด binder จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิการเผาขึ้นไปที 1300 °C ด้วยอัตราการเผา 3.3 °C/นาที และแช่อุณหภูมิไว้ที่ 1300 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิในเตาเผาลงมาที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตรา 5 °C/นาที



รูปที่ 2.5 การจัดเรียงชิ้นงานสำหรับการเผาผนึก

4. การขัดแต่งชิ้นงาน

ในการขัดแต่งชิ้นงานนั้นมีจุดประสงค์เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีขนาดและรูปร่างตามต้องการ และมีผิวหน้าที่ราบเรียบสม่ำเสมอ รวมทั้งเป็นการกำจัดออกไซด์ที่เกิดขึ้นหลังการเผาที่อยู่ผิวหน้าของชิ้นงานอีกด้วย ซึ่งการขัดแต่งชิ้นงานนั้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ การขัดด้วยเครื่องขัดและการขัดด้วยมือ เนื่องจากชิ้นงานมีความบางทำให้ยากต่อการใช้เครื่องขัด ในที่นี้จึง

ขัดด้วยมือและใช้สาร Isopropanol เป็นสารหล่อลื่นระหว่างการขัดเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานและช่วยให้ขัดได้ง่ายขึ้น โดยมีขั้นตอนการขัดดังนี้

1. เริ่มขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 100 พร้อมทั้งใช้ Isopropanol เป็นสารหล่อลื่น และขัดด้วยแรงที่สม่ำเสมอ โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาด้านละ 5 นาที
2. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาเป็นเวลา 1 นาที
3. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320 โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาเป็นเวลา 3 นาที
4. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 400 โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาเป็นเวลา 3 นาที
5. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 800 โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาเป็นเวลา 3 นาที
6. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1000 โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาเป็นเวลา 5 นาที
7. ขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 1500 โดยหมุนเป็นวงกลมสลับซ้ายขวาเป็นเวลา 5 นาที
8. ขัดขอบชิ้นงานทุกชิ้นด้วยทุกครั้ง

หมายเหตุ***เวลาในการขัดชิ้นงานโดยใช้กระดาษทรายแต่ละเบอร์นั้นอาจปรับตามความหนาของชิ้นงานแต่ละชิ้น

หลังขัดชิ้นงานเสร็จแล้วก็เอาไปทำความสะอาดโดยเครื่อง Ultrasonic cleaner ยี่ห้อ ULTRASONIK รุ่น 28H ซึ่งมีความถี่ในช่วง 44-48 kHz มีขั้นตอนดังนี้

1. นำชิ้นงานที่ขัดแล้ววางในบีกเกอร์ ขนาด 150 ml แล้วเท Isopropanol ให้ท่วมชิ้นงาน
2. จากนั้นนำบีกเกอร์ใส่ลงในเครื่องอัลตราโซนิค
3. เปิดเครื่องอัลตราโซนิค (ที่ปุ่ม Heat ไม่ต้องปรับเนื่องจากไม่ได้ใช้ความร้อน)
4. เมื่อครบ 5 นาทีแล้วนำชิ้นงานออก ล้างด้วย Isopropanol อีกครั้งแล้วเช็ดให้แห้ง

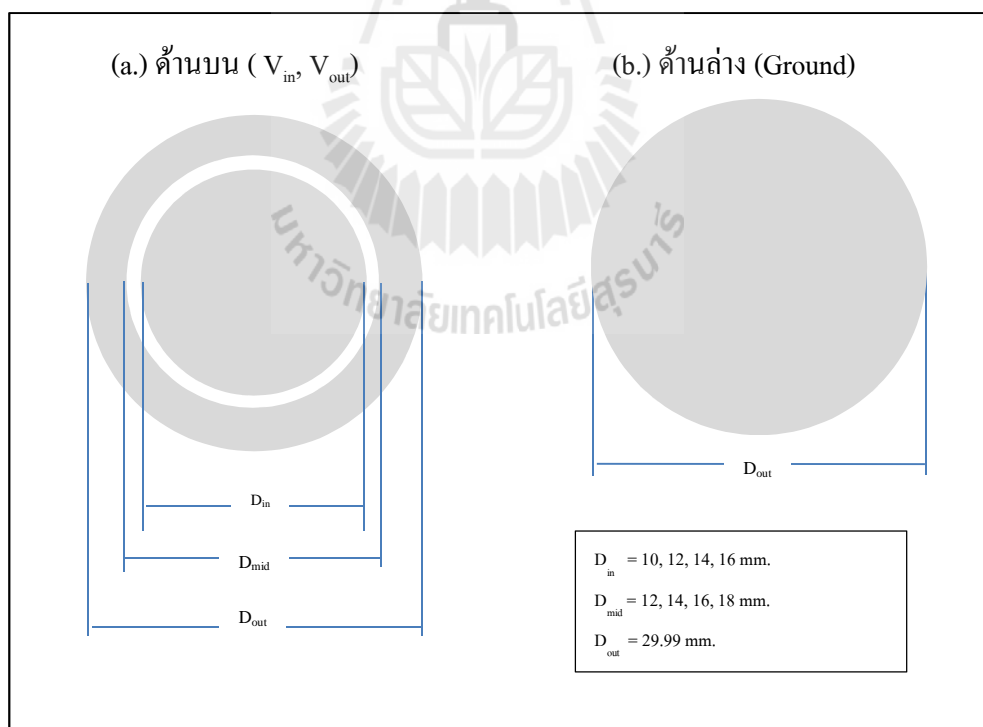
5. การเคลือบอิเล็กโทรด

ขั้นตอนที่สำคัญอีกขั้นตอนหนึ่งคือ การเคลือบสารตัวนำ หรืออิเล็กโทรด เพราะทั้งสองด้านของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกแบบวงแหวนนั้นจะเคลือบอิเล็กโทรดไม่เหมือนกัน ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.6 และมีขั้นตอนในการเคลือบอิเล็กโทรดมีดังนี้

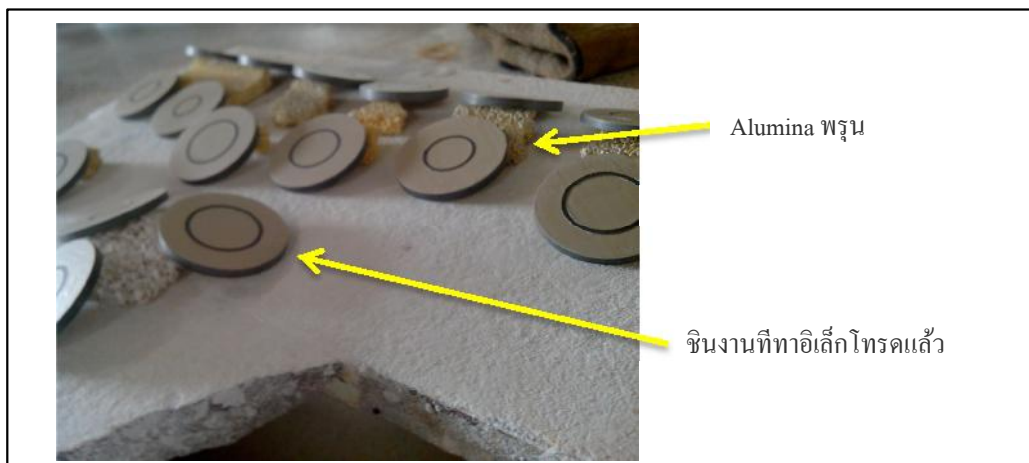
1. ผสมสารอิเล็กโทรด (electrode ยี่ห้อ ดูปองท์ – ซิลเวอร์พลาตินัม 7095 (60% Au-40%Pd) ชนิด Fire on electrode) กับ Isopropanol เพื่อให้สารไม่เหนียวเกินไป และเคลือบได้ง่ายขึ้น
2. เคลือบอิเล็กโทรดลงบนชิ้นงาน โดยเคลือบที่ด้านล่างที่ใช้เป็น Ground ก่อน แล้วทิ้งไว้ ให้แห้งสนิท
3. จากนั้นเคลือบอิเล็กโทรดที่ด้านบนให้เป็น V_{in} , V_{out} โดยทาอิเล็กโทรดเป็นสองวงดังรูปที่ 2.6a ส่วนที่เป็น Gap นั้นจะใช้สติ๊กเกอร์ติดไว้ป้องกันไม่ให้ อิเล็กโทรดในส่วน V_{in} , และ V_{out} สัมผัสกัน ทั้งยังช่วยให้เคลือบอิเล็กโทรดได้ง่ายขึ้น
4. เช็ดทำความสะอาดอิเล็กโทรดที่เปื้อนขอบชิ้นงานด้วย Isopropanol เพราะอิเล็กโทรดที่เปื้อนจะทำให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าลดลง เมื่อนำหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกไปเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าและใช้งานอาจทำให้เกิดการลัดวงจรได้

5. จัดเรียงชิ้นงานที่ผ่านการทาสีอิเล็กโทรดทั้งสองหน้าแล้ววางเรียงๆ บนชั้น Alumina พอร์ซิ่งวางอยู่บนแผ่นรองเผาดังรูปที่ 2.7 เพื่อให้ชิ้นงานให้สัมผัสกับแผ่น Alumina พอร์ซิ่งน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งจะช่วยให้รอยตำหนิของอิเล็กโทรดที่ทาบนชิ้นงานมีน้อยที่สุด
6. นำชิ้นงานที่จัดเรียงเสร็จแล้วเข้าเตาเผาเพื่อให้อิเล็กโทรดที่ทาติดแน่นบนชิ้นงาน โดยใช้ firing curve ดังแสดงในรูปที่ 2.8
7. เมื่อชิ้นงานเย็นลงมาถึงอุณหภูมิห้องแล้วเอาชิ้นงานออกมาจากเตา สังเกตว่าผิวชิ้นงานเป็นสีขาวๆ ซึ่งเป็นสีของ oxide ที่ติดบนผิวชิ้นงาน
8. ใช้ยางลบปากกา ลบ oxide บนผิวชิ้นงานออกไป หลังจากลบ oxide บนผิวชิ้นงานจะมีความมันวาวขึ้นมาก เพราะนั่นเป็นผิวของโลหะที่เคลือบบนผิวชิ้นงาน
9. ใช้ Isopropanol ทำความสะอาดผิวชิ้นงาน
10. นำชิ้นงานไปเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (poling)

ในงานวิจัยนี้ได้ผลิตหม้อแปลงไฟโซอิเล็กทริกขึ้นมา 32 ชิ้น ทุกชิ้นมี $D_{out} = 29.99$ มม. แต่ละชิ้นมีความหนาและ D_{in} และ D_{mid} แตกต่างกันทำให้พื้นที่หน้าตัดของส่วนที่เป็น input (A_{input}) และพื้นที่หน้าตัดส่วนที่เป็น output (A_{output}) แตกต่างกัน ทำให้มีสัดส่วนพื้นที่หน้าตัดด้าน input และ output (A_{input}/A_{output}) ต่างๆ กัน ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากตารางจะเห็นว่าชิ้นตัวอย่างที่ 1-xx กับชิ้นตัวอย่างที่ 2-xx มีความหนาและสัดส่วนพื้นที่หน้าตัดเท่ากันทั้งนี้เพื่อเป็นการทำการทดลองซ้ำเพื่อความเชื่อมั่นในผลการทดลองและสามารถนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ทางสถิติได้

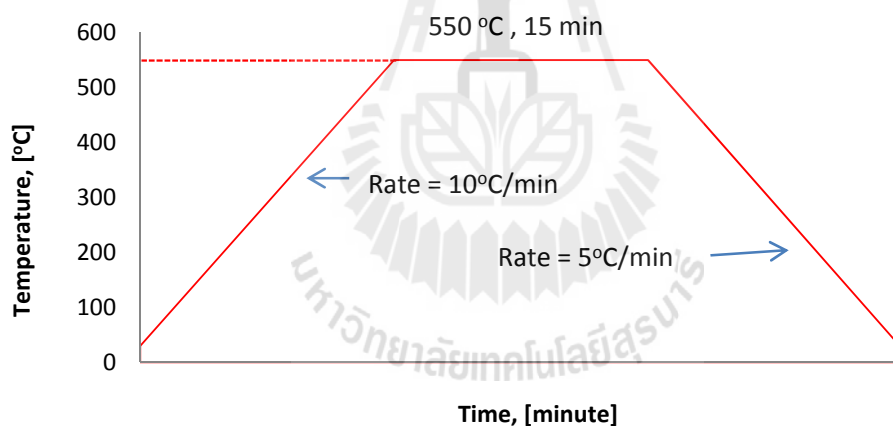


รูปที่ 2.6 การเคลือบอิเล็กโทรดด้านหน้าและด้านหลังชิ้นงาน



รูปที่ 2.7 การจัดเรียงชิ้นงานโดยวางเอียงๆ บนอะลูมินาพรุณซึ่งวางอยู่บนแผ่นรองเผา

หมายเหตุ***ในการเผาอิเล็กทรอนิกส์นั้น ไม่จำเป็นต้องโรยผงอะลูมินาบนแผ่นรองเผา เพราะผงอะลูมินาจะฟุ้งกระจายขณะเผาและไปติดอิเล็กทรอนิกส์ได้ ทั้งนี้การเผาอุณหภูมิ 550°C จะไม่มีวัสดุที่หลอมติดแผ่นรองเผาได้ ฉะนั้นจึงควรวางชิ้นงานพิงไว้กับอะลูมินาพรุณได้เลยโดยไม่ต้องโรยผงอะลูมินาบนแผ่นรองเผา



รูปที่ 2.8 Firing curve ในการเผาอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มจากเพิ่มอุณหภูมิของเตาเผาจากอุณหภูมิห้องขึ้นไปอยู่ที่ 550°C ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10°C/นาที จากนั้นแช่อุณหภูมิไว้ที่ 550°C เป็นเวลา 15 นาที แล้วลดอุณหภูมิของเตาลงมาที่อุณหภูมิห้องด้วยอัตราการลดอุณหภูมิ 5°C/นาที

ตารางที่ 2.1 ความหนาและสัดส่วนพื้นที่ด้าน input/output ของชิ้นงานโพลีเอทิลีนทริกในงานวิจัยนี้

Sample No.	Diameter, [mm.]	Thickness, [mm.]	Electrode area ratio, [A _{input} /A _{output}]
1-1	29.99	3.3	7.55
1-2	29.99	3.3	4.88
1-3	29.99	3.3	3.28
1-4	29.99	3.3	2.25
1-5	29.99	3.0	7.55
1-6	29.99	3.0	4.88
1-7	29.99	3.0	3.28
1-8	29.99	3.0	2.25
1-9	29.99	2.7	7.55
1-10	29.99	2.7	4.88
1-11	29.99	2.7	3.28
1-12	29.99	2.7	2.25
1-13	29.99	2.4	7.55
1-14	29.99	2.4	4.88
1-15	29.99	2.4	3.28
1-16	29.99	2.4	2.25
2-1	29.99	3.3	7.55
2-2	29.99	3.3	4.88
2-3	29.99	3.3	3.28
2-4	29.99	3.3	2.25
2-5	29.99	3.0	7.55
2-6	29.99	3.0	4.88
2-7	29.99	3.0	3.28
2-8	29.99	3.0	2.25
2-9	29.99	2.7	7.55
2-10	29.99	2.7	4.88
2-11	29.99	2.7	3.28
2-12	29.99	2.7	2.25
2-13	29.99	2.4	7.55
2-14	29.99	2.4	4.88
2-15	29.99	2.4	3.28
2-16	29.99	2.4	2.25

6. การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (Poling)

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในการเตรียมชิ้นงานทางด้านโพลีเอทิลีนทริก เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ทำให้เกิดการจัดเรียงขั้วของวัสดุประเภทนี้ การเหนี่ยวนำให้เกิดขั้วจะ apply สนามไฟฟ้าภายนอกขนาด 2.5 kV ต่อความหนา 1 มม. ที่อุณหภูมิ 90°C กระทำบนชิ้นงานที่ทำอีเล็กโทรดแล้ว โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำความสะอาดชิ้นงานด้วย Isopropanol แล้วใส่ชิ้นงานบน sample holder ในอ่างน้ำมันของเครื่อง pole (รูปที่ 2.9) โดยให้ ground ของชิ้นงานต่อกับขั้วบวกของเครื่อง pole

2. ให้ความร้อนอ่างน้ำมันของเครื่อง pole จนกระทั่งน้ำมันมีอุณหภูมิ 90°C
3. จ่ายไฟฟ้าเข้าไปที่ sample holder เพื่อ apply สนามไฟฟ้าเข้าไปยังชิ้นงานโดย ON ปุ่ม Power supply
4. ปรับปุ่ม current ไปที่ 110 เพื่อห้ามให้กระแสรั่วเกิน 0.4 mA แล้วเปิด Output
5. ปรับปุ่ม voltage จ่ายสนามไฟฟ้ากระแสตรงใส่ชิ้นตัวอย่างให้ได้ขนาด 2.5 kV/mm. เช่น ชิ้นงานหนา 3.0 mm. ต้องปรับ voltage ไปที่ 7.5 kV โดยปรับปุ่มอย่างช้าๆ หาก Power supply ตัดไฟ ให้ปรับกระแสให้ยอมรั่วเพิ่มได้อีก แต่ไม่ควรเกิน 0.4 mA แล้วปรับ voltage ต่อไปจนได้ 2.5 kV/mm. แล้วจับเวลา 15 นาที
6. เมื่อครบ 15 นาที ให้ปรับลดปุ่ม Current ลงจนกว่ากระแสไฟฟ้าจะตัดจาก Power supply เมื่อกระแสไฟฟ้าตัด ให้ปรับปุ่ม voltage ลงจนกว่าค่า voltage จะเหลือ 0 kV จึงนำชิ้นงานออก

นำชิ้นงานถัดไปใส่ลงในเครื่อง pole พักไว้สักครู่เพื่อให้ชิ้นงานปรับอุณหภูมิ จากนั้นให้ทำการ pole ตามขั้นตอนเดิมจนครบทุกชิ้นงาน



รูปที่ 2.9 อ่างน้ำมันของเครื่อง pole

7. การวัดสมบัติทางไพโซอิเล็กทริก

การวัดสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกนั้นจะหาสมบัติ 3 อย่าง คือ 1) Piezoelectric Charge Constant (d_{33}) ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่อง d_{33} Meter (รูปที่ 2.10) และ 2) Dielectric constant (K') หรือ relative permittivity (ϵ_r) ซึ่งไม่สามารถวัดได้โดยตรง แต่หาได้โดยวัดค่าความเก็บประจุ (C_p) จากเครื่อง Precision LCR Meter (รูปที่ 2.11) แล้วนำไปคำนวณหาค่า K' ซึ่งมีขั้นตอนการวัดดังต่อไปนี้

7.1. วิธีการวัดค่า Piezoelectric Charge Constant, d_{33}

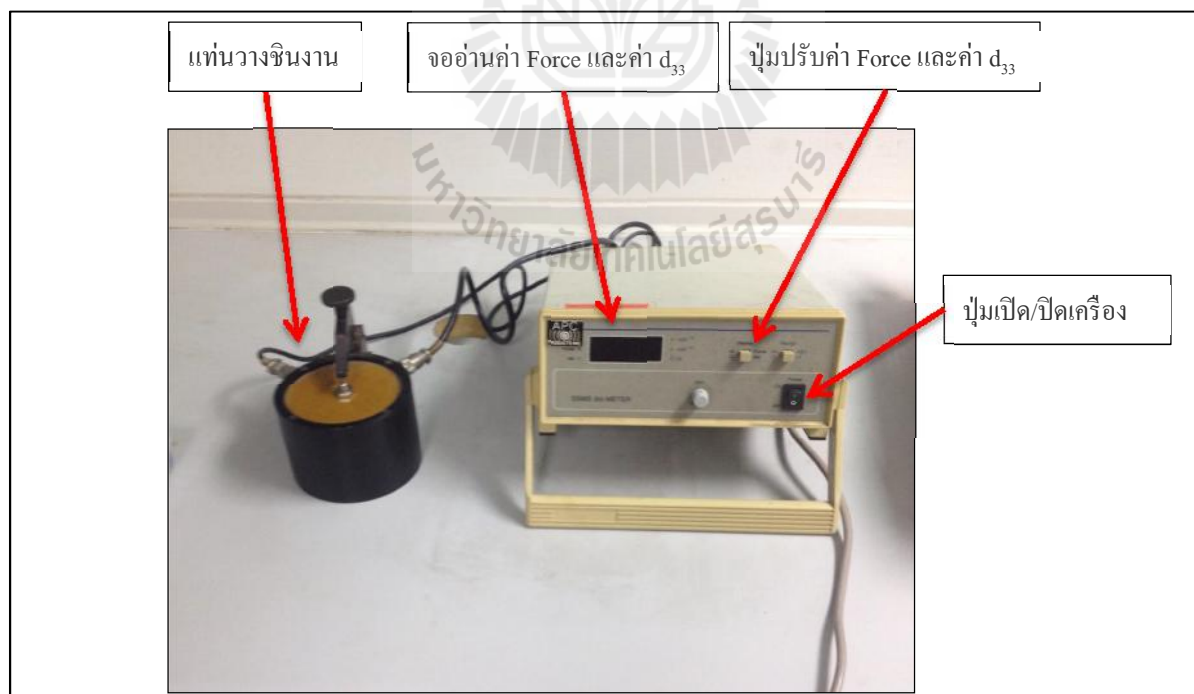
1. เมื่อทำการการเหนี่ยวนำหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกให้เกิดขั้วไฟฟ้าแล้ว ให้พักไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ขั้วของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ถูกจัดเรียงเกิดความเสถียร

2. เมื่อครบ 24 ชั่วโมงแล้ว นำหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกไปจัดเตรียมเพื่อวัดค่า d_{33} โดยวางบนแท่นวัด และใช้มือประคองไว้
3. เปิดเครื่องวัดค่า d_{33} แล้วให้เครื่องปรับความเสถียรสักครู่จึงทำการวัด
4. กดปุ่ม Force แล้วปรับปุ่มกดขึ้นงานให้ได้ Force 300 N
5. กดปุ่มอ่านค่า d_{33} แล้วบันทึกค่า
6. ทำซ้ำโดยวัดหลาย ๆ จุดบนหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกแต่ละชิ้นแล้วหาค่าเฉลี่ย
7. วัดค่า d_{33} จนครบทุกชิ้นงาน

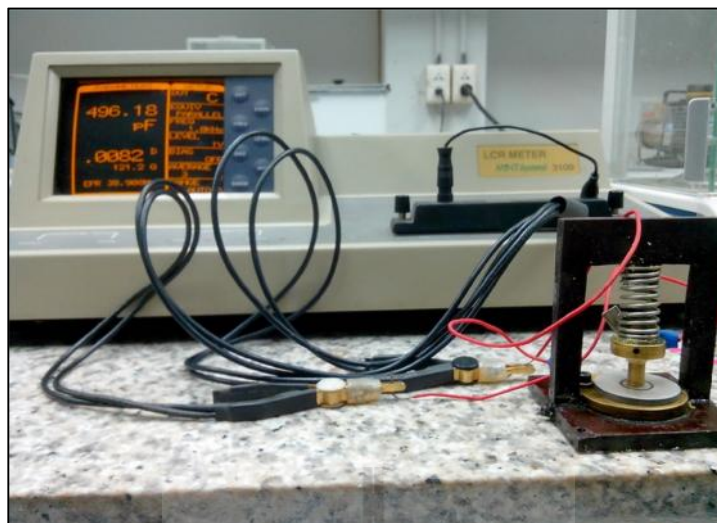
7.2. วิธีการหาค่า Dielectric constant หรือ Relative Permittivity (ϵ_r)

ในขั้นตอนนี้ใช้เครื่อง Precision LCR meter ยี่ห้อ Mini system 3100 วัดค่า C_p (Capacitance) และค่า D (Dielectric loss) ของชิ้นตัวอย่างแล้วนำ C_p ไปคำนวณค่า Relative dielectric constant (K') ซึ่งมีขั้นตอน ดังนี้

1. ถอดสายไฟที่พ่วงกับตัวเครื่องออกให้หมดก่อนเปิดเครื่อง LCR meter แล้วให้เครื่องปรับเสถียรภาพประมาณ 10 นาที
2. จากนั้น Calibration โดยเลือกโหมด open calibration
3. เมื่อ Calibration เสร็จให้นำหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกต่อเข้ากับเครื่อง LCR meter ดังรูปที่ 2.11
4. ปรับปุ่ม function ที่หน้าจอเครื่อง LCR meter ในการวัดดังนี้
 - DUT: C
 - EQUIV: PARALLEL
 - LEVEL: 1 V



รูปที่ 2.10 เครื่อง Piezoelectric d_{33} meter (APC 90-230)



รูปที่ 2.11 เครื่อง Precision LCR meter ยี่ห้อ Mini system รุ่น 3100

- FREQ: 1 kHz
 - BIAS: OFF
 - AVERAGE: 5
 - RANGE: AUTO 6
5. อ่านค่าที่จอมอนิเตอร์ของเครื่อง LCR meter โดยหน้าจอเครื่อง จะปรากฏค่า C_p (Capacitance) และค่า D (Dielectric loss) บันทึกค่า
 6. ทดลองจนครบทุกชิ้นงาน แล้วนำค่า C_p (Capacitance) และค่า D (Dielectric loss) ไปคำนวณหาค่า Relative dielectric constant (K') โดยใช้สูตร

$$C_p = \frac{K' \epsilon_0 A}{d}$$

เมื่อ K' คือ dielectric constant; ϵ_0 คือ Permittivity ของสุญญากาศเท่า 8.854×10^{-12} F/m;
 A คือพื้นที่หน้าตัดของตัวเก็บประจุ และ d คือความหนาของตัวเก็บประจุ

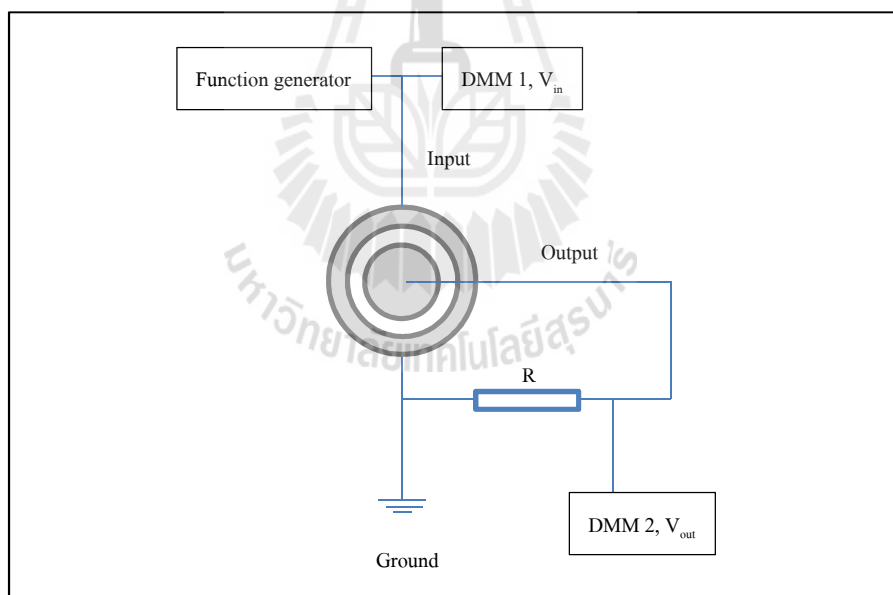
ขั้นตอนที่ 2 ทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

1. หา Resonance frequency และ V_{gain} ของหม้อแปลงไฟโอซิเล็กทริก

เมื่อจ่ายสัญญาณไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ V_{in} เข้าไปที่หม้อแปลงไฟโอซิเล็กทริก หม้อแปลงไฟโอซิเล็กทริกจะแปลงสัญญาณไฟฟ้าที่เข้ามาให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์ V_{out} ออกมา เรียกอัตราส่วนระหว่าง V_{out}/V_{in} ว่า V_{gain} ประสิทธิภาพของหม้อแปลงไฟโอซิเล็กทริกขึ้นกับความถี่สัญญาณไฟฟ้าและความต้านทาน (R) ในวงจรด้วย โดย V_{gain} จะมีค่าสูงสุดที่ความถี่เรโซแนนซ์ (resonance frequency) และความต้านทานไฟฟ้าที่เหมาะสม งานวิจัยนี้จึงทดลองศึกษา V_{gain} ของหม้อแปลงไฟโอซิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นในวงจรทดสอบเมื่อจ่ายไฟ V_{in} ที่มีความถี่ต่างๆ และ vary ค่า R ในวงจร

รูปที่ 2.12 เป็นวงจรสำหรับจ่ายไฟ V_{in} เข้าไปแล้ววัด V_{out} และหา V_{gain} ที่ความถี่ (Frequency) และ R ต่างๆ กัน ในวงจรมี digital multi meter (DMM) สองเครื่องในการวัดค่าแรงดันและความถี่ และใช้ Function generator เป็นแหล่งจ่ายสัญญาณ มีขั้นตอนการวัดดังนี้

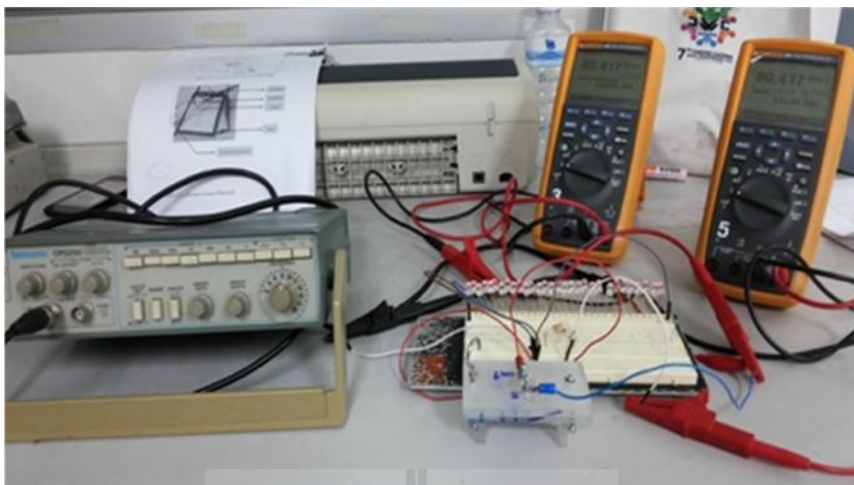
1. ต่ วงจรดังรูปที่ 2.12 ลงบนแผ่นโปรโตบอร์ด (Proto board) โดยใช้ตัวต้านทาน R = 100 k Ω , 300 k Ω และ 450 k Ω รูปที่ 2.13 เป็นวงจรที่ต่อจริง
2. ต่อสาย V_{in} และ Ground ของวงจรเข้ากับเครื่อง Function Generator
3. ใช้ digital multi meter ตัวที่ 1 (DMM 1) วัดความถี่และแรงดันตกคร่อม V_{in} และใช้ digital multi meter ตัวที่ 2 (DMM 2) วัดความถี่และแรงดันตกคร่อม V_{out}
4. เปิดเครื่อง Function Generator แล้วหมุนปรับ Amplitude ให้ $V_{in} = 3.0$ volts
5. ปรับปุ่ม Range เลือกย่านความถี่ในช่วง 1 kHz – 100 kHz เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก พร้อมทั้งบันทึกค่า V_{out} (อนึ่งก่อนเก็บข้อมูลผู้วิจัยได้ทดลอง vary ความถี่ที่จ่ายให้กับวงจรในช่วง 1-220 kHz พบว่าสามารถหา 1st Resonance Frequency ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตในการทดลองนี้ได้ในช่วง 70-80 KHz ในการเก็บข้อมูลจริงจึงเลือกย่านความถี่ 1-100 kHz)
6. บันทึกผล V_{in} , V_{out} และค่า Output Frequency ซึ่งดูได้จากจออนิเตอร์ของเครื่อง digital multi meter ทั้งสองตัวแล้วคำนวณ V_{gain} ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกทั้ง 32 ชิ้น



รูปที่ 2.12 วงจรที่ใช้หา Resonance frequency และ V_{gain} ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก

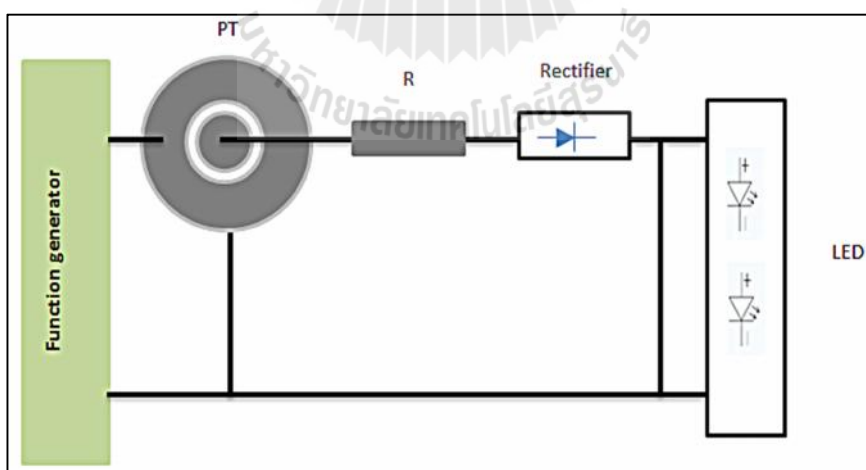
2 ทดสอบการใช้งานกับหลอด LED

เป็นการทดสอบเพื่อตรวจให้แน่ใจว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถใช้กับวงจรหลอด LED ได้ มีวิธีการทดลองดังนี้



รูปที่ 2.13 วงจรที่ใช้หา Resonance frequency และ V_{gain} ของหม้อแปลงไฟโอโซเล็กทริก

1. ต่อวงจรดังรูปที่ 2.14 โดยจากวงจรจะใช้ Load (R) ที่ให้แรงดัน output สูงสุด และใช้ fast recovery diode เป็น rectifier หลอด LED จะต่อแบบอนุกรมกัน แล้วนำหลอด LED ทั้งหมดมาต่อขนานกับวงจรอีกครั้ง
2. ต่อสาย V_{in} และ Ground ของวงจรเข้ากับเครื่อง Function Generator
3. ใช้ digital multi meter ตัวที่ 1 (DMM 1) วัดความถี่และแรงดันตกคร่อม V_{in} และใช้ digital multi meter ตัวที่ 2 (DMM 2) วัดความถี่และแรงดันตกคร่อม V_{out}
4. เปิดเครื่อง Function Generator แล้วหมุนปรับ Amplitude ให้ $V_{in} = 3.0$ volts
5. หมุนปรับค่า Frequency ไปที่ความถี่เรโซแนนซ์ของหม้อแปลงไฟโอโซเล็กทริกแต่ละชิ้น (ตัวอย่างแต่ละชิ้น จะมีความถี่เรโซแนนซ์ที่ไม่เท่ากัน)
6. ตรวจสอบว่าหลอด LED ส่องสว่างเพียงใด



รูปที่ 2.14 วงจรทดสอบการใช้งานหม้อแปลงไฟโอโซเล็กทริกสำหรับหลอด LED

ส่วนที่ 2 การนำโพซิโวลีเอทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

เตรียมหม้อแปลงโพซิโวลีเอทริกด้วยกรรมวิธีเหมือนๆ กับที่ใช้ในการทดลองส่วนที่ 1 แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยดังต่อไปนี้

- 1) การทดลองส่วนนี้ใช้ผง PZT สำเร็จรูป APC 844 ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้ APC 841 อย่างไรก็ตามได้รับการบอกเล่าจากบริษัท APC International Ltd. ว่า ผง APC 844 กับ APC 841 มี specification ต่างกันน้อยมาก
- 2) การทดลองส่วนนี้ใช้ผง APC 70 กรัม ในการอัดขึ้นรูปหม้อแปลงแต่ละชิ้น เพราะต้องการผลิตหม้อแปลงที่มีขนาดใหญ่ ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้ผง APC 18.85 กรัม ในการอัดขึ้นรูปหม้อแปลงแต่ละชิ้น เพราะต้องการผลิตหม้อแปลงที่มีขนาดเล็ก
- 3) การทดลองส่วนนี้อัดขึ้นรูปหม้อแปลงด้วยเครื่อง Uniaxial Hydraulic Press ยี่ห้อ Soil Testing Siam Compression Testing Machine cat. C41H2 ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้เครื่องอัด uniaxial hydraulic press ดังแสดงในรูปที่ 2.3
- 4) การทดลองส่วนนี้ใช้แม่แบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 57.56 มม. และใช้แรงอัด 30 ตัน ในการอัดขึ้นรูปหม้อแปลงแต่ละชิ้น ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้แม่แบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 34 มม. และใช้แรงอัด 18 ตัน ในการอัดขึ้นรูปหม้อแปลงแต่ละชิ้น
- 5) หลังจากอัด เฝامنึก และขัดแต่งแล้วชิ้นหม้อแปลงในการทดลองส่วนนี้มีความหนา 4.48 มม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 48.51 มม. ขณะที่ชิ้นงานของการทดลองส่วนที่ 1 มีความหนา 2.4, 2.7, 3.0 และ 3.3 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลาง 29.99 มม. ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงในการทดลองส่วนนี้มีความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่าหม้อแปลงในการทดลองส่วนที่ 1 ทั้งนี้เพราะหม้อแปลงในการทดลองส่วนนี้ใช้สำหรับหลอดโซเดียมความดันสูงซึ่งต้องใช้งานกับไฟฟ้าที่กำลังสูงและความต่างศักย์สูงกว่าหม้อแปลงในการทดลองส่วนที่ 1 ซึ่งใช้กับหลอด LED ซึ่งไม่ต้องใช้ไฟฟ้าที่มีกำลังและความต่างศักย์สูงมาก
- 6) หลังจากขัดแต่งแล้วทาอีเล็กโตรดด้านหน้าและหลังชิ้นงานทำให้หม้อแปลงในการทดลองส่วนนี้มีอีเล็กโตรดดังรูปที่ 2.6 อย่างไรก็ตาม D_{in} , D_{mid} และ D_{out} ของหม้อแปลงในการทดลองส่วนนี้มีค่าเท่ากับ 10, 14 และ 48.51 มม. ตามลำดับ ขณะที่ D_{in} , D_{mid} และ D_{out} ของหม้อแปลงในการทดลองส่วนที่ 1 มีค่าตรงกับตัวเลขในรูปที่ 2.6
- 7) การทดลองส่วนนี้เหนี่ยวนำให้เกิดขั้วไฟฟ้าบนหม้อแปลงโพซิโวลีเอทริกที่อุณหภูมิ 110°C ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 เหนี่ยวนำที่อุณหภูมิ 90°C
- 8) การทดลองส่วนนี้ใช้ Precision LRC meter ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 4284A ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ในการใช้วัด Capacitance สำหรับนำไปคำนวณหา K' ของชิ้นโพซิโวลีเอทริก แต่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้เครื่อง Precision LCR meter ยี่ห้อ Mini system รุ่น 3100 ดังแสดงในรูปที่ 2.11
- 9) วงจรที่ใช้หา resonance frequency และ V_{gain} ของการทดลองส่วนนี้ใช้วงจรดังรูปที่ 2.17 ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้วงจรดังรูปที่ 2.12 ซึ่งจริงๆ แล้วต่างกันไม่มากกล่าวคือวงจรในรูปที่ 2.12 เป็นวงจรที่จะอ่าน V_{out} จาก meter แต่วงจรในรูป 2.17 อ่าน V_{out} จาก oscilloscope
- 10) V_{in} ที่จ่ายเข้าไปในวงจรทดสอบ resonance frequency และ V_{gain} ของการทดลองส่วนนี้คือ 5 และ 10 volt ขณะที่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้ V_{in} 3 volt

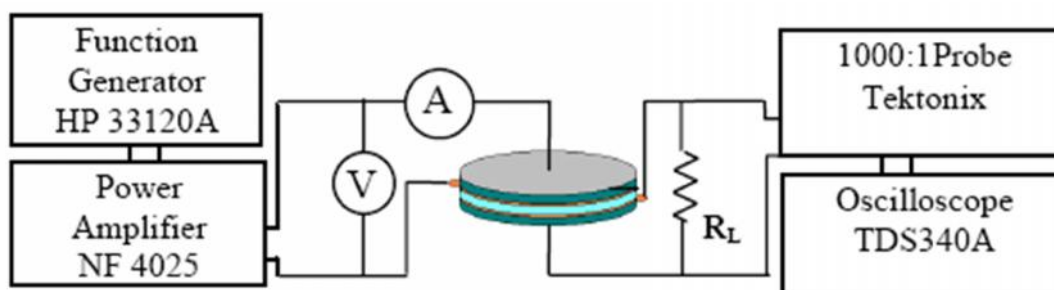
- 11) R_L ในรูปที่ 2.17 ของการทดลองส่วนนี้เท่ากับ R ในรูปที่ 2.12 ของการทดลองส่วนที่ 1 อย่างไรก็ตามการทดลองส่วนนี้ใช้ R_L ที่มีค่าเท่ากับ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 100 $k\Omega$ แต่การทดลองส่วนที่ 1 ใช้ R ที่มีค่าเท่ากับ 100, 300 และ 450 $k\Omega$
- 12) ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมในการทดลองส่วนนี้เตรียมขึ้นมา 4 ชิ้น แต่แตกเสียหาย 3 ชิ้น ใช้ได้จริงเพียงชิ้นเดียว



รูปที่ 2.15 เครื่อง Uniaxial Hydraulic Press ยี่ห้อ Soil Testing Siam Compression Testing Machine cat. C41H2



รูปที่ 2.16 เครื่อง Precision LRC meter ยี่ห้อ Hewlett Packard รุ่น 4284A



รูปที่ 2.17 วงจรที่ใช้หา Resonance frequency และ V_{gain} ของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริก



บทที่ 3 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

แบ่งผลการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนที่ 1 เป็นผลการทดลองเรื่องการนำไพโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับใช้กับหลอด LED และส่วนที่ 2 เป็นผลการทดลองเรื่องการนำไพโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับใช้กับหลอดโซเดียมความดันสูง

3.1 ส่วนที่ 1 การนำไพโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอด LED

3.1.1 สมบัติทางไพโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.1 แสดง piezoelectric charge constant (d_{33}) และ relative permittivity (ϵ_r) หรือ dielectric constant (K') ที่วัดได้จากการทดลองดังนี้

3.1.1.1 ค่า Piezoelectric charge constant, d_{33}

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 มีค่า d_{33} เฉลี่ยเท่ากับ 268 pC/N และหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 2-1 ถึง 2-16 มีค่า d_{33} 276 pC/N เมื่อเทียบกับ d_{33} ของ APC841 ในตารางที่ 1.3 จะเห็นได้ว่า d_{33} ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นจากการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่า d_{33} ของชิ้นไพโซอิเล็กทริกมาตรฐานของ APC841 จากบริษัทผู้ผลิตของ APC ที่ซื้อมาเล็กน้อยทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ผลิตจากโครงการนี้ได้รับการเหนี่ยวนำให้เกิดขั้ว (poling) ไม่สมบูรณ์เท่าขั้วของไพโซอิเล็กทริกจากบริษัทฯ อย่างไรก็ตาม d_{33} ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกจากโครงการนี้มีค่าสูงใกล้เคียงกับ d_{33} ของ APC841 จึงถือว่าหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ผลิตได้จากโครงการนี้จึงน่าจะใช้ได้พอสมควร

นำ d_{33} ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกชิ้นที่ 1-1 ถึง 1-16 จากตารางที่ 3.1 ไป plot กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง d_{33} กับ electrode area ratio; A_{input}/A_{output} ได้กราฟดังแสดงในรูปที่ 3.1a และ 3.1b ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่า d_{33} ของหม้อแปลงลดลงเล็กน้อยเมื่อ A_{input}/A_{output} เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังจะเห็นได้ว่า d_{33} ของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่อความหนาของหม้อแปลงเปลี่ยนไป เพื่อให้มั่นใจในผลการทดลองจึงทำการทดลองกับหม้อแปลงชุดที่ 2 (หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 2-1 ถึง 2-16) แล้ว plot กราฟได้ผลดังรูปที่ 3.1c และ 3.1d จากภาพจะเห็นได้ว่า d_{33} ของหม้อแปลงหมายเลขที่ 2-1 ถึง 2-16 ลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อหม้อแปลงมี A_{input}/A_{output} และความหนาเพิ่มขึ้น

3.1.1.2 ค่า Relative permittivity (V_r) หรือ dielectric constant (K')

จากตารางที่ 3.1 หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 มีค่า K' เฉลี่ยเท่ากับ 1844.86 และหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 2-1 ถึง 2-16 มีค่า K' เฉลี่ยเท่ากับ 1905.37 และเมื่อนำข้อมูลจากตาราง 3.1 ไปเทียบกับ K' ของชิ้นไพโซอิเล็กทริก APC481 มาตรฐานจากโรงงานผู้ผลิต APC ในตารางที่ 1.3 จะเห็นได้ว่า K' ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นในโครงการวิจัยนี้มีค่าสูงกว่า K' ของชิ้นไพโซอิเล็กทริก APC841 มาตรฐานจากโรงงานผู้ผลิต ยังไม่เป็นที่แน่ชัดว่าเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น

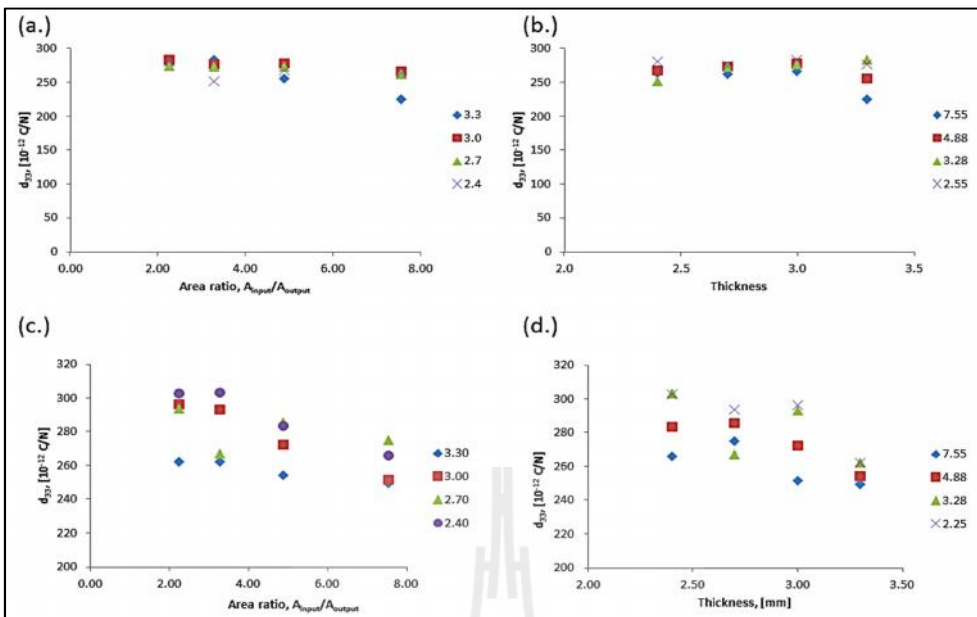
รูปที่ 3.2a และ 3.2b เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง K' กับ A_{input}/A_{output} และความหนาของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกตามลำดับของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 ส่วนรูปที่ 3.2c และ 3.2d เป็นกราฟเดียวกันของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 2-1 ถึง 2-16 จากภาพจะเห็นว่า K' ของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อ A_{input}/A_{output} และความหนาของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น

ความจริงแล้วทั้ง d_{33} และ K' เป็นสมบัติ (properties) ของวัสดุจึงไม่น่าจะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของวัสดุอันได้แก่ ความหนา อย่างไรก็ตามการทดลองนี้กลับพบว่า d_{33} และ K' เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความหนาและ $A_{\text{input}}/A_{\text{output}}$ ของหม้อแปลงเปลี่ยนแปลงไป ที่เป็นเช่นนี้อาจจะเป็นเพราะ 1) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจจะเป็นการเปลี่ยนแปลงที่เล็กน้อยและจริงๆ แล้วไม่มีนัยสำคัญ 2) การทดลองนี้ได้เคลือบอิเล็กโทรดลงบนผิวหม้อแปลงด้านบนแบบไม่เต็มหน้า (ดังแสดงในรูปที่ 2.6) ซึ่งปกติแล้วชิ้นตัวอย่างที่นำมาวัด d_{33} ต้องเคลือบอิเล็กโทรดแบบเต็มหน้าทั้งสองด้าน ดังนั้นผลการทดลองจึงอาจจะไม่ตรงกับทฤษฎี

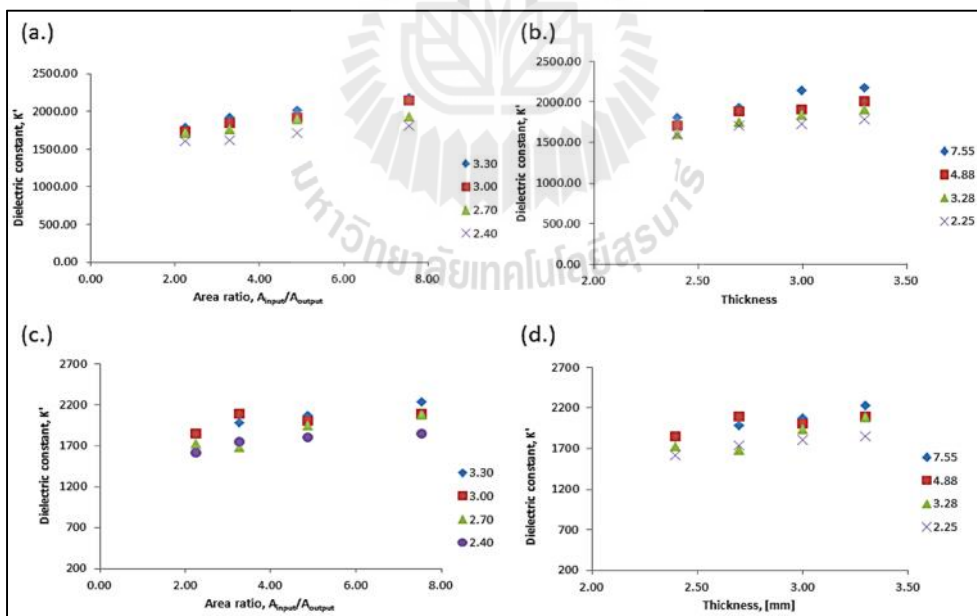
ตารางที่ 3.1 ขนาด electrode area ratio และสมบัติทางไพโซอิเล็กทริกของหม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นตามงานวิจัยนี้

Sample No.	Diameter, [mm.]	Thickness, [mm.]	Electrode area ratio [$A_{\text{input}}/A_{\text{output}}$]	d_{33} , [pC/N]	K' [unitless]
1-1	29.99	3.3	7.55	225	2182.59
1-2	29.99	3.3	4.88	255	2010.62
1-3	29.99	3.3	3.28	284	1912.39
1-4	29.99	3.3	2.25	278	1783.84
1-5	29.99	3.0	7.55	266	2139.97
1-6	29.99	3.0	4.88	278	1913.88
1-7	29.99	3.0	3.28	276	1846.29
1-8	29.99	3.0	2.25	283	1731.77
1-9	29.99	2.7	7.55	263	1928.74
1-10	29.99	2.7	4.88	272	1884.19
1-11	29.99	2.7	3.28	273	1755.96
1-12	29.99	2.7	2.25	274	1704.89
1-13	29.99	2.4	7.55	264	1807.04
1-14	29.99	2.4	4.88	268	1707.97
1-15	29.99	2.4	3.28	252	1611.74
1-16	29.99	2.4	2.25	280	1595.91
2-1	29.99	3.3	7.55	249	2225.20
2-2	29.99	3.3	4.88	254	2064.76
2-3	29.99	3.3	3.28	262	1974.34
2-4	29.99	3.3	2.25	262	1829.86
2-5	29.99	3.0	7.55	252	2087.03
2-6	29.99	3.0	4.88	272	1996.91
2-7	29.99	3.0	3.28	293	2087.35
2-8	29.99	3.0	2.25	296	1843.47
2-9	29.99	2.7	7.55	275	2075.16
2-10	29.99	2.7	4.88	285	1933.52
2-11	29.99	2.7	3.28	267	1673.63
2-12	29.99	2.7	2.25	294	1718.24
2-13	29.99	2.4	7.55	266	1838.60
2-14	29.99	2.4	4.88	283	1792.77
2-15	29.99	2.4	3.28	303	1733.97
2-16	29.99	2.4	2.25	303	1611.11

หมายเหตุ หม้อแปลงไพโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 Pole ภายใต้สนามไฟฟ้า 2.5 kV/mm ในน้ำมันพีซอลูม 90°C และหมายเลข 2-1 ถึง 2-16 Pole ภายใต้สนามไฟฟ้า 2.5 kV/mm ในน้ำมันซิลิโคนอุณหภูมิ 90°C



รูปที่ 3.1 ผลของสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด (A_{input}/A_{output}) และความหนา (Thickness) ของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกแบบวงแหวน ต่อค่า Piezoelectric charge constant, d_{33} โดยแกน Y แสดงค่า d_{33} แกน X สัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด(A_{input}/A_{output}) และความหนา (Thickness) กราฟ (a) และ (b) แสดงข้อมูลของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 กราฟ (c) และ (d) แสดงข้อมูลของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกหมายเลข 2-1 ถึง 2-16



รูปที่ 3.2 ผลของสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด (A_{input}/A_{output}) และความหนา (Thickness) ของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกแบบวงแหวน ต่อค่า Relative dielectric constant (K') โดยแกน Y แสดงค่า K' แกน X สัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด(A_{input}/A_{output}) และความหนา (Thickness) กราฟ (a) และ (b) แสดงข้อมูลของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 กราฟ (c) และ (d) แสดงข้อมูลของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกหมายเลข 2-1 ถึง 2-16

3.1.2 สมบัติทางไฟฟ้า

ตารางที่ 3.2 แสดง 1^{st} resonance frequency (วัดที่ด้าน output ของวงจรในรูปแบบที่ 2.12) และ V_{gain} (V_{out}/V_{in}) ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่เตรียมขึ้นมาในงานวิจัยนี้ เมื่อ apply V_{in} 3 volt เข้าไปในวงจรทดสอบและต่อ R ที่มีค่า 100 k Ω , 300 k Ω และ 450 k Ω จากตารางจะเห็นได้ว่า 1^{st} Resonance Frequency มีค่าอยู่ในช่วง 76 – 80 kHz และ V_{gain} มีค่าต่ำสุด 8.70 และสูงสุดถึง 98.97 นำข้อมูลจากตาราง 3.2 มา plot กราฟระหว่าง V_{gain} ต่อสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด (A_{input}/A_{output}) และ V_{gain} ต่อความหนา และ V_{gain} ต่อ R

3.1.2.1 ผลของสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด (electrode area ratio) ต่อ V_{gain} (V_{out}/V_{in})

รูปที่ 3.3a - 3.3c เป็นกราฟแสดง V_{gain} ต่อ A_{input}/A_{output} ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 ในวงจรที่ต่อ R 100 k Ω , 300 k Ω และ 450 k Ω ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 3.3d - 3.3f เป็นกราฟ V_{gain} ต่อ A_{input}/A_{output} ของหม้อแปลงหมายเลข 2-1 ถึง 2-16 จากภาพจะเห็นได้ว่ากราฟมีการกระจายตัวมาก จึงไม่สามารถบอกแนวโน้มได้ชัดเจนว่า V_{gain} เปลี่ยนแปลงตาม A_{input}/A_{output} และ R ของวงจรทดสอบ ผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับจากงานวิจัยของ สุธรรม ศรีหล่มสักและคณะ [11] ซึ่งพบว่าเมื่อ A_{input}/A_{output} เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า V_{gain} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเป็นเพราะงานวิจัยนี้ apply V_{in} 3 volt แต่งานของสุธรรมและคณะ [11] apply V_{in} 10 และ 15 volt

3.1.2.2 ผลของความหนา (Thickness) ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกต่อ V_{gain} (V_{out}/V_{in})

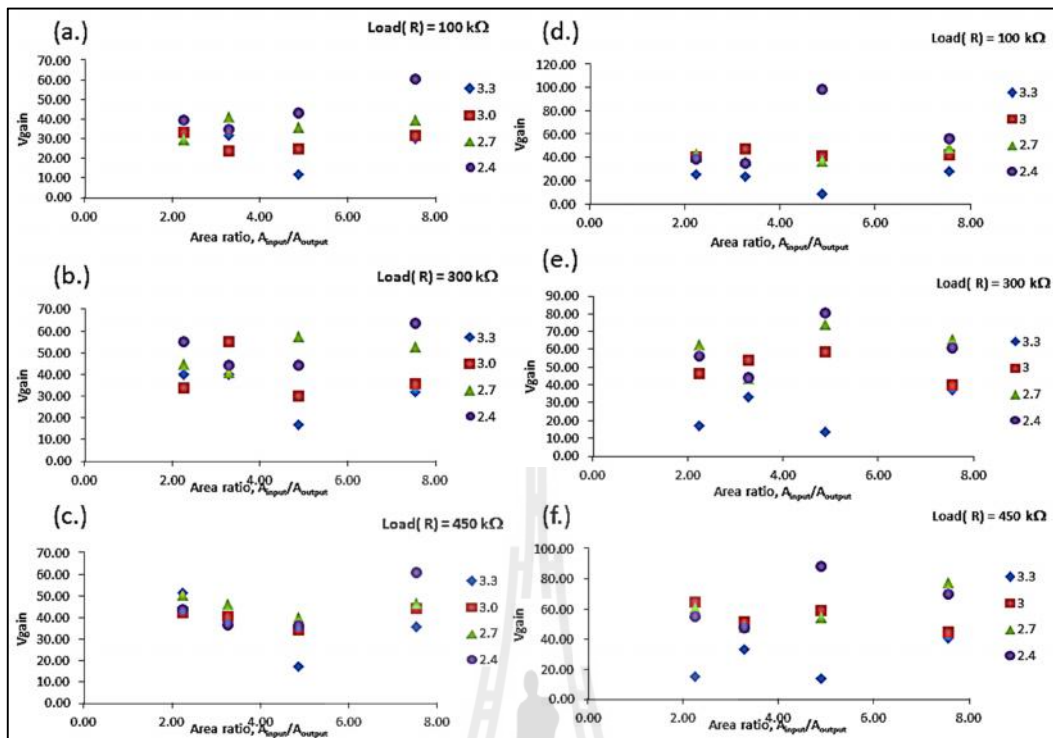
รูปที่ 3.4a - 3.4c เป็นกราฟแสดง V_{gain} ต่อความหนาของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 ในวงจรที่ต่อ R 100 k Ω , 300 k Ω และ 450 k Ω ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่า V_{gain} มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อหม้อแปลงมีความหนามากขึ้น เพื่อยืนยันผลการทดลองจึงนำข้อมูลของหม้อแปลงหมายเลขที่ 2-1 ถึง 2-16 มา plot กราฟได้เป็นรูปที่ 3.4d - 3.4f กราฟมีแนวโน้มในทำนองเดียวกันกับกราฟในรูปที่ 3.4a - 3.4c กล่าวคือ V_{gain} มีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อหม้อแปลงหนามากขึ้น อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ขัดแย้งกับผลการทดลองของ สุธรรม ศรีหล่มสักและคณะ [11] ที่พบว่า V_{gain} ไม่เปลี่ยนแปลงตามการความหนาของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้อาจจะเป็นเพราะงานวิจัยนี้ vary ความหนาหม้อแปลงในช่วง 2.4-3.3 มม. แต่งานวิจัยของสุธรรมและคณะ [11] vary ความหนาหม้อแปลงในช่วง 2.0-3.0 มม.

3.1.2.3 ผลของ Load (R) ต่อค่า V_{gain}

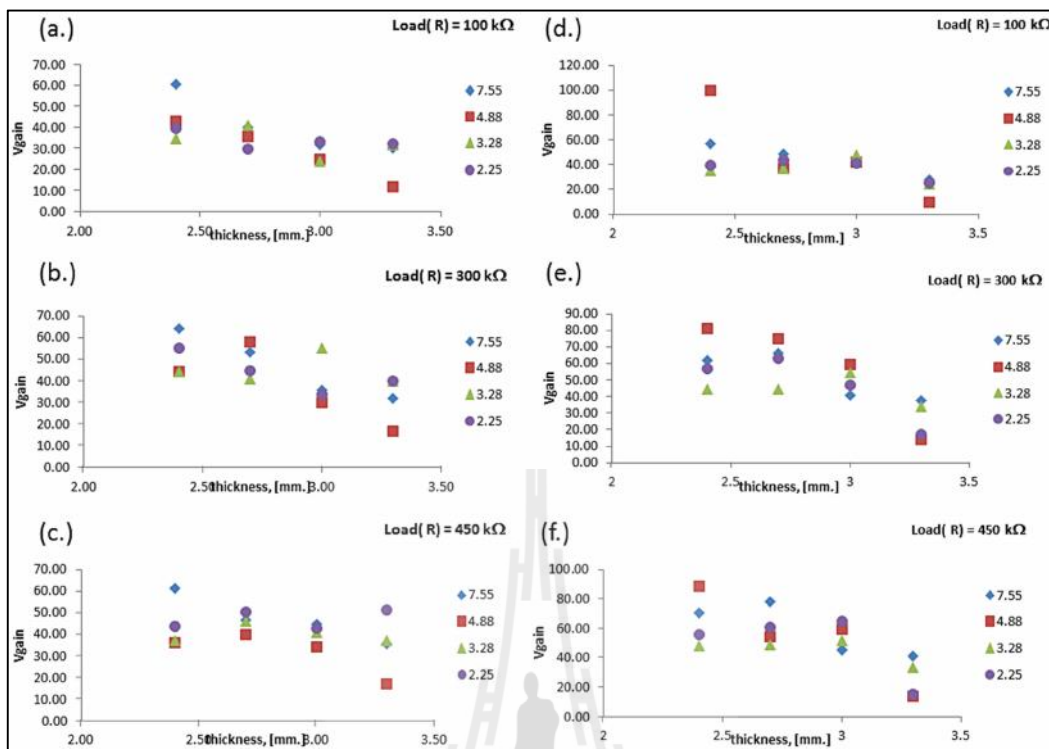
รูปที่ 3.5a เป็นกราฟแสดง V_{gain} เฉลี่ยต่อ Load (R) ที่ต่อในวงจรทดสอบของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกชิ้นที่ 1-1 ถึง 1-16 และ 3.5b เป็นกราฟเดียวกันของหม้อแปลงชิ้นที่ 2-1 ถึง 2-16 อนึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ R = 100 k Ω , 300 k Ω และ 450 k Ω เท่านั้นเพราะผู้วิจัยได้ทดลองใช้ R ต่ำกว่า 100k Ω แล้วปรากฏว่าไม่สามารถวัด V_{gain} ได้ และได้ทดลองใช้ R สูงกว่า 450 k Ω แล้วปรากฏว่า V_{gain} ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก จากรูป 3.5a และ 3.5b จะเห็นได้ชัดว่า V_{gain} ของหม้อแปลงมีค่ามากขึ้นเมื่อใช้ R ในวงจรทดสอบมากขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น งานวิจัยของ สุธรรม ศรีหล่มสักและคณะ [11]

ตารางที่ 3.2 1^{st} resonance frequency ($1^{\text{st}} F_R$) และ V_{gain} ของหม้อแปลงไพเอโซอิเล็กทริกที่มีความหนาและสัดส่วนพื้นที่ electrode ต่างๆ ในวงจรที่ต่อ load (R) ขนาดต่างๆ

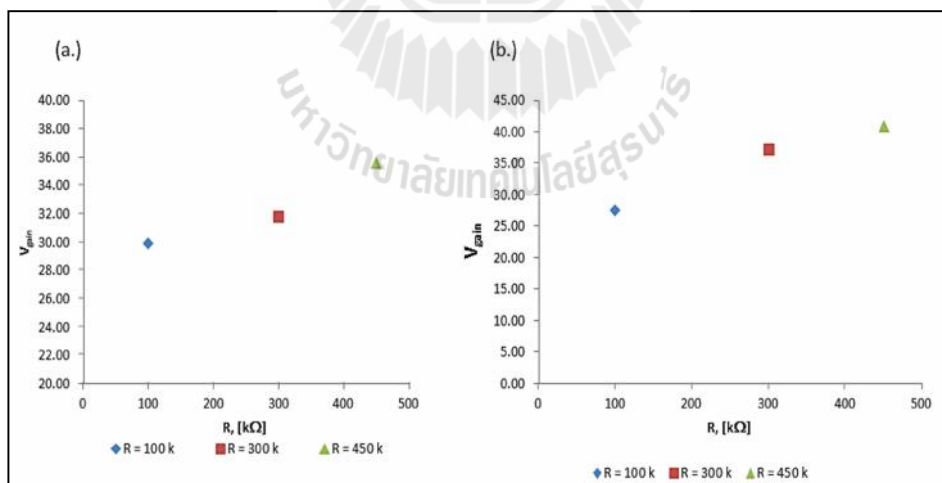
Sample No.	Thickness, [mm.]	Electrode area ratio	R = 100 k Ω		R = 300 k Ω		R = 450 k Ω	
			$1^{\text{st}} F_R$, [kHz]	V_{gain} ($V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$)	$1^{\text{st}} F_R$, [kHz]	V_{gain} ($V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$)	$1^{\text{st}} F_R$, [kHz]	V_{gain} ($V_{\text{out}}/V_{\text{in}}$)
1-1	3.3	7.55	77	29.88	77	31.77	77	35.57
1-2	3.3	4.88	78	11.74	78	16.75	78	17.22
1-3	3.3	3.28	79	31.41	79	39.78	79	37.07
1-4	3.3	2.25	80	32.22	80	39.99	80	51.17
1-5	3.0	7.55	77	31.62	77	35.71	77	44.30
1-6	3.0	4.88	78	24.54	78	29.84	78	34.08
1-7	3.0	3.28	79	23.60	78	55.18	79	40.54
1-8	3.0	2.25	80	32.94	80	33.69	80	42.43
1-9	2.7	7.55	77	39.62	77	52.89	77	46.51
1-10	2.7	4.88	78	35.64	78	57.55	78	39.80
1-11	2.7	3.28	79	41.00	79	40.74	79	45.95
1-12	2.7	2.25	81	29.41	81	44.64	81	50.41
1-13	2.4	7.55	78	60.30	78	63.80	78	61.09
1-14	2.4	4.88	78	42.93	78	44.09	78	36.19
1-15	2.4	3.28	79	34.43	79	44.12	79	36.86
1-16	2.4	2.25	80	39.33	80	54.93	80	43.82
2-1	3.3	7.55	76.0	27.44	76	37.12	76	40.89
2-2	3.3	4.88	78.0	8.70	76	13.48	76	13.80
2-3	3.3	3.28	78.6	23.73	78	33.37	78	33.28
2-4	3.3	2.25	79.4	24.90	80	16.79	80	14.84
2-5	3.0	7.55	76.7	41.93	77	40.28	77	44.92
2-6	3.0	4.88	77.5	41.47	77	58.66	78	59.08
2-7	3.0	3.28	78.5	47.16	79	53.77	79	51.55
2-8	3.0	2.25	79.8	40.64	80	46.28	80	64.75
2-9	2.7	7.55	76.5	48.24	77	65.78	76	77.45
2-10	2.7	4.88	78.7	36.29	79	74.47	79	54.33
2-11	2.7	3.28	78.8	36.43	79	43.82	79	48.64
2-12	2.7	2.25	80.0	42.90	80	62.85	80	60.29
2-13	2.4	7.55	78.8	56.16	79	61.12	79	69.92
2-14	2.4	4.88	79.0	98.97	79	80.40	79	88.32
2-15	2.4	3.28	79.5	34.81	79	43.98	79	47.64
2-16	2.4	2.25	82.3	38.59	82	56.45	82	55.31
			Max =	98.97	Max =	80.4	Max =	88.32



รูปที่ 3.3 กราฟแสดง V_{gain} ต่อสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด ($A_{\text{input}}/A_{\text{output}}$) ของหม้อแปลงไฟโซลิดสเตทที่หนา 2.4, 2.7, 3.0 และ 3.3 มม. วัดในวงจรที่ต่อความต้านทาน (load) $R = 100 \text{ k}\Omega$, $300 \text{ k}\Omega$ และ $450 \text{ k}\Omega$ รูป (a), (b) และ (c) เป็นกราฟของหม้อแปลงหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 และกราฟ (d), (e) และ (f) เป็นกราฟของหม้อแปลงหมายเลข 2-1 ถึง 2-16



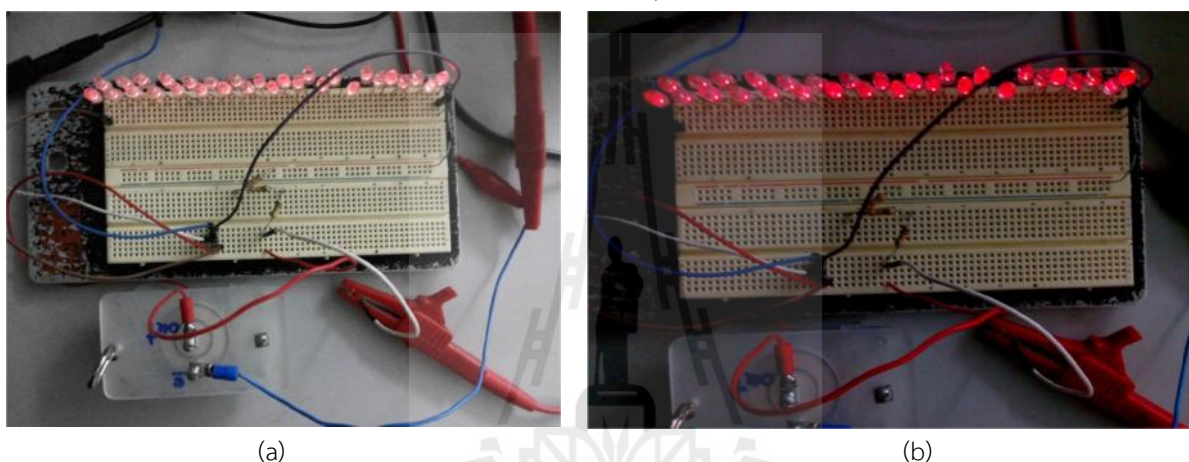
รูปที่ 3.4 กราฟแสดง V_{gain} ต่อความหนาของหม้อแปลงไฟอ์โซอิเล็กทริกที่มีสัดส่วนพื้นที่อิเล็กโทรด (A_{input}/A_{output}) 2.25, 3.28, 4.88 และ 7.55 วัดในวงจรที่ต่อความต้านทาน (load) R = 100 k Ω , 300 k Ω และ 450 k Ω รูป (a), (b) และ (c) เป็นกราฟของหม้อแปลง หมายเลข 1-1 ถึง 1-16 และกราฟ (d), (e) และ (f) เป็นกราฟของหม้อแปลงหมายเลข 2-1 ถึง 2-16



รูปที่ 3.5 กราฟแสดง V_{gain} ต่อ ความต้านทาน (load) R ที่ต่อในวงจรทดสอบของหม้อแปลงไฟอ์โซอิเล็กทริก รูป (a), (b) และ (c) เป็นกราฟของหม้อแปลงหมายเลข 1-1 ถึง 1-16 และรูป (d), (e) และ (f) เป็นกราฟของหม้อแปลงหมายเลข 2-1 ถึง 2-16

3.1.3 ผลการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นกับวงจรสำหรับหลอด LED

เพื่อทดลองนำหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ไปใช้จุดหลอด LED ได้จริงโดยต่อวงจรตามรูปที่ 2.14 ใช้ R 450kΩ ปรากฏหม้อแปลงทุกชิ้นที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ (หม้อแปลง 1-1 ถึง 1-16 และหม้อแปลง 2-1 ถึง 2-16) สามารถจุดหลอด LED 30 หลอดได้ รูปที่ 3.6 เป็นตัวอย่างการจุดหลอด LED ของหม้อแปลงชิ้นหนึ่ง อนึ่งเนื่องจากแหล่งจ่ายไฟที่ใช้จ่ายไฟฟ้าเข้าไปในหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกในงานวิจัยนี้เป็น Function generator ขนาดเล็กที่สามารถจ่ายไฟฟ้าที่มีแรงดันไม่เกิน 8 volts และหลอด LED แต่ละหลอดต้องใช้แรงดันตกคร่อม 3.0 volts ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงใช้หลอด LED เพียง 30 หลอด ถือว่าเป็นการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นเพื่อดูว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นมาสามารถจุดหลอด LED สว่างได้หรือไม่เท่านั้น หากต้องการทดสอบดูว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นสามารถใช้จุดหลอด LED ได้มากที่สุดก็หลอดต้องใช้เครื่องมือที่สามารถจ่ายไฟฟ้าได้มากกว่านี้และต้องออกแบบวงจรที่มีระบบ safety มากกว่านี้เพื่อความปลอดภัยด้วย



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างผลการทดสอบการใช้งานหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกไปจุดหลอด LED 30 หลอด a) ในที่สว่าง b) ในที่มืด

3.2 ส่วนที่ 2 การนำไฟโอโซอิเล็กทริกไปใช้ทำหม้อแปลงสำหรับหลอดโซเดียมความดันสูง

3.2.1 สมบัติทางไฟโอโซอิเล็กทริก

ตารางที่ 3.3 แสดง piezoelectric charge constant (d_{33}) และ relative permittivity (ϵ_r) หรือ dielectric constant (K') ที่วัดได้จากการทดลองดังนี้

3.2.1.1 ค่า Piezoelectric charge constant, d_{33}

จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นในการทดลองนี้มีค่า d_{33} เฉลี่ยเท่ากับ 242.67 pC/N เมื่อเทียบกับค่า d_{33} ของ APC844 ของบริษัท APC international Ltd. (ตารางที่ 1.3) ซึ่งเท่ากับ 300 pC/N จะเห็นว่า d_{33} ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตได้จากการทดลองนี้มีค่าต่ำกว่า specification เล็กน้อยทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะในการทดลองนี้วัด d_{33} จากชิ้นตัวอย่างที่ฉาบด้วย electrode ที่มีรูปร่างไม่ได้ตามมาตรฐาน กล่าวคือปกติแล้วชิ้นงานที่นำมาวัด d_{33} ควรจะมีฉาบด้วยอิเล็กโทรดเต็มทั้งสองหน้า ขณะที่ชิ้นงานไฟโอโซอิเล็กทริกที่นำไปวัด d_{33} ในการทดลองนี้ฉาบด้วยอิเล็กโทรดไม่เต็มดังรูปที่ 2.6

3.2.1.2 ค่า Relative permittivity (ϵ_r) หรือ dielectric constant (K')

จากตารางจะเห็นได้ว่า K' ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่วัดจากการทดลองนี้มีค่ามากกว่า K' ของ APC844 ตาม specification ของบริษัท APC international Ltd. (ตารางที่ 1.3) ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะเครื่อง Precision LRC meter ยี่ห้อ

Hewlett Packard รุ่น 4284A ที่ใช้ในการวัด capacitance แล้วนำไปคำนวณ K' ในการทดลองส่วนนี้อาจจะเสื่อมสภาพแล้ว เพราะตอนที่ไปยืมเครื่องมาใช้เครื่องอยู่ในโกดังเก็บของไม่มีคนดูแล

ตารางที่ 3.3 ขนาด electrode area ratio และสมบัติทางไฟโอโซอิเล็กทริกของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นตามงานวิจัยนี้

Sample No.	Diameter [mm.]	Thickness [mm.]	Electrode area ratio, $[A_{input}/A_{output}]$	d_{33} , [pC/N]	K' [unitless]
1	48.51	4.48	21.60	242.67	36000

3.2.2 สมบัติทางไฟฟ้า

3.2.2.1 V_{gain} และ Resonance frequency

ตารางที่ 3.4 แสดง V_{out} ที่วัดได้เมื่อ apply ความต่างศักย์ (V_{in}) ขนาด 5 และ 10 V ที่ frequency ต่างๆ ใส่ขึ้นไฟโอโซอิเล็กทริก ที่ต่อในวงจรทดสอบ รูปที่ 2.17 ที่ใช้ $R_L = 20k\Omega$ นำ V_{in} ไปหาร V_{out} ได้ $V_{step up}$ หรือ V_{gain} ซึ่งเป็นตัวเลขที่บอกว่าเมื่อ apply ความต่างศักย์ใส่ขึ้นไฟโอโซอิเล็กทริกแล้วขึ้นไฟโอโซอิเล็กทริกจะแปลงเป็นความต่างศักย์ที่สูงกว่าเดิมกี่เท่าออกมา column ที่ 3 และ column ที่ 6 ของตารางที่ 3.4 และรูปที่ 3.7 และ 3.8 แสดง V_{gain} จากตารางและรูปจะเห็นว่า V_{gain} มีค่าไม่เท่ากันแต่เปลี่ยนไปกับความถี่ของกระแสไฟฟ้าที่ apply ใส่หม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริก ที่ความถี่ resonance วัสดุไฟโอโซอิเล็กทริกจะสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลและเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดดังนั้นที่ความถี่นี้จะได้ V_{gain} มากที่สุด จากภาพและตารางจะเห็นว่าผลการทดลองนี้พบว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่สร้างขึ้นนี้มี resonance frequency ที่ความถี่ประมาณ 47 kHz และเมื่อ apply V_{in} เท่ากับ 5 และ 10 volt จะได้ V_{gain} ที่ resonance frequency ประมาณ 20.5 และ 18 เท่าตามลำดับ

ทำการทดลองแบบเดียวกันกับข้างต้นแต่เปลี่ยน R_L จาก $20k\Omega$ เป็น 10, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ $100k\Omega$ พบว่าเมื่อ apply V_{in} 5 volt ใส่ขึ้นไฟโอโซอิเล็กทริกได้ V_{out} , V_{gain} และ resonance frequency ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และรูปที่ 3.9 และเมื่อ apply V_{in} 10 volt ใส่ขึ้นไฟโอโซอิเล็กทริกได้ V_{out} , V_{gain} และ resonance frequency ดังแสดงในตารางที่ 3.6 และรูปที่ 3.10 จากตารางและรูปจะเห็นว่า resonance frequency เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเปลี่ยน R_L ที่ต่อในวงจรและ V_{in} แต่อย่างไรก็ตาม V_{gain} เปลี่ยนแปลงมากเมื่อเปลี่ยน R_L กล่าวคือตอนแรกๆ เมื่อเพิ่ม R_L V_{gain} จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ต่อมาเมื่อเพิ่ม R_L ถึงระดับหนึ่ง V_{gain} แทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยเมื่อเพิ่ม R_L ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของสุธรรมและคณะ [11]

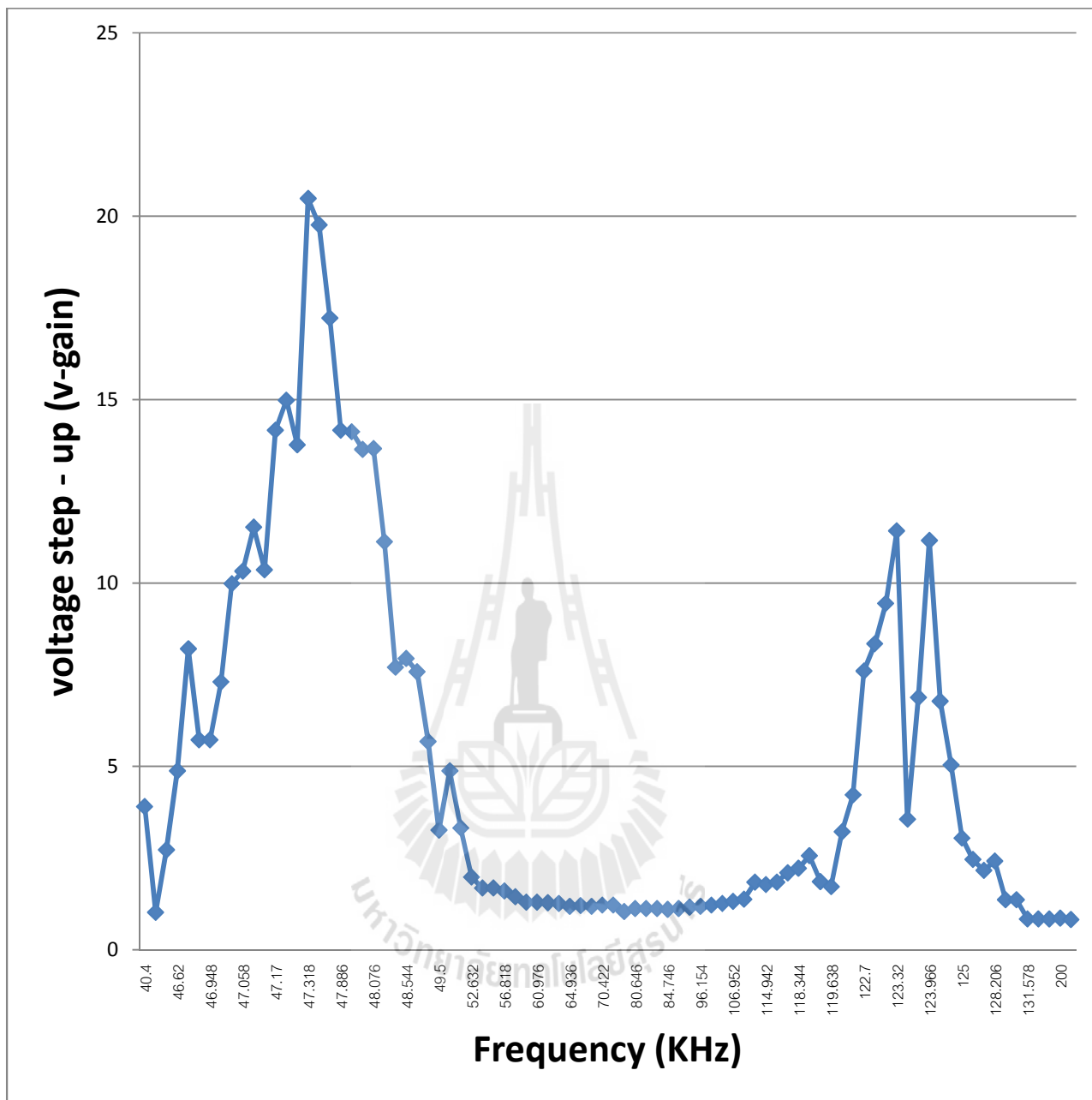
3.2.3 ผลการทดสอบการใช้งานเบื้องต้นกับวงจรสำหรับหลอดหลอดโซเดียมความดันสูง

เพื่อทดสอบว่าหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปจุดหลอดโซเดียมความดันสูงได้หรือไม่จึงทดลองนำหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกที่ผลิตขึ้นในงานวิจัยนี้ไปต่อเข้ากับวงจรหลอดโซเดียมความดันสูงจริง ปรากฏว่าสามารถจุดหลอดโซเดียมความดันสูงได้แต่เกิดความร้อนที่หม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทริกมากจนตะกั่วเชื่อมหลอมจึงไม่สามารถทดสอบต่อไปได้ เป็นที่น่าเสียดายที่ไม่ได้ถ่ายภาพผลการทดลองส่วนนี้ไว้เพราะได้ทำการทดลองที่ห้อง lab ของ รศ. ดร. ธีรศักดิ์ กุลสุวรรณิชพงษ์ [23] จึงได้รับทราบผลการทดลองเป็นนิตินัยเท่านั้น

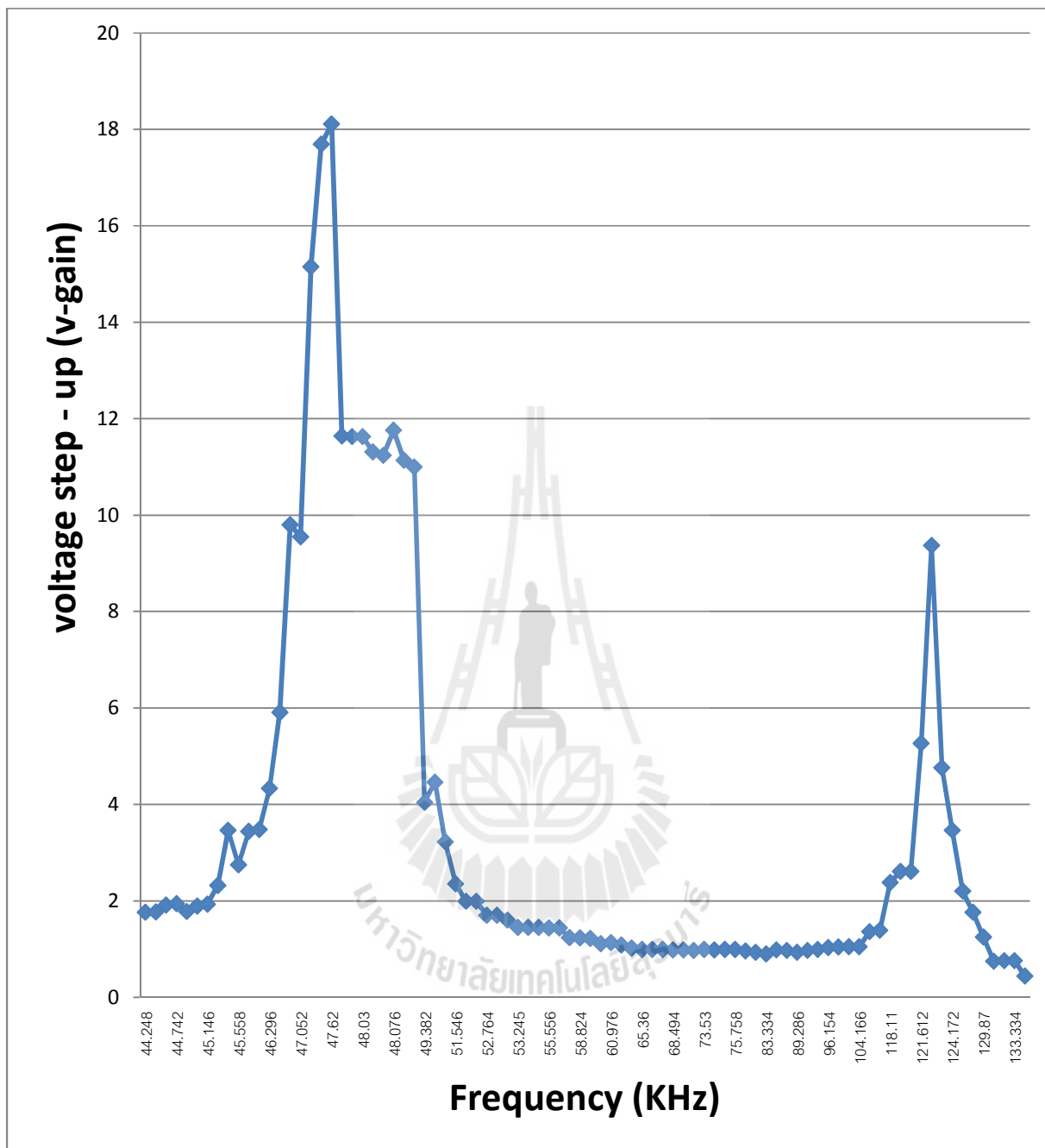
ตารางที่ 3.4 V_{out} และ V_{gain} เมื่อ apply ความต่างศักย์ V_{in} 5 และ 10volt ใส่ชิ้นโพธิ์โซลิต์กริกในวงจรทดสอบที่มี $R_L = 20k\Omega$

V_{in} 5 volt			V_{in} 10 volt		
V_{out} (V)	f(kHz)	V_{gain}	V_{out} (V)	f(kHz)	V_{gain}
19.5	40.4	3.9	17.6	44.248	1.76
5.1	42.736	1.02	17.7	44.642	1.77
13.6	44.642	2.72	19.1	44.642	1.91
24.4	46.62	4.88	19.4	44.742	1.94
41	46.766	8.2	17.8	44.844	1.78
28.6	46.728	5.72	18.9	44.944	1.89
28.6	46.948	5.72	19.3	45.146	1.93
36.5	46.948	7.3	23.2	45.146	2.32
49.9	46.948	9.98	34.6	46.19	3.46
51.6	47.058	10.32	27.5	45.558	2.75
57.6	47.17	11.52	34.4	45.89	3.44
51.8	47.17	10.36	34.8	45.97	3.48
70.8	47.17	14.16	43.3	46.296	4.33
74.9	47.226	14.98	59.1	46.728	5.91
68.8	47.244	13.76	98	47.002	9.8
102.4	47.318	20.48	95.5	47.052	9.55
98.8	47.394	19.76	151.5	47.298	15.15
86.1	47.802	17.22	176.9	47.598	17.69
70.8	47.886	14.16	181.1	47.62	18.11
70.6	48.962	14.12	116.4	48.024	11.64
68.2	47.962	13.64	116.3	48.032	11.63
68.3	48.076	13.66	116.3	48.03	11.63
55.6	48.092	11.12	113.1	48.062	11.31
38.5	48.504	7.7	112.4	48.07	11.24
39.7	48.544	7.94	117.6	48.076	11.76
37.9	48.544	7.58	111.4	48.076	11.14
28.4	48.544	5.68	110	48.192	11
16.3	49.5	3.26	40.42	49.382	4.042
24.4	49.8	4.88	44.6	49.424	4.46
16.6	50.252	3.32	32.2	49.752	3.22
9.9	52.632	1.98	23.5	51.546	2.35
8.4	54.946	1.68	19.9	51.65	1.99
8.4	55.556	1.68	19.9	52.356	1.99
8	56.818	1.6	17	52.764	1.7
7.2	58.14	1.44	17	52.764	1.7
6.5	59.524	1.3	16	53.192	1.6
6.5	60.976	1.3	14.5	53.245	1.45
6.4	62.5	1.28	14.5	53.402	1.45
6.3	63.292	1.26	14.5	53.245	1.45
5.9	64.936	1.18	14.4	55.556	1.44
6	66.226	1.2	14.4	55.866	1.44

5.9	68.494	1.18	12.4	58.14	1.24
6.1	70.422	1.22	12.3	58.824	1.23
6.1	73.53	1.22	12.2	58.824	1.22
5.2	73.53	1.04	11.1	60.24	1.11
5.6	80.646	1.12	11.3	60.976	1.13
5.6	81.968	1.12	10.8	61.728	1.08
5.6	83.334	1.12	10.2	64.936	1.02
5.5	84.746	1.1	9.9	65.36	0.99
5.6	87.72	1.12	9.9	67.114	0.99
5.8	90.91	1.16	9.9	67.568	0.99
5.9	96.154	1.18	9.8	68.494	0.98
6.1	103.092	1.22	9.8	71.428	0.98
6.3	106.382	1.26	9.7	72.992	0.97
6.6	106.952	1.32	9.9	73.53	0.99
6.9	110.498	1.38	9.8	74.35	0.98
9.2	113.636	1.84	9.9	74.626	0.99
8.9	114.942	1.78	9.9	75.758	0.99
9.2	116.28	1.84	9.6	78.432	0.96
10.5	116.28	2.1	9.3	81.662	0.93
11.1	118.344	2.22	9	83.334	0.9
12.8	119.048	2.56	9.8	85.47	0.98
9.3	119.048	1.86	9.7	88.496	0.97
8.6	119.638	1.72	9.3	89.286	0.93
16.1	120.482	3.22	9.7	90.84	0.97
21.1	121.952	4.22	9.9	93.458	0.99
38	122.7	7.6	10.3	96.154	1.03
41.7	122.7	8.34	10.4	100	1.04
47.2	122.75	9.44	10.5	103.092	1.05
57.1	123.32	11.42	10.5	104.166	1.05
17.8	123.45	3.56	13.6	111.112	1.36
34.4	123.456	6.88	13.9	112.36	1.39
55.8	123.966	11.16	23.8	118.11	2.38
33.9	124.87	6.78	26.1	119.402	2.61
25.2	125	5.04	26.1	119.402	2.61
15.2	125	3.04	52.7	121.612	5.27
12.3	125	2.46	93.7	123.126	9.37
10.8	126.582	2.16	47.6	123.762	4.76
12.1	128.206	2.42	34.6	124.172	3.46
6.8	128.206	1.36	22	127.118	2.2
6.8	129.87	1.36	17.6	128.206	1.76
4.2	131.578	0.84	12.5	129.87	1.25
4.2	138.888	0.84	7.5	129.87	0.75
4.2	147.058	0.84	7.6	129.87	0.76
4.3	200	0.86	7.6	133.334	0.76
4.1	208.334	0.82	4.4	147.005	0.44



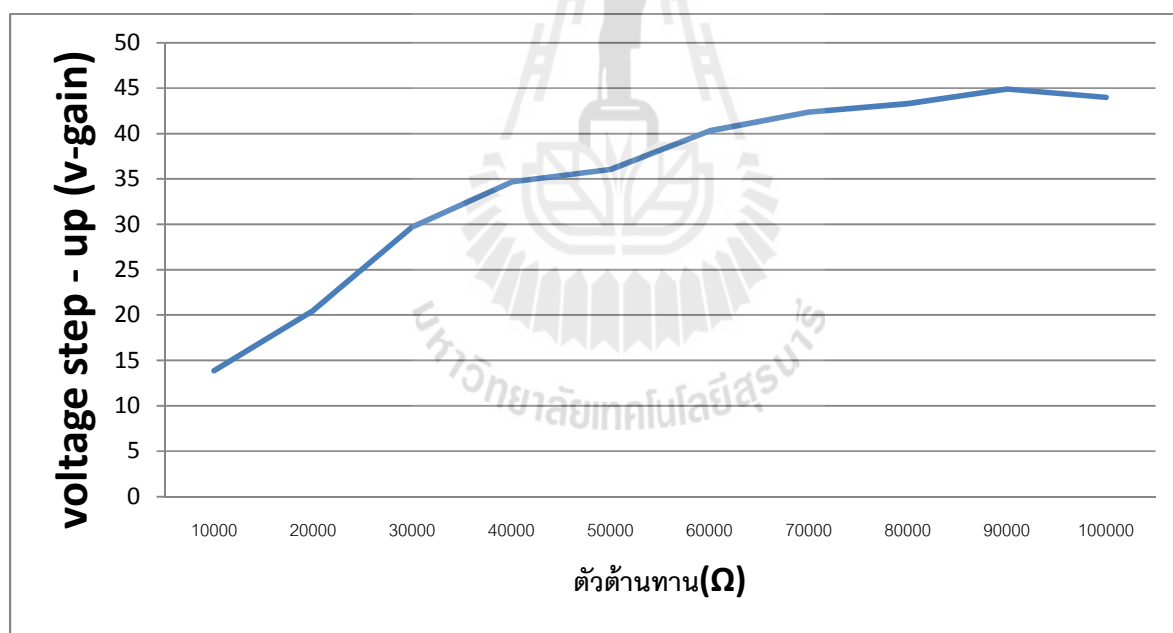
รูปที่ 3.7 V_{gain} ต่อ frequency เมื่อ apply V_{in} 5 volt ใส่ชิ้นโพธิ์โซอิลิกทริกในวงจรตามรูปที่ 2.7 ที่ต่อ $R_L = 20\text{k}\Omega$



รูปที่ 3.8 V_{gain} ต่อ frequency เมื่อ apply V_{in} 10 volt ใส่ขึ้นโพธิ์โซอิลเล็กทริกในวงจรตามรูปที่ 2.7 ที่ต่อ $R_L = 20k\Omega$

ตารางที่ 3.5 V_{out} V_{gain} และ resonance frequency เมื่อ apply V_{in} 5 volt ใส่หม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ที่ต่อกับ R_L ต่างๆ

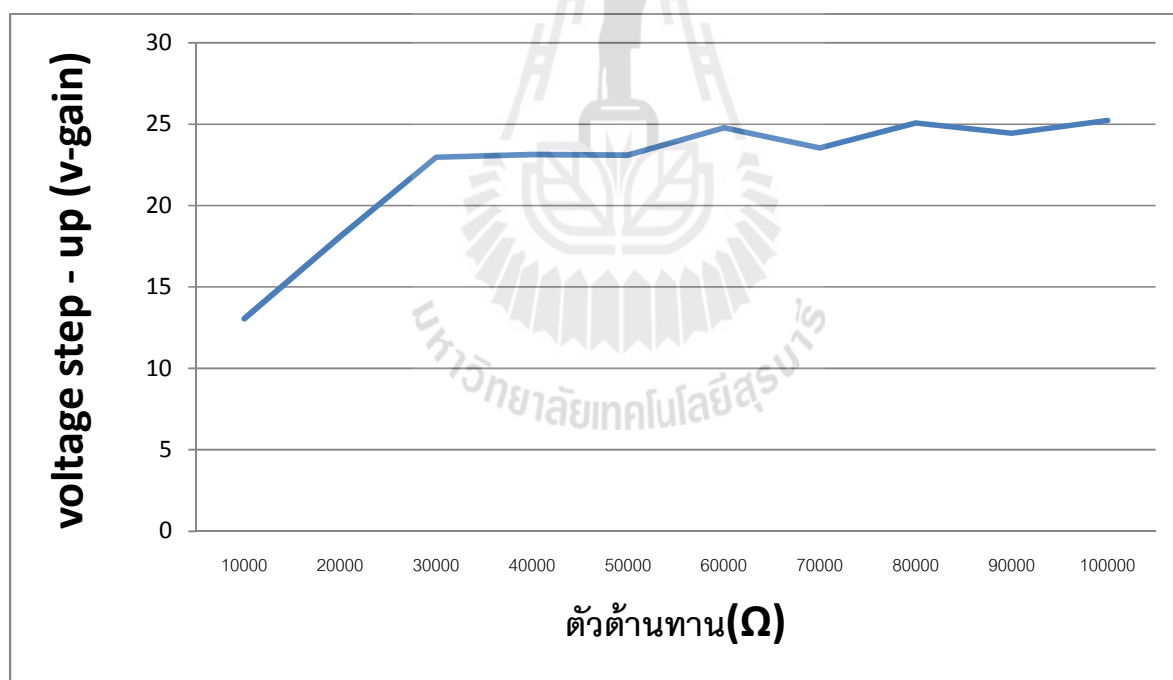
$V_{in}=5$ volt			
ตัวต้านทาน R_L (Ω)	Resonance f(kHz)	$V_{out}(v)$	V_{gain}
10000	47.5	69.4	13.88
20000	47.318	102.4	20.48
30000	47.49	148.6	29.72
40000	47.398	173.4	34.68
50000	47.382	180.2	36.04
60000	47.528	201.5	40.3
70000	47.528	211.8	42.36
80000	47.544	216.5	43.3
90000	47.466	224.5	44.9
100000	47.544	219.9	43.98



รูปที่ 3.9 V_{gain} ที่ Resonance frequency ของหม้อแปลงไฟโอโซอิเล็กทรอนิกส์ เมื่อ apply V_{in} 5 volt ใส่หม้อแปลงที่ต่อกับ R_L ต่างๆ

ตารางที่ 3.6 V_{out} V_{gain} และ resonance frequency เมื่อ apply V_{in} 10 volt ใส่หม้อแปลงไฟโอซีเล็กทริกที่ต่อกับ R_L ต่างๆ

$V_{in}=10$ volt			
ตัวต้านทาน R_L (Ω)	Resonance f(kHz)	$V_{out}(v)$	V_{gain}
10000	47.458	130.4	13.04
20000	47.62	181.1	18.11
30000	47.356	229.7	22.97
40000	47.498	231.3	23.13
50000	47.27	230.9	23.09
60000	47.298	247.9	24.79
70000	47.51	235.3	23.53
80000	47.272	250.7	25.07
90000	47.462	244.4	24.44
100000	47.374	252.2	25.22



รูปที่ 3.10 V_{gain} ที่ Resonance frequency ของหม้อแปลงไฟโอซีเล็กทริก เมื่อ apply V_{in} 10 volt ใส่หม้อแปลงที่ต่อกับ R_L ต่างๆ

บทที่ 4 สรุปผล

1. หม้อแปลงที่ผลิตจากโครงการนี้มี d_{33} ต่ำกว่า d_{33} ของวัสดุมาตรฐานของบริษัท APC เล็กน้อย แต่มี K' มากกว่า K' ของวัสดุมาตรฐานของบริษัท APC
2. $A_{\text{input}}/A_{\text{output}}$ ไม่มีผลต่อ V_{gain} ของหม้อแปลง แต่ความหนาของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นทำให้ V_{gain} ของหม้อแปลงลดลง
3. การเพิ่ม Load (R) ภายนอกที่ต่อกับวงจรทดสอบมีผลทำให้ V_{gain} ของหม้อแปลงเพิ่มขึ้น
4. สามารถใช้หม้อแปลงไพโซโซลิติกจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในวงจรสำหรับจุดหลอด LED ได้ แต่ไม่สามารถนำไปจุดหลอดโซเดียมความดันสูงได้เพราะเกิดความร้อนบนหม้อแปลงมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Choi, S.J., Lee, K.C., and Cho, B., 1998, **Design of fluorescent lamp ballast with PFC using a power piezoelectric transformer**, IEEE Conference Proceeding on Applied Power Electronics Conference and Exposition. 2: 1135-1139.
- [2] Eric, M.B., Weixing, H., Dan, Y.C., and Fred, C.L., 2005, **Radial mode piezoelectric transformer design for fluorescent Lamp ballast applications**, IEEE Transactions on Power Electronics. 20(5): 1213-1220.
- [3] Wikipedia, the free encyclopedia, website <http://th.wikipedia.org/wiki/หม้อแปลงไฟฟ้า> เข้าดูวันที่ 2 สิงหาคม 2558
- [4] Ray L. Lin, Fred C. Lee, Eric M. Baker, and Dan Y. Chen, **Inductor-less piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp**, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition – APEC, 2001.
- [5] Micromechatronics, Inc. website <http://www.mmech.com/transformers/types-of-pts> เข้าดูวันที่ 2 สิงหาคม 2558
- [6] Face Electronics LC, website <http://www.transoner.com/> เข้าดู สิงหาคม 2554
- [7] Yao-Joe Yang, Chien-Chen Chen, Ya-Mei Chen and Chih-Kung Lee, **Modeling of piezoelectric transformers using finite-element technique**, Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol. 31, No. 6, pp. 925-932 (2008).
- [8] ผู้จัดการออนไลน์, "เอ็มเทค" พัฒนาหม้อแปลงเซรามิกส์จีวี เบา-ปลอดภัย-ประหยัดไฟ 90%", website <http://www.manager.co.th/Science/ViewNews.aspx?NewsID=9490000091100> เข้าดู กรกฎาคม 2549
- [9] Sutham Srilomsak, Nitipot Putthongchai, Siriwan Chokkha, Thanatchai Kulworawanichpong, Monhakarn Phirasaksophon, Pitak Laoratanakul, **Performance of Hexagonal Ring/Dot Type and Circular Ring/Dot Type**

Piezoelectric Transformers, Integrated Ferroelectrics: An International Journal Volume 130, pages 33-38, 2011.

[10] ศิริวรรณ โชคดี สาขาวิชาวิศวกรรม เซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, **แบล็คสตีไฟอิโซอิเล็กทริกสำหรับหลอดฟลูออเรสเซนต์**, โครงการสร้างปัญญาวิทย์ ผลิตนักเทคโนโลยี, 2551-2552.

[11] Sutham Srilomsak, Nitipot Putthongchai, Banjong Pitiket, Kayanee Narasri, Thanatchai Kulworawanichpong, MonhakarnPhirasaksophon, Pitak Laoratanakul, **Effects of Thickness and Input/Output Area Ratio on Electrical Characteristics of Circular Ring/Dot Type Piezoelectric Transformer**, Integrated Ferroelectrics: An International Journal Volume 130, pages 39-49, 2011.

[12] Hwasoo Kim, Eunsung Jang, Dohyung Kim, Larkhoon Hwang, Juhyun Yoo, **THICKNESS-VIBRATION- MODE MULTILAYER PIEZOELECTRIC TRANSFORMER FOR DC-DC CONVERTER APPLICATION**, Integrated Ferroelectrics: An International Journal Volume 107, pages 12-23, 2009.

[13.] Matin S. Roedgaard, Michael Weirich, Michael A. E. Andersen, **Forward Conduction Mode Controlled Piezoelectric Transformer-Based PFC LED Drive**, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No.10, October 2013.

[14] Hyun Woo Chung, Sung Hun Lim, Gun Hee Kim, Dong Hua Li, Eun Sun Lee, Byung Du Ahn, Sang Yeol Lee, **Fabrication and characterization of piezoelectric $Pb(Zr,Ti)O_3$ - $Pb(Mn,W,Sb,Nb)O_3$ step-down piezoelectric transformer**, Sensors and Actuators A 128 (2006) 350-354.

[15] รศ.ดร.สุธรรม ศรีห่มสัก, **เอกสารประกอบการสอนรายวิชา 426413 Piezoelectric Ceramics ๓2/55**, สาขาวิชาวิศวกรรม เซรามิก สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2555.

[16] Wikipedia, the free encyclopedia, **Light-emitting diode**, Available at accessed on January, 2014
URL:http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode

[17] GOLDLIGHT INTERNATIONAL Co.,Ltd, หลอด LED, (online). Available accessed on January, 2014
URL:<http://www.goldlightinter.com/Default.aspx?pageid=41>

[18] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี, **ไดโอดเปล่งแสง**, (online). Available accessed on January, 2014
URL:<http://th.wikipedia.org/wiki/ไดโอดเปล่งแสง>

[19] Bernard Jaffe, William R. Cook, Jr. and Hans Jaffe, "Piezoelectric Ceramics, "Piezoelectric Ceramic, " Academic Press Limited Published. 1971.

[20] APC International, Ltd., Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications, 2002.

[21] Clevite Cooperation, Piezoelectric Tech Data for Designer, 1965.

[22] APC International, Ltd., available on website <https://www.americanpiezo.com/>, accessed on Aug 2, 2015.

[23] พุดกับ รองศาสตราจารย์ ดร.ธันด์ชัย กุลวรวานิชพงษ์ ประมาณปี 2556

กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณนักศึกษาที่มีรายชื่อดังต่อไปนี้ที่มีส่วนช่วยในงานวิจัยนี้: นายชวลิต ปัญญาอิสระ, นายชลิต ศรัทธาธรรม, นางสาวกรรณิการ์ เสนาโนฤทธิ, นางสาวแก้วเกษรา แทนแก้ว, นายชลวิทย์ โคตรบาล, นายศุภฤกษ์ ไพศาลพงศ์, นายอุรุพงษ์ วงศ์หนองแขง, นางสาวจิราพร มานนท์, นางสาวเสาวลักษณ์ เชียงกา, นางสาวกัญยานี นราศรี, นางสาวบรรจง ปิติเขตร, นางสาวกัญญาภัค สิมนาม, นางสาวณัฐฐา เกรกุล และ นายอำพล นิตย์ไธสง

