



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)
ปริญญา

วิศวกรรมไฟฟ้า

วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง เครื่องเชื่อมพลาสติกอัลตราโซนิค

Ultrasonic Welding

นามผู้วิจัย นางสาวนลิสสา สายะสนธิ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ชัยกุล, วศ.ม.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูเกียรติ การะเกตุ, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ณัฐกานา หอมทรัพย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์มงคล รักษาพัชรวงค์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ _____ เดือน _____ พ.ศ. _____

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

เครื่องเชื่อมพลาสติกอัลตราโซนิค

Ultrasonic Welding

โดย

นางสาวนลิตา สายะสนธิ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า)

พ.ศ. 2552

นลินสา สายะสนธิ 2552: เครื่องเชื่อมพลาสติกอัลตราโซนิก ปริญญาวิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ชัยกุล, วศ.ม. 74 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสารเพียโซอิเล็กทริกและสร้างเครื่องมือเชื่อมพลาสติกด้วยอัล
ตราโซนิกที่ใช้ชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากวงจรสร้าง
สัญญาณ ไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นพลังงานกล เพื่อเชื่อมปากถุงพลาสติกขนาดเล็ก

การวิจัยเริ่มตั้งแต่การศึกษาวิธีการเตรียมสารเพียโซอิเล็กทริก และทดลองผลิตชิ้นงาน
เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ จากนั้นจึงออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ กำหนดความถี่ 60 KHz
กำลังไฟฟ้า 55 วัตต์เพื่อจ่ายให้กับชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้ และประกอบเข้าเป็นเครื่อง
เชื่อมปากถุงพลาสติกแบบมือถือ

จากผลการทดสอบ ชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็ก
ทริกและเมื่อประกอบกับเครื่องมือเชื่อม สามารถเชื่อมพลาสติกที่มีขนาดความหนามากกว่า
0.06 มม. แต่ไม่เกิน 0.24 มม. ได้ โดยหลอมพลาสติกติดกันได้อย่างสมบูรณ์

Nalisa Sayasonti 2009: Ultrasonic Welding. Master of Engineering (Electrical Engineering), Major Field: Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Chaiwat Chaikul, M.Eng. 74 pages.

This research is a study of Piezoelectric material and ultrasonic plastic welder invention. This plastic welder utilizes the property of piezoelectric to convert electrical power from AC-generated circuit to mechanical power for sealing small plastic pieces.

This research studies from Piezoelectric material preparation, Piezoelectric transducer production, 60 KHz 55W oscillator circuit design, and integration as Piezoelectric handheld plastic welder.

The result exhibits that the specimens have Piezoelectric property and as integrated as welding tool can seal plastic pieces with thickness between 0.06 mm and 0.24 mm completely.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

___ / ___ / ___

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ชัยวัฒน์ ชัยกุล ประธานกรรมการ
ดร.ชูเกียรติ การะเกตุ กรรมการวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร. ณีฎฐกา หอมทรัพย์ กรรมการวิชาการ
ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงได้
ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัจฉนา วงศ์ชัยสุวรรณ อาจารย์นุชนาถ สุภพิพัฒน์
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้ความอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือ
ในการทำงานวิจัย ขอขอบพระคุณ ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง
ประเทศไทย ที่กรุณาให้คำปรึกษาเกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริก

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ น้องปิยดาและน้องการ์ตูน ที่ได้สนับสนุนช่วยเหลือ
และเป็นกำลังใจที่สำคัญในการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ เพื่อนและน้องๆที่ห้อง
410 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและสนับสนุนการทำ
วิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

นลิสสา สายะสนธิ

ตุลาคม 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	21
อุปกรณ์	21
วิธีการ	22
ผลและวิจารณ์	42
ผล	42
วิจารณ์	47
สรุปและข้อเสนอแนะ	56
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	57
ภาคผนวก	59
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สารตั้งต้นที่นำมาใช้เตรียมวัสดุ PZT	22
2	ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก PZT หลังเผาซินเทอร์เทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี	44
3	เปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดเซรามิก PZT	45
4	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายของเม็ดเซรามิก PZT	45
5	สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกของเม็ดเซรามิก PZT	46
ตารางผนวกที่		
1	ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2SB921 และ 2SD1237	72

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก	5
2	การจำแนกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตามลักษณะโครงสร้างผลึก	6
3	โครงสร้าง perovskite ของ $BaTiO_3$	11
4	เฟสไดอะแกรมของระบบ $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$	12
5	ค่า piezoelectric coupling factor (k_p) และค่า dielectric (ϵ_r) ของสาร PZT ที่สัดส่วน โมล Ti ต่าง ๆ	13
6	การเตรียมเซรามิก PZT	13
7	การเกิด neck ระหว่างอนุภาคในขณะเผาซินเทอร์	16
8	แผนภูมิอุณหภูมิการเผาแคลไซน์	23
9	การจัดเรียงเม็ด PZT เพื่อเผาซินเทอร์	25
10	แผนภูมิอุณหภูมิการเผาซินเทอร์	25
11	แผนภาพการโพล	26
12	แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องเชื่อมพลาสติก	31
13	หลักการทำงานของวงจรออสซิลเลเตอร์	33
14	วงจรขยายกำลังแบบคอลเลคเตอร์ร่วมและเป็นแบบคู่ประกอบ	34
15	วงจรขยายกำลังที่มีหม้อแปลงเป็นส่วนป้อนกลับ	35
16	วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบได้	35
17	วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการออกแบบเพิ่มเติม	38
18	ตัวเก็บประจุคดทอนแรงดัน	38
19	วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่เพิ่มตัวเก็บประจุคดทอนแรงดัน	39
20	วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มี filter 2 ชุด	40
21	วงจรที่ออกแบบสมบูรณ์	41
22	XRD pattern ของสาร PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์	42
23	XRD pattern ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเทอร์	43
24	เม็ดเซรามิก PZT ที่ผ่านการทำโพล	47
25	สัญญาณออกที่จ่ายให้กับเม็ดเพียโซอิเล็กทริก	49
26	ลายวงจรที่ออกแบบ	50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	แผ่นวงจรที่ประกอบอุปกรณ์เรียบร้อย	50
28	เม็ดเพียโซอิเล็กทริกที่นำไปประกอบกับอลูมิเนียม	51
29	ลักษณะของหัวเชื่อมที่ประกอบเสร็จแล้ว	51
30	ลักษณะพลาสติกที่นำมาทดลองเชื่อม	52
31	แสดงลักษณะการเชื่อมพลาสติก	52
32	แสดงลักษณะการเชื่อมพลาสติกอีกมุมหนึ่ง	53
33	รอยเชื่อมพลาสติกที่มีความหนา 0.24 มม.	53
34	รอยเชื่อมพลาสติกที่มีความหนา 0.06 มม.	54
35	รอยเชื่อมพลาสติกที่มีความหนามากกว่า 0.24 มม.	55
ภาพผนวกที่		
1	วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสลับเบื้องต้นเพียงครึ่งคาบ	60
2	วงจรแสดงแรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆ	63
3	วงจรแสดงการหาค่า C_{02}, C_{03}	71

เครื่องเชื่อมพลาสติกอัลตราโซนิก

Ultrasonic Welding

คำนำ

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า การเกษตรกรรมถือได้ว่าเป็นอาชีพหลักของประเทศไทย ประชาชนส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกร ปัญหาของเกษตรกรที่มักจะพบคือปัญหาเรื่องราคาผลผลิตตกต่ำ ซึ่งสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปัญหานี้เนื่องมาจากการจัดการผลผลิตที่ไม่ดีพอ ทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหานี้คือการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์อาหาร เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าผลผลิตและขยายตลาดผู้บริโภค เมื่อมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์ สิ่งจำเป็นที่ตามมาสำหรับการแปรรูปก็คือ การบรรจุภัณฑ์ (Packaging) ซึ่งเครื่องมือในการทำบรรจุภัณฑ์แบบเชื่อมพลาสติกที่ได้มาตรฐานและมีประสิทธิภาพนั้นมีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ราคาเครื่องละประมาณ 20,000 – 30,000 ทำให้เกษตรกรที่มีรายได้น้อยไม่สามารถหาอุปกรณ์ตัวนี้มาใช้งานได้ จึงจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่ไม่มีประสิทธิภาพหรือมาตรฐานเพียงพอ

นอกจากนั้น ปัจจุบันรัฐบาลกำลังสนับสนุนโครงการ 1 ตำบล 1 ผลิตภัณฑ์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการดำเนินงานของกลุ่มแม่บ้านและเกษตรกรในท้องถิ่นของแต่ละจังหวัด โดยผลิตภัณฑ์ที่เข้าร่วมโครงการส่วนมากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากผลิตผลทางการเกษตรที่มีอยู่ในท้องถิ่น นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารเช่นเดียวกัน จึงขาดไม่ได้ที่จะต้องมีการบรรจุในถ้วยหรือถุงพลาสติก ซึ่งวิธีที่เกษตรกรใช้ในปัจจุบัน เช่น ใช้ลวดเย็บกระดาษปิดปากถุงอาจไม่ได้มาตรฐานเพียงพอ และถนอมอาหารได้ไม่ดีนัก นอกจากนั้นผลิตภัณฑ์บางชนิดจำเป็นต้องมีการปิดปากถุงให้สนิท ไม่สามารถใช้ลวดเย็บกระดาษได้ และวิธีการที่นิยมใช้กันโดยมากคือการใช้เทียนไข แต่วิธีนี้ก็เป็นวิธีที่ไม่ได้มาตรฐานและมีโอกาสสร้างความเสียหายให้กับบรรจุภัณฑ์ได้ เนื่องจากถ้าพลาสติกไปสัมผัสกับเปลวไฟจะทำให้พลาสติกเป็นรูเกิดความเสียหาย นอกจากนั้น วิธีเหล่านี้ยังมีข้อจำกัดการใช้งานในด้านรูปร่างหรือรูปทรงของบรรจุภัณฑ์อีกด้วย

ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาและทดลองทำเครื่องเชื่อมพลาสติกแบบอัลตราโซนิก ซึ่งเป็นเครื่องเชื่อมที่มีขนาดเล็ก สะดวกในการเคลื่อนย้าย และมีประสิทธิภาพในการใช้งานเชื่อมพลาสติก สามารถสัมผัสกับชิ้นงานได้โดยตรงไม่สร้างความเสียหายต่อชิ้นงาน เพื่อเป็น

การช่วยแก้ปัญหาของเกษตรกรในเรื่องบรรจุภัณฑ์ และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาวิธีการเตรียมสารเพียโซอิเล็กทริกและทดลองผลิตชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์
2. ออกแบบและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กับเครื่องมือเชื่อมพลาสติก
3. ทดสอบชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่เตรียมได้โดยนำไปประกอบเป็นเครื่องมือเชื่อมและทดลองเชื่อมพลาสติก

เป้าหมายในการวิจัย

เครื่องมือที่วิจัยและพัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมปากถุงพลาสติกที่มีขนาดความหนา ระหว่าง 0.06-0.24 มม. ได้โดยพลาสติกหลอมติดกันโดยสมบูรณ์

การตรวจเอกสาร

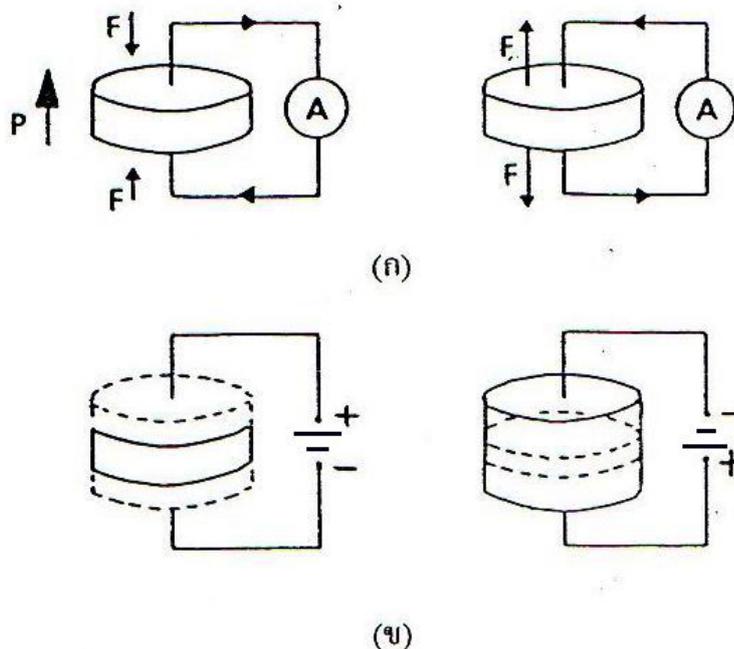
1. ทฤษฎีของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

1.1 ปรัชญาการเพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ถูกค้นพบครั้งแรกโดย Jacques และ Pierre Curie ในปี ค.ศ. 1880 ในผลึกสารประกอบเชิงเดี่ยว (single crystal compounds) เช่น ควอตซ์ (quartz) และเกลือ (Rochelle salt) (เชดส์คี้, 2538)

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเมื่อได้รับแรงดัน (mechanical stress) มักจะทำให้เกิดขั้วไฟฟ้าภายในวัสดุ (polarization) และให้ประจุไฟฟ้าออกมา โดยประจุไฟฟ้าที่ให้ออกมานั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่กระทำ ปรากฏการณ์ที่พลังงานกลเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เรียกว่า ผลทางตรง (direct effect)

ในทางกลับกัน เมื่อมีแรงดันไฟฟ้ามากระทำ จะทำให้เกิดความเครียด (strain) ขึ้นในวัสดุ วัสดุสามารถหดตัวหรือขยายตัวได้ โดยความเครียดนี้แปรผันตรงกับสนามไฟฟ้าที่ใส่เข้ามา ปรากฏการณ์ที่พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานกล เรียกว่า ผลย้อนกลับ (converse effect) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

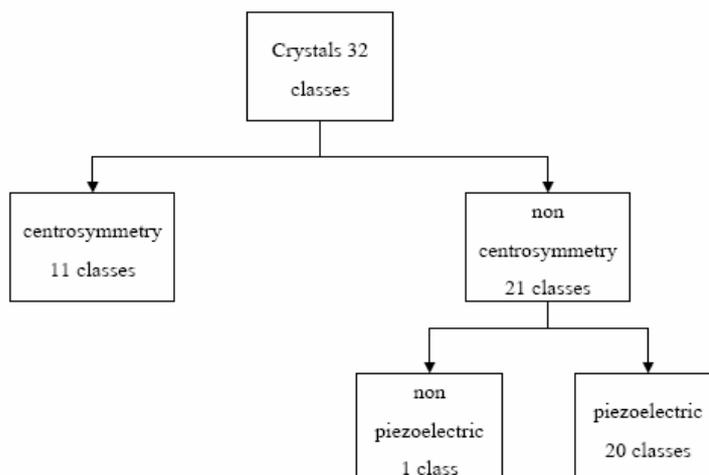
(ก) ผลทางตรง ผลของแรงอัดทำให้เกิดกระแสไหลเข้าวงจร ผลของแรงดึงทำให้เกิดกระแสไหลออกจากวงจร

(ข) ผลย้อนกลับ สนามไฟฟ้าในทิศเดียวกับทิศการ polarize ทำให้วัสดุหดตัว สนามไฟฟ้าในทิศตรงข้ามกับทิศการ polarize ทำให้วัสดุขยายตัว

ที่มา: เซ็ดศักดิ์ (2538)

1.2 ลักษณะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

การจำแนกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกออกจากวัสดุอื่น สามารถจำแนกโดยอาศัยการสมมาตรของโครงสร้างผลึก โดยทั่วไปลักษณะโครงสร้างผลึกสามารถแบ่งได้เป็น 32 กลุ่ม และแบ่งตามลักษณะการสมมาตรได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ผลึกกลุ่มที่มี center of symmetry 11 กลุ่ม และผลึกกลุ่มที่ไม่มี center of symmetry หรือที่เรียกว่า non centrosymmetry 21 กลุ่ม ในกลุ่มนี้มี 1 กลุ่มที่มีความสมมาตรอื่น ๆ ประกอบกันทำให้เกิด center of symmetry แบบประสิทธิผลขึ้น จึงเหลือ 20 กลุ่มที่มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การจำแนกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตามลักษณะโครงสร้างผลึก

1.3 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

1.3.1 ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant :d)

เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกกระทำด้วยความเค้นทางกล (mechanical stress , T) จะเกิด dielectric displacement (D) และในทางตรงกันข้าม เมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกถูกกระทำด้วยสนามไฟฟ้า (E) จะเกิดความเครียดทางกล (mechanical strain , S) ภายในวัสดุ สมบัติเพียโซอิเล็กทริกดังกล่าวสามารถแสดงในรูปสมการ ดังนี้

$$D = dT \quad (\text{ผลทางตรง})$$

$$S = dE \quad (\text{ผลย้อนกลับ})$$

โดยที่ d คือ piezoelectric constant

เนื่องจากผลทางตรงและผลย้อนกลับมีค่าเท่ากันและเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d) ดังสมการ

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E}$$

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (d) แสดงความสัมพันธ์ของ electrical polarization ที่เกิดจากความเค้นที่ให้ และความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากการให้สนามไฟฟ้า หน่วยของ d คือ coulombs / newton หรือ meter / volt

เนื่องจากความเป็นเพียโซอิเล็กทริกขึ้นกับทิศทาง ทำให้ค่า d มีหลายตัวตามทิศทางต่าง ๆ ที่สัมพันธ์กับ polarization หรือความเครียดที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเค้นหรือสนามไฟฟ้าที่ให้ในทิศทางต่าง ๆ ดังนั้น โดยทั่วไปค่า d จะเขียนเป็น d_{ij}

โดยที่ i = ทิศ polarization ที่เกิดขึ้นหรือทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้

j = ทิศของความเค้นที่ให้หรือทิศของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของสาร

ตัวอย่างเช่น d_{31} หมายถึง การเกิด polarization ในทิศทางแกน Z (3) เมื่อให้ความเค้นกับชิ้นงานในแนวแกน X(1) หรือความเครียดที่เกิดขึ้นในทิศทางแกน X(1) เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้ในทิศทางแกน Z(3)

1.3.2 ค่าตัวประกอบการเชื่อมต่อของเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric coupling factor :k)

ค่าที่บอกความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงานของเพียโซอิเล็กทริก ได้แก่ ความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือ การเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของพลังงานที่ได้รับต่อพลังงานที่จ่ายให้ ตามสมการ

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ได้}}{\text{พลังงานกลที่จ่ายให้}}$$

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานกลที่ได้}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้}}$$

ค่า k จะมีค่าน้อยกว่า 1 เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานมักไม่เกิดอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ค่า k ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วย ตัวอย่างเช่น วัสดุที่มีรูปทรงกระบอก และโพลตามแกนทรงกระบอก มีขั้วอิเล็กโทรดที่ปลายทรงกระบอกทั้ง 2 ด้าน ค่า k จะอยู่ในรูป longitudinal coupling factor (k_{33}) คือเกิดความเครียดในแนวแกน Z(3) เนื่องจากการให้สนามไฟฟ้าในแนวแกนเดียวกัน

สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ที่มีรูปทรงเป็นแผ่นกลมบาง (disk) ค่า k จะอยู่ในรูป planar coupling factor (k_p)

ค่า k สามารถคำนวณได้จากสมการที่เป็นฟังก์ชันของความถี่เรโซแนนท์ f_r และความถี่แอนติเรโซแนนท์ f_a

1.4 ประเภทของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

1.4.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดตามธรรมชาติ

วัสดุหรือแร่ธาตุที่สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้เอง ตัวอย่างที่สำคัญได้แก่

Rochelle Salt ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6\cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เป็นทรานสดิวเซอร์ที่มีกำลังต่ำแต่ใช้งานได้สามารถละลายในน้ำซึ่งเป็นข้อเสียของวัสดุชนิดนี้ มีอุณหภูมิใช้งานสูงสุดที่ 30°C ใช้งานใน Air transducers (earphones, hearing aids, microphones)

Quartz (SiO_2) เป็นวัสดุทรานสดิวเซอร์ที่แข็งและไม่ดูดซึมความชื้น ทำงานได้ดีในช่วงความถี่อัลตราโซนิก ($> 20 \text{ kHz}$) ทนต่ออุณหภูมิและสนามไฟฟ้าแรงสูง แต่มีค่า piezoelectric coupling factor ต่ำ การนำ quartz ไปใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์จะต้องตัดเป็นแผ่นบางๆตามลักษณะโครงสร้างผลึก โดยที่ quartz ที่ได้จะมีคุณสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะของการตัดที่ขนานกับแกนใด นำไปใช้งานเป็นอุปกรณ์ควบคุมความถี่ภายในนาฬิกา และในเครื่องส่งวิทยุ นอกจากนี้ยังนำไปใช้เป็นวงจรรองความถี่ใน remote control และในวงจรไฟฟ้าต่างๆ ด้วย

Ammonium Dihydrogen Phosphate (ADP) มีลักษณะคล้าย Rochelle Salt เพราะสามารถละลายน้ำได้ ถึงแม้ ADP จะมีประสิทธิภาพน้อยกว่า แต่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิได้สูงกว่า ดังนั้น จึงนำ ADP ไปใช้ในงานประเภทเดียวกันกับ Rochelle Salt แต่มีอุณหภูมิในการทำงานสูงกว่า และเช่นเดียวกับ Quartz การนำ ADP ไปใช้งานจะต้องตัดเป็นแผ่นบาง ๆ โดยที่ลักษณะการตัดจากโครงสร้างผลึกจะมีผลต่อคุณสมบัติของแผ่น ADP เช่นกัน การนำไปใช้งาน ใช้ในไฮโดรโฟน

นอกจากนี้ยังมีวัสดุอื่นอีก เช่น Tourmaline , Potassium Dihydrogen Phosphate (KDP)

1.4.2 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์

เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดตามธรรมชาติมีข้อจำกัดด้านรูปทรงในการใช้งาน การตัดจากแร่ธรรมชาติในทิศทางเฉพาะ ไม่สามารถใช้งานที่อุณหภูมิสูง ๆ ได้ รวมทั้งมีค่า piezoelectric coupling factor ต่ำ ทำให้มีการนำไปใช้งานได้น้อย จึงทำให้มีการสังเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกขึ้นอย่างกว้างขวาง เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้มากขึ้น ทั้งนี้เพราะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์สามารถนำมาขึ้นรูปเพื่อให้ได้รูปทรงตามที่ต้องการ และสามารถเพิ่มอุณหภูมิในการใช้งานให้สูงขึ้นได้ นอกจากนี้ยังสามารถปรับสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกได้ โดยการปรับแต่งส่วนผสม

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์แตกต่างจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตามธรรมชาติ คือ ต้องผ่านการทำโพล(การให้สนามไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิด polarization) เพื่อทำให้มีคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกก่อนนำไปใช้งาน ตัวอย่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์ที่สำคัญ ได้แก่

Barium Titanate (BaTiO₃) เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์ที่ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกและนำมาใช้งานจนทุกวันนี้ เป็นวัสดุที่มีค่าไดอิเล็กทริกสูง และสามารถใช้งานในอุณหภูมิที่สูงกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกตามธรรมชาติ ไม่ดูดซึมความชื้น สามารถขึ้นรูปได้หลายรูปแบบ ที่สำคัญคือเป็นวัสดุต้นแบบในการอธิบายโครงสร้างของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์ตัวอื่น ๆ ด้วย และเนื่องจากการค้นพบ Barium Titanate จึงนำไปสู่การค้นพบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์ที่สำคัญตัวอื่น ๆ อีกมากมาย

ลักษณะการนำไปใช้งานของ BaTiO_3 ในยุคแรกมีการนำมาพัฒนาเป็นทรานสดิวเซอร์ แต่ในปัจจุบัน มีการนำวัสดุชนิดนี้มาใช้ในการผลิตตัวเก็บประจุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง และตัวเก็บประจุแบบหลายชั้น (multilayer capacitor, MLC) ทั้งนี้เนื่องมาจากการค้นพบวัสดุตัวอื่นที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเป็นทรานสดิวเซอร์มากกว่า นอกจากนี้ BaTiO_3 ยังนำมาใช้เป็นเทอร์มิสเตอร์ด้วย

Lead Zirconate Titanate (PbZrTiO_3 หรือ PZT) เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กตริกสังเคราะห์ที่มีความสำคัญ เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานได้เป็นอย่างมาก PZT ถูกนำมาใช้แทนที่ BaTiO_3 สำหรับการใช้งานด้านทรานสดิวเซอร์ เนื่องจากมีค่า piezoelectric coupling factor และอุณหภูมิสูงสุดในการใช้งานสูงกว่า สามารถทำให้เกิดขั้วไฟฟ้า (poling) ได้ง่าย ใช้อุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ (การให้ความร้อนกับชิ้นงานเพื่อทำให้อนุภาคของสารจับตัวกันแน่นยิ่งขึ้น) ต่ำกว่า และสามารถปรับแต่งอัตราส่วนของ PbZrO_3 และ PbTiO_3 จึงทำให้สมบัติของวัสดุที่ได้มีความหลากหลายขึ้น

ลักษณะการนำไปใช้งานของ PZT สามารถนำไปใช้งานได้หลายประเภท แต่ที่สำคัญที่สุดคือการนำไปใช้งานด้านทรานสดิวเซอร์ โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaning) โซนาร์ (sonar) อุปกรณ์หาปลา (fish finder) อุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น มีดผ่าตัดอัลตราโซนิก, เครื่องอัลตราซาวด์, เครื่องตรวจฟังเสียงหัวใจ และใช้ในไมโครโฟนและลำโพงด้วย

สำหรับการใช้งานด้านอื่น เช่น เป็นตัวสร้างประจุไฟฟ้าที่แรงดันไฟฟ้าสูง (high voltages) อุปกรณ์ที่ใช้งานด้านนี้ ได้แก่ ที่จุดแก๊ส (gas ignitor) หรือนำไปใช้งานด้าน delay lines ในโทรทัศน์สีและคอมพิวเตอร์

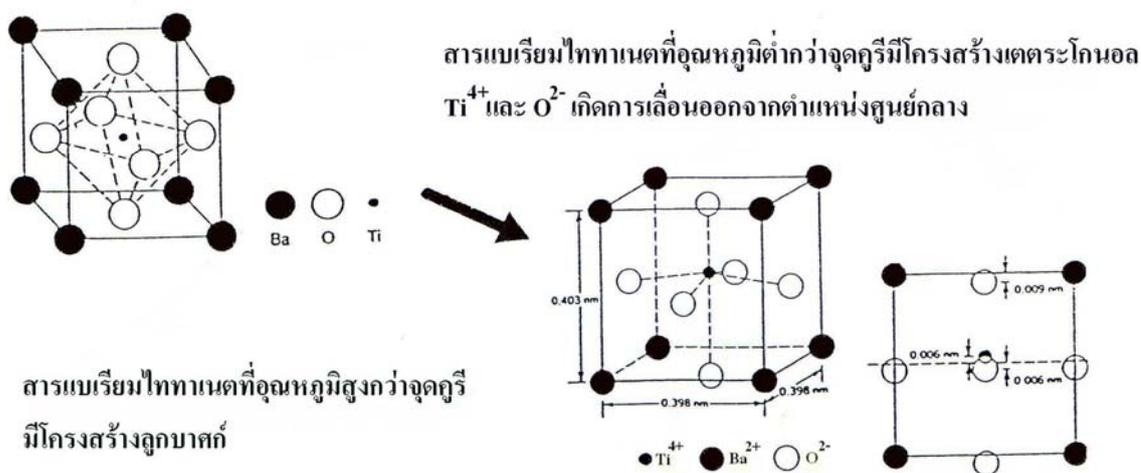
2. เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต

2.1 ลักษณะโครงสร้าง

ปี ค.ศ. 1954 Jaffe ได้ค้นพบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกที่เด่นชัดมากในระบบ solid solution ระหว่าง PbZrO_3 และ PbTiO_3 ทำให้เกิดเป็นสารประกอบที่ชื่อว่า เลดเซอร์โคเนตไททานต (PbZrTiO_3) หรือ PZT

PZT เป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างแบบ perovskite (ABO_3) เช่นเดียวกับ แบเรียมไททานเนต ($BaTiO_3$) ซึ่งเป็นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสังเคราะห์ที่ถูกค้นพบเป็นครั้งแรก จึงเป็น ต้นแบบในการใช้อธิบายโครงสร้าง

ลักษณะทั่วไปของโครงสร้าง perovskite ที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดคูรี unit cell เป็นรูป ลูกบาศก์ (simple cubic) ion ที่มีขนาดใหญ่ (A) หรือไอออนของแบเรียม (Ba^{2+}) อยู่ที่มุมของลูกบาศก์ ion ที่มีขนาดเล็ก (B) หรือไอออนของไททานเนียม (Ti^{4+}) อยู่ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง (body center) ของ ลูกบาศก์ ไอออนของออกซิเจน (O^{2-}) อยู่บริเวณกึ่งกลางด้านแต่ละด้าน (face center) ดังแสดงในภาพ ที่ 3



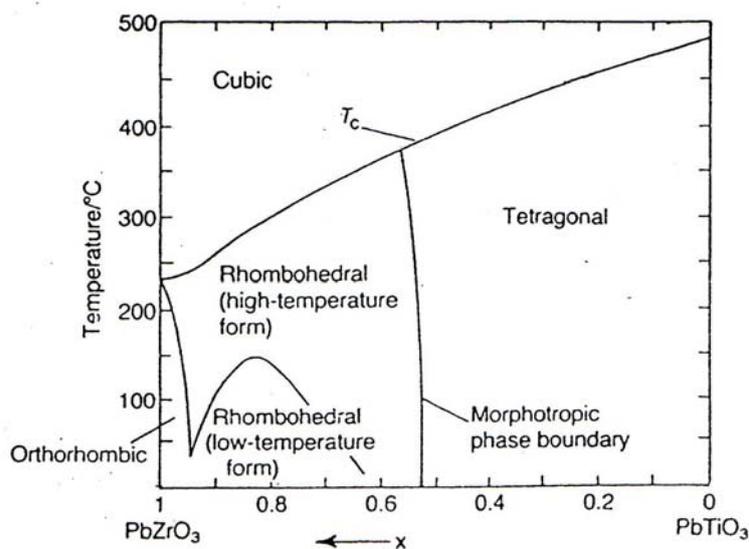
ภาพที่ 3 โครงสร้าง perovskite ของ $BaTiO_3$

ที่มา: วิบุรณ (2541)

เมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าจุดคูรี ไอออนของ Ti^{4+} จะเกิดการเลื่อนออกจากตำแหน่งศูนย์กลางทำให้เกิดลักษณะไดโพล และโครงสร้างเปลี่ยนเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal)

สำหรับสารประกอบ PZT ไอออนของเลด (Pb^{2+}) จะอยู่ที่มุมของลูกบาศก์ ไอออนของไททานเนียม (Ti^{4+}) และไอออนของเซอร์โคเนียม (Zr^{4+}) อยู่ในตำแหน่ง body center ส่วนไอออนของออกซิเจน (O^{2-}) จะอยู่ในตำแหน่ง face center เช่นเดียวกับ $BaTiO_3$

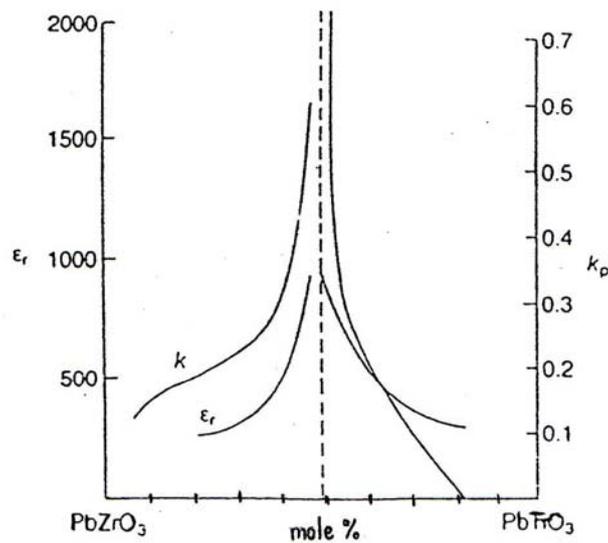
สารประกอบ PZT มีหลายโครงสร้างผลึก เช่น เติตระโกนอล ,รอมโบฮีดรอล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของไททาเนียมและเซอร์โคเนียม โดยสูตรของ PZT สามารถระบุเป็น $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ โดยที่ x เป็นสัดส่วน โมลของ Zr เฟสไดอะแกรม (phase diagram) ของ PZT แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เฟสไดอะแกรมของระบบ $PbTiO_3$ - $PbZrO_3$

ที่มา: วิบูลย์ (2541)

การเพิ่มปริมาณ Zr^{4+} มากขึ้น มีผลทำให้โครงสร้างเปลี่ยนจากเติตระโกนอลไปเป็นรอมโบฮีดรอล เมื่อสัดส่วน โมลของ Zr / Ti เท่ากับ 52 / 48 โมลเปอร์เซ็นต์ โครงสร้างของ PZT จะอยู่ในช่วงรอยต่อระหว่าง tetragonal และ rombohedral เรียกช่วงนี้ว่า Morphotropic phase boundary (MPB) ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกรสนใจศึกษามาก เนื่องจากให้ค่า k_p และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าบริเวณอื่น ดังแสดงในภาพที่ 5 บริเวณนี้ยังง่ายต่อการโพล เนื่องจาก polarization ที่เกิดขึ้นเองภายในแต่ละเกรน สามารถถูกทำให้ปรับเปลี่ยนทิศทางการจัดเรียงได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้สมบัติเพียโซอิเล็กตริกของ PZT มีมากกว่าบริเวณอื่น

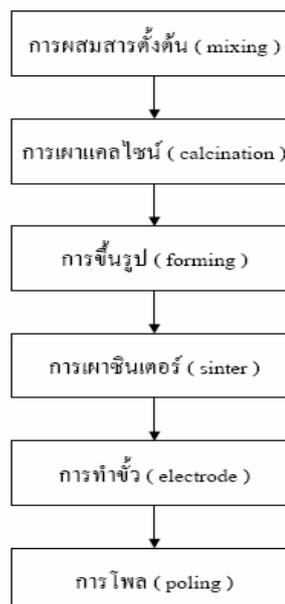


ภาพที่ 5 ค่า piezoelectric coupling factor (k_p) และค่า dielectric (ϵ_r) ของสาร PZT ที่สัดส่วน โมล Ti ต่าง ๆ

ที่มา: ลดาวัลย์ (2542)

2.2 การเตรียมเซรามิก PZT

การเตรียมเซรามิก PZT มีหลายวิธี เช่น mixed – oxide route , sol – gel route ซึ่งจะแตกต่างกันในขั้นตอนการผสมสารตั้งต้น แต่มีขั้นตอนหลักในกระบวนการเตรียมเหมือนกัน คือ



ภาพที่ 6 การเตรียมเซรามิก PZT

การผสมสารตั้งต้น (mixing)

เพื่อให้สารตั้งต้นแต่ละชนิดรวมตัวเป็นเนื้อเดียวกันตลอดทั้งสาร (homogeneous powder) และเกิดปฏิกิริยาได้ดีในขั้นตอนการเผาแคลไซน์ วิธีการผสมสารตั้งต้นที่นิยมมี 2 วิธี คือ

1. Conventional mixing

วิธีการผสมแบบนี้ เป็นการผสมสารตั้งต้นที่เป็นผงของสารประกอบ ออกไซด์เข้าด้วยกันในเครื่องบด (ball mill) เพื่อผสมสารตั้งต้นให้เป็นเนื้อเดียวกันและลดขนาดอนุภาคของสารเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้นตอนการเผาแคลไซน์ วิธีนี้ทั้งการผสมแบบแห้งหรือแบบเปียกก็ได้ สำหรับการผสมแบบเปียกจะใช้สารละลายอินทรีย์ เช่น เอทิลแอลกอฮอล์ หรือ โพรพิลแอลกอฮอล์ ทำหน้าที่เป็นตัวกลางของการผสม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้น ใช้เวลาในการผสมประมาณ 8-10 ชั่วโมง ซึ่งเวลาที่ใช้มีความสำคัญ เพราะถ้าใช้เวลาน้อยเกินไป สารผสมที่ได้จะไม่เป็นเนื้อเดียวกันและมีขนาดอนุภาคใหญ่ หลังจากนั้นนำมากรองเอาตัวกลางในการผสมออก ก่อนนำไปอบและเผาแคลไซน์ต่อไป

การผสมวิธีนี้เป็นวิธีที่ราคาถูก สะดวก ขั้นตอนไม่มาก และเป็นวิธีการผลิตผงเซรามิก PZT ที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิต

2. Chemical mixing

วิธีนี้เป็นการผสมสารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของสารละลายและเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของสารอินทรีย์ เช่น ออกซาเลทหรือซิเตรท สารเหล่านี้สามารถสลายตัวได้ง่ายโดยความร้อน ตัวอย่างของการผสมแบบนี้คือ วิธี sol-gel วิธีนี้สารตั้งต้นที่อยู่ในรูปของสารละลายจะทำปฏิกิริยากันเกิดเป็นสารประกอบตัวใหม่ขึ้น มีลักษณะเป็นสารละลายคอลลอยด์ (sol) นำสารที่ได้ไปผ่านขบวนการ condensation เกิดเป็นสารประกอบที่อยู่ในรูป gel หลังจากนั้นให้ความร้อนกับสารเพื่อแยกตัวทำละลายออก ทำให้ช่องว่างภายใน gel มีขนาดเล็กลง สารที่ได้จะเปลี่ยนรูปจาก gel เป็นของแข็ง แล้วจึงนำไปเผาแคลไซน์

วิธีนี้มีขั้นตอนมากกว่าวิธีแรก เสียค่าใช้จ่ายสูง แต่สารผสมที่ได้มีความบริสุทธิ์มากกว่า

การเผาแคลไซน์ (calcination)

เป็นการให้ความร้อนแก่สารผสม เพื่อเผาไหม้สารอินทรีย์ที่ตกค้างออกจากส่วนผสม และเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างออกไซด์ของสารตั้งต้นแต่ละชนิด จนเกิดเป็นสารประกอบ PZT ที่ต้องการเพียงเฟสเดียว (single phase) อุณหภูมิการเผาแคลไซน์ของสารประกอบแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ PZT อยู่ที่ประมาณ 800 – 900 °C ซึ่งอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ต้องมีความเหมาะสม ถ้าอุณหภูมิต่ำเกินไป สารประกอบ PZT ที่ได้จะไม่สมบูรณ์เนื่องจากมีเฟสของสารอื่นปะปนอยู่ สารประกอบที่ได้จะไม่เป็น single phase แต่ถ้าใช้อุณหภูมิและเวลาสูงมากเกินไป จะเกิดการระเหยของ PbO ทำให้เกิดการสูญเสียองค์ประกอบของ PZT ซึ่งจะไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ และเกิดน้ำหนักระเหยสูงเนื่องจากการระเหยของ PbO นอกจากนี้ภาชนะที่ใช้บรรจุสารในการเผาต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารและสามารถทนความร้อนสูงสุดในการเผาได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับสารที่ใช้ในการเผา สำหรับ PZT นิยมใช้ถ้วยอลูมินา (alumina crucible)

การบด (milling)

การเผาแคลไซน์ทำให้สารประกอบ PZT ที่ได้หดรัดและจับเป็นก้อนแข็ง จึงต้องนำมาบดเพื่อให้แตกออกเป็นผงและลดขนาดอนุภาคของสารประกอบ เพื่อให้ได้ผง PZT ที่ละเอียดมีขนาดอนุภาคเล็ก ทำให้ PZT หลังเผาซินเทอร์มีขนาดเกรนที่เล็ก เพื่อสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี

ขั้นตอนนี้จะมีการเติมตัวประสาน (binder) เป็นสารอินทรีย์ เช่น โพลีไวนิล - แอลกอฮอล์ (PVA) ลงไปผสมกับ PZT เพื่อช่วยในการขึ้นรูปขึ้นงานตามแบบที่ต้องการ ทำให้ขึ้นงานก่อนเผาสามารถคงรูปอยู่ได้และมีความแข็งแรงเพียงพอเพื่อสะดวกในการเคลื่อนย้าย ตัวประสานที่ใช้ต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบและต้องสลายตัวได้ที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมาก

การขึ้นรูป (forming)

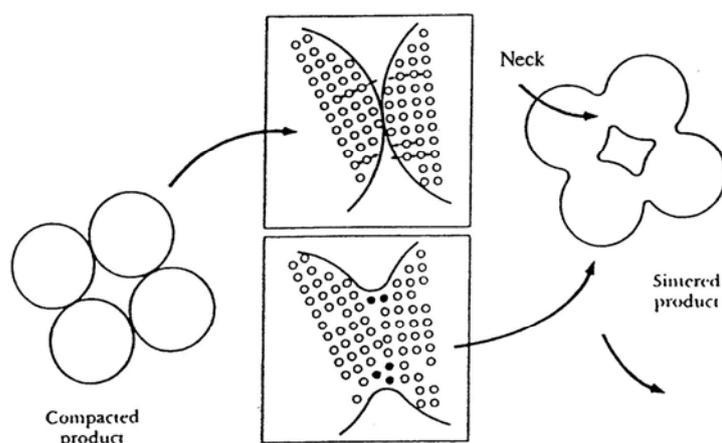
วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกสามารถใช้วิธีการขึ้นรูปแบบเดียวกันกับวัสดุเซรามิกทั่วไป เช่น การทำเป็นแผ่น (tape – casting) , การอัด (pressing) และการรีด (extrusion) เป็นต้น ซึ่งการเลือกวิธีการขึ้นรูปขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของชิ้นงานที่ต้องการ กรณีที่ชิ้นงานเป็นแผ่นบาง ๆ เช่นที่ใช้ใน buzzer , diaphragm จะขึ้นรูปโดยวิธี tape – casting ส่วนชิ้นงานที่เป็นแผ่นกลมหนาเช่น

ที่ใช้ในเครื่อง ultrasonic cleaning , อุปกรณ์หาปลา (fish finder) จะใช้การขึ้นรูปโดยวิธีอัดขึ้นรูป (pressing) ส่วนการขึ้นรูปโดยวิธี extrusion จะได้ชิ้นงานที่เป็นแท่งยาว

แรงดันที่ใช้ในการอัดขึ้นรูปก็มีความสำคัญเช่นกัน แรงดันมากขึ้นจะทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น แต่ถ้าใช้แรงดันในการอัดมากเกินไป เมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ชิ้นงานจะเกิดการขยายตัวทำให้เกิดรอยร้าวขึ้น ถ้าใช้แรงดันอัดน้อย ชิ้นงานที่ได้จะมีความหนาแน่นต่ำ และเมื่อนำไปเผาซินเทอร์แล้วจะพบว่าเกิดรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานที่ได้เสียคุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกไปหรือมีสมบัติทางไฟฟ้าที่ไม่ดี

การเผาซินเทอร์ (sinter)

หลังจากขึ้นรูปชิ้นงานแล้ว ชิ้นงานจะถูกนำมาเผาอีกครั้งเพื่อทำให้อนุภาคของสารเกิดการจับตัวกันแน่นยิ่งขึ้น โดยขบวนการเผาซินเทอร์ เป็นการเคลื่อนอนุภาคของสารให้เข้าใกล้ชิดกัน โดยวิธีการควบคุมมวลของสารที่เป็นผงเล็ก ๆ ไม่ให้แตกกระจายเป็นผงเล็ก ๆ อีก นั่นคือ หลังจากอัด PZT ที่เป็นผงด้วยแรงดันสูงแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิสูง จะทำให้อนุภาคของสารเข้าใกล้ชิดกันยิ่งขึ้น เกิดพันธะที่แข็งแรง เพิ่มความแข็งแรงของชิ้นงาน ระหว่างการเผา อนุภาคของสารจะเกิดการแพร่ (diffusion) เข้าหากันและเชื่อมติดกัน ลักษณะเป็นรอยคอดที่เรียกว่า neck neck นี้จะหนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ดังภาพที่ 7 อนุภาคจะชิดเข้าหากันจนช่องว่างถูกกำจัด ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 7 การเกิด neck ระหว่างอนุภาคในขณะเผาซินเทอร์

ที่มา: เซ็ดศักดิ์ (2538)

สาร PZT มีอุณหภูมิเผาซินเทอร์อยู่ในช่วง 1100–1300 °C แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงเกิน 900 °C จะเกิดการระเหยของ PbO ออกจากชิ้นงาน ทำให้อัตราส่วนผสมผิดไปมีผลต่อสมบัติของวัสดุ เช่น ค่า k_p ดังนั้นจึงต้องมีการใส่ผง PZT ไว้ในถ้วยเผาเพื่อควบคุมความดันไอของตะกั่ว และช่วยลดการสูญเสียของตะกั่ว (Lead Loss) จากเม็ดสาร ชิ้นงานที่ผ่านการเผาแล้วจะมีการหดตัว (shrinkage) ดังนั้นต้องมีการออกแบบเพื่อขนาดของชิ้นงานก่อนเผาให้มีความสัมพันธ์กัน จึงจะได้ขนาดตามต้องการ

การทำขั้วไฟฟ้า (electrode)

คือการทำขั้วไฟฟ้าให้กับชิ้นงาน เพื่อทำหน้าที่เหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าในขั้นตอนการ poling และทำหน้าที่ส่งผ่านกระแสไฟฟ้าไปยังชิ้นงาน ในการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก วัสดุที่นิยมใช้ทำขั้วคือ โลหะเงิน (Ag) เนื่องจากนำไฟฟ้าได้ดีและมีราคาถูก

การทำขั้วมีหลายวิธี เช่น การระเหย (evaporation) , sputtering ซึ่ง 2 วิธีนี้ต้องทำในระบบที่เป็นสุญญากาศ (vacuum) และขั้นตอนยุ่งยาก จึงนิยมทำขั้วโดยวิธี painting เป็นการทาโลหะเงินลงบนผิวหน้าของชิ้นงานทั้ง 2 ด้าน แล้วนำไปอบเพื่อให้โลหะเงินเกาะติดชิ้นงานได้แน่น และไล่ฟองอากาศออกจากรอยต่อระหว่างผิวของชิ้นงานกับโลหะเงินที่ทา

การโพล (poling)

การให้สนามไฟฟ้าแก่ชิ้นงานผ่านขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้ได้โพลในชิ้นงานเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ในทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้ ทำให้เกิดโพลาริเซชันในเม็ดสาร ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการทำวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เนื่องจากสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำโพล วัสดุแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน สำหรับเซรามิก PZT จะใช้สนามไฟฟ้าประมาณ 1.5 – 2 kV / mm. ทำการโพลในอ่างน้ำมันซิลิโคน (silicone oil) เนื่องจากมีค่า dielectric strength สูงกว่าอากาศ ที่อุณหภูมิ 120 °C เพราะที่อุณหภูมิสูงสามารถเหนี่ยวนำทิศทางของไดโพลได้ดีกว่า ใช้เวลาในการโพลนานตั้งแต่ 5 – 10 นาที

งานวิจัยที่เกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริก

งานวิจัยที่เกี่ยวกับสารเพียโซอิเล็กทริก สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ด้าน คือ

1. งานวิจัยเกี่ยวกับสมบัติและการปรับปรุงคุณสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริก

เจดศักดิ์ (2538) วิจัยการเตรียมสาร PZT และการเตรียมของผสมระหว่าง PZT กับเทอร์มัลพลาสติกที่สัดส่วนของเซรามิก PZT ที่แตกต่างกัน และศึกษาสมบัติเพียโซอิเล็กทริก, ไดอิเล็กทริกของของผสมที่เตรียมได้

วิบูรณ์ (2541) วิจัยการเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่าง PZT กับอีพอกซีเรซิน และศึกษาผลของสัดส่วนปริมาตรเซรามิก PZT ต่อสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) (2540) ได้ทำการวิจัยและพัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ที่เป็นสารประกอบที่ปลอดภัยจากออกไซด์ของตะกั่ว คือบิสมัทโซเดียมไททานต (BNT) เนื่องจากสารเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันคือ PZT มีออกไซด์ของตะกั่วซึ่งเป็นพิษและทำให้เกิดปัญหามลภาวะทางอากาศ

2. งานวิจัยเกี่ยวกับการนำสารเพียโซอิเล็กทริกไปใช้เป็นส่วนประกอบในเครื่องมือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ถวัลย์วงศ์ (2531) ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบมีดผ่าตัดอัลตราโซนิก โดยใช้สารเพียโซอิเล็กทริกชนิดเซรามิก PZT เป็นทรานสดิวเซอร์ ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 28 KHz จากวงจร Wien Bridge ให้เป็นคลื่นการสั่นสะเทือนส่งผ่านไปยังด้ามมีด ทำให้ใบมีดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสามารถตัดผ่านเนื้อเยื่อได้โดยไม่ต้องออกแรงเฉือน

ทวี (2537) ศึกษาและผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกชนิด PZT เพื่อนำมาใช้ในโรงงานผลิตชิ้นส่วน buzzer เพื่อลดการตั้งชื่อเซรามิก PZT จากต่างประเทศ โดยชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.35 ซม.หนาน้อยกว่า 0.5 มม.

ศุรนนท์ และคณะ (2545) ใช้เซรามิก PZT เป็นทรานสดิวเซอร์ สำหรับเครื่องต้นแบบ เครื่องตรวจฟังเสียงหัวใจ โดยสารประกอบ PZT จะทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณเสียงหัวใจเพื่อ เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วจึงผ่านวงจรแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล เพื่อป้อนเข้า คอมพิวเตอร์ให้แสดงผลออกมาในรูปของสเปกตรัมของเสียงหัวใจ โดยสามารถตรวจฟังเสียงหัวใจ ที่มีความถี่ประมาณ 80-90 Hz ได้ชัดเจน

อดิศักดิ์ และคณะ (2549) นำเพียโซอิเล็กทริกมาประกอบเป็นชุดหัวเชื่อมที่มีลักษณะครึ่ง วงกลม สำหรับการเชื่อมต่อพลาสติกกลม ซึ่งเพียโซอิเล็กทริกจะสั่นเมื่อได้รับสัญญาณความถี่จาก วงจรกำเนิดความถี่(Function Generator)และส่งคลื่นการสั่นมาที่หัวเชื่อมที่แนบสนิทกับผิวของท่อ ทำให้พลาสติกตรงจุดเชื่อมหลอมละลายเข้าด้วยกัน

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ได้ทำการวิจัยและพัฒนา กระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเพื่อใช้งานด้านทรานสดิวเซอร์ในเครื่องมือต่างๆ อย่างต่อเนื่อง ซึ่งทรานสดิวเซอร์ที่วิจัยและพัฒนา มีหลักการทำงานคือกำเนิดคลื่นการสั่นสะเทือนที่ ความถี่ระดับอัลตราโซนิคเมื่อมีการผ่านสัญญาณไฟฟ้าเข้าไป เครื่องมือที่ทางวว. ได้วิจัยและสร้าง ได้แก่

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2542)วิจัยเครื่องทำความ สะอาดอัลตราโซนิค คลื่นการสั่นสะเทือนความถี่ 40 KHz จากเซรามิกเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่ บริเวณก้นอ่างล้าง ทำให้อนุภาคของน้ำที่อยู่ในอ่างสั่นสะเทือนและสามารถแทรกเข้าไปยังส่วน ต่างๆของอุปกรณ์ทำให้คราบสกปรกที่ติดอยู่หลุดออก โดยไม่ทำให้ผิวหนังของวัสดุเสียหาย

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2547)วิจัยเครื่องพ่นหมอก สัญญาณไฟฟ้าความถี่สูงที่ป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะทำให้เกิดคลื่นการ สั่นสะเทือนความถี่สูงประมาณ 2 MHz ผ่านไปยังอนุภาคของน้ำ ให้เกิดการแตกตัวเป็นกลุ่มไอน้ำ โดยไม่มีความร้อนเกิดขึ้น

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2549)วิจัยเครื่องอัลตราโซนิค ภายภาพบำบัด วงจรกำเนิดคลื่นจะเป็นชุดขับเคลื่อนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่กับแผ่นอลูมิเนียม บริเวณหัวขวด ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนด้วยความถี่สูงถึง 1 MHz เมื่อคลื่นสัมผัสบริเวณผิวหนังจะ ทำให้โมเลกุลของน้ำเหลืองและเลือดเกิดการสั่นจึงทำให้เลือดหมุนเวียนได้ดีกว่าปกติ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)วิจัยเครื่องผสมสารอัลตราโซนิค วงจรกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 30KHz ขนาดกำลังไฟฟ้า 90 วัตต์ ทำให้เพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเกิดการสั่นและส่งคลื่นอัลตราโซนิคไปที่ปลายของหัวปืน ทำให้สามารถผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกันได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาเคมี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2550)วิจัยจักรอัลตราโซนิค เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ส่งคลื่นการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 28 KHz มาที่ปลายของหัวเชื่อมที่สัมผัสกับวัสดุเช่นหน้ากากป้องกันฝุ่นหรือผ้าอ้อม ทำให้บริเวณที่คลื่นส่งไปถึงเกิดการเสียดสีทำให้เกิดความร้อนจึงสามารถเย็บวัสดุได้โดยไม่ต้องใช้เข็มและด้ายจึงไม่เกิดรูของรอยตะเข็บบนเนื้อวัสดุ

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (2551)วิจัยเครื่องล้างผักผลไม้ปลอดสารพิษ เมื่อมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่ติดอยู่บริเวณก้นอ่างเครื่องล้าง ทำให้เกิดคลื่นการสั่นสะเทือนความถี่ 60 KHz ส่งไปยังน้ำที่อยู่ในอ่างล้าง น้ำที่สั่นสะเทือนด้วยคลื่นอัลตราโซนิคทำให้สิ่งสกปรก จุลินทรีย์และสารเคมีตกค้างที่ติดอยู่หลุดออก

เครื่องมือเชื่อมปากถุงพลาสติก

เครื่องมือสำหรับเชื่อมปากถุงพลาสติกที่ใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งได้ 3 แบบ

1. ใช้เทียนลนปิดปากถุงพลาสติก
2. ใช้ขวดลวดความร้อนทำให้พลาสติกหลอมติดกัน
3. ใช้คลื่นการสั่นสะเทือนทำให้อนุภาคที่อยู่ภายในพลาสติกสั่นสะเทือนและเกิดการเสียดสีกันจนทำให้เกิดความร้อนขึ้น บริเวณที่พลาสติกสัมผัสกันจึงเชื่อมติดกันได้

ในงานวิจัยนี้เลือกแบบที่ 3 คือการใช้คลื่นการสั่นสะเทือนมาออกแบบสร้างเครื่องเชื่อมปากถุง พลาสติกขนาดเล็ก แบบมือถือ เพราะสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา ประหยัดพลังงานเนื่องจากไม่ต้องเปิดเครื่องไว้ตลอดเวลาและสามารถเชื่อมพลาสติกได้ทันทีโดยไม่ต้องรอและไม่ทำให้เกิดควัน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์การเตรียมเซรามิก

1.1 เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง รุ่น LA 230S บริษัท sartorius (Germany)

1.2 เครื่องบดแบบ ball – mill บริษัท Hitachi (Japan)

1.3 ตู้อบ รุ่น memmert

1.4 เตาสำหรับเผา รุ่น Blue M บริษัท Blue M electric (USA)

1.5 เครื่องอัดไฮดรอลิก บริษัท T.M.C. Hydraulic Press (Thailand)

1.6 เครื่องอัด CIP รุ่น Dr.CIP บริษัท Kobelco (Japan)

1.7 เครื่องขัดเม็ดสาร รุ่น IMPTECH 101 Grinder polisher บริษัท IMP

1.8 แผ่นขัดซิลิกอนคาร์ไบด์ บริษัท Buchler (USA)

1.9 อุปกรณ์การโพล จัดทำโดยวว.

2. อุปกรณ์การออกแบบวงจร

2.1 แผ่นวงจรพิมพ์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆสำหรับประกอบวงจร

2.2 เครื่องมือสำหรับทดสอบและประกอบวงจร: ออสซิลโลสโคป, มัลติมิเตอร์, ชุดหัว
แรงสำหรับบัดกรีและที่ดูดตะกั่ว

วิธีการ

1. การเตรียมเซรามิก PZT

งานวิจัยนี้ต้องการเตรียมชิ้นงานเซรามิก PZT ที่มีลักษณะเป็นวงแหวน จำนวน 4 ชิ้น และมีค่าสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกที่ใกล้เคียงกับค่าในงานวิจัยของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ลักษณะของเม็ดเซรามิก PZT ที่ต้องการคือ

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 15 มม. ใน 7 มม.หนา 5 มม.

$$\text{ค่า } k_p = 0.69 \quad \text{ค่า } d_{33} = 372 \text{ pC/N}$$

1.1 การผสมสารตั้งต้น

ผสมสารตั้งต้นโดยวิธี conventional mixing สารตั้งต้นที่ใช้เป็นสารประกอบออกไซด์คือ เลดออกไซด์ (lead oxide : PbO) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (zirconium dioxide : ZrO₂) และไททานเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide : TiO₂) มีสารตัวเติม คือ แบเรียมคาร์บอเนต (barium carbonate : BaCO₃) สารตั้งต้นแต่ละตัวถูกนำไปชั่งน้ำหนักในอัตราส่วน Pb : Ba = 0.85 : 0.15 และ Zr : Ti = 0.52 : 0.48 โดยโมล ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารตั้งต้นที่นำมาใช้เตรียมวัสดุ PZT

ชื่อสาร	บริษัท	มวลโมเลกุล	มวลที่ใช้ (กรัม)	ลักษณะ , สี
PbO	Fluka	223.19	58.9649	ผงสีเหลือง
ZrO ₂	Riedel de Haen	123.22	19.9143	ผงสีขาว
TiO ₂	Fluka	79.9	11.9198	ผงสีขาว
BaCO ₃	Fluka	197.37	9.1995	ผงสีขาว
(Pb0.85Ba0.15)(Zr0.52Ti0.48)O3			100.0	

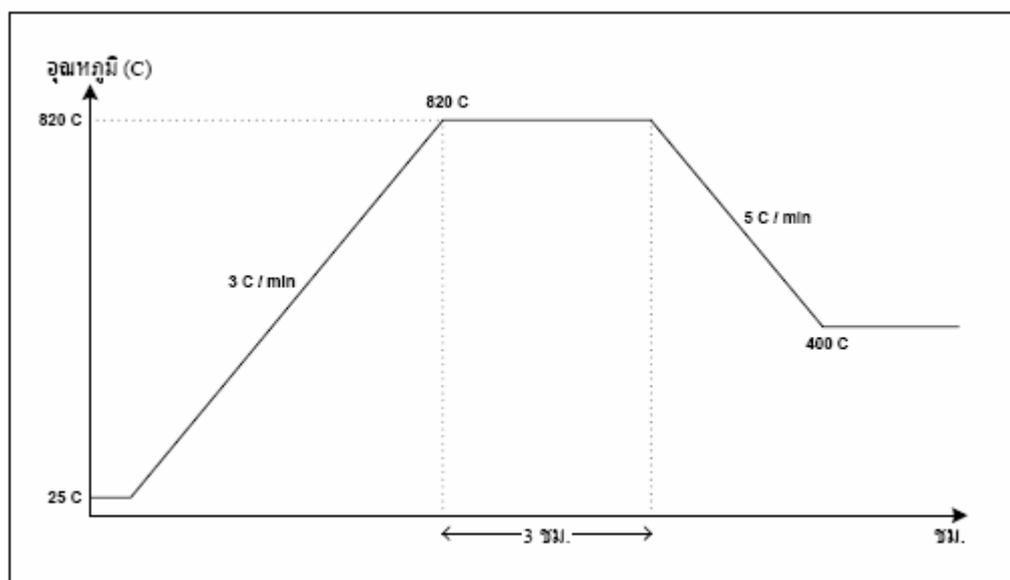
นำสารตั้งต้นบรรจุลงในเครื่องบดแบบ ball mill ใส่ลูกบดทำด้วยเซอร์โคเนียขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ประมาณ 1 ใน 3 ของหม้อบด เพื่อลดขนาดของสารตั้งต้น ใช้ความเร็วในการ

บดผสม 70 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมมาคนด้วย magnetic stirrer โดยใช้ ethyl alcohol absolute boiling point 78.5°C บริสุทธิ์ 99.5 % ปริมาตร 80 มิลลิลิตร เป็นตัวกลางช่วยให้สารตั้งต้นผสมกันได้ดียิ่งขึ้น ใช้เวลา 1 ชั่วโมง และต้องปิดพาราฟินกันสารกระเด็นและกัน alcohol ระเหย

นำสารผสมมากรองเอา ethyl alcohol ออก โดยทำการ suction หลังจากนั้นนำสารไปอบที่อุณหภูมิ 80°C นาน 1 ชั่วโมง แล้วนำมาบดกระจายด้วยโกร่ง (mortar) ก่อนเผาแคลไซน์

1.2 การเผาแคลไซน์

บรรจุสารผสมลงใน alumina crucible บริสุทธิ์ 99.9 % ทนความร้อนได้ 1600°C ปิดฝาเพื่อป้องกันการระเหยของสารเล็ดออกไซด์ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของสาร PZT ไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้ นำด้วยเผาเข้าเตาเผา โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องในอัตรา $180^{\circ}\text{C}/\text{ชม}$. จนถึงอุณหภูมิแคลไซน์ที่ 820°C และคงไว้ นาน 3 ชั่วโมง เพื่อให้สารผสมทำปฏิกิริยากันเป็นสารประกอบ PZT ที่มีเพียงเฟสเดียว หลังจากนั้นลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา $300^{\circ}\text{C}/\text{ชม}$. จนถึงอุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แผนภูมิอุณหภูมิการเผาแคลไซน์

นำสารประกอบ PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์ไปวิเคราะห์เฟสด้วยเครื่อง XRD เพื่อตรวจสอบเฟสที่ได้ว่าเป็นเฟสเดียวที่สมบูรณ์หรือไม่

1.3 การบด

การเผาแคลไซน์ทำให้สาร PZT เกาะตัวเป็นก้อน จึงต้องนำไปบดด้วย ball mill นาน 9 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปร่อนด้วยตะแกรงเบอร์ 80 mesh (width 180 μm) เพื่อให้สารมีความละเอียดสม่ำเสมอ แบ่งสารส่วนหนึ่งไว้ร่อนพื้นในขั้นตอนการเผาซินเทอร์ ส่วนที่เหลือนำไปผสมกับตัวประสาน คือ polyvinyl alcohol (PVA) เพื่อช่วยในการขึ้นรูป โดยเตรียมจากการละลายสาร PVA ในอัตราส่วน 0.01 g ต่อน้ำกลั่น 0.5 ml ปริมาณตัวประสานที่ใช้คิดเป็นอัตราส่วนสาร PVA ต่อสาร PZT เท่ากับ 0.01 : 1 โดยน้ำหนัก นำ PVA ที่ละลายแล้วไปผสมกับ PZT ในบีกเกอร์ คนให้เข้ากันประมาณ 1 ชั่วโมง สารที่ได้จะมีลักษณะข้นและเหนียว นำสารไปอบที่อุณหภูมิ 100°C นาน 2 ชั่วโมง

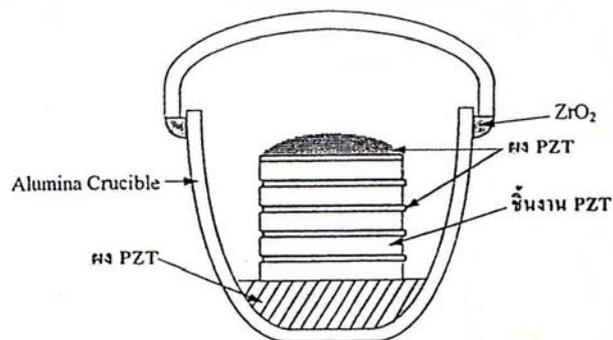
นำสาร PZT ที่ผสม PVA แล้ว มาบดให้ละเอียดด้วย โกร่งและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 80 mesh พร้อมที่จะนำไปอัดขึ้นรูปต่อไป

1.4 การขึ้นรูป

นำผง PZT ที่เตรียมได้มาอัดขึ้นรูป โดยกระบวนการอัด (pressing) ด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิกด้วยแรง 0.5 ตัน ได้เม็ด PZT ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 16 มม. ใน 7 มม.หนาประมาณ 6 มม. น้ำหนักเม็ดละ 6.5 g และนำไปอัดเพิ่มความหนาแน่นด้วยเครื่องอัด CIP (cold isostatic pressing) แรง 2000 kgf/cm^2 นำเม็ดสารที่อัดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 80°C เพื่อลดความชื้น

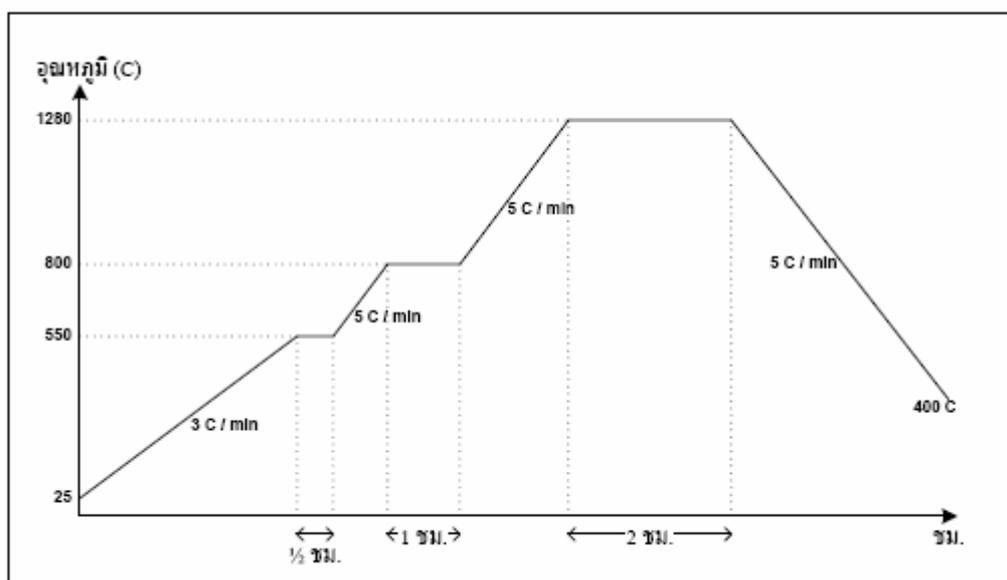
1.5 การเผาซินเทอร์

นำเม็ด PZT ที่อัดได้มาเรียงใส่ใน alumina crucible ที่รองพื้นด้านล่างด้วยผงของสารประกอบ PZT ที่แยกไว้เพื่อควบคุมความดันไอของตะกั่ว ช่วยเพิ่มบรรยากาศ PbO ทำให้ PbO ในเม็ด PZT ไม่ระเหยหรือระเหยน้อยลงได้ และระหว่างเม็ด PZT ที่เรียงเป็นชั้นจะใส่ผง PZT คั่นไว้เพื่อให้แยกแต่ละเม็ดออกจากกันได้ง่าย หลังจากการเผาซินเทอร์แล้ว กลุ่ม PZT เม็ดบนสุดด้วยผง PZT ปิดผนึกฝาด้วยเผาด้วย ZrO_2



ภาพที่ 9 การจัดเรียงเม็ด PZT เพื่อเผาซินเทอร์

เผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1280°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้อง ในอัตรา 180°C/ชม. ไปถึงอุณหภูมิ 550°C และคงไว้ 1/2 ชั่วโมง เพื่อเผาไล่สารอินทรีย์ที่ปะปนออกจากเม็ดสาร เพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตรา 300°C/ชม. ไปถึงอุณหภูมิ 800°C คงไว้ 1 ชั่วโมง เพื่อไล่ PVA หรือตัวประสานออกให้หมด จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราเดิมจนถึงอุณหภูมิเผาซินเทอร์ จากนั้นลดอุณหภูมิลงสู่อุณหภูมิห้องด้วยอัตรา 300°C/ชม. ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แผนภูมิอุณหภูมิการเผาซินเทอร์

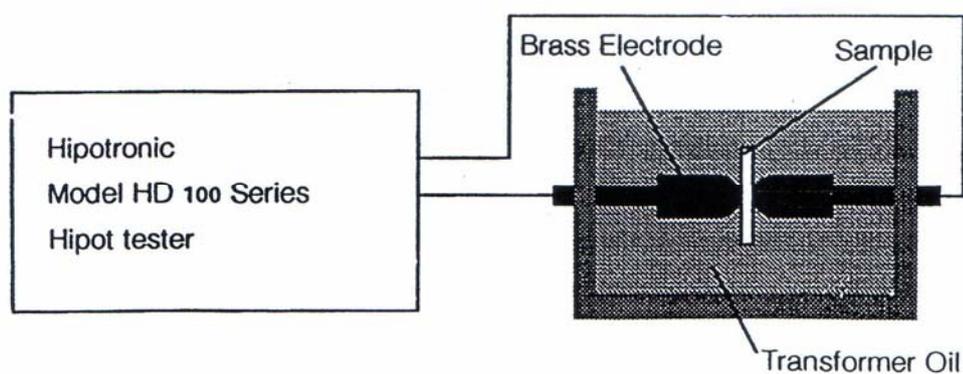
1.6 การทำขั้ว

เมื่อดสารก่อนนำไปทำขั้วถูกขัดปรับขนาดและขัดผิวหน้าให้เรียบโดยผิวทั้งสองด้าน จะต้องขนานกันด้วยเครื่องขัดแบบกระดาษทราย โดยเริ่มต้นจากการขัดอย่างหยาบด้วยกระดาษทรายเบอร์ 300 , 800 และ 1200 ตามลำดับ เพื่อลดความหนาของเมื่อดสารจนเหลือประมาณ 5 mm. หลังจากนั้นจึงขัดละเอียดเพื่อให้ผิวหน้าเรียบขึ้นเงาด้วยผงขัดอลูมินาขนาด 1 ไมโครเมตร ก่อนนำไปทำขั้ว

นำชิ้นงานมาทาผิวหน้าทั้งสองด้านด้วยโลหะเงิน (silver paint) แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 600°C นาน 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ฟองอากาศออกจากรอยต่อ ทำให้โลหะเงินเกาะติดชิ้นงาน เมื่อดสารที่ทำขั้วแล้วถูกนำไปทำโพล

1.7 การโพล

ทำโพลโดยใช้สนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 kV / mm. ผ่านไปยังชิ้นงานที่แช่อยู่ในอ่างน้ำมันซิลิโคนที่ถูกอุ่นให้มีอุณหภูมิ 120°C นาน 5 นาที เพื่อให้โพลาริเซชันที่เกิดขึ้นเองพยายามจัดเรียงไปตามทิศทางเดียวกันกับทิศของสนามไฟฟ้าที่ให้ ทำให้เกิดโพลาริเซชันลัทธิในเมื่อดสาร เมื่อดสารที่ผ่านการโพลถูกทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 วัน จึงทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกต่อไป



ภาพที่ 11 แผนภาพการโพล

2. การวิเคราะห์และการตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุ

เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์และตรวจวัดคุณสมบัติของวัสดุ

1. เครื่อง X – ray diffractometer (XRD) ยี่ห้อ Shimadzu
2. เครื่อง LF Impedance Analyzer รุ่น 4192A ยี่ห้อ Hewlett Packard (HP)
3. เครื่อง Berlincourt piezo d – meter รุ่น CADT – 3300 ยี่ห้อ Channel

2.1 การวิเคราะห์เฟส

เฟสของสารถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X – ray diffractometer (XRD) สำหรับสารตัวอย่างแบบผงจะถูกบรรจุลงในช่องแผ่นอลูมิเนียมรองรับ (aluminium holder) และปาดผิวหน้าให้เรียบ ส่วนเม็ดสารตัวอย่างจะติดใน aluminium holder โดยใช้ดินน้ำมันช่วยพยุงและผิวหน้าของเม็ดสารควรเรียบขนานกับแผ่นอลูมิเนียม

การวิเคราะห์ผลทำโดยการนำ X – ray diffraction pattern ที่ได้จากการวิเคราะห์สารตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับ standard pattern ของสาร PZT ใน JCPDS (Journal of Committee for Power Diffraction Standard)

2.2 การหาค่าความหนาแน่น

ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเทอร์แล้วหาได้จากการชั่งน้ำหนักในของเหลว โดยอาศัยหลักของอาร์คิมิดีส (Archimedes' Principle) โดยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักแบบดิจิตอลที่มีอุปกรณ์หาความหนาแน่น (densometer) วิธีการชั่งมวลเพื่อหาความหนาแน่นเริ่มจากประกอบชุดอุปกรณ์หาความหนาแน่นเข้ากับเครื่องชั่งให้เรียบร้อย เตรียมของเหลวที่จะใช้ ในที่นี้ใช้น้ำกลั่น จากนั้นปรับศูนย์แล้วนำเม็ดเซรามิก PZT ชั่งมวลในอากาศ อ่านค่ามวลแล้วปรับศูนย์ โดยที่เม็ดสารยังชั่งอยู่ จากนั้นนำเม็ด PZT ลงไปชั่งในน้ำกลั่น ตัวเลขมวลจะติดลบให้อ่านเฉพาะตัวเลข ค่าที่ได้คือมวลของน้ำกลั่นที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเม็ด PZT ซึ่งคำนวณค่าความหนาแน่นได้จากสมการ

$$\rho = \left(\frac{M}{M_0} \right) \rho_0 \quad (1)$$

โดยที่ ρ คือ ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก PZT (g/cm^3)

ρ_0 คือ ความหนาแน่นของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิขณะซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 g/cm^3

M คือ มวลของเม็ดสารที่ชั่งในอากาศ (g)

M_0 คือ มวลของของเหลว (น้ำกลั่น) ที่มีปริมาตรเท่ากับปริมาตรของเม็ดสาร (g)

2.3 การหาค่าการหดตัวและน้ำหนักสูญหาย

เม็ด PZT ที่อัดขึ้นรูปแล้วและเม็ด PZT หลังเผาซินเทอร์ถูกนำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาคำนวณหาค่าจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การหดตัว} = \left[\frac{D_b - D_a}{D_b} \right] \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่ D_b คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผา (mm.)

D_a คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหลังเผา (mm.)

$$\text{เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหาย} = \left[\frac{W_b - W_a}{W_b} \right] \times 100\% \quad (3)$$

โดยที่ W_b คือ น้ำหนักก่อนเผา (g)

W_a คือ น้ำหนักหลังเผา (g)

2.4 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก

เม็ดสาร PZT ที่ผ่านการโพล จะทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องนาน 1 วัน จึงทำการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก

2.4.1 สมบัติไดอิเล็กทริก

ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกและค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก

การหาค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant) ϵ_r ของเม็ด PZT ได้จากการวัดค่าความจุไฟฟ้า (C) ของเม็ดสารด้วยเครื่อง HP 4192A LF Impedance Analyzer โดยวัดค่า C ที่อุณหภูมิห้อง ความถี่ 1 kHz แล้วนำมาคำนวณหาค่า ϵ_r ได้จากสมการ

$$\epsilon_r = \frac{t}{\epsilon_0 A} C \quad (4)$$

โดยที่ ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12} F / m

t คือ ความหนาของชิ้นงาน (m)

A คือ พื้นที่ผิวหน้าตัดของชิ้นงาน (m^2)

ค่าสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) $\tan \delta$ วัดแล้วอ่านค่าได้โดยตรงจากเครื่อง HP 4192A LF Impedance Analyzer โดยวัดไปพร้อมกับค่าความจุไฟฟ้า (C)

2.4.2 สมบัติเพียโซอิเล็กทริก

ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant : d_{33})

ค่า piezoelectric constant (d_{33}) เป็นค่าประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแนวแกน Z เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกระทำในแนวแกน Z สามารถตรวจวัดโดยเครื่อง Berlincourt piezo d – meter Model CADT – 3300 หลักการทำงานของเครื่องนี้คือ ใช้ mechanical stress หรือแรงเค้นขนาด 1.5 ปอนด์ ที่ความถี่ 100 Hz กระทำต่อชิ้นงาน ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่ขั้ว electrode และสามารถอ่านค่า d_{33} บริเวณที่ทำการวัดได้โดยตรง ค่า d_{33} ของชิ้นงานเฉลี่ยจากการวัดค่าทั้งหมด 12 บริเวณ คือผิวด้านบนและผิวด้านล่างด้านละ 6 บริเวณ

ค่าตัวประกอบการเชื่อมต่อของเพียโซอิเล็กทริก

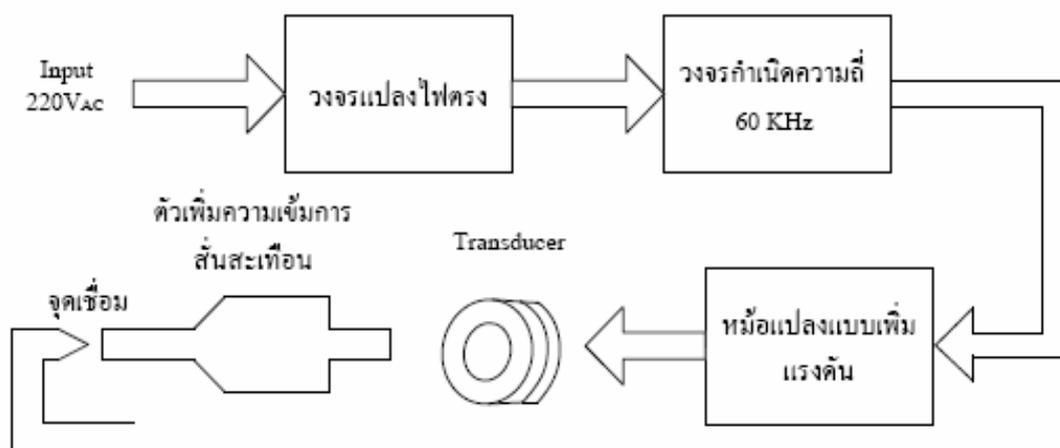
(piezoelectric coupling factor : k_p)

ค่า k_p เป็นค่าแสดงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า (หรือในทางกลับกัน) หาได้จากการวัดค่าความถี่เรโซแนนท์ (f_r) และความถี่แอนติเรโซแนนท์ (f_a) ของชิ้นงานด้วยเครื่อง HP 4192A LF Impedance Analyzer แล้วนำมาคำนวณหาค่า k_p จากสมการ

$$k_p = \sqrt{\frac{2.52(f_a - f_r)}{f_r}} + 0.038 \quad (5)$$

3. การออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับเครื่องเชื่อมอัลตราโซนิก

หลักการทำงานของเครื่องเชื่อมพลาสติก



ภาพที่ 12 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องเชื่อมพลาสติก

จากภาพที่12 หลักการทำงานของเครื่องเชื่อมพลาสติกคือ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ลักษณะ sine wave ให้กับเม็ดเพียโซอิเล็กทริก จากคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก จะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้กลายเป็นพลังงานทางกล ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมาที่พลาสติก ทำให้อนุภาคที่อยู่ภายในพลาสติกเกิดการสั่นสะเทือนและทำให้เกิดความร้อนขึ้นตรงบริเวณที่พลาสติกสัมผัสกันจึงสามารถเชื่อมติดกันได้

ในการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับเพียโซอิเล็กทริก มีคุณสมบัติที่ต้องการดังนี้

1. สามารถให้กำลังออก 55วัตต์ ขนาดสัญญาณ 353.55 V_{RMS} ความถี่ 60 KHz
2. สามารถลดค่ากำลังไฟฟ้าของสัญญาณออกได้ โดยที่ความถี่ของสัญญาณยังมีค่าใกล้เคียงเดิม
3. สัญญาณออกของวงจรมีความถี่คงที่ ($\pm 5\%$) วงจรมีเสถียรภาพไม่เปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มหรือลด
4. สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับลักษณะรูปคลื่นที่ค่อนข้างเป็น sine wave มีความถี่ตอบสนองกับความถี่ของเพียโซอิเล็กทริก
5. วงจรไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูง (> 80%)

6. ใช้อุปกรณ์น้อย

ลักษณะวงจรที่ใช้สำหรับสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับหรือวงจรออสซิลเลเตอร์สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

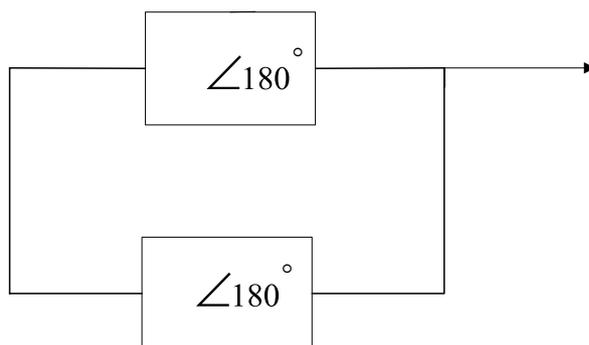
1. วงจรกำเนิดคลื่นและวงจรขับแยกกัน
2. วงจรกำเนิดคลื่นและวงจรขับเป็นวงจรชุดเดียวกัน

วงจรแบบที่ 2 มีข้อดีคือใช้อุปกรณ์น้อยกว่า มีการป้อนกลับในตัวและสามารถทำให้สัญญาณออกคงที่ได้ด้วย จึงเลือกวงจรแบบที่ 2 เป็นวงจรสร้างความถี่ในการวิจัยนี้

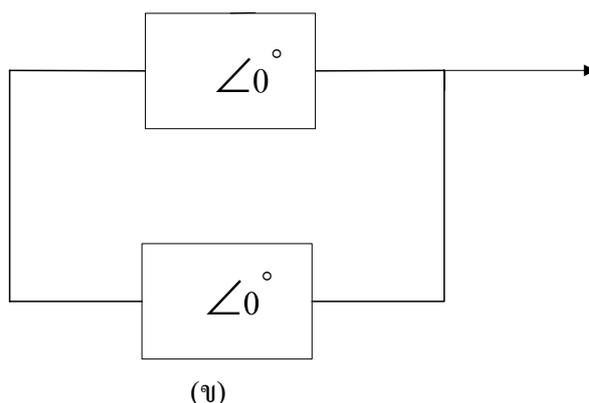
เมื่อพิจารณาจากลักษณะของวงจรที่ต้องการออกแบบแล้ว จึงนำหลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์มาใช้ในการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกต่อไป

หลักการของวงจรออสซิลเลเตอร์

วงจรออสซิลเลเตอร์คือวงจรขยายชนิดหนึ่ง แต่เป็นวงจรขยายที่มีการป้อนกลับแบบบวก มีหลักการทำงานดังนี้



(ก)



ภาพที่ 13 หลักการทำงานของวงจรรอสซิลเลเตอร์

(ก) วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ A_v และ β ทำมุม 180°

(ข) วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ A_v และ β ทำมุม 0°

โดยที่ A_v คือ voltage gain

β คือ feedback voltage gain

βA_v คือ loop gain

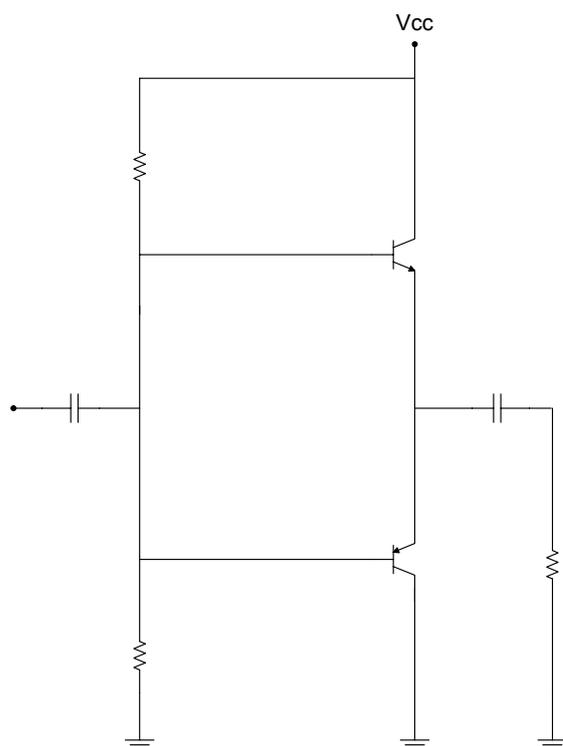
วงจรรอสซิลเลเตอร์จะเกิดการ oscillate เมื่อ

1. $\beta A_v \geq 1$
2. phase shift ของ loop gain = 0°

วงจรรขยายกำลัง (power amplifier) พื้นฐานมี 3 แบบ คือ

1. วงจรโอพีที (OPT: output transformer) เป็นวงจรรขยายที่ใช้หม้อแปลงที่ภาคสัญญาณออก
2. วงจรโอทีแอล (OTL: output transformer less) เป็นวงจรรขยายที่ปรับปรุงมาจากโอพีที โดยตัดหม้อแปลงที่ภาคสัญญาณออกทิ้งไป และต่อตัวเก็บประจุเพิ่มเข้าไปแทน
3. วงจรโอซีแอล (OCL: output capacitor less) คล้ายกับวงจรรโอทีแอล แต่ตัดตัวเก็บประจุที่ภาคสัญญาณออกทิ้ง และเพิ่มแหล่งจ่ายไฟอีก 1 แหล่ง

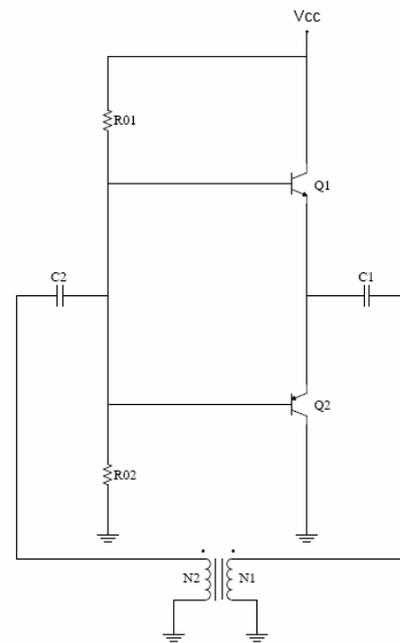
ในการวิจัยนี้ส่วนของวงจรขยายกำลัง เลือกวงจรขยายแบบโธทีแอล ที่ใช้แหล่งจ่ายไฟเพียงชุดเดียว ตัวเก็บประจุที่ภาคสัญญาณออกทำหน้าที่เชื่อมต่อสัญญาณออกไปที่โหลดและเป็นเสมือนแหล่งจ่ายไฟให้กับทรานซิสเตอร์ตัวล่าง ขณะที่ตัวล่างทำงาน ลักษณะการต่อทรานซิสเตอร์เป็นแบบคอลเลคเตอร์ร่วม(emitter follower) แบบคู่ประกอบ (complementary symmetry) คือใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด NPN คู่กับ PNP เพื่อทำหน้าที่สลับกันขยายสัญญาณกระแสออกทีละครึ่งไซเคิล โดยสัญญาณออกที่ได้จะมีเฟสตรงกับสัญญาณเข้า



ภาพที่ 14 วงจรขยายกำลังแบบคอลเลคเตอร์ร่วมและเป็นแบบคู่ประกอบ

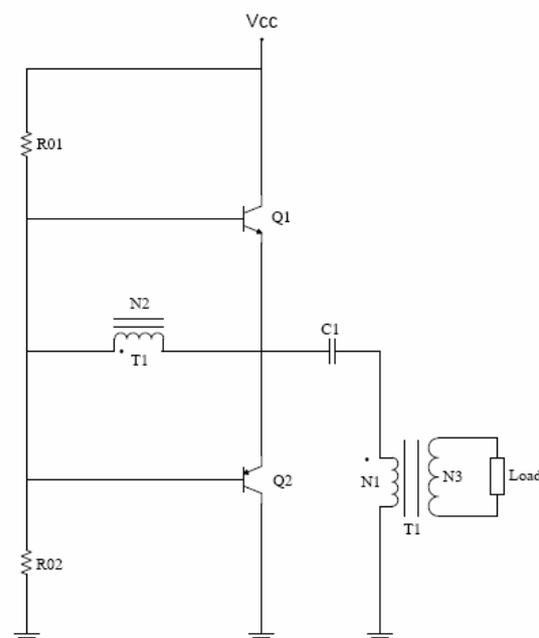
สำหรับส่วนของวงจรป้อนกลับเลือกใช้หม้อแปลง เพราะต้องการเพิ่มแรงดันออกให้กับเพียโซอิเล็กทริกและสามารถควบคุมเฟสป้องกันให้เกิดการออสซิลเลตได้ง่าย

เมื่อนำวงจรขยายกำลังและวงจรส่วนป้อนกลับมารวมกัน สามารถออกแบบเป็นวงจร
ออสซิลเลเตอร์ที่มีลักษณะดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 วงจรขยายกำลังที่มีหม้อแปลงเป็นส่วนป้อนกลับ

จากวงจรข้างบนสามารถวาดใหม่เพื่อขับ โหลดและป้อนกลับด้วยได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ออกแบบได้

หลักการการทำงานของวงจรที่ออกแบบ

เมื่อให้กำลังไฟฟ้ากับวงจร กระแสไฟฟ้าเริ่มไหลผ่าน R_{01} ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 เริ่มนำกระแส กระแสจะไหลผ่านขา E ไหลมาประจุ C_1 ผ่านเข้าห้อมแปลงด้านปฐมภูมิ (N_1) เหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทุติยภูมิ (N_2) ทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าป้อนให้โหลด และเกิดแรงดันที่ N_2 ป้อนกลับแบบบวกเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำให้ Q_1 นำกระแสมากขึ้นเรื่อยๆ และแรงดันป้อนกลับ (N_2) ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 เป็นไบอัสกลับ Q_2 จะยังคงไม่ทำงาน กระแสทรานซิสเตอร์ Q_1 จะไหลผ่าน C_1 เข้าห้อมแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะค่อยๆ ลดลงเมื่อ C_1 เริ่มเก็บประจุจนเต็ม กระแสจะหยุดไหลเข้าห้อมแปลง เส้นแรงแม่เหล็กขลุบตัวลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิ N_2, N_3 ในทิศทางตรงข้าม ทำให้แรงดันไบอัสที่เบสของ Q_1 เป็นไบอัสกลับ Q_1 หยุดทำงาน และทำให้เบสของ Q_2 เป็นไบอัสตรง ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส

เมื่อทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส จะดึงกระแส (คายประจุ) ออกจาก C_1 ทำให้เกิดกระแสไหลผ่านห้อมแปลง N_1 ในทิศทางตรงกันข้ามกับตอนแรก และเกิดแรงดันป้อนกลับที่ขดลวดทุติยภูมิ N_2 และ N_3 ทำให้ Q_2 นำกระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อ C_1 คายประจุหมด กระแสจะหยุดไหลออกจากห้อมแปลง Q_2 จะหยุดนำกระแสและผลของ ไบอัส R_{01} และการป้อนกลับจะทำให้ Q_1 เริ่มนำกระแสใหม่

การทำงานสลับกันไปมาของ Q_1 และ Q_2 ทำให้เกิดการสร้างคลื่นความถี่กระแสสลับ (เกิดออสซิลเลต) ความถี่ของวงจรขึ้นกับการเก็บประจุและการคายประจุที่ C_1 และความต้านทานด้านออกของทรานซิสเตอร์ Q_1 หรือ Q_2 กับความต้านทานสมมูลทางด้านเข้าของห้อมแปลง

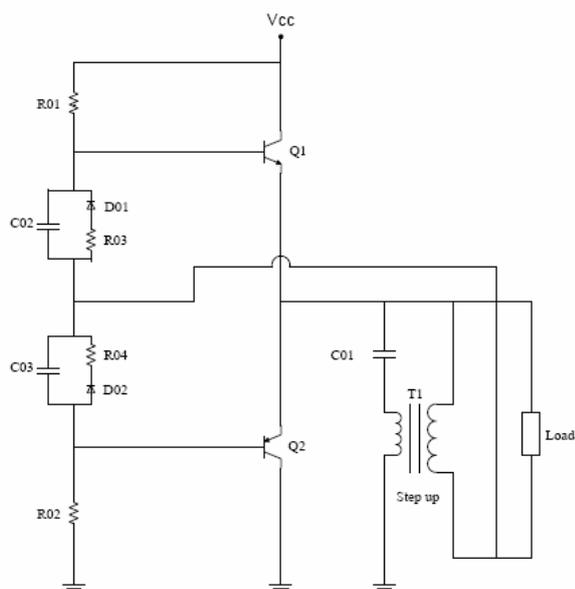
สำหรับ C_1 นอกจากทำหน้าที่เก็บประจุขณะทรานซิสเตอร์ตัวบนนำกระแสและเป็นแหล่งจ่ายไฟชั่วคราวให้กับทรานซิสเตอร์ตัวล่าง Q_2 ทำงานแล้ว ยังเป็นตัวกันกระแสไฟตรงไม่ให้ออกมายังห้อมแปลง เพื่อป้องกันคอยล์ห้อมแปลง N_1 เสียหาย จากกรณีที่ทรานซิสเตอร์ Q_1 เกิดลัดวงจรทำให้แรงดันไฟตรงจ่ายมาที่ขดลวดของห้อมแปลงได้

การควบคุมความถี่ในการออสซิลเลตของสัญญาณ ไฟฟ้าขึ้นอยู่กับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันในวงจร (RC time constant) คือค่าความต้านทานสมมูลที่มีในห้อมแปลง N_1 , ความต้านทานอนุกรมแฝงในตัวเก็บประจุ C_1 มาคำนวณร่วมกับตัวเก็บประจุ C_1 เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ตามที่ต้องการ

เพื่อจำกัดกระแส I_B ป้องกันไม่ให้ไหลเกินจากที่ทรานซิสเตอร์ทนได้ จึงนำ R03,R04 มาต่ออนุกรมกับขาเบสของ Q_1, Q_2 ทำให้กระแสที่จะเข้าทรานซิสเตอร์ไม่เกินค่าที่ต้องการ และเพื่อลดช่วงเวลาการเปลี่ยนสถานะของทรานซิสเตอร์ สามารถทำได้ด้วยการเพิ่มความเร็วในการนำกระแสให้กับทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัว โดยทำให้ค่ากระแส I_B ในขณะที่ทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแส มีค่ามากกว่าปกติ จึงนำตัวเก็บประจุมาต่อขนานกับ R03 และ R04 ซึ่งตัวเก็บประจุนี้เรียกว่า ตัวเก็บประจุเพิ่มความเร็วกว้าง (speed up capacitor) เมื่อทรานซิสเตอร์เริ่มนำกระแสจะมีกระแสค่ามากวิ่งผ่านตัวเก็บประจุเข้าทรานซิสเตอร์ทันทีซึ่งจะช่วยลดช่วงเวลาการนำกระแสของทรานซิสเตอร์ลงได้ดีขึ้น

ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 จะสลับกันทำงานคนละครึ่งคาบเวลา แต่เพราะการตอบสนองของทรานซิสเตอร์อาจเป็นไปได้ช้าเนื่องจากการเกิดประจุสะสมขึ้นในทรานซิสเตอร์ขณะนำกระแส เมื่อหยุดจ่ายกระแสไบอัสให้ที่เวลา $t=T/2$ ประจุสะสมจะทำให้ทรานซิสเตอร์สามารถนำกระแสต่อได้อีก ขณะที่ทรานซิสเตอร์อีกตัวเริ่มนำกระแส ทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวเกิดนำกระแสพร้อมกันและทำให้เกิดการเสียหาย จึงกำหนดค่าเวลาไร้ผลสนอง (dead time) ที่มีค่าไม่น้อยกว่า off time (t_{off}) ของทรานซิสเตอร์ไว้ให้กับทรานซิสเตอร์ในช่วงก่อนเริ่มนำกระแส โดยนำไดโอดมาต่อขนานกับตัวเก็บประจุเพิ่มความเร็วกว้าง (C02, C03) ขณะที่ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส C จะคายประจุจนเหลือแรงดันตกคร่อมประมาณ $V_D = 0.7$ โวลต์ ซึ่งทำให้เกิดแรงดันค่าลบตกคร่อมระหว่างขา B-E อยู่ -0.7 โวลต์ เมื่อสัญญาณป้อนกลับเริ่มเป็นบวก ทรานซิสเตอร์ได้รับกระแสไบอัส จึงต้องใช้เวลาเพื่อระยะหนึ่งถึงจะสามารถนำกระแสได้ ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวไม่นำกระแสพร้อมกัน

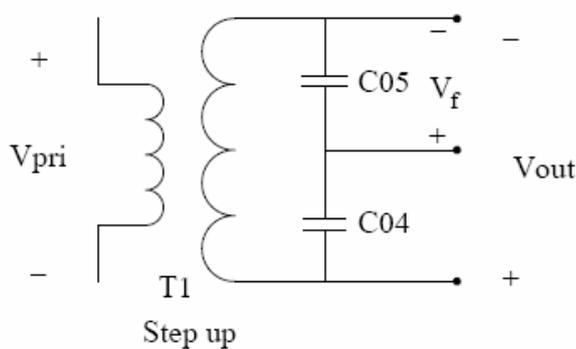
เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ทรานซิสเตอร์จ่ายออกมามีค่าแรงดันไม่มากพอ ($\approx V_{CC}$) ที่จะจ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริก เพราะเพียโซอิเล็กทริกต้องการแรงดันค่ามากประมาณ 1000V_{p-p} เพื่อใช้เปลี่ยนให้เป็นแรงเคลื่อนทางกล หม้อแปลงที่ต่อในวงจรส่วนป้อนกลับจึงต้องใช้หม้อแปลงแบบเพิ่มแรงดัน (step up) เพื่อมาเพิ่มแรงดันไฟฟ้าให้กับเพียโซอิเล็กทริกที่ต่ออยู่กับคานทุติยภูมิของหม้อแปลงและใช้ขดลวดชุดนี้เป็นแรงดันป้อนกลับด้วย



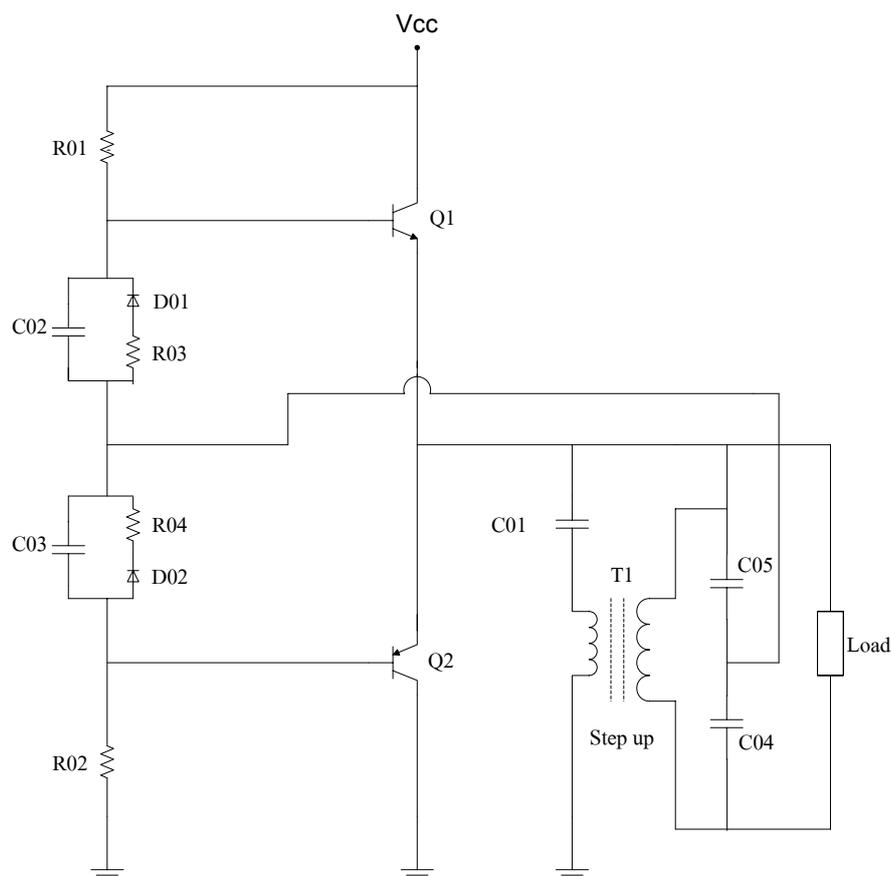
ภาพที่ 17 วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีการออกแบบเพิ่มเติม

เนื่องจากวงจรต้องมีการป้อนกลับ (feedback) ของสัญญาณจาก output มาที่ input ทำให้ในวงจร แรงดันที่ออกจากหม้อแปลง step up ด้านทุติยภูมิ จะถูกป้อนกลับมาเข้าที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์เป็นแรงดันป้อนกลับ (V_f) ดังในภาพ แต่เนื่องจากแรงดันออกที่ได้มีค่ามาก เมื่อป้อนกลับไปทรานซิสเตอร์จึงต้องลดทอนแรงดันลงเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม ไม่มากเกินไปจนทำให้รอยต่อเบสกับอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์และ C,R ที่ต่ออยู่ในส่วนป้อนกลับของวงจรเกิดความเสียหาย

การลดทอนแรงดันออก (v_p) สามารถทำได้ด้วยการต่อตัวเก็บประจุที่ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลง เพื่อทำหน้าที่แบ่งแรงดัน ทำให้แรงดันที่ถูกป้อนกลับมีค่าลดลงตามต้องการ



ภาพที่ 18 ตัวเก็บประจุลดทอนแรงดัน



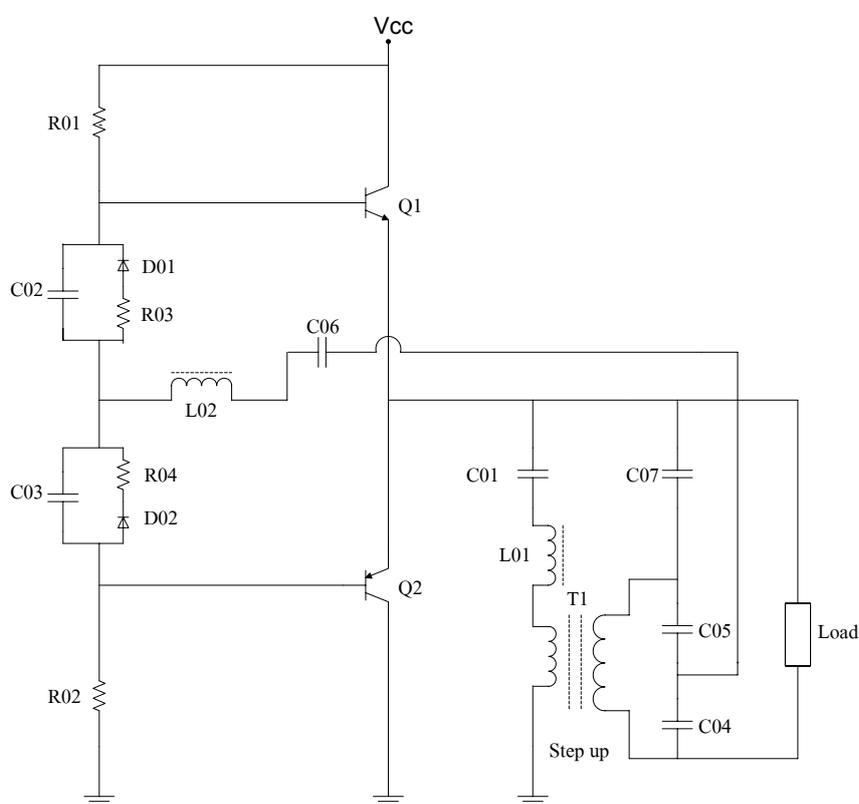
ภาพที่ 19 วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่เพิ่มตัวเก็บประจุลดทอนแรงดัน

สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ได้จากวงจรเพื่อใช้จ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริกมีลักษณะเป็น square wave แต่เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกทำงานได้ดีเมื่อสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่เป็น input มีลักษณะ sine wave ดังนั้นจึงเพิ่ม inductor (L) เข้ามาในวงจร โดยนำมาต่ออนุกรมกับ C01 เพื่อทำหน้าที่เป็นวงจรกรองแบบ series resonance ทำให้ได้สัญญาณ sine wave ผ่านออกมา

วงจรกรองที่ใช้เป็น series resonance เพราะต้องการให้สัญญาณที่ออกจากทรานซิสเตอร์ผ่านได้ดีที่สุด โดยมีโวลต์ตกคร่อมน้อยที่ความถี่เรโซแนนท์ ทำให้สัญญาณออกจากทรานซิสเตอร์ที่เป็น square wave เปลี่ยนเป็น sine wave ง่ายมาที่หม้อแปลง เพื่อทำหน้าที่เพิ่มแรงดันสำหรับป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกต่อไป

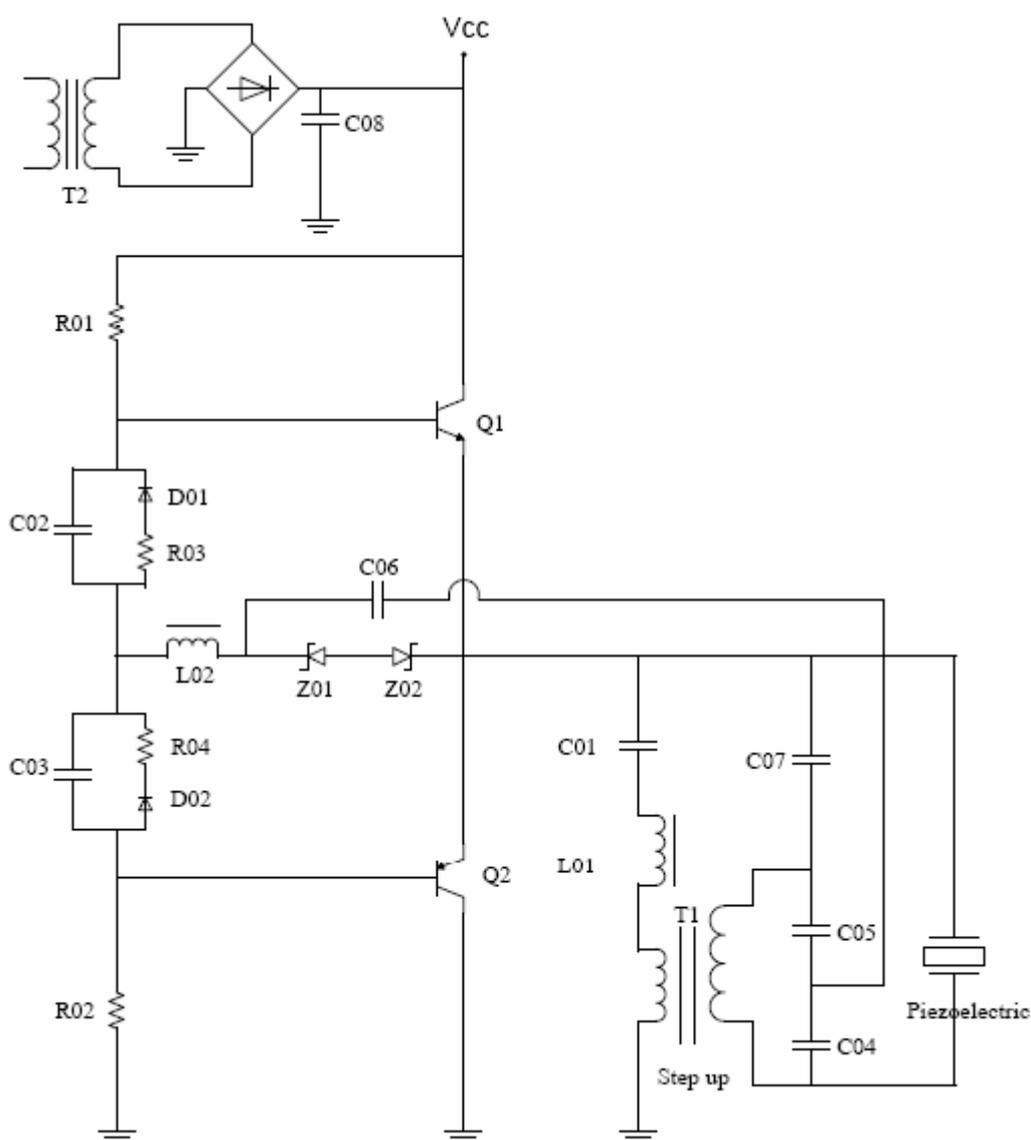
เพื่อให้สัญญาณ output ที่ใช้ป้อนให้กับเพียโซอิเล็กทริกเป็น sine wave มีความถี่ที่ต้องการเพียงความถี่เดียวหรือใกล้เคียงมากที่สุด จึงเพิ่มวงจรกรองเข้าไปในวงจรอีก 1 ชุด ระหว่างแรงดันที่ป้อนกลับมา (v_p) กับขาเบสของทรานซิสเตอร์ โดยใช้วงจรกรองที่เป็น series resonance แบบเดียวกับชุดแรก

เพราะวงจรกรองเพียง 1 ชุด ให้สัญญาณ sine wave ที่ยังมีความถี่อื่นที่ไม่ต้องการปนอยู่ จึงต้องใช้วงจรกรอง 2 ชุด ช่วยกรองสัญญาณความถี่อื่นที่ไม่ต้องการออก ทำให้สัญญาณ output ที่จ่ายไปที่เพียโซอิเล็กทริกเป็น pure sine เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเพียโซอิเล็กทริก ทำให้การเชื่อมพลาสติกเกิดได้ดียิ่งขึ้น



ภาพที่ 20 วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มี filter 2 ชุด

เพื่อความปลอดภัยของทรานซิสเตอร์ กรณีที่เกิดแรงดันค่ามากไหลย้อนกลับมา จึงนำซีเนอร์ไดโอดมาต่อเพิ่มเข้าไปในวงจรโดยพิจารณาจากค่าแรงดันย้อนกลับของวงจรที่กำหนดไว้ที่ 10 โวลต์ จึงเลือกซีเนอร์ไดโอดที่มีค่า zener voltage 12 โวลต์ เพราะเมื่อเกิดแรงดันย้อนกลับที่มีค่ามากกว่า 10 โวลต์ กระแสจะไหลมาทางซีเนอร์ไดโอดแทน เป็นการป้องกันทรานซิสเตอร์ไม่ให้เสียหายได้



ภาพที่ 21 วงจรที่ออกแบบสมบูรณ์

ผลและวิจารณ์

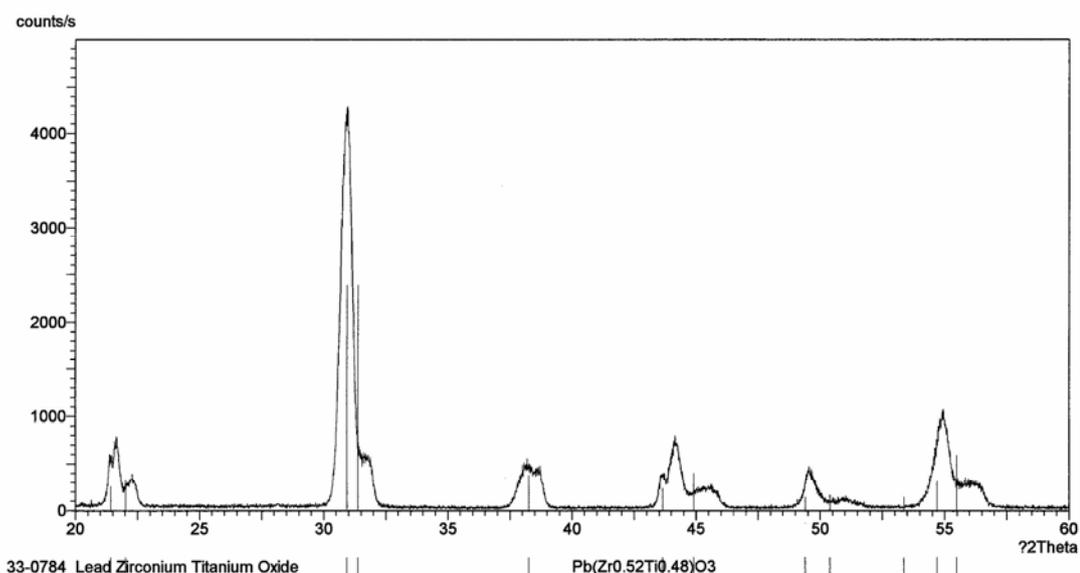
ผล

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติของเซรามิก PZT

1.1 ผลการวิเคราะห์เฟส

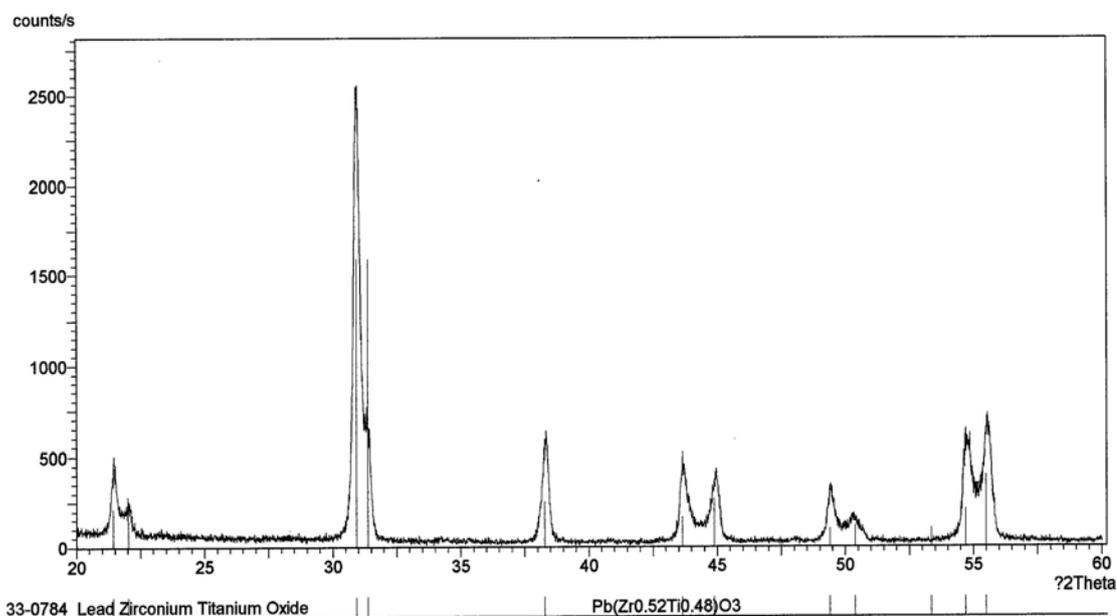
X-ray diffraction pattern ของสารประกอบ PZT ที่ได้จากการบดผสมสารตั้งต้นนาน 10 ชั่วโมง นำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 820°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง x-ray diffractometer แสดงในภาพที่ 22

การวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบว่าสารที่เตรียมได้เกิดเป็นสารประกอบ PZT ที่มีโครงสร้างแสดงเฉพาะเฟสเดียว (single phase) ของ PZT และไม่มีเฟสของสารอื่นเจือปน โดยนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ pattern มาตรฐานของ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ จาก JCPDS file No. 33-784 ผลการวิเคราะห์พบว่าสารที่เตรียมได้ แสดงเฟสของสารประกอบ PZT เพียงเฟสเดียว เกิดเป็นสารประกอบ PZT ที่สมบูรณ์ มีโครงสร้างผลึกเป็น tetragonal พร้อมทั้งจะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป และอุณหภูมิเผาแคลไซน์ที่ 820°C สามารถได้เฟสเดียวของสาร PZT



ภาพที่ 22 XRD pattern ของสาร PZT ที่ผ่านการเผาแคลไซน์

ภาพที่ 23 แสดงเฟสของสารประกอบ PZT ที่ผ่านการเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1280°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลที่ได้แสดงเฉพาะเฟสเดียวของสารประกอบ PZT เช่นกัน



ภาพที่ 23 XRD pattern ของเซรามิก PZT ที่ผ่านการเผาซินเทอร์

1.2 ผลการหาค่าความหนาแน่น

เมื่อดสารที่ผ่านการเผาซินเทอร์และผ่านการขัดปรับขนาดและผิวหน้าจำนวน 4 เม็ด นำมาหาค่าความหนาแน่น โดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ผลที่ได้นำไปเปรียบเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี (Theoretical density) ที่คำนวณจากความหนาแน่นของ 1 หน่วยเซลล์ (unit cell) ของสารประกอบ PZT มีค่าเท่ากับน้ำหนักของอะตอมใน 1 หน่วยเซลล์หารด้วยปริมาตรของหน่วยเซลล์

$$\rho_{\text{theory}} = \frac{M}{V_{\text{abc}} N_A} \quad (6)$$

โดยที่ M คือ น้ำหนักของสารประกอบหนัก 1 โมล (g)

V_{abc} คือ ปริมาตรของหน่วยเซลล์ประกอบด้วยด้าน a , b และ c ในกรณีผลึก tetragonal

$$v = a^2 c \text{ (Å)}^3$$

N_A คือ เลขอโวกาโดร หรือจำนวนอนุภาคหนัก 1 โมล = 6.02×10^{23} โมเลกุล

ค่า M ของ $(Pb_{0.85}Ba_{0.15})(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ มีค่าเท่ากับ 315.1459 g ปริมาตรของหน่วยเซลล์มีค่า $6.7262 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$ ($a = b = 4.0277 \text{ \AA}$, $c = 4.1463 \text{ \AA}$) ดังนั้น ค่าความหนาแน่นทางทฤษฎีของสารประกอบ PZT คือ 7.783 g/cm^3

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก PZT หลังเผาซินเทอร์เทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี

เม็ดเซรามิก PZT	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ความหนาแน่นทางทฤษฎี (g/cm^3)	ความคลาดเคลื่อน (%)
1	7.6043	7.783	2.296
2	7.5843	7.783	2.553
3	7.5729	7.783	2.699
4	7.6092	7.783	2.233

ความหนาแน่นของเม็ดเซรามิก PZT มีค่าอยู่ในช่วง $7.57 - 7.61 \text{ g/cm}^3$ ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าประมาณ $2.23 - 2.7 \%$ ค่าที่คลาดเคลื่อนเนื่องมาจากกระบวนการเตรียมสารยังไม่ดีพอ เวลาที่ใช้ในการบดสารน้อยเกินไป ทำให้ขนาดอนุภาคผง PZT ที่ใช้อัดขึ้นรูปเม็ดมีขนาดใหญ่ เกิดการแพร่เข้าหากันและเชื่อมติดกันได้ไม่ดี ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน หรืออาจเนื่องมาจากการระเหยออกของ PbO ในขณะเผาซินเทอร์ที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดน้ำหนักสูญหาย ความหนาแน่นที่ได้จึงลดลง

1.3 ผลการหาค่าการหดตัวและน้ำหนักสูญหาย

เม็ดสารที่อัดขึ้นรูปแล้วก่อนเผาซินเทอร์จำนวน 4 เม็ด นำมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและชั่งน้ำหนัก เมื่อเผาซินเทอร์แล้ว นำเม็ดสารทั้ง 4 เม็ดที่ยังไม่ได้ขัดมาวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อนำค่าที่ได้มาคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การหดตัวและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหาย ตามสมการที่ (2) และ (3)

ตารางที่ 3 เปอร์เซ็นต์การหดตัวของเม็ดเซรามิก PZT

เม็ดเซรามิก PZT	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ก่อนเผา (mm.)	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง หลังเผา (mm.)	% การหดตัว
1	16.5	15.1	8.48
2	16.5	15	9.09
3	16.5	14.9	9.69
4	16.5	15	9.09

ตารางที่ 4 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายของเม็ดเซรามิก PZT

เม็ดเซรามิก PZT	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	% น้ำหนักสูญหาย
1	5.4530	5.3003	2.80
2	5.8108	5.5979	3.664
3	5.5364	5.3298	3.732
4	5.5881	5.4063	3.253

จากตารางที่ 3 และตารางที่ 4 เม็ดเซรามิก PZT มีค่าเปอร์เซ็นต์การหดตัวเฉลี่ยเท่ากับ 9.087 % ค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญหายเฉลี่ยเท่ากับ 3.362 % ค่าการหดตัวเกิดจากกระบวนการเผาซินเทอร์ ที่จะทำให้ PZT แน่นขึ้นเป็นเซรามิก PZT มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ลดช่องว่างหรือรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงาน ค่าการหดตัวมีความสำคัญต่อการออกแบบขนาดของแม่พิมพ์ที่ใช้ขึ้นรูปชิ้นงานก่อนเผา เพื่อให้ได้ขนาดตามต้องการและมีความแม่นยำ จึงต้องมีการเพิ่มค่านี้เข้าไปในการออกแบบ

น้ำหนักสูญหายที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากการระเหยออกของ PVA (polyvinyl alcohol) ที่ใช้เป็นตัวช่วยประสานในการขึ้นรูป ทั้งนี้สามารถลดค่าน้ำหนักสูญหายได้ โดยการลดปริมาณของ PVA ที่ใช้ และบดสารประกอบ PZT ให้นานขึ้น เพื่อทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กลง เนื้อสารมีความละเอียดมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ชิ้นงานยึดติดกันได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาขึ้นไปอีกด้วยการเปลี่ยนตัวประสาน (binder) ที่ใช้จาก PVA เป็นสารชนิดอื่นที่ไม่ทำปฏิกิริยากับสารประกอบ PZT ระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิไม่สูงมาก อนุภาคมีขนาดเล็กกว่า และใช้ในปริมาณที่น้อยกว่า ซึ่งจะ

ทำให้น้ำหนักของชิ้นงานก่อนเผามีค่าใกล้เคียงกับน้ำหนักของเนื้อสารจริง และเมื่อเผาซินเทอร์ binder ที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะระเหยออกโดยไม่ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนขึ้นภายในชิ้นงาน ทำให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นด้วย ตัวอย่าง binder ที่มีการนำมาใช้กับสารประกอบ PZT แทนที่ PVA คือ propanal alcohol โดยจะใช้ฉีดผสมลงไปในสารประกอบ PZT ที่เตรียมจะนำไปอัดขึ้นรูป เพื่อให้สารมีความชื้น อนุภาคยึดติดกันได้ง่ายในขณะอัด โดย propanal alcohol มีจุดระเหยที่อุณหภูมิ 200-300 °C

นอกจาก PVA จะทำให้เกิดน้ำหนักสูญหายแล้ว สาเหตุที่สำคัญอีกหนึ่งอย่างคือเกิดการระเหยของ PbO ออกจากเม็ดสาร เนื่องจาก PbO สามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิประมาณ 900 °C ซึ่งในการทดลองอาจปิดผนึกฝาถ้วยเผาไม่สนิทหรือชุดเซตแก้วในถ้วยเผาน้อยเกินไป จึงทำให้ PbO ระเหยออกจากชิ้นงาน ซึ่งถ้า PbO ระเหยออกมากเกินไป จะทำให้เซรามิก PZT ที่ได้ มีอัตราส่วนผสมผิดไปและทำให้ความเป็นเพียโซอิเล็กทริกลดลง

1.4 ผลการหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก

เม็ดเซรามิก PZT ที่ผ่านการจัดปรับขนาดและผิวหน้า ถูกนำมาทำขั้วด้วยโลหะเงินและทำโพลด้วยสนามไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 2 kv/mm ที่อุณหภูมิ 120°C นาน 5 นาที ปลดทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1 วัน จึงนำมาหาค่าสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริก ด้วยวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.4 ผลที่ได้แสดงในตารางดังนี้

ตารางที่ 5 สมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกของเม็ดเซรามิก PZT

เม็ดเซรามิก PZT	f_r (KHz)	k_p	d_{33} (pC/N)	ϵ_r (1 KHz)	$\tan \delta$ (%)
1	96.929	0.3913	216	1114.08	2.2
2	97.904	0.4211	255	1144.71	2.9
3	98.691	0.3943	230	1098.62	3.6
4	101.386	0.3671	198	1016.22	2.5



ภาพที่ 24 เม็ดเซรามิก PZT ที่ผ่านการทำโพล

เม็ดเซรามิก PZT ทั้ง 4 เม็ดที่นำมาทำโพล มีค่าความถี่เรโซแนนท์ (f) อยู่ในช่วง 96-101 KHz นำไปคำนวณหาค่า k_p จากสมการที่ (5) ได้ค่าอยู่ในช่วง 0.36 -0.42 ค่าที่แสดงถึงสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกและแสดงความเป็นเพียโซอิเล็กทริกคือค่า piezoelectric constant (d_{33}) จากผลที่ได้ ค่า d_{33} มีค่ามากที่สุดคือ 255 pC/N น้อยที่สุดคือ 198 pC/N ค่าที่ได้ แสดงให้เห็นว่า เม็ดเซรามิก PZT ทั้ง 4 เม็ดที่เตรียมได้ สามารถนำไปใช้งานเป็น transducer ที่ต้องการในเครื่องเชื่อมพลาสติกด้วยอัลตราโซนิกได้ตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

วิจารณ์

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้พบว่า ค่า d_{33} และ k_p ที่ได้มีค่าน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่า d_{33} และ k_p ของเม็ดเซรามิก PZT ในงานวิจัยของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ ที่เตรียมเซรามิก PZT เพื่อใช้งานเป็น transducer สำหรับเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิก (ultrasonic cleaner) ซึ่งเป็น transducer ที่มีลักษณะการทำงานเหมือนกัน คือ กำเนิดแรงสั่น (vibration) ที่ความถี่ระดับอัลตราโซนิกเมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไป โดยเม็ดเซรามิก PZT มีค่า $d_{33} = 372$ pC/N , $k_p = 0.69$ จากค่าที่ได้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการเตรียมเซรามิก PZT ในงานวิจัยนี้ยังไม่ดีพอ ได้แก่ ขนาดอนุภาคผง PZT ที่ใช้อัดขึ้นรูปเม็ด สามารถทำให้ละเอียดลงได้ด้วยการเพิ่มเวลาในการบดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 160 หรือ 200 mesh ขึ้นไป การใช้ตัวประสานที่มีขนาดอนุภาคใหญ่และปริมาณมาก ทำให้เกิดรูพรุนหรือช่องว่างขึ้นภายในชิ้นงาน หลังเผาซินเทอร์ ควรเพิ่มเวลาในการทำโพลเม็ดเซรามิก เพื่อทำให้เกิด polarization เพิ่มขึ้น ทั้งหมดนี้มีผลให้ค่าความหนาแน่นและค่าสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกดีขึ้นกว่าเดิม

2. ผลการทดสอบวงจร

เมื่อออกแบบวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเบื้องต้นได้แล้วดังภาพผนวกที่ 1 จึงนำมาวัดสัญญาณออกที่ได้ พบว่าลักษณะของสัญญาณที่วัดได้มีความถี่ไม่เท่ากับ 60 KHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต้องการในการออกแบบ จึงทดลองปรับค่าอุปกรณ์ในวงจร จนสัญญาณออกที่ได้มีความถี่เป็น 60 KHz อุปกรณ์ที่ปรับค่าคือ

C_{01} เปลี่ยนค่าจาก 0.96 μF เป็น 1.33 μF

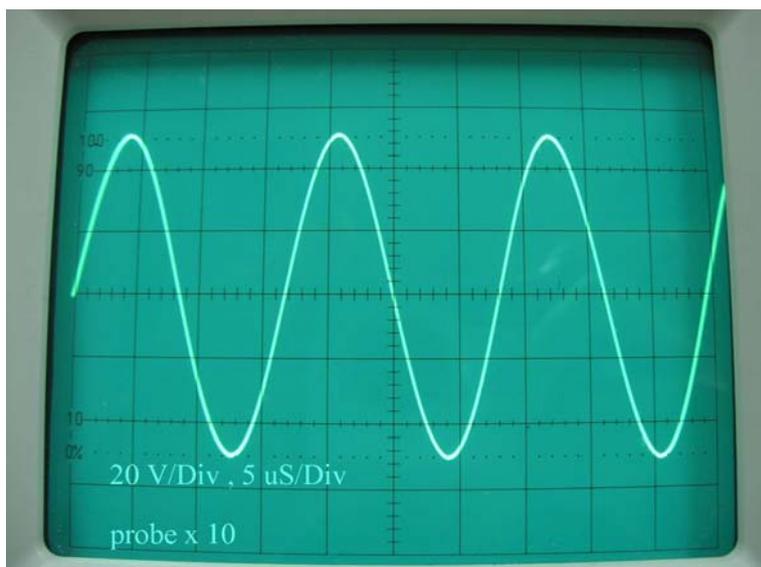
เมื่อวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับมีความถี่ตามที่ต้องการได้แล้ว จึงออกแบบวงจรในส่วนอื่นเพิ่มตามที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อการออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับเครื่องเชื่อมอัลตราโซนิก เมื่อได้วงจรที่สมบูรณ์แล้ว จึงทดลองวัดสัญญาณออกที่ได้เพื่อตรวจสอบว่ามีลักษณะตามที่ต้องการหรือไม่ พบว่าสัญญาณที่วัดได้ยังไม่เป็น sine wave ที่ต้องการ จึงได้ปรับค่าอุปกรณ์ในวงจรพร้อมทั้งวัดสัญญาณออกที่ได้ จนได้สัญญาณที่ใกล้เคียง sine ที่สุดและมีความถี่ที่ต้องการเพียงความถี่เดียว โดยอุปกรณ์ที่ทำการปรับค่าคือ

C_{02}, C_{03} เปลี่ยนค่าจาก 47 nF เป็น 68 nF

L_{01} เปลี่ยนค่าจาก 11.7 μH เป็น 9.7 μH

สัญญาณออกที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป สำหรับจ่ายให้กับเม็ดเซรามิก PZT แสดงในภาพ

ที่ 25

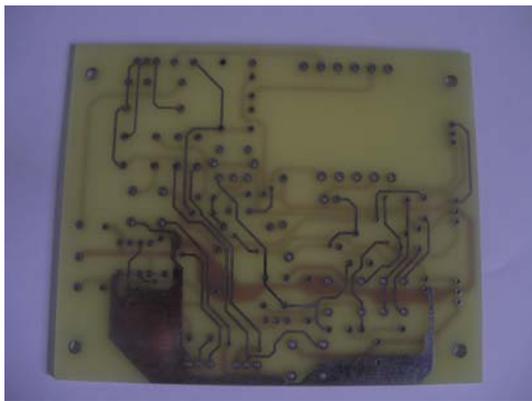


ภาพที่ 25 สัญญาณออกที่จ่ายให้กับเม็คเพียโซอิเล็กทริก

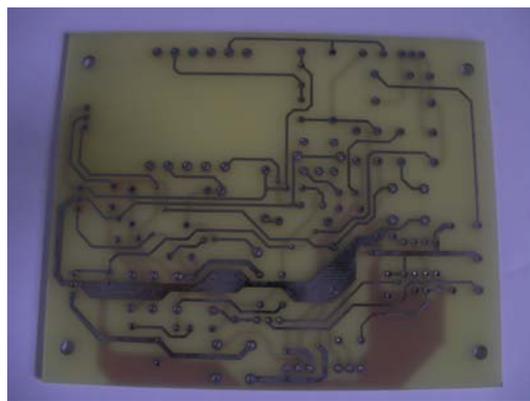
สัญญาณที่ได้เป็น sine wave ค่าแรงดันไฟฟ้า 500 V_p ความถี่ 60 KHz ตามที่ต้องการ และไม่มีสัญญาณความถี่อื่นรบกวน จึงเหมาะสำหรับนำไปใช้จ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริก เพื่อเปลี่ยนให้เป็นคลื่นการสั่นสะเทือน และประกอบในเครื่องมือเชื่อมต่อไป

3. ผลการประกอบเป็นเครื่องมือเชื่อม

เมื่อออกแบบวงจรและทดสอบว่าสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับลักษณะ sine wave ความถี่ 60 KHz สำหรับจ่ายให้กับเม็ดพืชโซอิลเล็กทรินตามที่ต้องการได้แล้ว จึงออกแบบลายวงจรเพื่อทำแผ่นวงจรและประกอบอุปกรณ์ที่ออกแบบได้ลงในแผ่นวงจร



(ก)

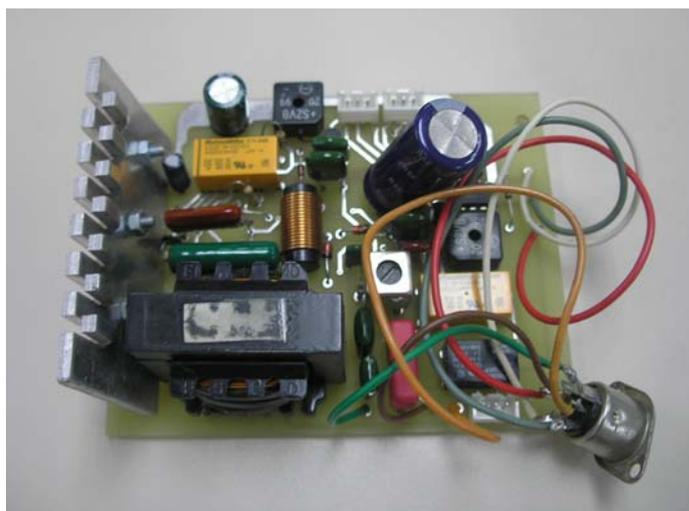


(ข)

ภาพที่ 26 ลายวงจรที่ออกแบบ

(ก) ลายวงจรด้านที่ 1

(ข) ลายวงจรด้านที่ 2



ภาพที่ 27 แผ่นวงจรที่ประกอบอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว

สำหรับในส่วนของหัวเชื่อม นำเม็ดเซรามิก PZT ที่เตรียมได้ไปประกอบกับอลูมิเนียม ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งคลื่นการสั่นสะเทือนจากเม็ดเพียโซอิเล็กทริกมาที่พลาสติกที่ต้องการเชื่อม แล้วจึงนำแท่งอลูมิเนียมไปประกอบเข้ากับหัวเชื่อมที่เตรียมไว้



ภาพที่ 28 เม็ดเพียโซอิเล็กทริกที่นำไปประกอบกับอลูมิเนียม



ภาพที่ 29 ลักษณะของหัวเชื่อมที่ประกอบเสร็จแล้ว

4. ผลการนำไปทดลองเชื่อม

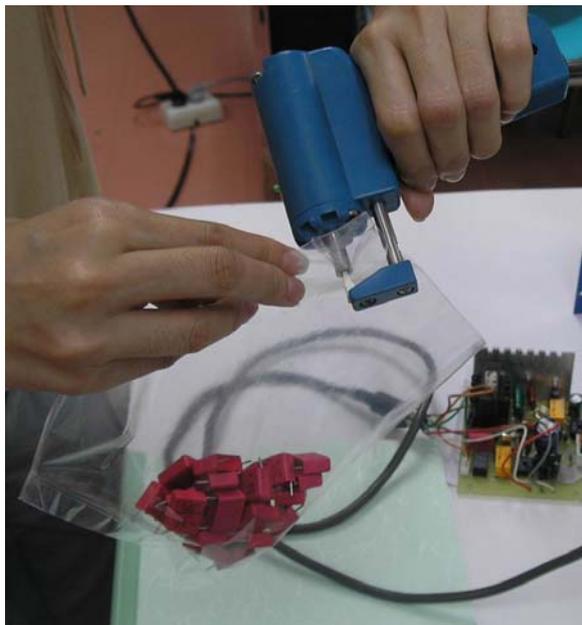
ในการนำไปทดลองเชื่อม ทดสอบโดยใช้พลาสติกที่มีขนาดความหนาแตกต่างกัน 3 ขนาด



ภาพที่ 30 ลักษณะพลาสติกที่นำมาทดลองเชื่อม



ภาพที่ 31 แสดงลักษณะการเชื่อมพลาสติก



ภาพที่ 32 แสดงลักษณะการเชื่อมพลาสติกอีกมุมหนึ่ง

ผลที่ได้พบว่า พลาสติกที่มีขนาดความหนา 0.24 มม. ผลจากการเชื่อมดังภาพที่ 33 คือ พลาสติกเชื่อมติดกันตลอดแนว ไม่สามารถดึงแยกออกจากกันได้ และพลาสติกไม่มีรอยขาดจากการเชื่อม



(ก)

ภาพที่ 33 รอยเชื่อมพลาสติกที่มีความหนา 0.24 มม. (ก) ระยะใกล้ (ข) ระยะใกล้



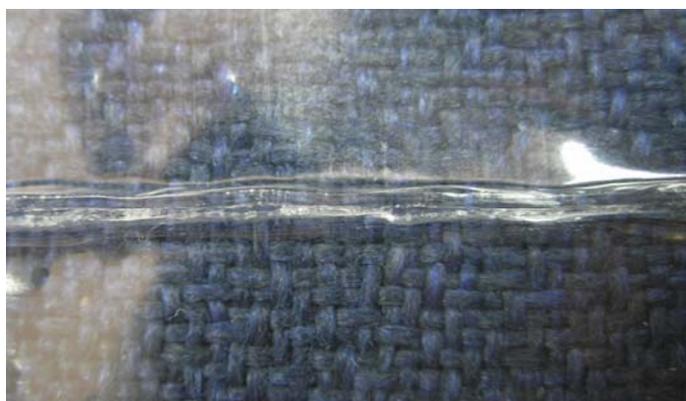
(ข)

ภาพที่ 33 (ต่อ)

พลาสติกที่มีขนาดความหนา 0.06 มม. ผลที่ได้พบว่า พลาสติกจะขาดตรงรอยเชื่อม เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นการสั่นสะเทือนที่ส่งมามีค่ามากเกินไป ทำให้พลาสติกที่เชื่อม หลอมติดกันจนขาด



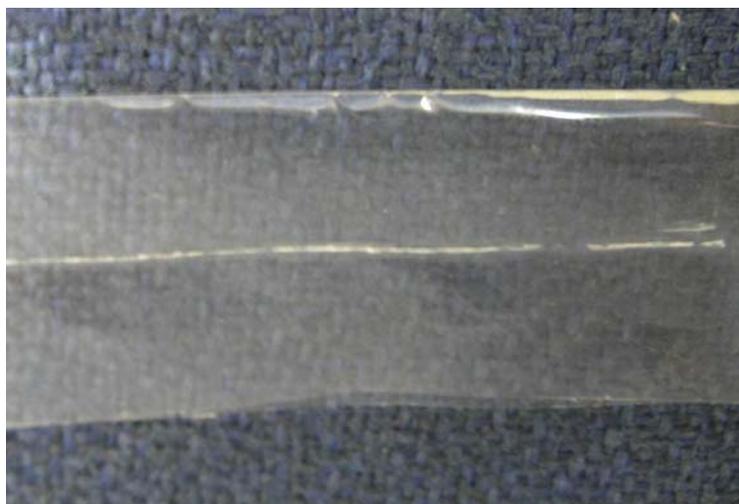
(ก)



(ข)

ภาพที่ 34 รอยเชื่อมพลาสติกที่มีความหนา 0.06 มม. (ก) ระยะไกล (ข) ระยะใกล้

สำหรับพลาสติกที่มีขนาดความหนามากกว่า 0.24 มม. จากการทดลอง ไม่สามารถเชื่อมพลาสติกให้ติดกันได้ เพราะพลาสติกที่ใช้มีขนาดหนาเกินไป ความร้อนที่เกิดขึ้นจึงไม่เพียงพอที่จะทำให้พลาสติกเชื่อมติดกัน จนสามารถดึงพลาสติกให้แยกออกจากกันได้



(ก)



(ข)

ภาพที่ 35 รอยเชื่อมพลาสติกที่มีความหนามากกว่า 0.24 มม. (ก) ระยะใกล้ (ข) ระยะไกล

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เครื่องเชื่อมนี้เหมาะสำหรับใช้ในการเชื่อมพลาสติกที่มีขนาดความหนามากกว่า 0.06 มม. แต่ไม่เกิน 0.24 มม.

สรุปและข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยและออกแบบเครื่องมือเชื่อมพลาสติกด้วยอัลตราโซนิคนี้ ชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ที่เตรียมได้สามารถแสดงสมบัติเพียโซอิเล็กทริก และเมื่อนำมาประกอบกับเครื่องมือเชื่อมแล้ว เครื่องสามารถใช้งานได้จริง เมื่อทดสอบกับพลาสติกที่มีขนาดความหนา มากกว่า 0.06 มม. แต่ไม่เกิน 0.24 มม. โดยพลาสติกที่นำมาเชื่อมจะหลอมติดกันตลอดและไม่สามารถดึงแยกออกจากกันได้ ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์และเป้าหมายที่กำหนดไว้

สำหรับแนวทางในการพัฒนาในระยะต่อไป ควรจะปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติของเครื่องเชื่อมพลาสติกให้ดียิ่งขึ้น เช่น การปรับปรุงกระบวนการเตรียมเซรามิก PZT เพื่อให้ค่าสมบัติทางไฟฟ้าและเพียโซอิเล็กทริกดีขึ้นกว่าเดิม เนื่องจากค่าที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย(วว.)แล้ว ยังมีค่าน้อยกว่า เช่นค่า k_p หรือค่าที่แสดงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล ชิ้นงานที่ได้มีค่า k_p สูงสุดที่ 0.39 ควรปรับปรุงให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าของ วว. ซึ่ง $k_p = 0.69$, การออกแบบวงจรที่ลดการใช้ตัวเหนี่ยวนำ L ที่นำมาใช้ในวงจรเพื่อทำให้สัญญาณออกที่ได้มีลักษณะเป็น sine wave(เนื่องจาก L ไม่มีค่าที่เป็นมาตรฐาน การนำ L มาใช้ต้องสั่งทำหรือพันขึ้นเองเพื่อให้ได้ค่าตามที่ต้องการ) , การออกแบบวงจรให้สามารถเชื่อมพลาสติกที่มีความหนาเพิ่มขึ้น หรือการปรับปรุงให้วงจรใช้อุปกรณ์ที่น้อยลงกว่านี้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- โคทม อาริยา. 2521. วงจรอิเล็กทรอนิกส์. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- ชัยวัฒน์ ยูบูรณ์. 2534. การขึ้นเตอร้ของสารเพียโซอิเล็กตริกเซรามิกที่อุณหภูมิระหว่าง 800-1250°ซ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- เจดศักดิ์ แซ่ลี. 2538. สมบัติไดอิเล็กตริกและเพียโซอิเล็กตริกในของผสมแบบ0-3 พีแซดที่กับเทอร์มัลพลาสติก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานันท์ และ ลำไพ ศรีสังข์. 2531. รายงานการวิจัยเรื่องมีดผ่าตัดอัลตราโซนิค, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นภัทร วัฒนเทพินทร์. 2544. ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์. สำนักพิมพ์ สกายบุ๊กส์, กรุงเทพฯ.
- นรินทร์ เนาวประทีป. 2543. อิเลคทรอนิกส์เบื้องต้น. สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.
- บัณฑิต บัวบูชา. 2536. ทฤษฎีและการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า. สำนักพิมพ์ ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ.
- ภัทรารวรรณ คหะวงศ์. 2543. Advanced Ceramics. เทคโนโลยีวัสดุ (21): 55-60.
- ปิ่น ภู่วรรณ. 2532. ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- เล็ก สีคง. 2540. วัสดุวิศวกรรมและอุตสาหกรรม. ม. ป. ท.
- วิบูรณ์ หวานวาริ. 2541. สมบัติเพียโซอิเล็กตริกของวัสดุเชิงประกอบแบบ1-3 ระหว่างพีแซดที่เซรามิกกับพอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2542. รายงานความก้าวหน้าโครงการวิจัยครั้งที่1/34 การพัฒนาสารทรานสดิวเซอร์สำหรับเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตราโซนิคส์.

Buchanan, R.C. 1986. **Ceramic Materials for Electronics**. Marcel Dekker Inc., New York.

Green, D.C. 1995. **Electronics 3**. 5th ed. Longman Scientific & Technical, Malaysia.

Grob, B. 1988. **Electronic Circuits and Applications**. McGraw-Hill, Singapore.

Millman, J. and H. Taub. 1965. **Pulse, Digital and Switching Waveforms**. McGraw-Hill, Singapore.

Moulson, A.J. and J.M. Herbert. 1990. **Electroceramics**. Chapman and Hall, London.

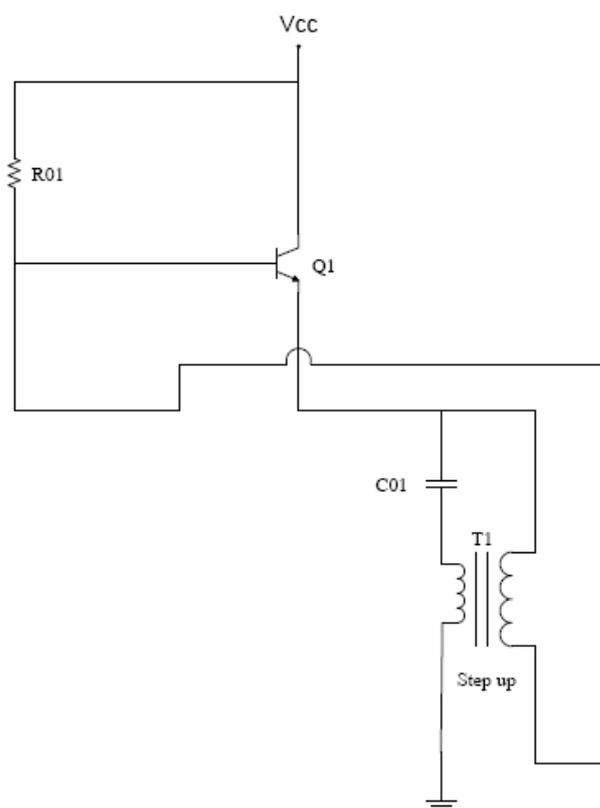
Shields, J.P. 1966. **Basic Piezoelectricity**. Howard W. Sams & Co., Inc., New York.

Van Randerat, J. and R.E. Settrington. 1974. **Piezoelectric Ceramics**. Mullard Limited, London.

ภาคผนวก

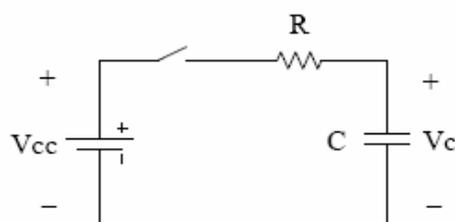
1. การออกแบบวงจรเบื้องต้น

จากวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเบื้องต้น เมื่อคิดการทำงานเพียงครั้งคาบ สามารถวาดได้ในภาพผนวกที่ 1



ภาพผนวกที่ 1 วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเบื้องต้นเพียงครั้งคาบ

จากภาพผนวกที่ 1 สามารถวาดได้ใหม่ดังนี้



จากวงจรเวลาที่ C ใช้ในการเก็บประจุจนแรงดันคร่อม C มีค่า $\approx 99\%$ ของค่า V_{cc} คือที่ประมาณ 5 เท่าของค่าคงตัวเวลา

$$t = 5\tau = 5R_{\text{รวม}} C$$

เนื่องจากวงจรทำงานเพียงครึ่งคาบ

$$\therefore t = \frac{T}{2} = 5\tau = 5R_{\text{รวม}} C$$

วงจรออกแบบให้ทำงานที่ความถี่ 60 KHz ซึ่งเป็นค่าความถี่เรโซแนนซ์ของเพียโซอิเล็กทริกที่ได้

จาก $f = 60 \text{ KHz}$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \times 10^3} = 16.667 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\therefore 5\tau = \frac{T}{2} = 8.333 \times 10^{-6} \text{ s}$$

$$\tau = R_{\text{รวม}} C = 1.666 \times 10^{-6}$$

นั่นคือ $R_{\text{รวม}} C = 1.666 \times 10^{-6}$

ค่า $R_{\text{รวม}}$ ในวงจร คือความต้านทานที่มีอยู่ในทรานซิสเตอร์, ความต้านทานสมมูลของหม้อแปลง
 ด้านปฐมภูมิและค่าความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ (ESR) ทั้งหมดรวมกัน โดยแต่ละตัวมี
 ค่าประมาณดังนี้

ความต้านทานในทรานซิสเตอร์	=	0.05	Ω
ความต้านทานในหม้อแปลง	=	0.1	Ω
ความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ	=	1.59	Ω

ความต้านทานทั้งหมดต่ออนุกรมกัน

$$R_{\text{รวม}} = 1.74 \quad \Omega$$

จากค่า $R_{\text{รวม}}$ สามารถหาค่า C ได้

$$R_{\text{รวม}} C = 1.666 \times 10^{-6}$$

$$\therefore C = 0.96 \quad \mu\text{F}$$

จึงได้ค่า C_{01} ในการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

2. การคำนวณค่าแหล่งจ่ายไฟตรงสำหรับวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับ

ในการออกแบบเครื่องมือเชื่อมพลาสติกได้กำหนดค่ากำลังไฟฟ้าโดยอ้างอิงกับเครื่องมือเชื่อมของต่างประเทศยี่ห้อ RIC KIMOTO INC. รุ่น RKP-6000 ซึ่งมีการใช้กำลังไฟฟ้า 50 watt ในการออกแบบได้เพิ่มค่ากำลังไฟฟ้าที่ใช้ขึ้นอีก 10% จากเดิม จึงกำหนดค่าที่ต้องการไว้ที่

$$\text{กำลังไฟฟ้า} = 55 \text{ watt}$$

จากการออกแบบวงจรเพื่อหาค่าความต้านทานของเพียโซอิเล็กทริก สามารถวัดค่ากระแสของวงจรได้เท่ากับ 3.6774 mA เมื่อนำมาคำนวณทำให้ได้ค่าความต้านทานเท่ากับ 2291.35 Ω

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$55 = \frac{V^2}{2291.35}$$

$$V^2 = 55 \times 2291.35 = 126024.25$$

$$V_{rms} = 354.99 \text{ v}$$

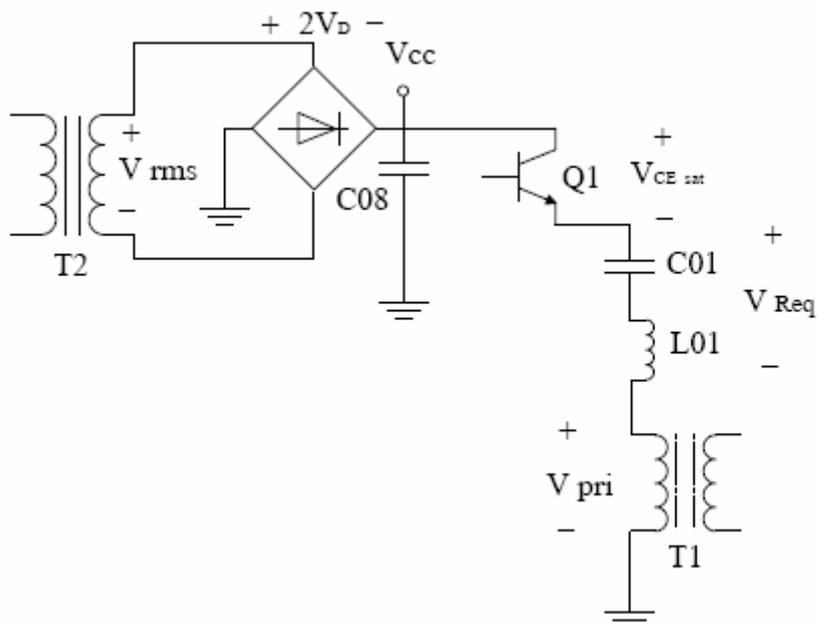
$$V_p = 502.03 \text{ v}$$

เพื่อให้ได้ค่ากำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ จึงกำหนดขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ต้องจ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริกมีค่า 500 Vp

เนื่องจากการทดลองได้นำเอาหม้อแปลงสำเร็จรูปแบบเพิ่มแรงดัน (step up) ขนาด 22 เท่า มาใช้เพิ่มแรงดันให้กับเพียโซอิเล็กทริก จากค่าแรงดันไฟฟ้าที่เพียโซอิเล็กทริกต้องการและจำนวน step up ของหม้อแปลง สามารถหาค่าแรงดันด้าน primary ได้จาก

$$\frac{V_{sec}}{V_{pri}} = 22 \quad ; \quad V_{pri} = \frac{500}{22} = 22.73 \text{ Vp}$$

จากแรงดันไฟฟ้า 220 Vac ผ่านส่วนต่างๆของวงจรจนมาถึงขดลวดค้ำานปฐมภูมิของหม้อแปลงแบบเพิ่มแรงดัน สามารถวัดได้ดังภาพผนวกที่ 2



ภาพผนวกที่ 2 วงจรแสดงแรงดันตกคร่อมส่วนต่างๆ

จากวงจรภาพผนวกที่ 2 แหล่งจ่ายไฟตรง (V_{CC}) มีค่า

$$V_{CC} = V_{CE\ sat} + V_{Req} + V_{pri}$$

$V_{CE\ sat}$: แรงดันตกคร่อมระหว่างคอลเลกเตอร์และอิมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ขณะอิ่มตัว
= 2 โวลต์

V_{Req} : แรงดันตกคร่อมความต้านทานสมมูลย์ของวงจรเรโซแนนท์ (C01,L01) = 1 โวลต์

V_{pri} : แรงดันตกคร่อมขดลวดค้ำานปฐมภูมิของหม้อแปลง T1 = 23 โวลต์

$$\therefore V_{CC} = 26 \text{ volt}$$

จึงออกแบบให้วงจรมีค่าแหล่งจ่ายไฟตรง V_{CC} ที่ 26 โวลต์

จากค่า V_{CC} ที่คำนวณได้ สามารถคำนวณหาค่าแรงดันด้านทุติยภูมิ (V_{rms}) ของหม้อแปลง T2 ได้
จากสมการ

$$\begin{aligned}V_{p_{sec}} &= V_{CC} + 2V_D \\ &= 26 + 2 \\ &= 28 \text{ Vp} \\ V_{sec} &= \frac{28}{\sqrt{2}} = 20 \text{ Vrms}\end{aligned}$$

จึงนำหม้อแปลง T2 ที่มีค่าแรงดันออกขนาด 20 Vrms ค่ากระแส 3.5 A มาใช้ในวงจร

3. การเลือกค่า R_{01}, R_{02}

R_{01}, R_{02} ทำหน้าที่ไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ ช่วยให้ทรานซิสเตอร์เริ่มต้นทำงานได้ สามารถหาค่าได้จากค่า I_B ของวงจรโดยการกำหนดค่ากระแสที่ต้องการเพื่อกระตุ้นให้ทรานซิสเตอร์เริ่มต้นทำงานที่ 1% ของค่า I_{Bmax}

สามารถหาค่า I_{Bmax} จาก

$$I_E \approx I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_{pri} = 22 I_{sec}$$

จากค่า $V_{sec} = 353.55 \text{ V}_{rms}$ และ power = 55 watt

$$I_{sec} = I_{rms} = \frac{55}{353.55} = 0.155 \text{ A}$$

$$I_{sec} = I_p = \sqrt{2} \times 0.155 = 0.22 \text{ A}$$

$$I_E = I_{pri} = 22 \times 0.22 = 4.84 \text{ A}$$

$$\therefore I_C \approx I_E = 4.84 \text{ A}$$

$$\therefore I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4.84}{30} = 0.16 \text{ A}$$

$$I_{Bmax} = 0.16 \text{ A} = 160 \text{ mA}$$

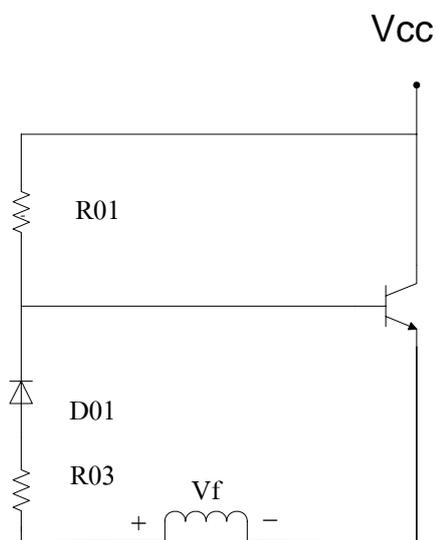
$$1\% \text{ ของ } I_{Bmax} = 1.6 \text{ mA}$$

$$R = \frac{V_{CC}}{I} = \frac{26}{1.6}$$

$$R = 16.25 \text{ k}\Omega$$

4. การเลือกค่า R_{03}, R_{04}

ค่า R_{03}, R_{04} ที่ต่อในวงจรเพื่อช่วยจำกัดค่ากระแส I_B ของทรานซิสเตอร์ให้มีค่าตามที่ต้องการ สามารถหาค่าได้จากการวน loop ของวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับเบื้องต้น จากวงจรภาพที่ 17 เมื่อคิดการทำงานเพียงครั้งคาบ สามารถวาดได้เป็น



จาก KVL : $V_f - V_{BE} - V_D = I_B R_{03}$

$$R_{03} = \frac{V_f - V_{BE} - V_D}{I_B}$$

จากหัวข้อที่ 3 ได้ค่า $I_B = 0.16$ A

กำหนดค่าแรงดันป้อนกลับ (V_p) และค่า V_{BE}, V_D ที่เหมาะสมดังนี้

$$V_f = 10 \text{ v}$$

$$V_{BE} = 1 \text{ v}$$

$$V_D = 1 \text{ v}$$

$$R_{03} = \frac{10 - 1 - 1}{0.16} = 50 \text{ } \Omega$$

5. การเลือกค่า C_{04} , C_{05}

C_{04} , C_{05} ทำหน้าที่ลดทอนแรงดัน output ที่มีค่ามากให้เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับป้อนกลับเป็น feedback voltage (V_f) โดยใช้การแบ่งแรงดัน ค่า C ที่ได้เกิดจากการกำหนดค่า (V_f) ที่ต้องการ

ค่า V_f ที่วงจรต้องการมีค่า 10 โวลต์

จากภาพที่ 18

$$V_f = \frac{C_{04}}{C_{04} + C_{05}} V_{out}$$

$$\frac{C_{04}}{C_{04} + C_{05}} = \frac{10}{500} = \frac{1}{50}$$

$$50C_{04} - C_{05} = C_{05}$$

$$49C_{04} = C_{05}$$

เนื่องจาก C_{04} ต้องรับแรงดันค่ามาก จึงเลือก C ที่มีค่าน้อย เพื่อขนาดของ C ที่ไม่ใหญ่จนเกินไป

เลือกค่า

$$C_{04} = 2.2 \text{ nF}$$

$$C_{05} = 49 \times 2.2 \times 10^{-9} = 0.1 \text{ } \mu\text{F}$$

6. การเลือกค่า L_{01}

เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริกเป็น sine wave จึงนำ L มาต่ออนุกรมกับ C_{01} เพื่อทำให้เป็นวงจร series resonance โดยสามารถหาค่า L ได้จาก

ต้องการความถี่ resonance (f_r) = ความถี่ resonance ของเพียโซอิเล็กทริก = 60 KHz

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

ค่า C ในการคำนวณ คือ C_{01} และ C_{04} , C_{05} ที่ต่อด้าน secondary ของหม้อแปลงแต่มีผลสะท้อนกลับมาที่ด้าน primary ของหม้อแปลงด้วย จึงได้นำมาคิดรวมกัน

$$\text{จาก } C_{04} = 2.2 \text{ nF} , C_{05} = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$$

$$C_{04} \text{ อนุกรมกับ } C_{05} \quad \therefore C_{04+05} = \frac{2.2 \times 10^{-9} \times 0.1 \times 10^{-6}}{2.2 \times 10^{-9} + 0.1 \times 10^{-6}} = 2.1526 \text{ nF}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_{\text{pri}} &= n^2 C_{\text{sec}} \\ &= 22 \times 22 \times 2.1526 \times 10^{-9} \\ &= 1.042 \text{ }\mu\text{F} \end{aligned}$$

นำ C_{pri} อนุกรมกับ C_{01} จะได้

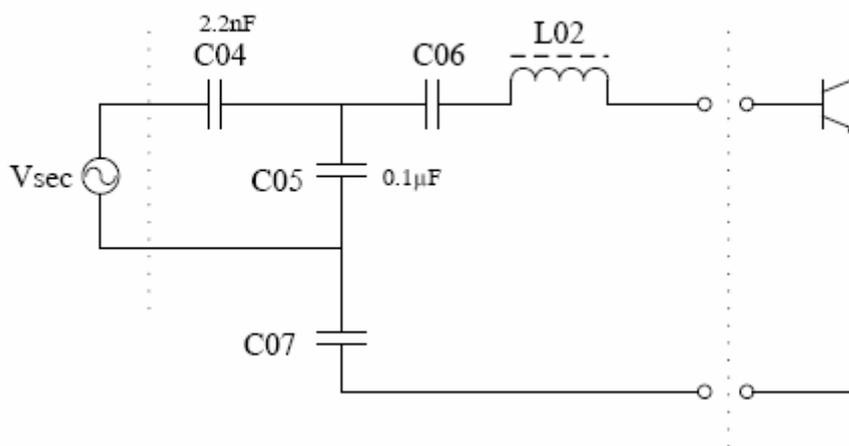
$$C = \frac{1.042 \times 10^{-6} \times 1.33 \times 10^{-6}}{(1.042 + 1.33) \times 10^{-6}} = 0.6 \text{ }\mu\text{F}$$

$$L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = 11.7 \text{ }\mu\text{H}$$

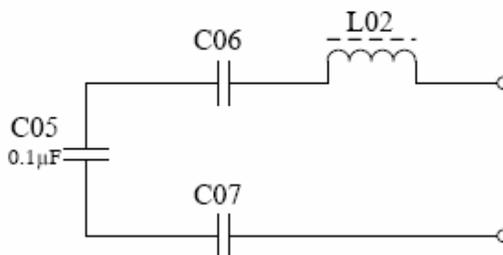
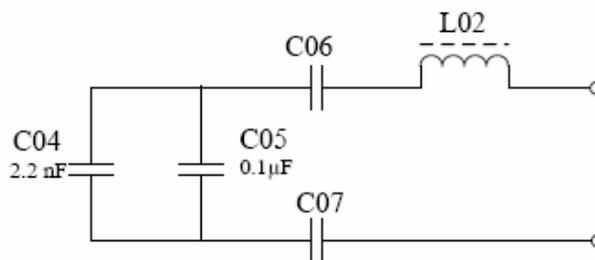
7. การเลือกค่า C_{06} , L_{02}

เพื่อให้สัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้กับเพียโซอิเล็กทริกเป็น sine wave มีความถี่ที่ต้องการเพียงความถี่เดียว จากภาพที่ 20 จึงเพิ่ม C_{06} , L_{02} เพื่อทำหน้าที่วงจรกรองแบบ series resonance เช่นเดียวกับ C_{01} , L_{01}

จากภาพที่ 20 สามารถวาดได้เป็น



เมื่อ short voltage source (V_{sec}) สามารถวาดภาพได้ใหม่ดังนี้



จากวงจรข้างบน ชุดวงจรกรอง (C_{06} , L_{02}) ต่ออนุกรมอยู่กับ C_{05} ซึ่งทำหน้าที่ลดทอนแรงดันป้อนกลับและ C_{07} ทำหน้าที่ป้องกันไฟDC ทำให้ตัวเก็บประจุทั้ง 2 ตัวมีผลต่อค่า f_r ของชุด วงจรกรองด้วย

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{02}(C_{05} + C_{06} + C_{07})}} = 60 \text{ KHz}$$

ทดลองเลือกค่า $L_{02} = 0.2 \text{ mH}$

$$(C_{05} + C_{06} + C_{07}) = 35.18 \text{ nF}$$

จากหัวข้อที่ 5 ได้ค่า $C_{05} = 0.1 \mu\text{F}$

$$C_{06} + C_{07} = 54 \text{ nF}$$

เพื่อความสะดวกจึงเลือก C_{06}, C_{07} ที่มีค่าเท่ากันมาใช้ในวงจร

$$C_{06} = C_{07} = 108 \text{ nF} = 0.11 \mu\text{F}$$

จากการคำนวณพบว่าค่า C ที่ได้มีค่ามากเกินไปกว่า $0.1 \mu\text{F}$ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในวงจร จึงเพิ่มค่า L_{02} อีก

ถ้า $L_{02} = 0.25 \text{ mH}$ ค่า $C_{06} = C_{07}$ มีค่า 78 nF ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถหาได้ จึงเลือกค่า C ที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้ คือ 68 nF

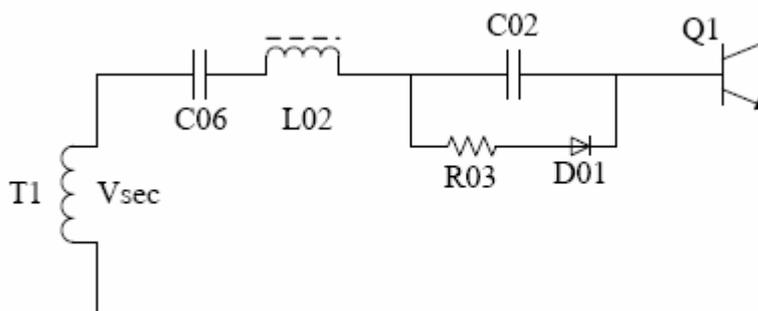
จากค่า $C_{06} = C_{07} = 68 \text{ nF}$ สามารถหาค่า L_{02} ได้

$$L_{02} = 0.277 \text{ mH}$$

ในการออกแบบจึงเลือกใช้ L ที่สามารถปรับค่าได้ มีค่าอยู่ระหว่าง $0.2-0.35 \text{ mH}$ มาประกอบเป็นชุดวงจรตรงกับ C_{06} ค่า 68 nF

8. การเลือกค่า C_{02}, C_{03}

C_{02}, C_{03} ทำหน้าที่เพิ่มความเร็วในการนำกระแสให้กับทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีกระแสค่ามากวิ่งผ่านตัวเก็บประจุเข้าทรานซิสเตอร์ทันทีที่เริ่มนำกระแส สามารถหาค่าได้โดยคิดจากเวลาที่ C ใช้ในการคายประจุผ่านตัวต้านทานและไดโอด ขณะที่ทรานซิสเตอร์ไม่นำกระแส ตามภาพผนวกที่ 3



ภาพผนวกที่ 3 วงจรแสดงการหาค่า C_{02}, C_{03}

$$\text{ความถี่ของวงจร } f = \frac{1}{T} = 60 \text{ KHz}$$

$$\text{เวลาที่ C ใช้ในการคายประจุทั้งหมด} = 5\tau = \frac{T}{2}$$

$$T = 16.67 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\frac{T}{2} = 8.335 \text{ } \mu\text{s}$$

$$\text{จาก } 5\tau = \frac{T}{2}$$

$$5 \times R \times C = 8.335 \times 10^{-6}$$

จากภาพผนวกที่ 3 ค่า $R_{03} = 50 \text{ } \Omega$

$$C_{02}, C_{03} = \frac{8.335 \times 10^{-6}}{5 \times 50} = 33 \text{ nF}$$

แต่เนื่องจากวงจรไม่ต้องการให้ C คายประจุทั้งหมด เพื่อป้องกันกรณีที่ทรานซิสเตอร์ทั้ง 2 ตัวทำงานพร้อมกัน จึงกำหนดให้ C คายประจุเหลือแรงดันคร่อม $C \approx V_D = 0.7$ โวลต์ จึงต้องใช้ C ที่มีค่ามากกว่า 33 nF จึงเลือก C ค่า 47 nF มาใช้ในวงจร

9. การเลือกเบอร์ทรานซิสเตอร์

การเลือกเบอร์ของทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้ในวงจร พิจารณาจากค่าต่างๆดังนี้

$$P_{tr} > \frac{1}{4}P_L = \frac{1}{4} \times 55 = 13.75 \text{ watt}$$

$$V_{CE \max} > 2V_{CC} = 2 \times 26 = 52 \text{ volt}$$

$$I_{C \max} > I_{C \text{ peak}} = 4.84 \text{ A}$$

ทรานซิสเตอร์ที่เลือกใช้ต้องอยู่ในกลุ่ม power switching transistor

เบอร์ทรานซิสเตอร์ที่เลือกใช้คือ 2SB921 (PNP) คู่กับ 2SD1237 (NPN)

ตารางผนวกที่ 1 ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2SB921 และ 2SD1237

	2SB921	2SD1237
V_{CE}	-80 V	80 V
I_C	-7 A	7 A
P_C	40 W	40 W
h_{FE}	30	30

10. การคำนวณค่า ESR

จากหัวข้อที่ 1 การออกแบบวงจรเบื้องต้น ความต้านทานแฝงในตัวเก็บประจุ(ESR) สามารถหาค่าได้จาก

$$ESR = \frac{\tan\delta}{\omega C}$$

การคำนวณทดลองเลือกค่า $C = 1 \mu\text{F}$ มาแทนลงในสมการ

จาก datasheet ของตัวเก็บประจุยี่ห้อ BENNIC

$C = 1 \mu\text{F}$ ที่ความถี่ $f = 1 \text{ KHz}$ มีค่า $\tan\delta = 0.01$ แทนค่าในสมการได้

$$ESR = \frac{0.01}{2\pi \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6}}$$

$$ESR = 1.59 \Omega$$

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาวนลิสสา สายะสนธิ
เกิดวันที่	20 สิงหาคม 2520
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสงคราม
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย