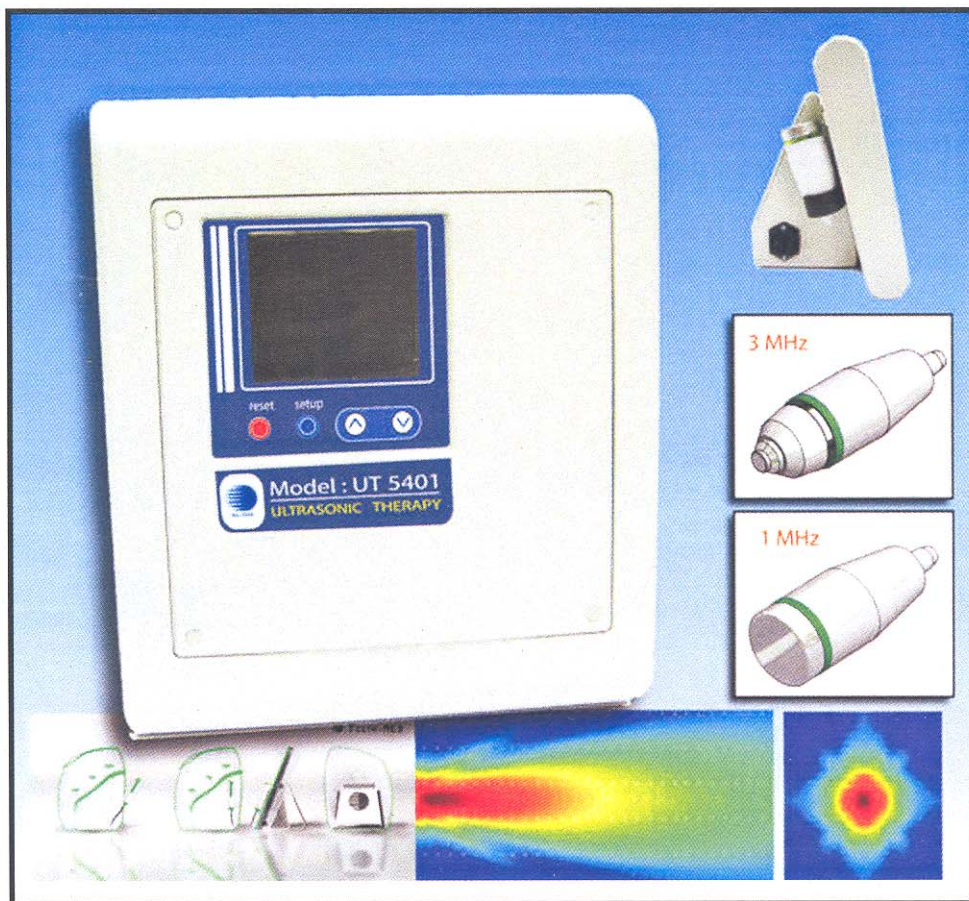




จว.

โครงการวิจัยที่ ภ. 52-13 / ย. 5 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การพัฒนาเครื่องหวดกระดูกกล้ามเนื้อ ด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ.52-13

การพัฒนาเครื่องนวดกระดูกกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่

โครงการย่อยที่ 5

การพัฒนาเครื่องนวดกระดูกกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

การพัฒนาเครื่องนวดกระดูกกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่

โดย

เฉลิมชัย จีระพันธุ์

ปิยลักษณ์ เงินชุกลิน แสงเดือน ดวงดาว

สิทธิชัย กาญจนสุทธา ประชา เหล่าอวยพร

ลักขณา กริธาเวทย์ ชุตติมา เอี่ยมโชติชวลิต

บรรณาธิการ

ลิขิต หาญจางสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

พิสุทธิ พลั้วสวาท

วว., กรุงเทพฯ 2555

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นายงวุฒิ เสาวพฤกษ์)

ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) และท่านรองผู้ว่าการวิจัยและพัฒนาด้านพัฒนาอย่างยั่งยืนที่ให้คำแนะนำ และให้การสนับสนุนโครงการด้วยดีตลอดมา ขอขอบคุณ ดร.ไกรสร อัญชลีวรพันธุ์ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ที่ให้ความร่วมมือในการตรวจสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขอขอบคุณ คุณสมภพ เจริญจิตต์ บริษัท บุญชัยพลาย จำกัด ให้ข้อมูลด้านการใช้งานของเครื่อง และรูปแบบของเครื่อง ขอขอบคุณ ดร.วดี วิชัยดิษฐ์ ห้องปฏิบัติการมาตรฐานทางไฟฟ้า และอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์ทดสอบและมาตรวิทยา ให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ทดสอบคลื่น

และขอขอบคุณพนักงานฝ่ายนวัตกรรมวัสดุ (ฝนว.) ทุกท่านที่ให้ความร่วมมือ และสนับสนุน ขอขอบคุณพนักงาน วว. ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุน และให้กำลังใจที่ดีตลอดโครงการ

คณะผู้วิจัย

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	จ
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง	5
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	24
4. สรุปผลการทดลอง	98
5. เอกสารอ้างอิง	102
6. ภาคผนวก 1	104
ภาคผนวก 2	107

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	ชื่อสูตรของสารที่เติมด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ปริมาณ 1-5 โมลเปอร์เซ็นต์	12
ตารางที่ 2.2	ชื่อสูตรของสารที่เติมด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ปริมาณ 0.1-0.7 โมลเปอร์เซ็นต์	12
ตารางที่ 2.3	ชื่อสูตรของสารที่เติมด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ปริมาณ 0.1 และ 0.3 โมลเปอร์เซ็นต์ Ba และ Fe doped-PZT	13
ตารางที่ 2.4	แสดงการทำงานของ CD 4514	16
ตารางที่ 2.5	การเลือกรูปแบบสัญญาณ	18
ตารางที่ 3.1	สมบัติทางกายภาพของสารหลังการเผาแคลไซน์ ($850^{\circ}C/4$ ชั่วโมง) และหลังการเผาซินเตอร์ริง $1200^{\circ}C/2$ ชั่วโมง	25
ตารางที่ 3.2	สมบัติทางไฟฟ้าของสาร PZT และ PZT doped Mn	27
ตารางที่ 3.3	น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ ($850^{\circ}C/4$ ชั่วโมง) การหดตัวและความหนาแน่นหลังการเผาซินเตอร์ริง ($1200^{\circ}C/2$ ชั่วโมง)	29
ตารางที่ 3.4	ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงาน PZT, PZT -0.1% Mn, PZT -0.3% Mn, PZT-0.5% Mn และ PZT-0.7% Mn	32
ตารางที่ 3.5	สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZT, PZT -0.1%Mn, PZT -0.3%Mn, PZT -0.5% Mn และ PZT -0.7% Mn	33
ตารางที่ 3.6	น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ ($850^{\circ}C/4$ ชั่วโมง) การหดตัวและความหนาแน่นหลังการเผาซินเตอร์ริง ($1200^{\circ}C/2$ ชั่วโมง)	34
ตารางที่ 3.7	สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZTBaFe, PZTBaFe -0.1% Mn และ PZTBaFe -0.3% Mn	39
ตารางที่ 3.8	ค่าความถี่เรโซแนนซ์ และแอนติเรโซแนนซ์ ของสารเพียโซอิเล็กทริกที่ความหนาประมาณ 0.7 มม.	40
ตารางที่ 3.9	กราฟความถี่เรโซแนนซ์ และแอนติเรโซแนนซ์ของ thickness mode ของตัวอย่าง ก) PZTBaFe ข) PZTBaFe -0.1%Mn และ ค) PZTBaFe -0.3%Mn	42

สารบัญตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 3.10	ค่าความหนาอะลูมิเนียมสำหรับประกอบเป็นห้วนวดความถี่ 1 และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์	44
ตารางที่ 3.11	แสดงค่ากำลังคลื่นของห้วนวดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	62
ตารางที่ 3.12	แสดงค่ากำลังคลื่นของห้วนวด 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร	62

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 2.1	กระบวนการผลิตสารเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT)	11
รูปที่ 2.2	แสดงขาการทำงานของไอซี CD4514	15
รูปที่ 2.3	แสดงวงจรภายในของไอซี ULN2803	17
รูปที่ 2.4	โครงสร้างของไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่	18
รูปที่ 2.5	หลักการทํางานพื้นฐานของวงจร LC ออสซิลเลเตอร์	19
รูปที่ 2.6	แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ ที่เวลาต่าง ๆ ของวงจร LC	20
รูปที่ 2.7	ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของตัวเก็บประจุและลวดนำไฟฟ้า ของวงจร LC	21
รูปที่ 2.8	วงจรชุด LC ออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์	22
รูปที่ 2.9	วงจรชุดขับสัญญาณไฟฟ้า	23
รูปที่ 3.1	กราฟ XRD ของสาร PZT, PZT-1%Mn, PZT-3%Mn และ PZT-5%Mn	24
รูปที่ 3.2	กราฟ XRD ชิ้นงานหลังซินเตอร์ริงของสาร PZT, PZT-1%Mn, PZT-3%Mn และ PZT - 5%Mn	26
รูปที่ 3.3	กราฟ XRD ของสาร PZT, PZT-0.1%Mn, PZT-0.3%Mn, PZT-0.5%Mn และ PZT- 0.7%Mn หลังแคลไซน์	28
รูปที่ 3.4	XRD ของสาร PZT, PZT-0.1%Mn, PZT-0.3%Mn, PZT-0.5%Mn และ PZT- 0.7%Mn หลังการเผาซินเตอร์ริง	30
รูปที่ 3.5	ลักษณะจุดโครงสร้างของ ก) PZT ข) PZT-0.1%Mn ค) PZT-0.3%Mn ง) PZT-0.5%Mn จ) PZT-0.7%Mn	31
รูปที่ 3.6	กราฟ XRD ของสาร PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe - 0.3%Mn หลังแคลไซน์	35
รูปที่ 3.7	กราฟ XRD ของสาร PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe - 0.3%Mn หลังเผาซินเตอร์ริง	36
รูปที่ 3.8	ลักษณะจุดโครงสร้างของ ก) PZTBaFe ข) PZTBaFe-0.1%Mn ค) PZTBaFe-0.3%Mn	38

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.9	กราฟความถี่เรโซแนนซ์ (fr) และแอนตี้เรโซแนนซ์ (fa) ของ thickness mode	41
รูปที่ 3.10	ส่วนประกอบของหัวนวดอัลตราซาวด์	42
รูปที่ 3.11	โครงสร้างทรานสดิวเซอร์สำหรับเครื่องนวดอัลตราซาวด์กายภาพบำบัด	43
รูปที่ 3.12	ค่า Emission transfer function (FTE) สำหรับชั้นโลหะที่มีความหนาต่างๆ	44
รูปที่ 3.13	หัวนวดอะลูมิเนียมที่ติดชิ้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	45
รูปที่ 3.14	การประกอบชิ้นเพียโซอิเล็กทริก(PZT) กับหัวนวดอะลูมิเนียมความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์	45
รูปที่ 3.15	ชุดทดสอบการส่งคลื่นของชิ้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	46
รูปที่ 3.16	ชุดทดสอบการส่งคลื่นของชิ้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก	46
รูปที่ 3.17	การประกอบชิ้นเพียโซอิเล็กทริก (PZT) กับชุดทรานสดิวเซอร์	47
รูปที่ 3.18	โครงสร้างหัวนวด ก) หัวนวด 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ข) หัวนวด 3 เมกะเฮิร์ตซ์	48
รูปที่ 3.19	ส่วนประกอบหัวนวดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	48
รูปที่ 3.20	หัวนวดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	49
รูปที่ 3.21	ส่วนประกอบหัวนวดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์	49
รูปที่ 3.22	หัวนวดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์	50
รูปที่ 3.23	วงจรไฟฟ้าส่วนควบคุม	51
รูปที่ 3.24	ลายทองแดงแผ่น PCB ภาคควบคุม	51
รูปที่ 3.25	การต่อวงจรควบคุมการจ่ายกระแส	52
รูปที่ 3.26	การต่อวงจรการปรับค่าความเข้มของคลื่น	52
รูปที่ 3.27	ลายทองแดงแผ่น PCB วงจรการปรับค่าความเข้มของคลื่น	53
รูปที่ 3.28	การต่อวงจรการแสดงผลและสวิตช์อินพุต	53
รูปที่ 3.29	ลายทองแดงแผ่น PCB วงจรติดต่อผู้ใช้	54
รูปที่ 3.30	วงจรจ่ายไฟ	54
รูปที่ 3.31	แผนผังการวงจรไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าเก็บประจุของร่างกายมนุษย์	56

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.32 แสดงค่าความต่างของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณไฟฟ้าก่อนและหลังการสัมผัสร่างกายมนุษย์ที่ความถี่ต่างๆ	56
รูปที่ 3.33 วงจรกำเนิดความถี่ด้วยไอซี MAX 038	57
รูปที่ 3.34 ลายทองแดงแผ่น PCB วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่	58
รูปที่ 3.35 คลื่นสัญญาณไฟฟ้า 1 เมกะเฮิร์ตซ์	58
รูปที่ 3.36 คลื่นสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์	59
รูปที่ 3.37 คลื่นสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์	60
รูปที่ 3.38 เครื่องวัดความเข้มของคลื่น และการติดตั้งในการวัด	61
รูปที่ 3.39 การทดสอบชุดห้วงนวด 3 เมกะเฮิร์ตซ์กับวงจรไฟฟ้า	61
รูปที่ 3.40 การทดสอบชุดห้วงนวด 3 เมกะเฮิร์ตซ์กับวงจรไฟฟ้า	61
รูปที่ 3.41 แผนภาพการทำงานของวงจรขับสัญญาณไฟฟ้า	63
รูปที่ 3.42 วงจรรวมเครื่องนวด อัลตราซาวด์กายภาพบำบัด 2 ความถี่	64
รูปที่ 3.43 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 1	65
รูปที่ 3.44 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของการทดลองครั้งที่ 1	66
รูปที่ 3.45 การติดตั้งแผ่น ground plate ก่อนวางแผ่นวงจรไฟฟ้า (control PCB)	67
รูปที่ 3.46 การติดตั้งแผ่น ground plate หลังแผ่นวงจรไฟฟ้า (panel PCB)	67
รูปที่ 3.47 การติดตั้งสายกราวด์กับหม้อแปลงไฟฟ้า	68
รูปที่ 3.48 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 2	68
รูปที่ 3.49 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของการทดลองครั้งที่ 2	69
รูปที่ 3.50 ชุด socket ที่มีวงจรกรองกระแส (filter) ประกอบเทียบกับแบบเดิม	70
รูปที่ 3.51 หม้อแปลงไฟฟ้าก่อนพันด้วยทองแดง	70
รูปที่ 3.52 การนำแผ่นทองแดงมาพันรอบหม้อแปลงไฟฟ้า และต่อลงสายกราวด์	70
รูปที่ 3.53 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 3	71

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.54 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของ การทดลองครั้งที่ 3	71
รูปที่ 3.55 ก่อนและหลังการหมุนกลับวงจรไฟฟ้าภายในเครื่อง	72
รูปที่ 3.56 ทำฟาส์ทิงกะสิครอบภาคขับสัญญาณไฟฟ้าภายในเครื่อง	73
รูปที่ 3.57 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 4	73
รูปที่ 3.58 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของ การทดลองครั้งที่ 4	74
รูปที่ 3.59 การตำแหน่ง heat sink และทรานซิสเตอร์ที่ย้ายใหม่ในเครื่อง A	75
รูปที่ 3.60 ตำแหน่งของสายสัญญาณ 5 เส้นและการหุ้มสายสัญญาณด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ในเครื่อง B	75
รูปที่ 3.61 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมด standby ของเครื่อง A การทดลอง ครั้งที่ 5 แบบไม่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม	76
รูปที่ 3.62 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมด standby ของเครื่อง A การทดลอง ครั้งที่ 5 แบบหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม	76
รูปที่ 3.63 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมด standby ของเครื่อง B การทดลอง ครั้งที่ 5 แบบไม่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม	77
รูปที่ 3.64 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมด standby ของเครื่อง B การทดลอง ครั้งที่ 5 แบบหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม	77
รูปที่ 3.65 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ใน โหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของ เครื่อง A การทดลองครั้งที่ 5 แบบหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม	78
รูปที่ 3.66 แสดงตำแหน่งหม้อแปลงไฟและทรานซิสเตอร์ที่ได้จัดวางตำแหน่งใหม่ภายใน และด้านหลังเครื่อง	80
รูปที่ 3.67 ลายวงจรก่อนและหลังการปรับปรุงให้มีลายทองแดงวนล้อมรอบ	81
รูปที่ 3.68 ลายวงจรไฟฟ้าด้านบนของแผ่นที่มีลายทองแดงทั้งแผ่นต่อเข้ากับสายกราวด์ และเคลือบด้วยสารพลาสติกสีเขียว	82

สารบัญรูป (ต่อ)

		หน้า
รูปที่ 3.69	การสลับสายสัญญาณไฟฟ้าของหัวвод	82
รูปที่ 3.70	กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนนอนของเครื่องนวดที่ใช้แผ่น PCB แบบ 2 หน้าในโหมด standby	83
รูปที่ 3.71	กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนนอนและแนวตั้งของเครื่องนวดที่ใช้แผ่น PCB แบบ 2 หน้าในโหมดส่งคลื่น	83
รูปที่ 3.72	กราฟสนามแม่เหล็กแนวนอนและแนวตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องในโหมดส่งคลื่น 1.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร	84
รูปที่ 3.73	กราฟสนามแม่เหล็กแนวนอนและแนวตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องใน โหมด stand by	85
รูปที่ 3.74	ตำแหน่งภายในแผงผังวงจรไฟฟ้าที่ใส่แกนเฟอร์ไรต์เพิ่มเติม เพื่อลดทอนการแพร่วัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	86
รูปที่ 3.75	การต่อเก็บประจุเข้ากับตัวถังของมอเตอร์เพื่อลดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	87
รูปที่ 3.76	การต่ออุปกรณ์ MOV เพื่อลดสัญญาณ surge ในสายไฟ	88
รูปที่ 3.77	การต่อขา center tap ของหม้อแปลง แบบที่ 1 และแบบที่ 2	89
รูปที่ 3.78	กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนนอนที่แพร่ออกจากเครื่องใน โหมด stand-by	90
รูปที่ 3.79	กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องใน โหมด stand-by	90
รูปที่ 3.80	กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนนอนที่แพร่ออกจากเครื่องใน โหมด stand-by	91
รูปที่ 3.81	กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องใน โหมด stand-by	92
รูปที่ 3.82	ค่ากำลังคลื่นหลังการเปิดเครื่องนานเป็นระยะเวลาต่างๆ	93
รูปที่ 3.83	แบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่ แบบที่ 1	94
รูปที่ 3.84	แบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่ แบบที่ 2	94
รูปที่ 3.85	ต้นแบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่	95
รูปที่ 3.86	แบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่	96
รูปที่ 3.87	ต้นแบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่หลังการปรับปรุง	97

DEVELOPMENT OF ULTRASONIC MASSAGE DEVICE WITH 2 FREQUENCIES

**Chalermchai Jeerapan, Saengdoen Daungdaw, Piyaluck Ngernchuklin,
Sittichai Kanchanasutha, Pracha Lao-auyporn, Laksana Kreethawate
and Chutima Eamchochawalit**

ABSTRACT

The 1 and 3 MHz ultrasound therapy equipment used for physical therapy has been proposed. The development of ultrasonic therapy device is divided into four main parts including piezoelectric material for transducer, transducer probe design, electrical circuit and ultrasonic therapy body design.

We obtained piezoelectric ceramics with two different properties. First, the piezoelectric shows the capacitance of 1.3635 nF and thickness resonance frequency at 1 MHz. The other has the capacitance is equal to 1.233 nF and thickness resonance frequency found at 3 MHz. These make them suitable for ultrasonic therapy application. The ultrasonic transducers consisting of piezoelectric ceramic, aluminum head, handle and wiring were designed for transmitting ultrasonic at the interested frequencies. The electrical circuits were successfully developed such as wave form control system, display, drive circuit for transducer and touch system between transducer and skin's patient to automatically control ultrasonic emission.

Finally, the 1 and 3 MHz ultrasonic therapy prototype with its intensities of 0.5 -1.5 W/cm² and 0.1 to 0.5 W/cm², respectively, has been achieved. There are two modes of continuous and pulse with ratios 1:1 to 1:9 used in the prototype. Also, it can continuously operate in a period of 0-30 minutes. Furthermore, we has experimented the electromagnetic radiation of ultrasonic therapy prototype during its operation. This will be the fundamental information for future development of the medical ultrasonic devices.

การพัฒนาเครื่องนวดกระดูกกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่

เฉลิมชัย จีระพันธุ์¹, แสงเดือน ดวงดาว¹, ปิยลักษณ์ เงินชุกลิน¹, สิทธิชัย กาญจนสุธา¹,
ประชา เหล่าอวยพร¹, ลักษณา กริธาเวทย์¹ และชุติมา เอี่ยมโชติชวลิต¹

บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องนวดกระดูกกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 โดยแบ่งขั้นตอนการวิจัยเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก, การพัฒนาชุดทรานสดิวเซอร์ การพัฒนางจรไฟฟ้า และการพัฒนารูปแบบตัวเครื่อง.

ในขั้นตอนการพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกได้พัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีจุดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าเก็บประจุ 1.3635 nF และสารเพียโซอิเล็กทริกที่มีจุดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าเก็บประจุ 1.233 nF ขั้นตอนการออกแบบชุดหัวทรานสดิวเซอร์ ได้ชุดหัวอัลตราซาวด์ จำนวน 2 ชุด ได้แก่ หัวนวดอัลตราซาวด์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ และการออกแบบวงจรไฟฟ้า ได้ชุดวงจรไฟฟ้าประกอบด้วย วงจรควบคุมการทำงานเพื่อให้ส่งคลื่นได้ตามรูปแบบต่อเนื่องและแบบเป็นจังหวะ และการแสดงผล, วงจรขับสัญญาณไฟฟ้าเพื่อขับให้กับชุดทรานสดิวเซอร์ทำงาน และวงจรตรวจสอบการสัมผัสของหัวนวดกับผิวหนังผู้บำบัดเพื่อควบคุมการส่งคลื่นอัตโนมัติ.

เครื่องนวดกระดูกกล้ามเนื้อต้นแบบ 1 และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถควบคุมให้ส่งคลื่นความเข้มได้ 0.5 -1.5 W/cm², สำหรับคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 0.1 - 0.5 W/cm², สำหรับคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถควบคุมโหมดการส่งคลื่นได้ทั้งแบบต่อเนื่องและแบบเป็นช่วง ซึ่งการส่งแบบเป็นช่วงจะควบคุมจังหวะการส่งและหยุดได้ตั้งแต่ 1 : 1 จนถึง 1 : 9 และสามารถตั้งเวลาการทำงานได้ตั้งแต่ 0 – 30 นาที นอกจากนั้นยังได้ศึกษาการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกจากตัวเครื่องขณะทำงานเพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิจัยทางด้านเครื่องมือบำบัดทางการแพทย์ต่อไปในอนาคต

¹ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

1. บทนำ

คลื่นอัลตราซาวด์เป็นการเรียกลักษณะการสั่นทางกลที่มีความถี่มากกว่าการได้ยินของมนุษย์ โดยปกติมนุษย์สามารถได้ยินตั้งแต่ 20 เฮิร์ตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิร์ตซ์ เครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อเป็นเครื่องมือชนิดหนึ่ง ที่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์มาช่วยในการบำบัดอาการเจ็บปวดของกล้ามเนื้อที่เกิดจากหลายสาเหตุต่างๆ เช่น การทำงานในท่าที่ซ้ำๆ กันเป็นประจำ การเคลื่อนไหวที่ไม่ถูกต้องของกล้ามเนื้อหลังจากการผ่าตัด ฯลฯ โดยคลื่นอัลตราซาวด์จะเกิดจากการสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกที่อยู่ในหัวนวด และถูกส่งออกไปยังผิวหนังและกล้ามเนื้อ เมื่อของเหลวและเซลล์ในบริเวณนั้นได้รับคลื่นจะเกิดการหดและขยายตามจังหวะของคลื่นนั้น เช่น คลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์จะทำให้เซลล์มีการสั่นจะหดและขยาย 1 ล้านครั้งต่อวินาที เป็นต้น. ในภาวะนี้เองภายในเซลล์จะมีการดูดซับพลังงานของคลื่นไว้และสะสมจนเป็นความร้อนเรียกว่า heat effect ซึ่งช่วยให้ระบบการไหลเวียนของโลหิต กระตุ้นการสร้างเนื้อเยื่อให้เร็วขึ้น กระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์กลับมาทำงานได้เป็นปกติ อย่างเช่น Lundeborg ได้ทดลองการใช้คลื่นอัลตราซาวด์บำบัดอาการเจ็บจากก้นแข็งที่ข้อมือ พบว่าการใช้คลื่นอัลตราซาวด์บำบัดช่วยฟื้นฟูสภาพได้ดีกว่าการไม่ใช้คลื่นอัลตราซาวด์บำบัด (Lundeborg 1998) ทั้งนี้ปัจจัยที่จะทำให้เกิด heat effect จะขึ้นกับความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ใช้บำบัดรักษา อย่างเช่นการทดลองของ Michale G. Miller ได้ทดลองวัดอุณหภูมิของกล้ามเนื้อแขนที่บำบัดด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 1 และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ นาน 10 นาที พบว่าคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ จะทำให้อุณหภูมิของกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้น 5.88 °ซ. ขณะที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์จะทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 2.6 °ซ. ได้ ซึ่งการบำบัดรักษากล้ามเนื้อด้วยคลื่นอัลตราซาวด์ในแต่ละส่วนของร่างกายมนุษย์จะต้องเลือกความถี่ ความเข้ม และระยะเวลาการบำบัดให้เหมาะสม.

งานวิจัยเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่นี้ เป็นการพัฒนาเครื่องที่มีหัวนวดสำหรับส่งคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยดำเนินการวิจัยเป็น 4 ส่วนหลักได้แก่ งานวิจัยทางด้านสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่เป็นส่วนกำเนิดคลื่นอัลตราซาวด์, การออกแบบส่วนหัวนวดที่เป็นการนำสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกมาประกอบเป็นชุดหัวนวด, การพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องและกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าให้กับชุดหัวนวดให้ทำงาน และการพัฒนารูปแบบเครื่องให้สามารถนำไปทดลองใช้งานได้จริง.

การพัฒนาสารเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (Lead Zirconate Titanate : PZT) ที่เป็นสารเพียโซอิเล็กทริกที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นจากเลดออกไซด์ (PbO), เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO_2) และไททานเนียมออกไซด์ โดยพบว่า อัตราส่วนของ Zr/Ti เท่ากับ 53/47 เป็นอัตราส่วนที่ทำให้สาร PZT มีการเกิดเฟสสองเฟสอยู่ร่วมกันหลังขบวนการแคลไซน์ คือ เฟสของเตตระโกนอลและรอมโบฮีดรอล และเรียกส่วนผสมที่มีสองเฟสอยู่ร่วมกันนี้ว่า Morphotropic Phase Boundary (MPB) สูตรส่วนผสมที่ MPB นี้จะให้สมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่สูงที่สุด (Zipparo 1996) เนื่องจากทิศทางของ spontaneous polarization (Ps) มีถึง 14 ทิศทาง โดยเกิดจากโครงสร้างเตตระโกนอล 6 ทิศทางของ plane [100] และที่เหลือนั้นเกิดจากโครงสร้างรอมโบฮีดรอล 8 ทิศทางของ plane [111] (Lockwood 1994) ดังนั้น Ps จะเรียงตัวในแนวเดียวกับสนามไฟฟ้าที่ให้อันในขั้นตอนการทำขั้ว (poling) จะเกิดได้มากที่สุด ส่งผลให้มีสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกที่สูง นอกจากนั้นการเติมด้วยตัวเติม (dopant) ในโมลเปอร์เซ็นต์ต่างๆ ยังช่วยพัฒนาสมบัติของสารเพียโซอิเล็กทริกให้เพิ่มมากขึ้น โดยทำการศึกษาดั้มเติม MnO_2 เนื่องจาก Mn^{2+} และ Mn^{3+} เป็น acceptor ions และเมื่อใส่เข้าไปในสูตร PZT พื้นฐานแล้วนั้น จะเข้าไปแทนที่ Zr^{4+} ทำให้เกิด oxygen vacancies ขึ้นในโครงสร้างเปอรอฟสไกต์ของสูตร PZT พื้นฐาน ด้วยเหตุดังกล่าวจึงส่งผลให้ได้สมบัติของ “Hard PZT” โดยมีค่า dielectric constant, dielectric loss และ piezoelectric coefficients ที่ต่ำ แต่มีค่า Coercive field (E_c) สูง จึงทำให้ยากต่อการ pole และ depole ได้ [4]

การพัฒนาทางด้านหัวводหรือชุดทรานสดิวเซอร์ของเครื่องจะเป็นการพัฒนาเทคนิคการประกอบชิ้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกที่ได้พัฒนาขึ้นเข้ากับหัวводอะลูมิเนียม, การเชื่อมต่อสายสัญญาณไฟฟ้ากับชิ้นเพียโซอิเล็กทริก โดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมด้านอัลตราโซนิกส์.

การพัฒนาวงจรไฟฟ้าประกอบด้วย การพัฒนาส่วนควบคุมการทำงานใช้หลักการของไมโครคอนโทรลเลอร์ มาเป็นส่วนประมวลผลต่างๆ ได้แก่ การรับค่าจากผู้ใช้ การคำนวณเวลาการทำงานการควบคุมส่วนส่งคลื่น เป็นต้น การพัฒนาส่วนวงจรส่งคลื่น การพัฒนาส่วนควบคุมการส่งคลื่น

การพัฒนารูปแบบตัวเครื่องเป็นการออกแบบตัวเครื่อง การจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ เช่น วงจรไฟฟ้า หน้าจอแสดงผล ปุ่มกดรับคำสั่งต่างๆ เป็นต้น.

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

2.1.1 วัสดุที่ใช้ในการเตรียมสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต

- สารตะกั่วออกไซด์ (PbO ความบริสุทธิ์ 99%)
- สารเซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (ZrO₂ ความบริสุทธิ์ 99%)
- สารไททานเนียมไดออกไซด์ (TiO₂ ความบริสุทธิ์ 99%)
- สารแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂ ความบริสุทธิ์ 80-85%)
- สารแบเรียมคาร์บอเนต (BaCO₃ ความบริสุทธิ์ 99 %)
- สารเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe₂O₃ ความบริสุทธิ์ 99 %)

2.1.2 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิต

- สารละลายอะซีโตน
- ซิลเวอร์อิเล็กโทรดสำหรับทำขั้วไฟฟ้า
- น้ำมันซิลิโคน เพื่อป้องกันการ arch ขณะทำขั้วไฟฟ้า (poling)
- กาว mounting wax ใช้สำหรับติดตัวอย่างเครื่องเจียรราบ
- กาว epoxy สำหรับติดแผ่นเพียโซอิเล็กทริกกับแผ่นอะลูมิเนียม

2.1.3 อุปกรณ์ และเครื่องมือกระบวนการผลิตสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

- เตาอบสาร
- เครื่องบดผสม
- เตาเผาไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิสูงสุด 1700 °ซ.)
- เครื่องอัด Hydraulic press
- แบบพิมพ์สแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 และ 3 เซนติเมตร
- เครื่องอัดทุกทิศทาง (Cold Isostatic Press : CIP)
- เครื่องเจียรราบ
- เครื่องขัดอัตโนมัติ
- ชุดอุปกรณ์วัดความหนาแน่นของสาร
- เครื่องเหนี่ยวนำขั้วไฟฟ้า (poling)
- เครื่องหาขนาดอนุภาค (particle analyzer)
- เครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field Emission Scanning Electron

Microscope : FESEM)

- เครื่องวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezo d-meter Model CAPT)
- เครื่อง Impedance Analyzer Hewlett Packard รุ่น 4192A
- เครื่องวัดค่าไฟฟ้าแบบตัวเลข (Digital Multimeter Fluke 187)

2.1.4 วัสดุในงานวิจัยทางด้านวงจรไฟฟ้า

2.1.4.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบ active

- IC (Integrated circuit)
 - MAX038 สำหรับกำเนิดความถี่
 - AT89C52 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับการประมวลผล
 - CD4514, ULN2803 สำหรับชุด buffer เพื่อขับสัญญาณไฟฟ้า
- ไตรแอก
- ไดแอก
- ทรานซิสเตอร์
- ไดโอด

2.1.4.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบ passive เช่น ตัวเก็บประจุ, ตัวต้านทาน และตัวนำ

ไฟฟ้า

- พัดลมระบายอากาศ
- หม้อแปลงไฟ
- จอแสดงผล LCD
- ชุดอะลูมิเนียมระบายความร้อน
- สายไฟ
- สวิตช์ไฟ
- อุปกรณ์อื่นๆ

2.1.4.3 อุปกรณ์ใช้ในกระบวนการออกแบบวงจรไฟฟ้า

- เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า (Oscilloscope)
- เครื่อง Digital Multimeter
- เครื่องวัดกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ (Ultrasonic Power Meter) รุ่น UPM-DT 10

2.1.4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบชุดห้วงวัดและตัวเครื่อง

- แท่งอะลูมิเนียม
- แผ่นพลาสติก PVC
- แผ่นอะคริลิก
- สายไฟ

- การ epoxy
- แผ่นทองแดง

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 วิเคราะห์ทดสอบชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก

2.2.1.1 การวัดปริมาณการสูญเสียของตะกั่วช่วงเผาเคลือบ

ซึ่งนำน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผาเคลือบ และหลังเผาเคลือบ จดบันทึกไว้แล้ว นำค่าที่ได้ นำมาคำนวณตามสมการ

$$\% \text{ การสูญเสียตะกั่ว} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100 \quad \text{----- (2.1)}$$

W_1 = พงตัวอย่างก่อนเผาเคลือบ (กรัม)

W_2 = พงตัวอย่างก่อนเผาเคลือบ (กรัม)

2.2.1.2 การวัดการหดตัว

นำชิ้นตัวอย่างสาร PZT วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อนและหลังเผาซินเตอร์ริง จดบันทึกค่าที่ได้ นำมาคำนวณตามสมการ

$$\% \text{ การหดตัว} = (L_1 - L_2) / L_1 \times 100 \quad \text{----- (2.2)}$$

L_1 = เส้นผ่านศูนย์กลางก่อนเผา (มม.)

L_2 = เส้นผ่านศูนย์กลางหลังเผา (มม.)

2.2.2 การทดสอบทางกายภาพ

2.2.2.1 การวัดค่าความหนาแน่นของตัวอย่าง (ρ)

นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเผาซินเตอร์ริงนำมาขัดผิวให้เรียบ นำมาล้างสารละลายอะซีโตนด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์ นำไปอบแห้ง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง (D) ชั่งน้ำหนักในน้ำ (I) และน้ำหนักอิ่มตัว (S) แล้วนำไปคำนวณความหนาแน่นของชิ้นงานตามสูตร

$$\rho = D / (S - I) \quad \text{----- (2.3)}$$

2.2.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะจุลโครงสร้างของสาร

ลักษณะจุลโครงสร้างของชิ้นงาน โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิด Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) นำชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการเผาซินเตอร์ริง นำมาขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 800, 1000, และ 2400 ตามลำดับ แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ ประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำมาเคลือบผิวด้วยทองโดยวิธี sputtering แล้ว นำเข้าเครื่อง FESEM

2.2.2.3 การวิเคราะห์โครงสร้างเฟสและโครงสร้างผลึก

เฟสและโครงสร้างผลึกของตัวอย่างถูกวิเคราะห์โดยเครื่อง X-Ray Diffractometer (XRD)

- การเตรียมตัวอย่างชนิดผง เตรียมโดยการนำตัวอย่างที่ผ่านจากการเผาแคลไซน์ นำมาบด ให้ละเอียดเป็นเนื้อเดียวกัน นำผงใส่ที่เตรียมตัวอย่างอัดให้แน่น และปาดผิวให้เรียบ ก่อนนำเข้า เครื่อง XRD

- การเตรียมตัวอย่างชนิดเม็ด นำเม็ดตัวอย่างที่ผ่านการเผาซินเตอร์ริง นำมาขัดให้เรียบ ขนานกัน แล้วนำมาติดกับที่เตรียมตัวอย่างให้ผิวหน้าของชิ้นงานเรียบติดกับขอบที่เตรียมตัวอย่าง แล้วนำเข้าเครื่อง XRD

2.2.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า

นำตัวอย่างที่ผ่านการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (poling) 20 kV/cm ทำการวัดค่าสมบัติทางไฟฟ้าด้วย เครื่อง Impedance Analyzer Model 4912A โดยวัดค่าความจุไฟฟ้า (C) ของชิ้นงานที่ 1 kHz, ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้า ($\tan\delta$), วัดค่าความถี่เรโซแนนซ์จะทำการสแกนหามุมระหว่างกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์ที่อ่านจากเครื่อง Impedance Analyzer มีค่าทิศทางลบไปเป็น 0 องศา จะได้ ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด (Z_r), สำหรับการวัดค่าแอนตี้เรโซแนนซ์จะทำการสแกนหามุมระหว่างกระแสไฟฟ้า และความต่างศักย์จากทิศทางบวกไปเป็น 0 องศา จะได้ค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) และค่าอิมพีแดนซ์สูงสุด (Z_a) ค่าต่างๆที่ได้สามารถนำมาคำนวณหาค่าได้ดังนี้

2.2.2.5 ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

$$K = Cd / \epsilon_0 A \quad \text{-----}(2.4)$$

โดยที่ K = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก

C = ค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า (นาโนฟารัด)

d = ค่าความหนาของฉนวนงาน (มิลลิเมตร)

ϵ_0 = ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของอากาศ = 8.85×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร

A = พื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่เป็นขั้วไฟฟ้า (มิลลิเมตร²)

2.2.2.6 Mechanical Quality Factor (Q_m)

สำหรับ ค่า Mechanical quality factor (Q_m) ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนระหว่างความเครียดในเฟส (strain in phase) ต่อความเครียดนอกเฟส (strain out of phase) ซึ่งเกิดขึ้นจากการสั่นของสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ค่า Q_m คำนวณจากค่าความถี่ที่วัดได้จากการวัดค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุด (Z_r) ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) โดยการแทนค่าตัวแปรต่างๆ ลงในสมการ (2.5) :

$$Q_m = f_a^2 / 2\pi f_r Z_r C_f (f_a^2 - f_r^2) \quad \text{-----}(2.5)$$

เมื่อ f_a = ความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (เฮิรตซ์)

f_r = ความถี่เรโซแนนซ์ (เฮิรตซ์)

Z_r = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่เรโซแนนซ์ (โอห์ม)

C_f = ค่าความจุไฟฟ้า ที่ 1 kHz (ฟารัด)

2.2.2.7 Mechanical coupling coefficient (k_p)

ค่า mechanical coupling coefficient คำนวณได้จากการวัดค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์ (f_a) k_p เป็นค่าแสดงความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานกลเป็นไฟฟ้าหรือพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล สามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.6) :

$$k_p = (2.59 (f_a - f_r / f_r))^{1/2} \quad \text{-----}(2.6)$$

เมื่อ k_p = ค่า coupling coefficient

f_r = ค่าความถี่เรโซแนนซ์

f_a = ค่าความถี่แอนตี้เรโซแนนซ์

2.2.2.8 การคำนวณหาค่าการสูญเสียทางไฟฟ้า ($\tan \delta$)

ค่าการสูญเสียทางไฟฟ้าหรือเรียกอีกอย่างว่าค่า dissipation factor หรือค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าไดอิเล็กทริกส่วนจินตภาพ (out-of-phase component) ต่อค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริง (in-phase component) ดังสมการ (2.7) :

$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad \text{-----(2.7)}$$

เมื่อ ϵ'' = ค่าไดอิเล็กทริกส่วนจินตภาพ

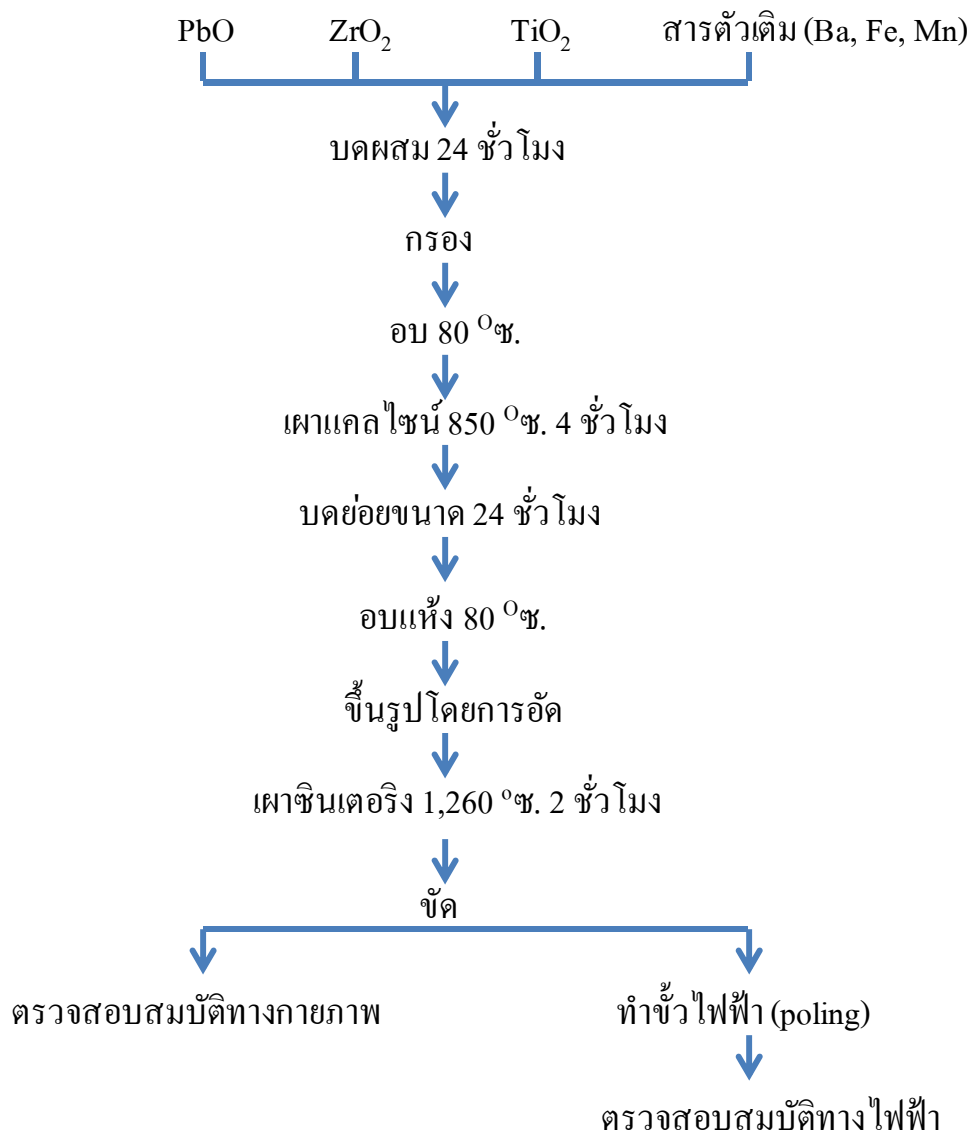
ϵ' = ค่าไดอิเล็กทริกส่วนจริง

2.2.2.9 ค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก (d_{33})

ค่า d_{33} คือ ค่าที่เพียโซอิเล็กทริกซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของสารเพียโซอิเล็กทริกซึ่งคุณสมบัตินี้จะขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก, เมื่อให้แรงกระทำในทิศ 3 หรือ แกน z ผลึกก็จะให้ประจุไฟฟ้าในทิศทาง 3 หรือ แกน z เช่นเดียวกัน หน่วยที่วัดเป็น คูลอมบ์ต่อนิวตัน สามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Piezo d-meter Model CAPT (Channel Product, Inc.)

2.2.3 การเตรียมสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก

ศึกษาสารเพียโซอิเล็กทริกสำหรับเครื่องขนาด 2 ความถี่ เตรียมสารโดยวิธี mixed oxide ผ่านกระบวนการ conventional ceramic process แล้วทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ เช่น เฟสและโครงสร้างผลึก ลักษณะจุดโครงสร้างของสาร สมบัติทางกายภาพและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกหลังการเผา และหลังการทำขั้วไฟฟ้าโดยวัดค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก(d_{33}), ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (ϵ_r), Mechanical quality factor (Q_m), Mechanical coupling coefficient (k_p) ขั้นตอนการเตรียมสารเพียโซอิเล็กทริกโดยวิธีแบบ mixed oxide มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.1 จากนั้นเป็นการแสดงสูตรส่วนผสมเพื่อเพิ่ม mechanical quality factor (Q_m) โดยตัวเติม (dopant) ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) มีการเติมในปริมาณที่แตกต่างกัน ลงในสูตร PZT ที่อยู่ใน morphotropic phase boundary คือ $Pb(Zr_{1-y}Ti_y)O_3$ โดยที่ $51 \leq y \leq 53$ และอีก การทดลองได้นำ MnO_2 เป็นตัวเติมร่วมกับคาร์บอเนต ($BaCO_3$) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) สูตรการทดลอง และผลการทดลองจะแสดงในส่วนต่อไป



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตสารเลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT).

2.2.3.1 การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 1-5 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน PZT

(Zr/Ti = 53/47)

สูตรในการศึกษาเริ่มต้นที่ PZT พื้นฐาน $\text{Pb}[(\text{Zr}_{0.53} \text{Ti}_{0.47})_{1-x} \text{Mn}_x] \text{O}_3$ โดย $x = 0, 0.01, 0.03$ และ 0.05 สูตรส่วนผสม และชื่อสูตรแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ชื่อสูตรของสารที่เติมด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ปริมาณ 1 - 5 โมลเปอร์เซ็นต์

ส่วนผสม	ตัวเติม (% โมล)	ชื่อสูตร
PZT (53/47)	0	PZT
PZT (53/47)	1	PZT -1%Mn
PZT (53/47)	3	PZT -3%Mn
PZT (53/47)	5	PZT -5%Mn

2.2.3.2 การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 0.1-0.7 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน PZT

(Zr/Ti = 52/48)

สูตร PZT พื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง คือ $\text{Pb}[(\text{Zr}_{0.52} \text{Ti}_{0.48})_{1-x} \text{Mn}_x] \text{O}_3$ โดย $x = 0, 0.001, 0.003, 0.005$ และ 0.007 ส่วนผสม และชื่อสูตรแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ชื่อสูตรของสารที่เติมด้วยแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ปริมาณ 0.1-0.7 โมลเปอร์เซ็นต์

ส่วนผสม	ตัวเติม (% โมล)	ชื่อสูตร
PZT (52/48)	0	PZT
PZT (52/48)	0.1	PZT -0.1%Mn
PZT (52/48)	0.3	PZT -0.3%Mn
PZT (52/48)	0.5	PZT -0.5%Mn
PZT (52/48)	0.7	PZT -0.7%Mn

2.2.3.3 การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂) ในปริมาณ 0.1 และ 0.3 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน Ba และ Fe doped-PZT (Zr/Ti = 52/48)

สูตร PZT พื้นฐานที่ใช้ในการทดลอง คือ Pb_{0.85}Ba_{0.15}[(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.9992-x}Fe_{0.008}Mn_x]O₃ โดย x = 0, 0.001 และ 0.003 ส่วนผสม ชื่อสูตรแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ชื่อสูตรสารที่เติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO₂) ในปริมาณ 0.1 และ 0.3 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน Ba และ Fe doped-PZT

ส่วนผสม	ตัวเติม (% โมล)	ชื่อสูตร
PZTBaFe	0	PZTBaFe
PZTBaFe	0.1	PZTBaFe -0.1%Mn
PZTBaFe	0.3	PZTBaFe -0.3%Mn

2.2.4 ขั้นตอนการออกแบบหัวนิ้ว

ส่วนประกอบหัวนิ้ว จะประกอบด้วยชิ้นเพียโซอิเล็กทริกกับหัวนิ้วอะลูมิเนียม โดยการออกแบบจะกำหนดให้ขนาดความหนาของหัวนิ้วอะลูมิเนียมมีขนาดเท่ากับ ¼ ของความยาวคลื่นในเนื้ออะลูมิเนียม และการยึดติดชิ้นเพียโซอิเล็กทริกจะทำด้วยการทา กาว epoxy

2.2.5 ขั้นตอนการออกแบบวงจรไฟฟ้า

2.2.5.1 การออกแบบชุดควบคุม

ในการออกแบบวงจรควบคุมประกอบด้วยส่วนหลักคือ

- ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ AT89C52 เป็นหัวใจสำคัญของระบบควบคุมแบบดิจิทัลขนาดเล็ก ส่วนประกอบของไมโครคอนโทรลเลอร์นี้ จะมีขาอินพุตหรือเอาต์พุตพอร์ต 32 ขา และชุดคำสั่งง่ายต่อการทำความเข้าใจและสามารถนำชุดคำสั่งนี้ไปใช้ได้กับ ของตระกูล MCS-51 รุ่นอื่น ๆ รายละเอียดโครงสร้างของไมโครคอนโทรลเลอร์ดังแสดงในภาคผนวก 1 ลำดับขั้นตอนการออกแบบโปรแกรมจะทำการออกแบบในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป และทำการบันทึกโปรแกรมที่ได้ออกแบบลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านเครื่อง programmer ทางด้านวงจรควบคุมจะออกแบบให้ขาของไอซีที่ทำหน้าที่เป็นพอร์ตรับ/ส่งสัญญาณ ไฟฟ้าต่างๆ แตกต่างกันไป โดยขารับสัญญาณหรือเรียกว่า พอร์ตอินพุต ได้แก่ ขาที่ทำหน้าที่รับคำสั่งจากสวิทช์กดต่างๆ ของหน้าจอควบคุม และขาที่ส่งสัญญาณหรือพอร์ตเอาต์พุต ได้แก่ ขาที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณเพื่อไปควบคุมส่วนต่างๆ เช่น จอแสดงผล LCD, ส่วน buffer, การส่งเสียงเตือน เป็นต้น ซึ่งจะกำหนดให้พอร์ตชุดที่ 1

สำหรับขั้วสัญญาณไฟฟ้าเพื่อควบคุมลักษณะของการส่งคลื่นของหัววนผ่านส่วน buffer ขาพอร์ต 2 เป็นเอาต์พุต สำหรับส่งข้อมูลและคำสั่งให้กับจอแสดงผล LCD และขา P3.6 และ P3.7 ต่อเข้ากับ ขา RS และ E ของ LCD พอร์ตชุดที่ 0 กำหนดให้ 4 บิตล่าง คือขาที่ P0.0 - P0.3 เป็นอินพุตรับ สัญญาณจากการกดสวิทช์ในการสื่อสารกับผู้ใช้ 3 บิตบนของพอร์ตชุดที่ 0 กำหนดให้เป็นขา เอาต์พุตสำหรับขับให้หลอด LED จำนวน 3 หลอดเพื่อแสดงสถานการณ์ตั้งค่าต่างๆ ขณะที่ขา P3.3 กำหนดให้เป็นขาเอาต์พุตสำหรับควบคุมเปิด/ปิดการทำงานของหัวอัลตราซาวด์ผ่านชุดออปโตไดรแอก ขา P3.5 กำหนดเป็นเอาต์พุตสำหรับสัญญาณเสียง ขณะที่ขา 40 และขา 31 ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะต่อกับไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ และต่อไฟกราวด์ที่ขา 20 วงจรสำหรับรี เซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ประกอบด้วย สวิตช์ ตัวเก็บประจุ (C) และตัวต้านทาน (R) จะต่อที่ขา 9 โดยคาบเวลาของการรีเซ็ต (T) จะถูกกำหนดให้มีค่ามากกว่า 2 เท่าของเวลาการทำงานของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ คำนวณได้จาก

$$T = RC$$

โดยรอบการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์คำนวณได้จากความถี่ของคริสตอลและตัว เก็บประจุที่อยู่ในวงจร สามารถคำนวณวงรอบการทำงาน ตามสมการดังนี้

$$\text{รอบการทำงาน} = \frac{12}{\text{cycstal}}$$

- **อุปกรณ์แสดงผล** ใช้จอแสดงผลแบบผลึกเหลวหรือ LCD (Liquid คลิสตัล Display module) แสดงตัวเลขหรือตัวอักษรต่างๆตามสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ รายละเอียดโครงสร้างและการควบคุมการทำงานของ LCD อยู่ในภาคผนวก 2

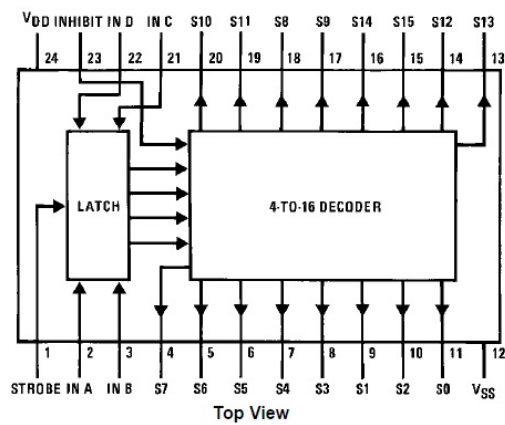
- **ไดรแอกและออปโตไดรแอก** เป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างเป็นสารกึ่งตัวนำต่อเรียงกัน 4 ชั้น โดยไดรแอกเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาต่อกับวงจรไฟฟ้าเพื่อควบคุมการไหลของ กระแสไฟฟ้าคล้ายกับการทำงานของ รีเลย์ โดยภาวะเริ่มการนำกระแส จะเกิดก็ต่อเมื่อมี กระแสไฟฟ้าที่ไหลทิศทางเดียวกันมากระตุ้นที่ขาเกทของไดรแอก ส่วนใหญ่จะต่อไดรแอกเข้าที่ขา เกทเพื่อช่วยทางด้านการกระตุ้นให้ทำงาน ออปโตไดรแอกเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่นเดียวกับ ไดรแอกเพียงแต่การกระตุ้นจะใช้วิธีการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้หลอด LED ที่อยู่ภายในสว่าง และเมื่อ ขาเกทได้รับแสงจะทำให้ออปโตไดรแอกนำกระแส ทำให้สามารถแยกระบบไฟฟ้าควบคุมที่เป็น แรงดันต่ำออกจากแรงดันไฟฟ้าที่ถูกควบคุมที่เป็นแรงดันสูง

- ส่วนการติดต่อกับผู้ใช้ ประกอบด้วยสวิตช์ และเมื่อมีการกดสวิตช์สัญญาณไฟฟ้าจะถูกส่งให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์

2.2.5.2 การออกแบบส่วน buffer

เป็นส่วนรับสัญญาณไฟฟ้าจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อไปควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับชุดวงจรจับสัญญาณไฟฟ้าประกอบด้วยไอซี CD4514 และ ULN2803 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ไอซีถอดรหัส CD4514 เป็นไอซี CMOS ทำหน้าที่ในการถอดรหัส โดยใช้อินพุตขนาด 4 บิตถอดรหัสเป็น 16 ช่อง ให้สถานะเอาต์พุตที่ทำงานเป็นระดับลอจิก “1” เอาต์พุตอื่นมีสถานะเป็นระดับลอจิก “0”

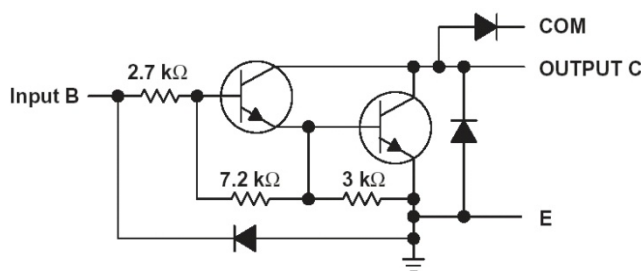


รูปที่ 2.2 ขบวนการทำงานของไอซี CD4514.

ตารางที่ 2.4 แสดงการทำงานของ CD4514

Inhibit	Data Input				Output
	D	C	B	A	
0	0	0	0	0	S0 = "1"
0	0	0	0	1	S1 = "1"
0	0	0	1	0	S2 = "1"
0	0	0	1	1	S3 = "1"
0	0	1	0	0	S4 = "1"
0	0	1	0	1	S5 = "1"
0	0	1	1	0	S6 = "1"
0	0	1	1	1	S7 = "1"
0	1	0	0	0	S8 = "1"
0	1	0	0	1	S9 = "1"
0	1	0	1	0	S10 = "1"
0	1	0	1	1	S11 = "1"
0	1	1	0	0	S12 = "1"
0	1	1	0	1	S13 = "1"
0	1	1	1	0	S14 = "1"
0	1	1	1	1	S15 = "1"
1	x	x	x	x	All Output = "0"

- **ULN2803** เป็นไอซีสำหรับการขับ (Driver) สัญญาณไฟฟ้า ภายในจะประกอบด้วยชุดของทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อกันดังรูปที่ 2.3 จำนวน 8 ชุด และระหว่างขาของคอลเลกเตอร์และอีมีตเตอร์ของทรานซิสเตอร์แต่ละชุดจะต่อกับไดโอดต่อคร่อมอยู่ภายใน ทำหน้าที่เป็นวงจรดิจิทัลแบบ NOT GATE โดยขาต้านเอาต์พุตของวงจรจะต่อแบบ Open collector ทำให้เอาต์พุตนำกระแสและทนแรงดันได้มาก โดยที่ภาคอินพุตสามารถควบคุมโดยใช้แรงดันต่ำ โดยปกติจะถูกใช้งานด้านวงจรดิจิทัลที่ต้องการขับเอาต์พุตแรงดันสูง



รูปที่ 2.3 วงจรภายในของไอซี ULN2803.

การปรับเปลี่ยนค่าความเข้มของคลื่น จะเกิดจากการนำสัญญาณ 4 บิต ที่ได้มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์มาถอดรหัสด้วยไอซีถอดรหัสเบอร์ CD4514 เป็นสัญญาณ 16 บิตในแต่ละบิตจะถูก ส่งไปยังไอซี ULN2803 จำนวน 2 ตัว จากข้างต้นที่ ไอซี ULN2803 ประกอบด้วยวงจร NOT GATE จำนวน 8 ชุด, ไอซีตัวแรกจะใช้ส่งสัญญาณให้กับวงจรขับสัญญาณของหัววัดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และไอซีตัวที่สองจะจะใช้ส่งให้กับวงจรขับสัญญาณของหัววัดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีตัวต้านทานปรับค่าได้ต่ออยู่ระหว่างขาไอซี ULN 2803 กับชุดขับสัญญาณเพื่อใช้ปรับกระแสไบแอสให้กับชุดขับสัญญาณไฟฟ้าให้มีคลื่นที่ออกจากหัววัดมีความเข้มค่าต่างๆ.

2.2.5.3 ภาคจ่ายไฟ

ประกอบด้วยวงจรเรียงกระแส วงจรกรองกระแส และวงจรรักษาระดับแรงดัน วงจรเรียงกระแสใช้ไดโอดเรียงกระแสสลับเป็นกระแสตรงเป็นแบบบริดจ์จำนวนแรงดันได้ดังนี้

$$V = 1.414V_{ac}$$

วงจรกรองกระแสใช้สำหรับกรองกระแสไฟ โดยตามปกติกระแสไฟสลับที่ผ่านวงจรเรียงกระแสเป็นกระแสไฟตรงแต่สัญญาณที่ได้ยังเป็นรูปคลื่นอยู่ไม่เรียบ ต้องใช้วงจรกรองกระแสไฟช่วยลดการกระเพื่อมของสัญญาณไฟ ซึ่งมักใช้ตัวเก็บประจุ ยิ่งค่าเก็บประจุมากเท่าไรยิ่งทำให้กระแสไฟเรียบเท่านั้น.

วงจรรักษาระดับแรงดันใช้ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ 7805 เป็นเร็กกูเรเตอร์แรงดันไฟบวก 5 V ขนาดกระแส 1 A.

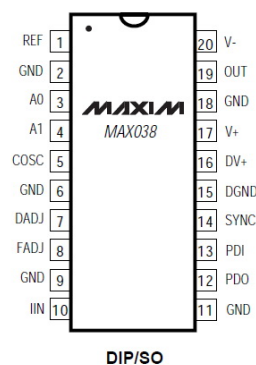
2.2.5.4 การออกแบบวงจรส่วนขับสัญญาณไฟฟ้า

การทดลองกำเนิดความถี่โดยใช้ไอซี MAX038 ไอซีกำเนิดความถี่สำเร็จรูปขนาด 20 ขา สามารถสร้างความถี่ได้ 3 รูปแบบดังตาราง 2.5 กำเนิดความถี่ได้ตั้งแต่ 0.1Hz-20เมกะเฮิรตซ์ โดยใช้ไฟแบบบวกลบขนาด 5 โวลต์

ตารางที่ 2.5 การเลือกรูปแบบสัญญาณ

A0	A1	Waveform
x	1	Sine Wave
0	0	Square Wave
1	0	Triangle Wave

X=Don't care

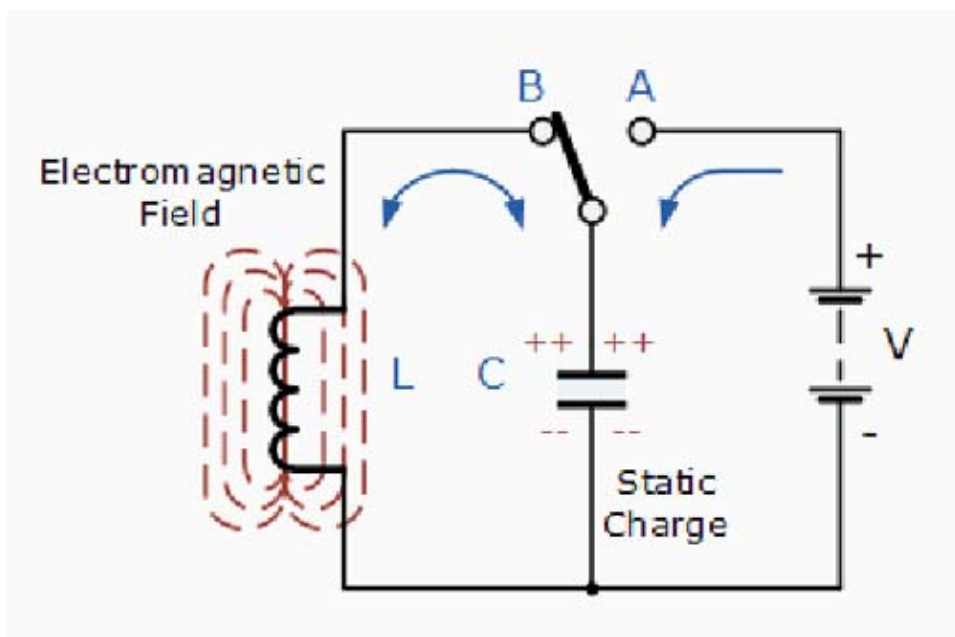


รูปที่ 2.4 โครงสร้างของไอซีกำเนิดสัญญาณความถี่.

ออกแบบวงจรกำเนิดความถี่ สามารถสร้างความถี่ได้ 3 รูปแบบ โดยการกำหนดค่าลอจิกที่ขา A1 และ A0 สำหรับสร้างความถี่แบบ สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และไซน์เวฟ ค่าความถี่กำหนดจากค่าความต้านทานต่อที่ขา REF กับ IN และค่าตัวเก็บประจุที่ขา COSC กับกราวด์โดยสมการ.

$$F_o = \frac{2 \times 2.5V}{R_{IN} \times C_F}$$

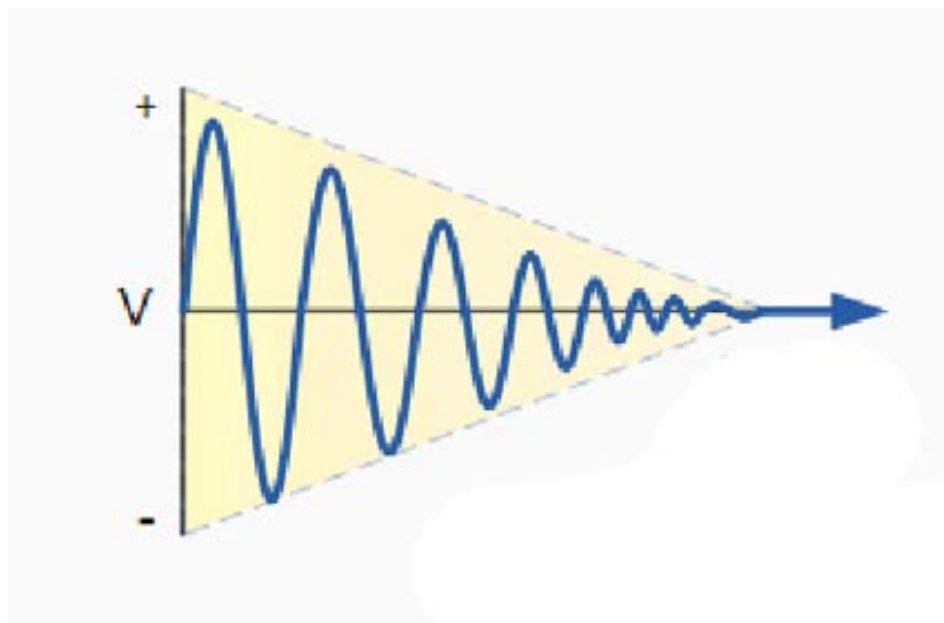
การทดลองกำเนิดความถี่ด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ LC โดยวงจรจะประกอบด้วย ลวดนำไฟฟ้า (L) และตัวเก็บประจุ (C) มาต่อกัน จากทฤษฎีวงจรออสซิลเลเตอร์ชนิด LC ออสซิลเลเตอร์จะสามารถผลิตความถี่ในย่านความถี่สูงได้ดี มีความแน่นอนของความถี่ในระยะสั้นและระยะกลางได้ดีกว่าวงจรชนิด RC ออสซิลเลเตอร์ ดังนั้น ในการออกแบบวงจรภาคขับสัญญาณไฟฟ้าจึงเลือกใช้วงจรกำเนิดความถี่ชนิด LC ออสซิลเลเตอร์.



รูปที่ 2.5 หลักการทำงานพื้นฐานของวงจร LC ออสซิลเลเตอร์.

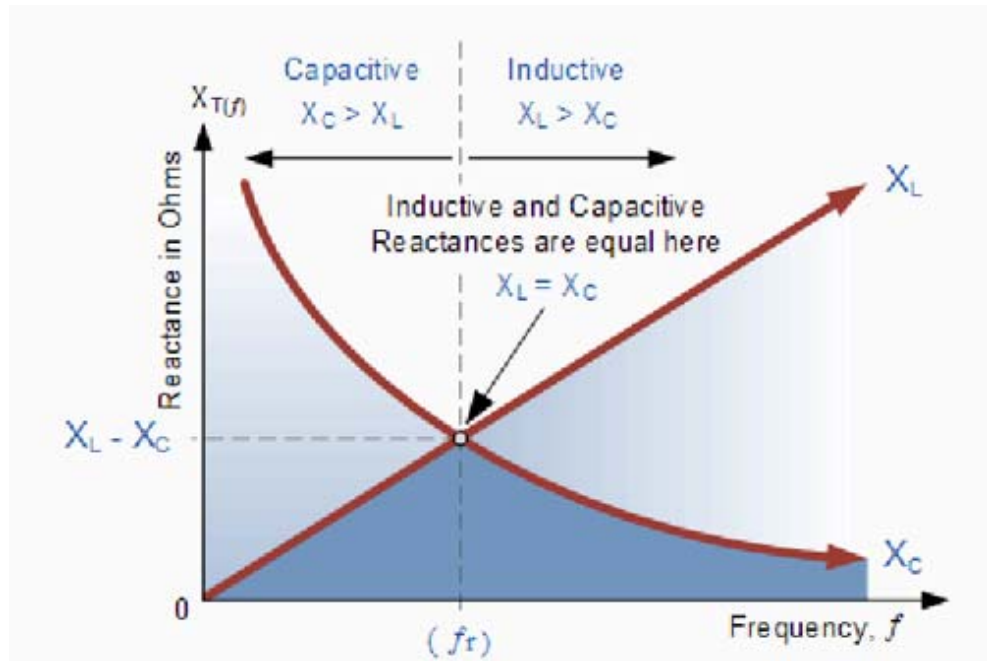
จากรูปที่ 2.5 วงจรประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) โดยตัวเก็บประจุจะเก็บพลังงานในรูปแบบ Electrostatic field ในขณะที่ขดลวดเหนี่ยวนำจะเก็บพลังงานในรูปแบบของสนามแม่เหล็ก ในสถานะเริ่มต้น ตำแหน่งสวิตช์จะถูกโยกมาต่อที่ตำแหน่ง A ตัวเก็บประจุจะเก็บพลังงานจากแหล่งจ่ายไฟ Vdc จนเต็ม และทำการเปลี่ยนสวิตช์ไปอยู่ที่ตำแหน่ง B ตัวเก็บประจุ

จะคลายประจุให้ขดลวดเหนี่ยวนำ ทำให้ที่ขดลวดนำไฟฟ้าเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นจนอิมตัวในขณะที่ตัวเก็บประจุคายประจุจนหมด เปรียบเหมือนพลังงานถูกย้ายจากตัวเก็บประจุไปที่ลวดนำไฟฟ้า จากนั้นสนามแม่เหล็กที่เกิดการอิมตัวที่ลวดนำไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไหลกลับทิศไปยังตัวเก็บประจุทำให้ตัวเก็บประจุเกิดการเก็บประจุในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้สนามแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำลดลงจนหมด ขบวนการถ่ายเทพลังงานระหว่างตัวเก็บประจุกับลวดนำไฟฟ้าจะเกิดซ้ำไปมา เมื่อวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เวลาต่างๆ หลังการเปลี่ยนสวิตช์ไปที่ตำแหน่ง B จะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 ทั้งนี้แรงดันไฟฟ้าที่เกิดการออสซิลเลตจะค่อยๆ ลดลงจนเป็นศูนย์, เนื่องจากการถ่ายเทพลังงานในแต่ละครั้งจะเกิดการสูญเสียในระบบ. ฉะนั้นหากต้องการให้เกิดการออสซิลเลตอย่างต่อเนื่อง จะต้องมี การเติมพลังงานจากภายนอกเพื่อชดเชยพลังงานสูญเสียดังกล่าว โดยทางปฏิบัติจะออกแบบให้สวิตช์เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น การใช้ตัวทรานซิสเตอร์เป็นสวิตช์ ดังรูปที่ 2.8 เป็นต้น.



รูปที่ 2.6 แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุ ที่เวลาต่างๆ ของวงจร LC.

ความถี่ของการออสซิลเลตขึ้นอยู่กัค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด และ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ โดยจุดที่ค่า X_L มีค่าเท่ากับค่า X_C เราเรียกจุดนี้ว่า ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f) แสดงดังรูป 2.7



รูปที่ 2.7 ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่ต่างๆ ของตัวเก็บประจุและลวดนำไฟฟ้า ของวงจร LC.

ดังนั้น จากสมการ $X_L = 2\pi fL$ และ $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

ที่ความถี่เรโซแนนซ์จะได้

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

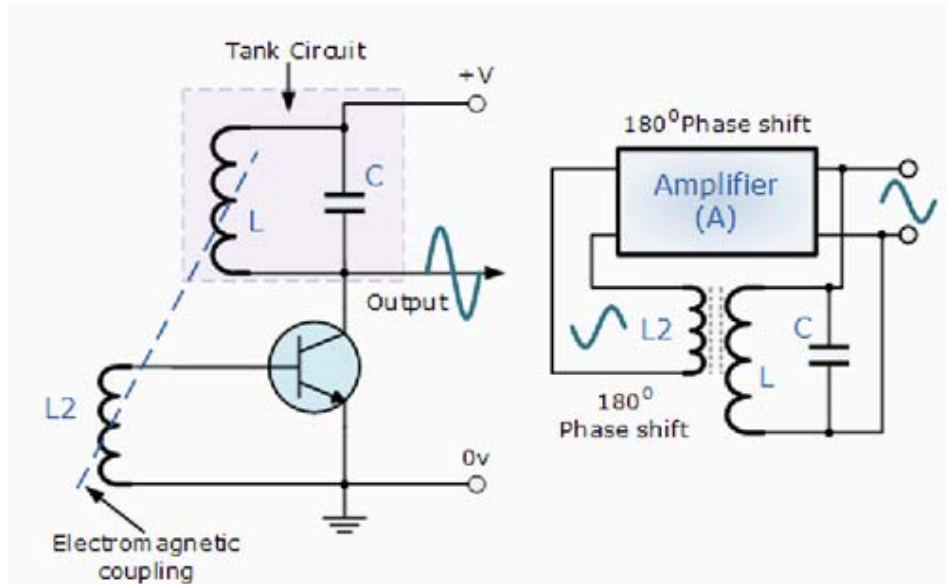
และ

$$2\pi f^2 L = \frac{1}{2\pi C}$$

$$f^2 = \frac{1}{(2\pi)^2 LC}$$

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

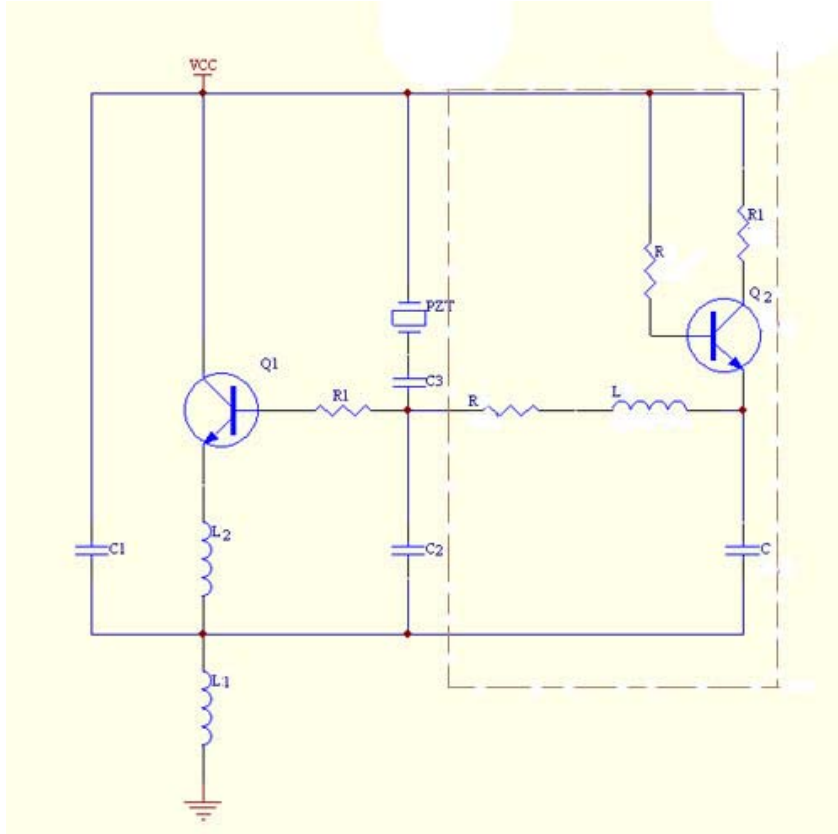
จากทฤษฎีดังกล่าวเมื่อนำมาใช้งานร่วมกับทรานซิสเตอร์แสดงดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 วงจรชุด LC ออสซิลเลเตอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์เป็นสวิทช์อิเล็กทรอนิกส์.

ในขั้นตอนการทดลองสร้างวงจรส่วนชุดขับได้ออกแบบใช้ในการทดลองออกเป็น 2 ส่วน
คือ

1. วงจรชุดขับสัญญาณไฟฟ้า
2. วงจรชุดควบคุมกระแส



รูปที่ 2.9 วงจรชุดขับสัญญาณไฟฟ้า.

จากรูปการปรับความถี่ (f_r) ของวงจรชุดขับสัญญาณไฟฟ้าคำนวณได้จาก

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_T}}$$

โดย $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_p}$

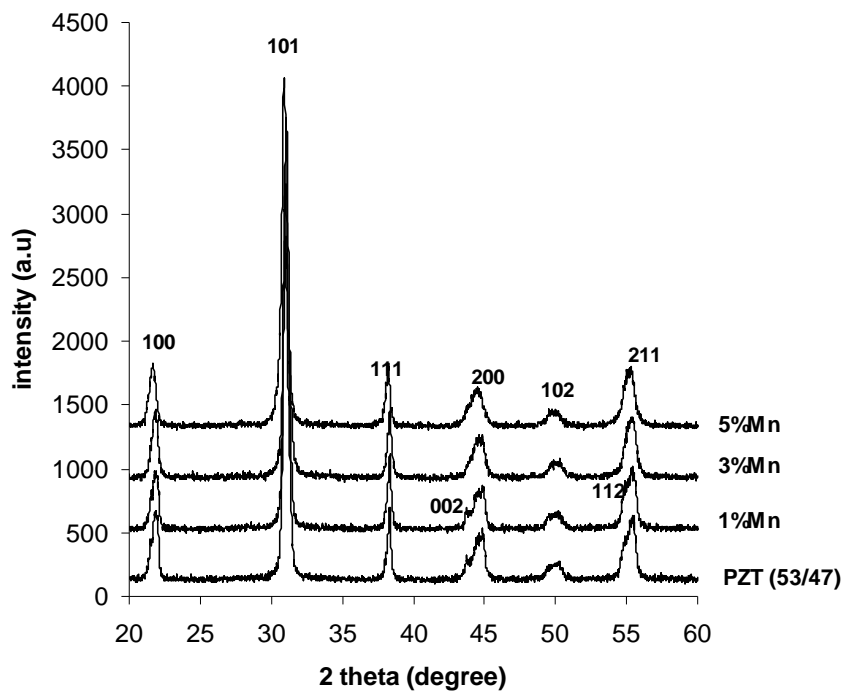
เมื่อ ค่า C_p = ค่าตัวเก็บประจุภายในสาร PZT ทรานสดิวเซอร์

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ผลการศึกษาตัวเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2)

3.1.1. ผลการศึกษาตัวเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 1-5 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน PZT (Zr/Ti = 53/47)

หลังจากการนำโลหะออกไซด์มาผสมตามอัตราส่วนโดยโมลแล้วนั้น และทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จึงนำผงส่วนผสมหลังเผามาตรวจสอบเฟส และลักษณะโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น โดย XRD ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.1.



รูปที่ 3.1. กราฟ XRD ของสาร PZT, PZT-1%Mn, PZT-3%Mn และ PZT-5%Mn หลังแคลไซน์.

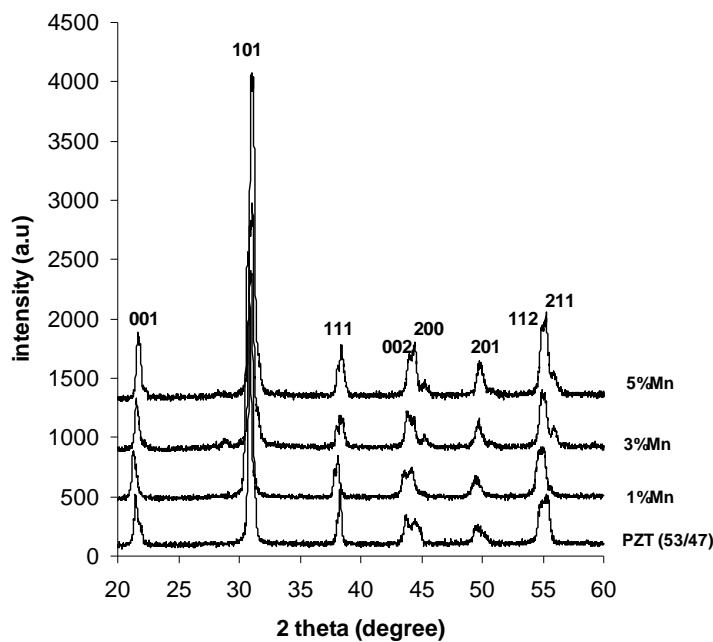
พบว่า ผงหลังแคลไซน์แสดงเฟสเดียวของสาร PZT โดยไม่พบเฟส pyrochlore ตาม JCPDS No. 33-0784. อย่างไรก็ตาม เมื่อปริมาณ MnO_2 เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลต่อโครงสร้างผลึกของสารที่เปลี่ยนแปลงไป, นั่นคือ สูตร PZT และ PZT-1%Mn มีโครงสร้างเป็นเทอร์โกนอล, เนื่องจากมีการแยกกันของฟลัก (002) และ (200) ที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ $43-44^\circ$. แต่เมื่อปริมาณ MnO_2 เพิ่มมากขึ้น ในสูตร PZT-3% Mn และ PZT-5% Mn นั้น, ฟลักที่ตำแหน่งดังกล่าวไม่มีการแยกตัวกัน

(broad), ซึ่งเป็นลักษณะของโครงสร้างรอมโบอีตรอล. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเทตระโกนอลไปเป็นรอมโบอีตรอลนั้น สามารถอธิบายได้ว่า เกิดจากการแทนที่ (substitution) ของอะตอม Mn ไปยัง B-site ions ได้แก่ Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ในโครงสร้างเปอร์รอฟสไกต์, ซึ่งพบเช่นนี้ได้ในการศึกษาผลของ Mn-doped PZT ของ He (2000).

ตารางที่ 3.1. สมบัติทางกายภาพของสารหลังการเผาแคลไซน์ ($850^{\circ}\text{C}/4$ ชั่วโมง) และหลังการเผาซินเตอร์ริง $1200^{\circ}\text{C}/2$ ชั่วโมง.

สูตร	น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสียหลังซินเตอร์ริง (%)	c/a ratio หลังซินเตอร์ริง	การหดตัว (%)	ความหนาแน่นเทียบกับทฤษฎี (%)
PZT (53/47)	1.09	2.33	1.0209	10.01	95
PZT-1%Mn	1.16	1.06	1.0213	10.69	96
PZT-3%Mn	1.20	-	1.0204	-	93
PZT-5%Mn	1.09	1.75	1.0148	11.65	91

จากตารางที่ 3.1 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักรวมหลังแคลไซน์และหลังซินเตอร์ริง อยู่ในช่วง 2-3% ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้. เนื่องจาก ในสูตรการทดลองทุกสูตรได้มีการเพิ่มปริมาณเลคออกไซด์ 1.3 % จากปริมาณเลคออกไซด์จริงที่คำนวณได้ เพื่อยังคงให้ส่วนผสมอยู่ในอัตราส่วน stoichiometric. โดยสามารถตรวจสอบจากเฟสที่เกิดขึ้น จากรูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงเฟสโดย XRD ของ PZT, PZT-1%Mn, PZT-3%Mn และ PZT- 5% Mn หลังการแคลไซน์และหลังเผาซินเตอร์ริงตามลำดับ. จากพีค XRD พบว่า ทุกสูตรส่วนผสมยังคงแสดงโครงสร้างเปอร์รอฟสไกต์ โดยปราศจากเฟสอื่นปนอยู่. ผลของการหดตัวหลังเผาซินเตอร์ริง มีค่าอยู่ในช่วง 10-12 % แสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเตอร์ริงสูงเพียงพอที่ทำให้เกิดการเชื่อมกันของอนุภาค. ส่วนผลของความหนาแน่นเมื่อเทียบกับความหนาแน่นทางทฤษฎี มีค่าประมาณ 91-96%. โดยพบว่า เมื่อปริมาณ Mn เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นจะลดลง, เนื่องจากการเติมปริมาณ Mn ที่มากขึ้นจะมีผลต่อการจัดวางกระบวนการซินเตอร์ริง, ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเผาต่ำลง. ดังนั้น ความหนาแน่นจะลดน้อยลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Mi *et al.* (2007).



รูปที่ 3.2. กราฟ XRD ชิ้นงานหลังซินเตอร์ริงของสาร PZT, PZT-1%Mn, PZT-3%Mn และ PZT - 5%Mn.

รูปที่ 3.2 แสดงผล XRD ของชิ้นงาน PZT หลังเผาซินเตอร์ริง. ผลที่ได้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลของผงหลังแคลไซน์ คือ เมื่อปริมาณ MnO_2 เพิ่มขึ้น, โครงสร้างของสารจะเปลี่ยนจากเทตระโกนอลเป็นรอมโบฮีดรอล. โดยสูตรส่วนผสมที่เติม MnO_2 0 และ 1% มีการแยกกันของพีคที่ (200) และ (002) ที่ชัดเจนกว่า MnO_2 3 และ 5% และสามารถยืนยันได้จากการคำนวณอัตราส่วนของ c/a (ตารางที่ 3.1). ผลดังกล่าวสอดคล้องกับ XRD คือ เมื่อปริมาณ MnO_2 เพิ่มขึ้นอัตราส่วน c/a ลดลง นั่นคือ โครงสร้างมีความเป็นเทตระโกนอลล้น้อยลง

ตารางที่ 3.2. สมบัติทางไฟฟ้าของสาร PZT และ PZT doped Mn.

ชื่อสูตร	d_{33} (pC/N)
PZT (53/47)	251
PZT-1%Mn	152
PZT-3%Mn	65
PZT-5%Mn	*

*ไม่สามารถ pole ขึ้นงานได้

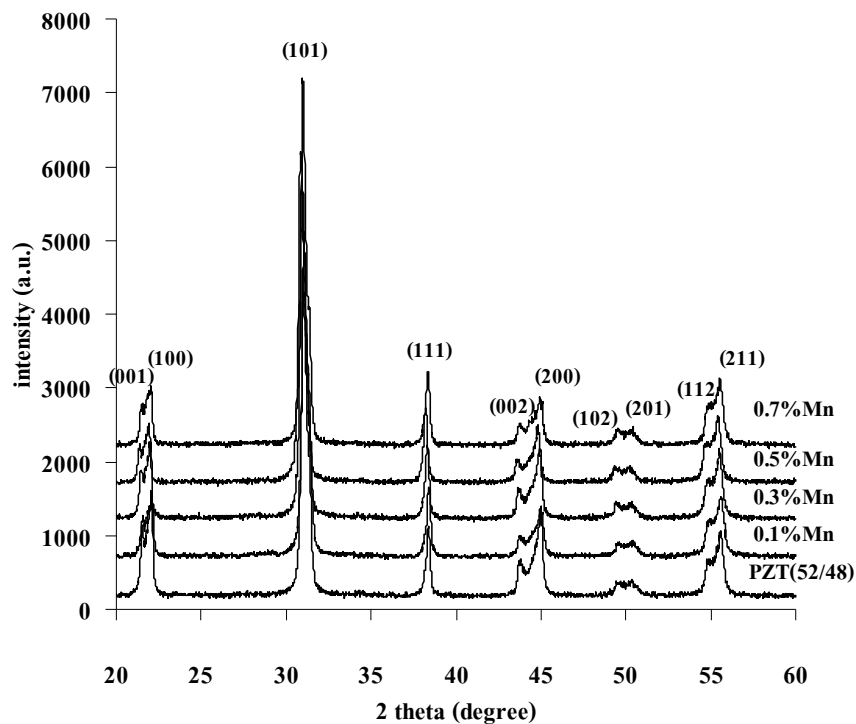
ตารางที่ 3.2 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของสาร PZT และ Mn doped-PZT ที่ 1, 3 และ 5% พบว่า หลังการทำขั้ว (poling) สูตร PZT พื้นฐาน ที่ไม่มีการเติม MnO_2 ให้ค่า d_{33} มากที่สุด, คือ 251 pC/N. ในขณะที่เมื่อเติม MnO_2 ลงไป 1, 3 และ 5% นั้น, ค่า d_{33} ลดลงตามลำดับ. โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สูตร PZT-5%Mn ไม่สามารถอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าได้. เนื่องจากปริมาณการเติม MnO_2 ที่มากเกินไป, จะมีผลต่อการนำไฟฟ้าที่สูง” เช่นเดียวกับการศึกษาของ Guiffard *et al.* (2005) พบว่า co-doping ของ Mn ใน Nb, F-doped PZT มีผลต่อการนำไฟฟ้า, เนื่องจากการเกิด Oxygen vacancies ส่งผลให้ไม่สามารถทำขั้ว (pole) ได้.

ดังนั้น ในการทดลองต่อไป ได้ออกแบบโดยการเติมปริมาณตัวเติมให้น้อยลง, ซึ่งอยู่ในช่วงน้อยกว่า 1%. โดยสูตร PZT พื้นฐานที่ศึกษา จะมีอัตราส่วน Zr/Ti เท่ากับ 52/48, ซึ่งยังอยู่ใน co-existence ของเทระโกนอลเป็นเฟสรวม โบฮีตรอลหรือ morphotopic phase boundary (MBP).

3.1.2. ผลการเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 0.1-0.7 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน PZT (Zr/Ti = 52/48).

เช่นเดียวกับการทดลองที่แล้ว หลังจากบดผสมและเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°C. เป็นเวลา 4 ชั่วโมง, จึงนำผงส่วนผสมหลังเผามาตรวจสอบเฟสและลักษณะโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้น, โดย XRD ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.3.

รูปที่ 3.3 พบว่า ผงหลังแคลไซน์แสดงเฟสเดียวของสาร PZT โดยไม่พบเฟส pyrochlore เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.1.1. โดยสูตร PZT (52/48) ที่ไม่มีการเติม MnO_2 พบว่า โครงสร้างผลึกอยู่ในรูปทรงแทงโกนอล และเมื่อเติม MnO_2 ลงไป ในปริมาณ 0.1-0.7% โครงสร้างผลึกยังคงเป็นทรงแทงโกนอล เช่นเดิม. โดยมีการแยกกันของพีค (002) และ (200) ที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ $43-45^\circ$. ผลดังกล่าวเป็นไปในทางเดียวกันกับการทดลองที่แล้ว คือ PZT (53/47) และ PZT-1%Mn, มีโครงสร้างผลึกเป็นทรงแทงโกนอล. จากการทดลองดังกล่าวสรุปได้ว่า ปริมาณ MnO_2 น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1% อะตอม Mn^{2+} ที่เข้าไปแทนที่อะตอม Zr^{4+} หรือ Ti^{4+} ยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการบิดเบี้ยวไปเป็นรอมโบฮีดรอลในโครงสร้างเปอร์รอฟสไกต์ได้.

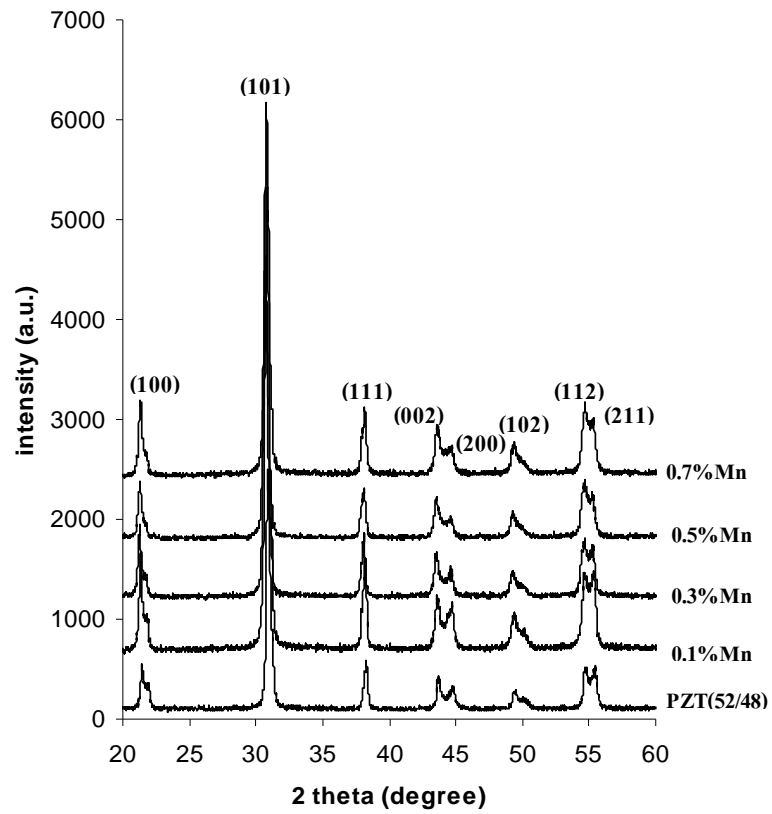


รูปที่ 3.3. กราฟ XRD ของสาร PZT, PZT-0.1%Mn, PZT-0.3%Mn, PZT-0.5%Mn และ PZT-0.7%Mn หลังแคลไซน์.

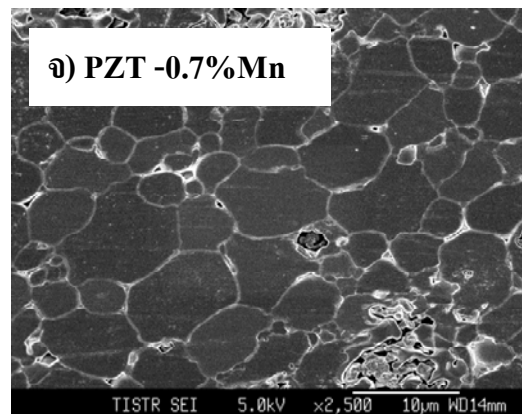
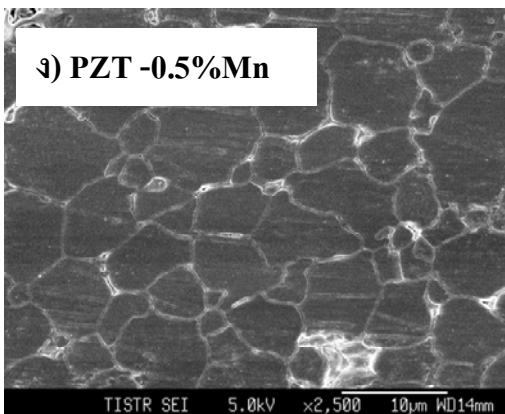
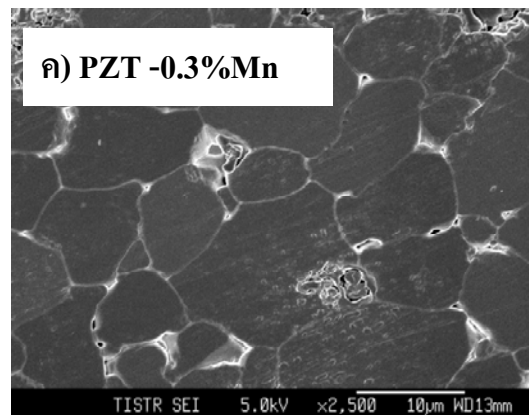
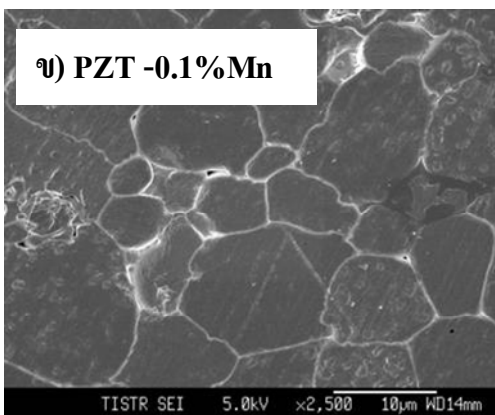
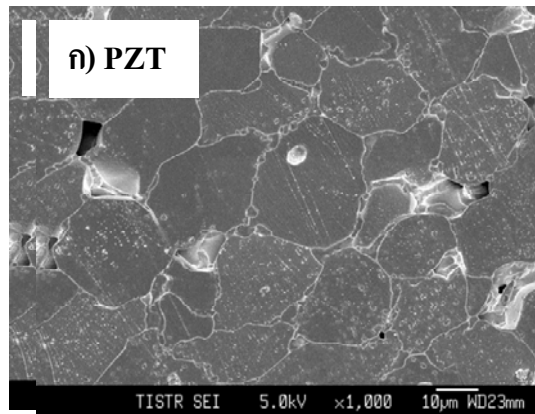
ตารางที่ 3.3. น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ (850°ซ./4 ชั่วโมง) การหดตัวและความหนาแน่นหลังการเผาซินเตอร์ริง (1200°ซ./2 ชั่วโมง).

สูตร	น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสียหลังซินเตอร์ริง (%)	c/a ratio หลังซินเตอร์ริง	การหดตัว (%)	ความหนาแน่นเทียบกับทฤษฎี (%)
PZT	1.33	2.48	1.0213	9.99	93
PZT -0.1%Mn	1.17	2.09	1.0222	9.93	95
PZT -0.3%Mn	1.05	2.26	1.0220	11.13	96
PZT -0.5%Mn	1.39	2.12	1.0221	11.23	97
PZT -0.7%Mn	1.11	2.11	1.0207	11.29	96

ตารางที่ 3.3 พบว่า การสูญเสียน้ำหนักของเลดออกไซด์ทั้งจากการเผาแคลไซน์และการเผาซินเตอร์ริง มีค่าประมาณ 3%. อย่างไรก็ตาม การสูญเสียเลดออกไซด์ในปริมาณดังกล่าว ยังส่งผลต่อการได้เฟสเดียวของเปอร์รอฟสไกต์, หลังจากการเผาซินเตอร์ริงขึ้นงาน, แสดงโดยรูปที่ 3.4. จากการคำนวณอัตราส่วน c/a พบว่า มีค่ามากกว่า 1 นั้น แสดงว่า โครงสร้างผลึกดังกล่าวมีลักษณะเป็นเทตระโกนอล. นอกจากนี้ มีค่าการหดตัวอยู่ในช่วง 10-11% และค่าความหนาแน่นเมื่อเทียบกับค่าทางทฤษฎีมีค่ามากกว่า 95% ในสูตรที่มีการเติม MnO₂, แสดงให้เห็นว่า MnO₂ มีส่วนช่วยให้เกิดการหดตัวของชิ้นงานดีขึ้น. ดังนั้น ความหนาแน่นจึงสูงขึ้นด้วย (Miller 2009).



รูปที่ 3.4 XRD ของสาร PZT, PZT-0.1% Mn, PZT-0.3% Mn, PZT-0.5% Mn และ PZT- 0.7% Mn หลังการเผาซินเตอร์ริง.



รูปที่ 3.5. ลักษณะจุลโครงสร้างของ ก) PZT, ข) PZT-0.1%Mn, ค) PZT-0.3%Mn, ง) PZT-0.5%Mn, จ) PZT-0.7%Mn.

ตารางที่ 3.4. ขนาดเกรนเฉลี่ยของชิ้นงาน PZT, PZT -0.1%Mn, PZT -0.3%Mn, PZT-0.5%Mn และ PZT-0.7%Mn.

สูตร	ขนาดเกรนเฉลี่ย (μm)
PZT	23.1
PZT -0.1%Mn	12.3
PZT -0.3%Mn	12.7
PZT -0.5%Mn	8.9
PZT -0.7%Mn	7.2

จากรูปที่ 3.5 ก-จ แสดงลักษณะเกรนของชิ้นงาน PZT และ Mn-doped PZT หลังเผาซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 1260 °ซ./2 ชั่วโมง. โดยชิ้นงานดังกล่าวจะถูกนำไปขัดด้วยกระดาษซิลิกอนคาร์ไบด์ เบอร์ 320 ถึง 2500 และนำไปเผาที่ 1160 °ซ เป็นเวลา 30 นาที, ซึ่งจะแสดงให้เห็นเกรนและขอบเกรน (grain boundary). โดยพบว่า เกรนมีรูปร่างไม่มีเหลี่ยมที่แน่นอน (irregular shape). ดังนั้น การเชื่อมต่อของเกรนในลักษณะนี้จะทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้น, แต่ขนาดรูพรุนยังมีขนาดค่อนข้างเล็กและมีในปริมาณน้อย, ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นไม่มากนัก. จากตารางที่ 3.3 พบว่า ค่าความหนาแน่นของชิ้นงานทุกสูตรมีค่ามากกว่า 95% ของความหนาแน่นทางทฤษฎี, ยกเว้นในสูตรของ PZT ที่มีค่าความหนาแน่น 93%.

นำภาพ FESEM มาคำนวณขนาดของเกรนโดยวิธี linear intercept method จากตารางที่ 3.4 พบว่าชิ้นงาน PZT มีขนาดเกรนใหญ่ที่สุดประมาณ 23 ไมครอน. เมื่อมีการเติม MnO_2 ในปริมาณเพิ่มขึ้น, ขนาดของเกรนจะเล็กลง. โดยชิ้นงาน PZT -0.7%Mn มีขนาดเกรนที่ 7 ไมครอน. โดย Jaffe *et al.* (1971) ได้รายงานไว้ว่า ตัวเติมชนิด acceptor นี้จะช่วยยับยั้งการโตของเกรนของสารเซรามิกหลังเผา. นอกจากนี้ ยังพบว่า ขนาดเกรนที่ลดลงส่งผลต่อการเพิ่มความหนาแน่นของชิ้นงาน. กล่าวคือ ชิ้นงาน PZT มีขนาดเกรนเฉลี่ย 23 ไมครอน, มีค่าความหนาแน่น 93%. ในขณะที่ชิ้นงาน PZT -0.7%Mn มีขนาดเกรนเฉลี่ย 7 ไมครอน, มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 96%.

ตารางที่ 3.5. สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZT, PZT -0.1%Mn, PZT -0.3%Mn, PZT -0.5%Mn และ PZT -0.7%Mn.

สูตร	d_{33} (pC/N)	Dielectric constant (K)	Dielectric loss (%)	k_p	k_t	Mechanical Quality factor (Q_m)
PZT	305	1044	0.8375	0.24	0.29	515
PZT -0.1%Mn	312	1129	0.7050	0.17	0.21	646
PZT -0.3%Mn	304	1095	0.6900	0.34	0.40	168
PZT -0.5%Mn	252	1000	0.7400	0.35	0.41	232
PZT -0.7%Mn	240	931	0.8675	0.33	0.38	195

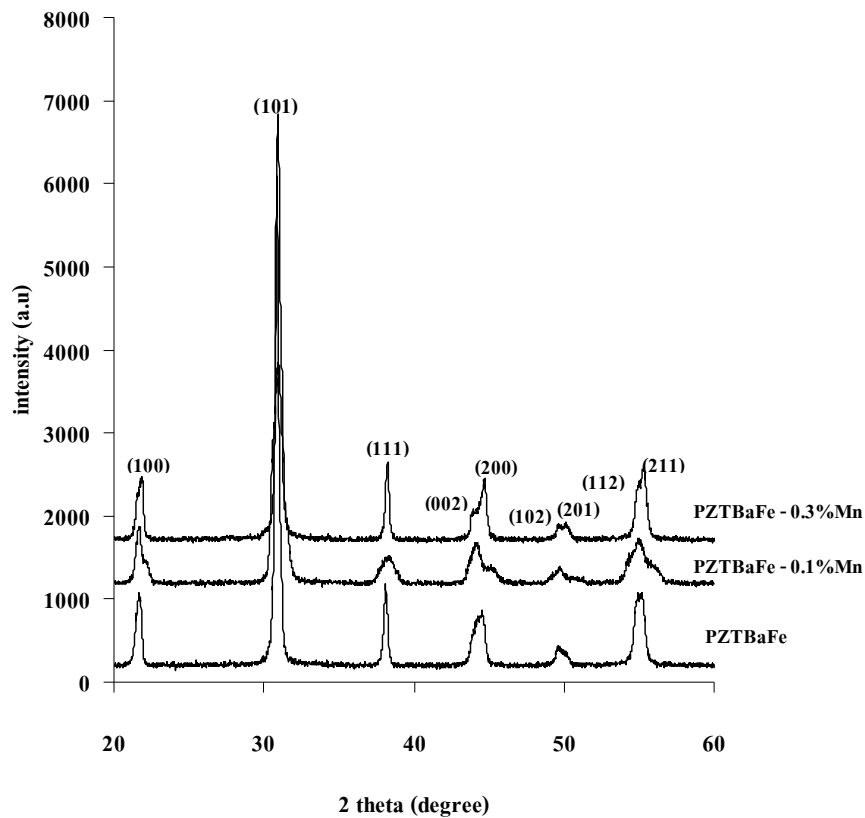
ตารางที่ 3.5 แสดงสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZT, PZT -0.1%Mn, PZT -0.3%Mn, PZT-0.5%Mn และ PZT -0.7%Mn โดยสมบัติดังกล่าว คือ d_{33} , K, dielectric loss, k_p และ k_t ทุกชิ้นงานมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก. ค่า d_{33} ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 240-320 pC/N, ค่า K อยู่ในช่วงต่ำประมาณ 1000 และมีค่า dielectric loss ที่ค่อนข้างต่ำมากประมาณ 0.8%. สมบัติที่วัดได้มีค่าเปรียบเทียบกับ Hard PZT (Levine 2001), ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการ เพื่อนำชิ้นงาน PZT ไปใช้กับงานทางด้าน Ultrasonic cleaning, sonar หรือ high power acoustic radiation (Zipparo et al. 1996). อย่างไรก็ตาม ค่า coupling coefficient k_p และ k_t ยังคงมีค่าต่ำอยู่ในช่วง 0.2-0.4, โดยปกติควรมีค่าประมาณ 0.5-0.6. ทั้งนี้ อาจเนื่องมาจากขั้นตอนการขัดชิ้นงานที่ยังคงแสดงค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และความถี่แอนติเรโซแนนซ์ไม่ชัดเจน, หรืออาจเกิดจากการให้สนามไฟฟ้าขณะทำขั้ว (poling) ที่ไม่เพียงพอ, ซึ่งส่งผลต่อค่า mechanical coupling coefficient ที่ต่ำลงได้. ส่วนผลของการเติม MnO_2 ต่อสมบัติ Q_m นั้นพบว่า ค่า Q_m สูงที่สุด เท่ากับ 646 ได้จากการเติม MnO_2 1% และมีค่ามากกว่าสูตรพื้นฐาน ซึ่งมีค่า Q_m เท่ากับ 515. เนื่องจาก Mn^{2+} ซึ่งมีอิเล็กตรอนวงนอก (Valence electron) น้อยกว่าอะตอม Ti^{4+} หรือ Zr^{4+} . ดังนั้น Mn^{2+} จึงเปรียบเสมือนตัวเติม acceptor ซึ่งจะส่งผลให้เกิด oxygen vacancies ขึ้น, ซึ่งส่งผลต่อการหดตัวลงหรือการบิดเบี้ยวของ unit cell, จึงส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของ dipole moment ยากขึ้น. ดังนั้น จึงทำให้ค่า Q_m เพิ่มสูงขึ้นและมีค่า dielectric constant ค่อนข้างต่ำ (Miller 2008) แต่เมื่อเพิ่ม MnO_2 มากขึ้น, พบว่า ค่า Q_m ลดลงอย่างเห็นได้ชัด.

3.1.3. การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 0.1 และ 0.3 โมลเปอร์เซ็นต์ใน Ba และ Fe doped-PZT (Zr/Ti = 52/48)

ตารางที่ 3.6. น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ ($850^\circ\text{C}/4$ ชั่วโมง) การหดตัวและความหนาแน่นหลังการเผาซินเตอร์ริง ($1200^\circ\text{C}/2$ ชั่วโมง).

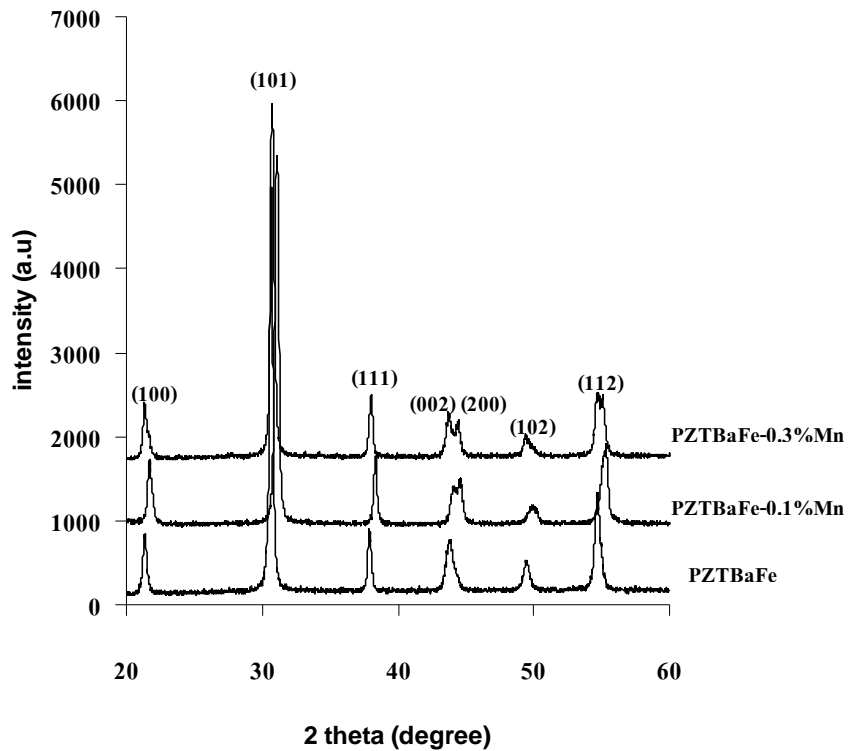
สูตร	น้ำหนักที่สูญเสียหลังแคลไซน์ (%)	น้ำหนักที่สูญเสียหลังซินเตอร์ริง (%)	c/a ratio หลังซินเตอร์ริง	การหดตัว (%)	ความหนาแน่นเทียบกับทฤษฎี (%)
PZTBaFe	2.95	1.29	1.0125	12.66	97
PZTBaFe - 0.1%Mn	3.21	1.41	1.0412	12.36	95
PZTBaFe - 0.3%Mn	3.5	1.39	1.0144	11.76	95

จากผลการทดลองในตารางที่ 3.6 พบว่า น้ำหนักหลังแคลไซน์ของ PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe-0.3%Mn ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วง 3-3.5% ซึ่งสูงกว่าการทดลองที่ผ่านมา, ที่มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 1-1.5% เท่านั้น. น้ำหนักที่สูญเสียดังกล่าวเกิดจากการระเหยของเลดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่สำคัญต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริก, ที่ทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของสารเพียโซอิเล็กทริกน้อยลง ถ้ามีการระเหยของเลดออกไซด์มากเกินไป และมีผลต่อเฟสของสารโดยสามารถตรวจสอบจาก XRD. จากผลของ XRD ในรูปที่ 3.6 พบว่า สารประกอบหลังเผาแคลไซน์เป็นโครงสร้างเปอร์รอฟสไกต์ของเฟสเลดเซอร์โคเนตไททานเนต.



รูปที่ 3.6. กราฟ XRD ของสาร PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe-0.3%Mn หลังแคลไซน์.

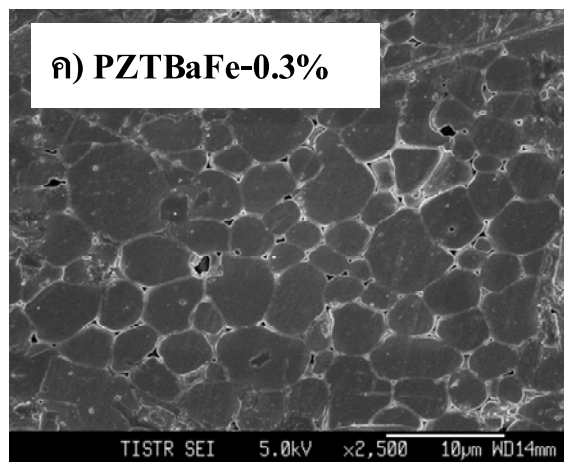
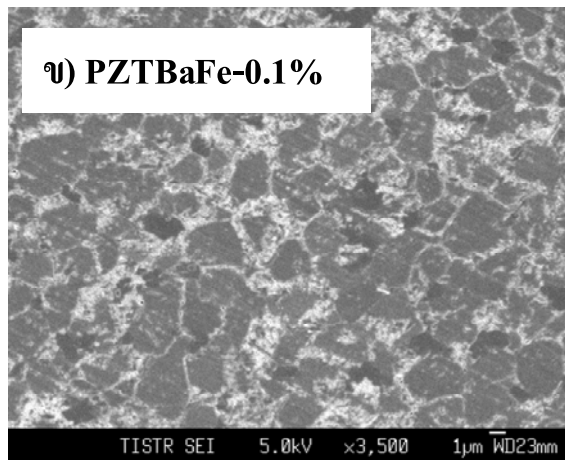
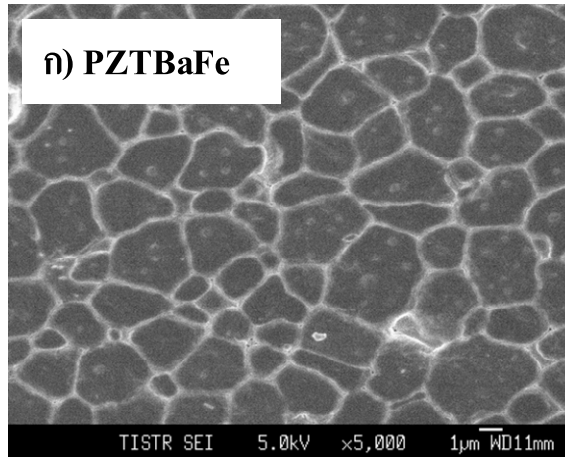
ส่วนการสูญเสียน้ำหนักของชิ้นงานหลังการซินเตอร์ริง ประมาณ 1.3-1.4 %. โดยรวมแล้วในการทดลองนี้ ค่าการสูญเสียเลดออกไซด์ทั้งที่เกิดจากการแคลไซน์และเผาซินเตอร์ริงอยู่ที่ประมาณ 4-5% ซึ่งมีความมากกว่าปริมาณเลดออกไซด์ที่เติมเข้าไปทดแทน ($\approx 1.3\%$). ด้วยเหตุนี้จึงอาจเกิดจากการขาดเลดออกไซด์ (Pb deficiency) ทำให้เกิดเฟส pyrochlore ได้. เช่นเดียวกับการศึกษาของ Miclea *et al.* (2007) พบว่า ปริมาณเลดออกไซด์มีผลต่อสมบัติเพียโซอิเล็กทริกใน hard PZT. โดยสมบัติเพียโซอิเล็กทริกจะลดลง เมื่อชิ้นงานอยู่ในส่วนผสม non-stoichiometric ที่ขาดเลดออกไซด์ 4%. อย่างไรก็ตาม ผลของเฟสหลังการซินเตอร์ริงพบว่า ทุกสูตรในการทดลองยังคงพบเป็นเฟสเดี่ยวเปอร์รอฟสไกต์ของ PZT ดังแสดงในรูปที่ 3.7.



รูปที่ 3.7. กราฟ XRD ของสาร PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe-0.3%Mn หลังเผาซินเตอร์ริง.

การสูญเสียปริมาณเลดออกไซด์ระหว่างการเผาจึงเป็นกระบวนการที่ต้องระมัดระวัง. นอกจากนั้นประสิทธิภาพของชิ้นงานหลังเผาที่ดียังสามารถบอกได้ว่า การหดตัวและค่าความหนาแน่น, ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 11-13% และ 95-97% (เทียบกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี). ค่าดังกล่าวเป็นค่าที่สูงมากพอที่ชิ้นงานจะไม่ breakdown เนื่องจากรูพรุนขณะทำขึ้น. ผลของปริมาณรูพรุนและขนาดเกรนสามารถยืนยันได้โดยภาพ FESEM แสดงในรูปที่ 3.8, พบว่า ลักษณะของการเชื่อมต่อกันของเกรนค่อนข้างต่อเนื่อง, ส่วนใหญ่ไม่พบรูพรุนระหว่างขอบเกรน, แต่จะพบบ้างในสูตร PZTBaFe -0.3%Mn (รูป 3.8 ค). โดยจะพบรูพรุนระหว่างรอยต่อของขอบเกรน. นั้นแสดงถึงประสิทธิภาพของอุณหภูมิการเผาซินเตอร์ริงยังไม่เหมาะสม. นอกจากนี้ ผลของปริมาณตัวเติม เช่น Mn และ Fe ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการโตของเกรน มีผลต่อการแพร่ของอะตอมน้อยลง. ดังนั้น จึงเกิดรูพรุนระหว่างขอบเกรนและรอยต่อของเกรนหลังการเผาซินเตอร์ริง. ปริมาณรูพรุนดังกล่าวจะมีผลต่อสมบัติทางเพียโซอิเล็กทริกหรือไม่นั้น จะต้องตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป. เป็นที่น่าสังเกต

อีกอย่างหนึ่ง คือ สูตรการทดลองที่แล้ว คือ PZT-0.1%Mn และ PZT-0.3%Mn มีขนาดเกรน ประมาณ 12 μm , ในขณะที่สูตร PZTBaFe -0.1%Mn และ PZTBaFe -0.3%Mn มีขนาดเกรน 4 และ 6 μm ตามลำดับ ซึ่งเล็กกว่าการเติมตัวเติม Mn เพียงธาตุเดียวถึง 2 เท่า. ผลการทดลองนี้เป็นการยืนยันได้ว่า การเติมตัวเติมชนิด acceptor ทั้ง Mn และ Fe จะช่วยยับยั้งการโตของเกรนได้.



รูปที่ 3.8. ลักษณะจุลโครงสร้างของ ก) PZTBaFe ข) PZTBaFe-0.1%Mn ค) PZTBaFe-0.3%Mn.

ตารางที่ 3.7. สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZTBaFe, PZTBaFe -0.1%Mn และ PZTBaFe -0.3%Mn.

สูตร	d_{33} (pC/N)	Dielectric constant (K)	Dielectric loss (%)	k_p	k_t	Mechanical Quality factor (Q_m)
PZTBaFe	270	996	0.2800	0.39	0.33	937
PZTBaFe - 0.1%Mn	274	1110	0.3800	0.12	0.16	967
PZTBaFe - 0.3%Mn	349	1445	0.4400	0.29	0.34	239

สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงาน PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe-0.3%Mn แสดงในตารางที่ 3.7. จะเห็นได้ว่า เมื่อเติมตัวเติม Mn ลงในสูตร PZT ที่มี Ba และ Fe เป็นตัวเติมอยู่แล้วนั้น, การเติมตัวเติม Mn มากขึ้น (0.1% และ 0.3%) มีผลทำให้ค่าเพียโซอิเล็กทริก d_{33} สูงขึ้นจาก 270 เป็น 350. ในขณะที่ค่า Mechanical Quality factor (Q_m) ลดลงจาก 937 เป็น 239. ผลดังกล่าวสอดคล้องกัน เนื่องจากการเพิ่มของค่าเพียโซอิเล็กทริก d_{33} และ Dielectric constant (K) เกิดจากการเคลื่อนที่ของโพลาริเซชัน (polarization) ได้ง่ายภายใต้สนามไฟฟ้า, ซึ่งสอดคล้องกับผลของ Mechanical Quality factor (Q_m) ที่ลดลงเมื่อเติมปริมาณ Mn เพิ่มขึ้น. แสดงให้เห็นถึงว่าการเติม Co-doping ของ Ba, Fe และ Mn จะทำให้ชิ้นงานมีส่วนของ soft-PZT มากขึ้น.

3.2 การเตรียมชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้ในเครื่องนวดอัลตราซาวด์ที่ความถี่

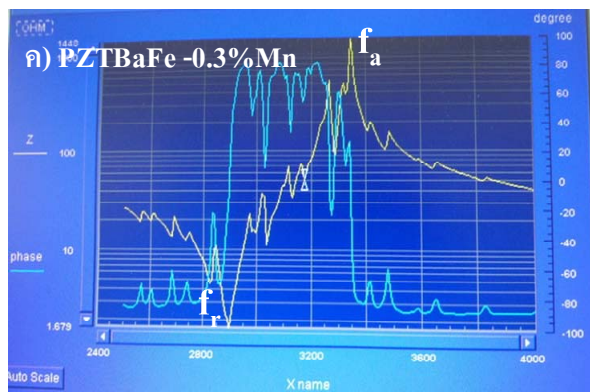
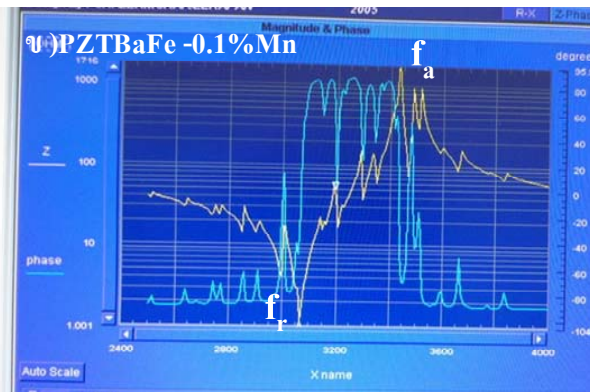
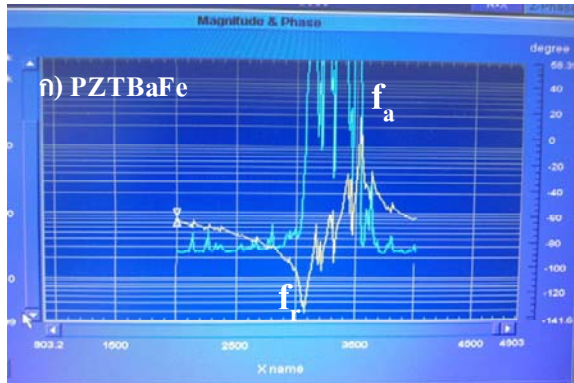
เมกะเฮิรตซ์

ดังนั้น ในการทดลองต่อไป จึงเตรียมชิ้นงาน PZT ให้มีความหนา 0.7 ± 0.02 มิลลิเมตร ในสูตร PZTBaFe, PZTBaFe-0.1%Mn และ PZTBaFe-0.3%Mn. จากการตรวจสอบค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และแอนติเรโซแนนซ์ (f_a) ของตัวอย่างทั้งสาม พบว่า มีค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) ใกล้เคียงที่ 3 เมกะเฮิรตซ์ (ตารางที่ 3.8) และสามารถยืนยันได้จากกราฟรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นกราฟแสดงของค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) /แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) กับค่าอิมพีแดนซ์ (เส้นสีฟ้า) และค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) /แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) กับเฟส (เส้นสีเหลือง). ตัวอย่างทั้งสามมีพีคของความถี่เรโซแนนซ์ที่ค่อนข้างแหลม (sharp) และไม่มีการซ้อนทับของการสั่นจาก fundamental signal เป็นผลมาจากการขัดตัวอย่างที่ขนานกันของหน้าทั้งสองและมีความหนาสม่ำเสมอ. ข้อดีของการเตรียม

ชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่ดี คือ ง่ายต่อการนำชิ้นงานไปต่อกับเบ้าอะลูมิเนียม และสามารถ tuning สัญญาณไฟฟ้าเพื่อขับเคลื่อนหัวทรานสดิวเซอร์ได้ตรงกับความถี่ที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ.

ตารางที่ 3.8. ค่าความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และแอนติเรโซแนนซ์ (f_a) ของสารเพียโซอิเล็กทริกที่ ความหนาประมาณ 0.7 มม.

สูตร	ความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) (เมกะเฮิรตซ์)	แอนติเรโซแนนซ์ (f_a) (เมกะเฮิรตซ์)
PZTBaFe	3.070	3.484
PZTBaFe -0.1%Mn	3.063	3.456
PZTBaFe -0.3%Mn	2.933	3.317



รูปที่ 3.9. กราฟความถี่เรโซแนนซ์ (f_r) และแอนติเรโซแนนซ์ (f_a) ของ thickness mode ของตัวอย่าง ก) PZTBaFe ข) PZTBaFe-0.1%Mn และ ค) PZTBaFe - 0.3%Mn

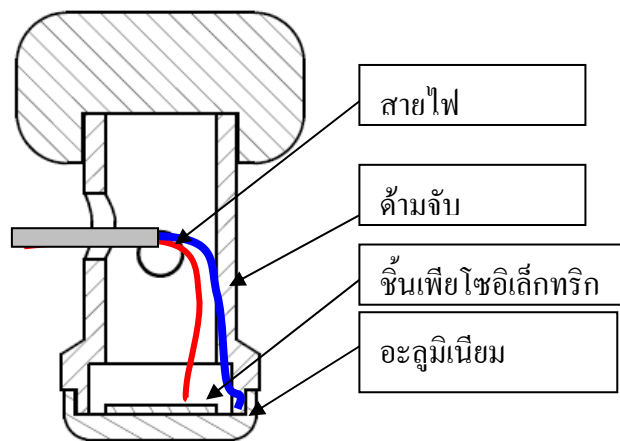
สมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แสดงในตารางที่ 3.9 และผลการทดสอบดังตารางที่ 3.12 ในหัวข้อ 3.4.3.2 การทดลองวงจรปรับกระแส.

ตารางที่ 3.9. ค่าทางไฟฟ้าของชั้นงานเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการทดสอบอัลตราซาวด์ที่มีความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.

สูตร	d_{33} (pC/N)	Dielectric constant (K)	Dielectric loss (%)	k_p	k_t	Mechanical Quality factor (Q_m)
PZTBaFe	240	848	0.39	0.58	0.53	78
PZTBaFe - 0.1%Mn	225	920	0.43	0.55	0.49	159
PZTBaFe - 0.3%Mn	290	1360	0.64	0.63	0.54	90

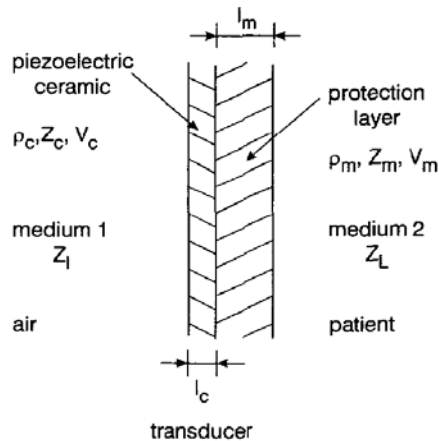
3.3 การออกแบบหัวขนาด

การพัฒนารูปแบบและส่วนประกอบชุดทรานสดิวเซอร์ ซึ่งนักกายภาพบำบัดมักจะเรียกกันว่า “หัวขนาด” หรือ “head sound” ดังรูปที่ 3.10, จะประกอบด้วยส่วนหัวขนาดที่ทำหน้าที่ส่งคลื่น. ส่วนค้ำจับและส่วนสายไฟที่นำสัญญาณไฟฟ้าไปสู่ส่วนหัวขนาด.

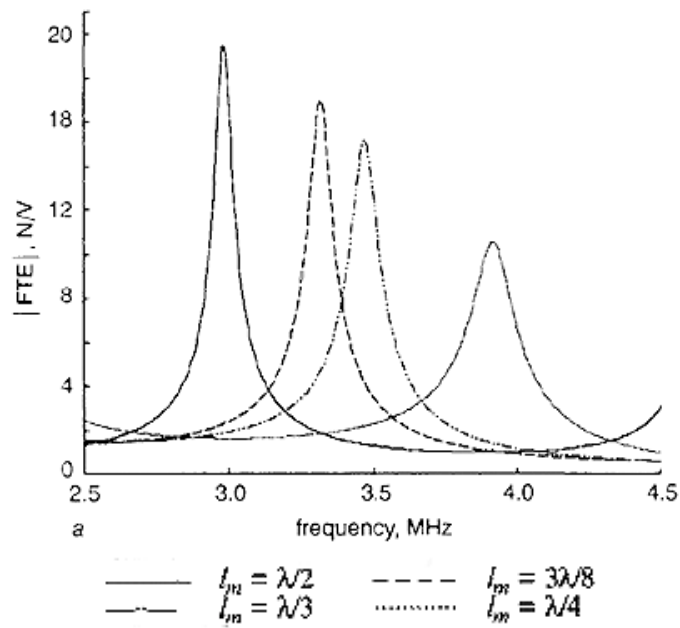


รูปที่ 3.10. ส่วนประกอบของหัวขนาดอัลตราซาวด์.

ส่วนหัวขวด จะประกอบด้วยชั้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกยึดติดด้วยกาวกับส่วนโลหะ ซึ่งอาจทำด้วย อะลูมิเนียมหรือไททาเนียม. โดยความหนาของส่วนโลหะจะมีผลต่อการส่งคลื่นอย่างเช่น การทดลองของ Turo (1999) ที่ทำการทดลองหาแรงดันคลื่นของหัวขวดที่มีส่วนโลหะหนาเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่น (λ) ขนาดต่างๆ กัน. จากรูปที่ 3.11 แสดงถึงลักษณะโครงสร้างของการประกอบชั้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกกับส่วนโลหะ. ส่วนรูปที่ 3.12 แสดงค่าแรงดันคลื่นต่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับชั้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก หรือเรียกว่า transfer function in emission (FTE) ที่ความถี่ 2.4 - 4.5 เมกะเฮิรตซ์, โดยเส้นกราฟแต่ละเส้นแทนหัวขวดที่มีความหนาของส่วนโลหะ (l_m) ขนาด $\lambda/2$, $3\lambda/8$, $\lambda/3$ และ $\lambda/4$ ตามลำดับ. พบว่า ค่าแรงดันคลื่นที่ส่งออกมาจากหัวขวดสูงสุด เมื่อความหนาส่วนโลหะเท่ากับ $n\lambda/2$ และเป็นคลื่นที่มีความถี่ที่ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ของสาร. ขณะที่ส่วนโลหะที่มีความหนา $3\lambda/8$, $\lambda/3$ และ $\lambda/4$ จะได้ค่า FTE สูงสุดที่มีความถี่ต่างจากความถี่เรโซแนนซ์ของสาร และมีค่าน้อยกว่า.



รูปที่ 3.11. โครงสร้างทรานสดิวเซอร์สำหรับเครื่องนวดอัลตราซาวด์กายภาพบำบัด (Turo 1999).



รูปที่ 3.12. ค่า Emission transfer function (FTE) สำหรับชั้นโลหะที่มีความหนาต่างๆ (Turo 1999).

ในการออกแบบหัววัดเลือกใช้วัสดุอะลูมิเนียมเกรด AL7505 เป็นส่วนหัววัด โดยคำนวณค่าความยาวคลื่น (λ) ได้จากสูตร $\lambda=v/f$ เมื่อ v คือความเร็วคลื่นในโหมดแนวยาว (longitudinal) ซึ่งอะลูมิเนียมเกรดนี้มีความเร็ว 5400 เมตรต่อวินาที และ f คือความถี่ของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านเนื้อสาร จะได้ขนาดความหนาของส่วนโลหะที่นำมาทำเป็นหัววัด ดังแสดงในตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.13-3.14 แสดงส่วนหัววัดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 3.10. ค่าความหนาอะลูมิเนียมสำหรับประกอบเป็นหัววัดความถี่ 1 และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.

ชุดทรานสดิวเซอร์	ความหนาที่ $\lambda/2$ (มม.)
หัววัดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์	5.4
หัววัดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์	1.8



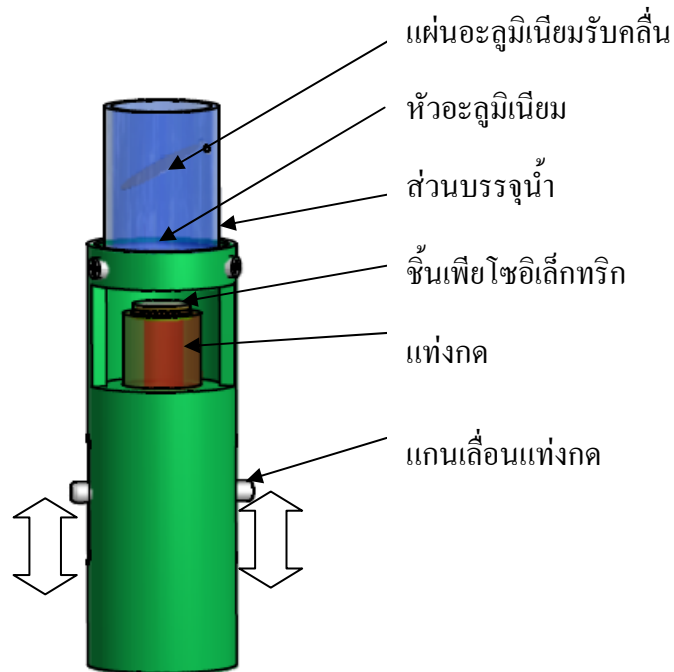
รูปที่ 3.13. หัววัดอะลูมิเนียมที่ติดชั้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิกความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์.



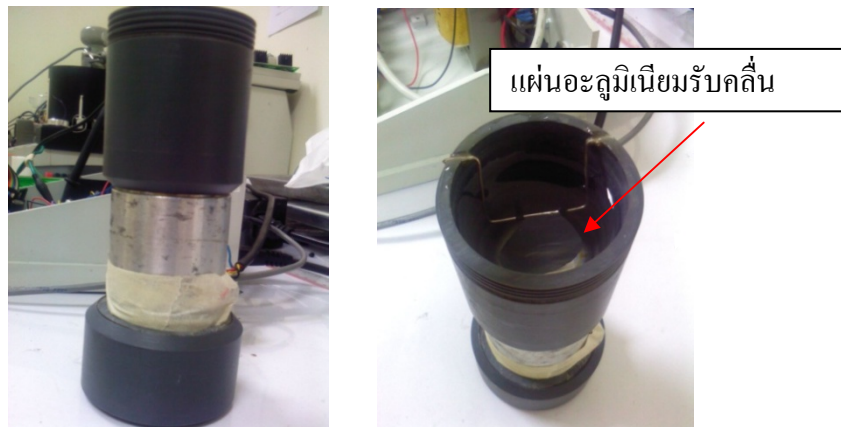
รูปที่ 3.14. การประกอบชั้นเพียโซอิเล็กทริก(PZT) กับหัววัดอะลูมิเนียมความถี่ 3 เมกะเฮิรตซ์.

การประกอบส่วนหัววัดเข้ากับสายไฟนำสัญญาณไฟฟ้า, ได้ศึกษาลักษณะการนำสัญญาณไฟฟ้าจากสายไฟไปยังชั้นเพียโซอิเล็กทริกด้วยวิธีแบบกดด้วยสปริงแทนการเชื่อมด้วยตะกั่วไฟฟ้า เพื่อลดการเสื่อมสภาพของชั้นเพียโซอิเล็กทริกเนื่องจากความร้อนที่ใช้เชื่อมขั้ว. โดยออกแบบชุดทดสอบประสิทธิภาพการส่งคลื่นแบบกด ประกอบด้วยแท่งกดสำหรับกดชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกให้แนบกับหัวอะลูมิเนียม. โดยการนำสัญญาณไฟฟ้าจากวงจรจับสัญญาณไฟฟ้า จะไหลผ่านจากแท่งกดไปยังชั้นเพียโซอิเล็กทริกและไหลวนกลับผ่านผิวชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริก ไปยังส่วนหัวอะลูมิเนียมและกลับไปยังวงจรไฟฟ้าทางสายไฟอีกเส้นหนึ่ง. เมื่อทำการปล่อยสัญญาณไฟฟ้าจะทำให้สารเพียโซอิเล็กทริกเกิดการสั่นและส่งคลื่นผ่านหัวอะลูมิเนียมที่วางเหนือชั้นเพียโซอิเล็กทริกไปยังน้ำที่บรรจุไว้ในกระบอก. เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านน้ำจะทำให้เกิดแรงดันดันแผ่นฟอยล์ให้เกิดการยกตัวสูงขึ้น, ทำให้เปรียบเทียบแรงดันคลื่นและประสิทธิภาพการส่งคลื่นได้. ผลการทดสอบพบว่า เมื่อความเรียบของผิวหน้าของชั้นเพียโซอิเล็กทริกไม่แนบกับแผ่นโลหะจะเกิดเสียงแหลม แต่คลื่นไม่สามารถยกแผ่นฟอยล์ได้. ความเรียบของผิวหน้าอะลูมิเนียมจะใช้การวัด

ด้วย dial gauge ที่มีความละเอียดในระดับ 0.1 ไมครอนเป็นการตรวจวัด พบว่า ความเรียบของผิวหน้าอะลูมิเนียมจะต้องอยู่ในระดับ ± 50 ไมครอน ถึงจะทำให้หัวนวดส่งคลื่นอัลตราซาวด์ออกมาได้.

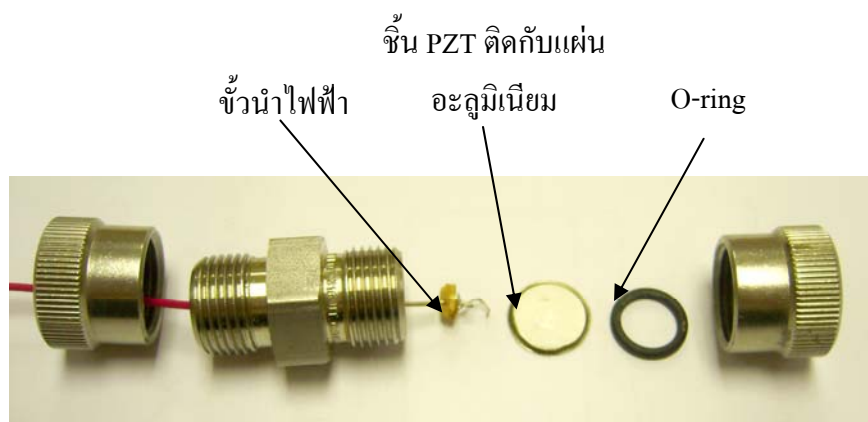


รูปที่ 3.15. ชุดทดสอบการส่งคลื่นของชั้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.



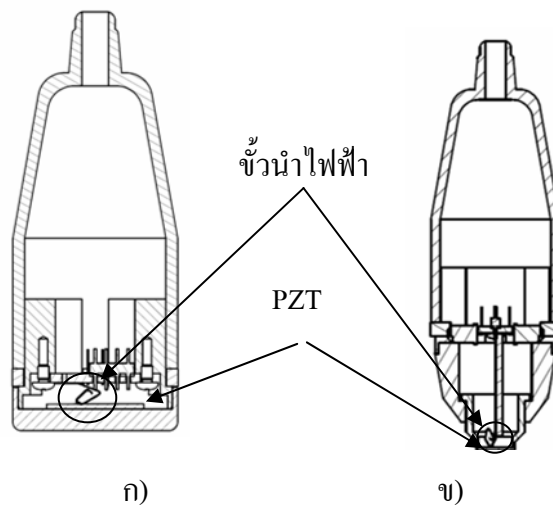
รูปที่ 3.16. ชุดทดสอบการส่งคลื่นของชั้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.

การทดลองประกอบชุดทรานสดิวเซอร์ และการทดสอบกำลังคลื่นชนิดแบบหัวกด สำหรับหัวขนาดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.



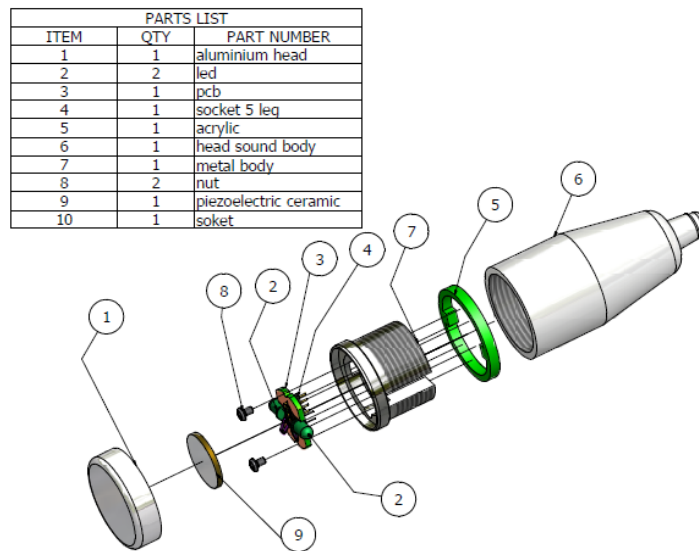
รูปที่ 3.17. การประกอบชิ้นเพียโซอิเล็กทริก(PZT) กับชุดทรานสดิวเซอร์.

จากการศึกษารูปแบบการกดขั้วของโลหะเพื่อนำไฟฟ้าชิ้นงานข้างต้นได้นำไปสู่การ ออกแบบหัวขนาดดังรูปที่ 3.18.



รูปที่ 3.18. โครงสร้างหัวนวด ก) หัวนวด 1 เมกะเฮิรตซ์ ข) หัวนวด 3 เมกะเฮิรตซ์.

ส่วนค้ำจับ, ได้ออกแบบค้ำจับให้มีรูปร่างที่นำไปใช้งานสะดวก ไม่เกิดการเมื่อยล้าเมื่อใช้ไปนาน โดยใช้วัสดุพลาสติกเกรด PVC และชุดหัวนวดที่ประกอบด้วยส่วนหัวนวด, สายไฟ. ส่วนค้ำจับ ได้ถูกออกแบบดังรูปที่ 3.19, แสดงส่วนประกอบของหัวนวดความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์ และ 3 เมกะเฮิรตซ์ ตามลำดับ.

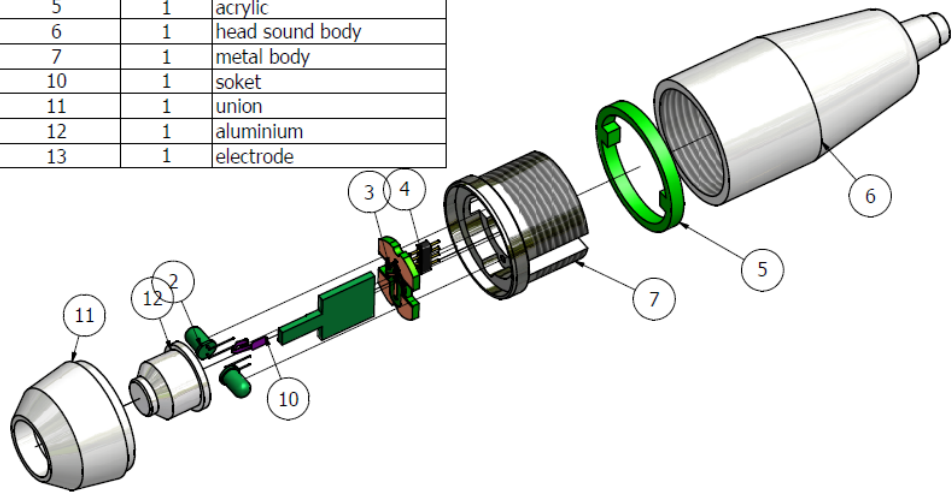


รูปที่ 3.19. ส่วนประกอบหัวนวดความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์.

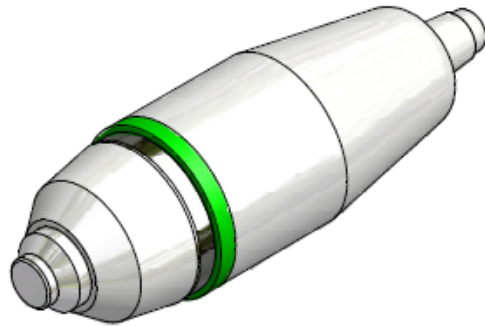


รูปที่ 3.20. หัวขนาดความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์.

PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
2	2	led
3	1	pcb
4	1	socket
5	1	acrylic
6	1	head sound body
7	1	metal body
10	1	soket
11	1	union
12	1	aluminium
13	1	electrode



รูปที่ 3.21. ส่วนประกอบหัวขนาดความถี่ 3 เมกะเฮิรตซ์.



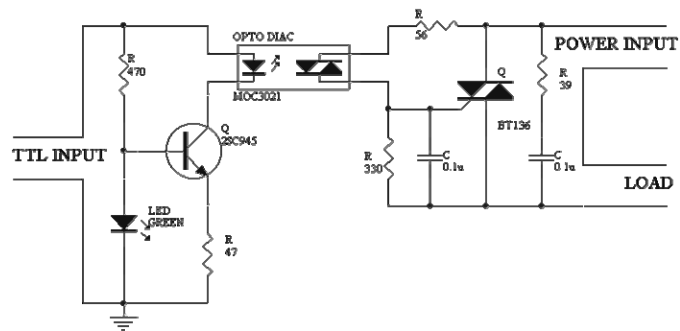
รูปที่ 3.22. หัววัดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.

3.4 การออกแบบวงจรไฟฟ้า

3.4.1 การออกแบบวงจรส่วนควบคุม

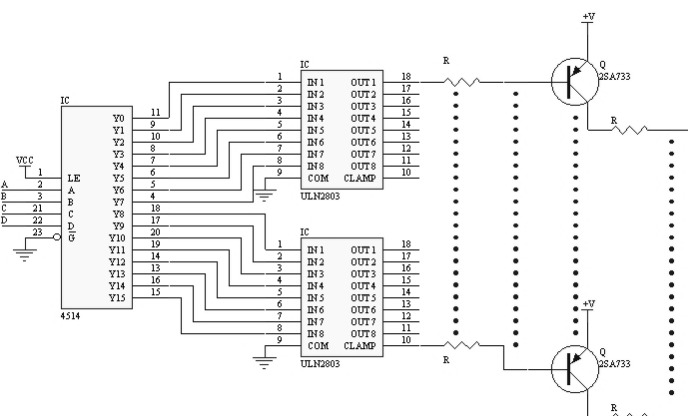
สร้างวงจรภาคควบคุม มีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นหัวใจหลัก, ใช้แหล่งจ่ายไฟขนาด 5 โวลต์จ่ายเข้าไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์. โดยไฟบวก 5 โวลต์เข้าขา 40 และ 0 โวลต์ เข้าขา 20 ใช้ ออสซิลเลเตอร์จากคริสตอลขนาด 12 เมกะเฮิร์ตซ์ ร่วมกับตัวเก็บประจุขนาด 20 พิโคฟารัด สำหรับ รักษาเสถียรภาพ, ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์มีวงรอบการทำงานเป็น 1 เมกะเฮิร์ตซ์. วงจรรีเซ็ต ใช้ RC ค่าความต้านทาน 5 กิโลโอห์ม ค่าเก็บประจุ 10 ไมโครฟารัด ใช้ขา P3.5 ขับลำโพงแบบเพียโซ, ซึ่งต้องใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP สำหรับขยายขนาดกระแสในการขับลำโพง, ใช้ตัวต้านทานทำหน้าที่แยกค่าแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ทุกขาของอินพุตและเอาต์พุตใช้ค่าความต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม วงจรแสดงดังรูป 3.23.

สร้างวงจรควบคุมการจ่ายกระแสสำหรับขั้ววงจรจับหัวอัลตราซาวด์ ใช้ไทรแอก เบอร์ BT136 ทนกระแสได้สูงสุด 4 แอมแปร์. ใช้ไดโอดในการจุดฉนวนเป็น Opto diac เบอร์ MOC3021 ซึ่งจะรับสัญญาณเปิดปิดวงจรจากภาคควบคุม แสดงวงจรดังรูป 3.25.



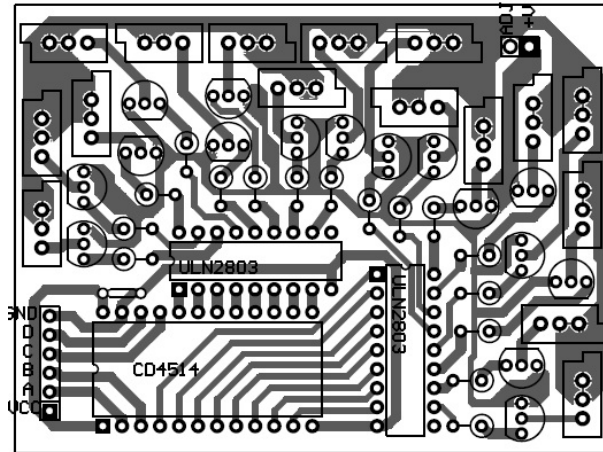
รูปที่ 3.25. การต่อวงจรควบคุมการจ่ายกระแส.

สร้างวงจรการปรับค่าความเข้มของคลื่น, ใช้ไอซีถอดรหัส เบอร์ CD4514 ไฟเลี้ยงเข้าขา 24 และ 12 อินพุต, รับมาจากภาคควบคุมขนาด 4 บิตถอดรหัสให้สัญญาณเอาต์พุต 16 ช่อง, ซึ่งต่อร่วมกับไอซี บัพเฟอร์ เบอร์ ULN2803 เป็นแบบ open connector ตัวละ 8 ช่อง จำนวน 2 ตัว. เอาต์พุตของบัพเฟอร์ต่อไบอัสให้ทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ซึ่งจะใช้เป็นตัวเลือกค่ากระแสที่จะไบอัสให้กับทรานซิสเตอร์ในภาคจับหัวอัลตราซาวด์ แสดงดังรูป 3.26.



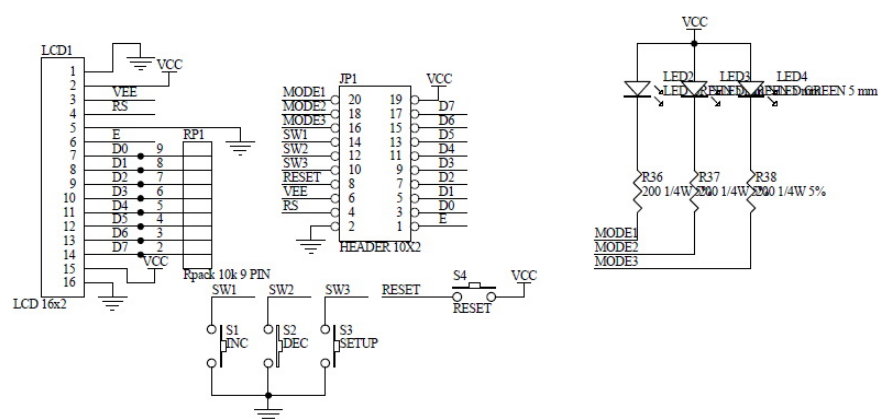
รูปที่ 3.26. การต่อวงจรการปรับค่าความเข้มของคลื่น.

นำวงจรมาออกแบบแผ่น PCB ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับสร้างลายทองแดง กำหนดค่า Footprint ต่างๆ ดังรูป 3.27.

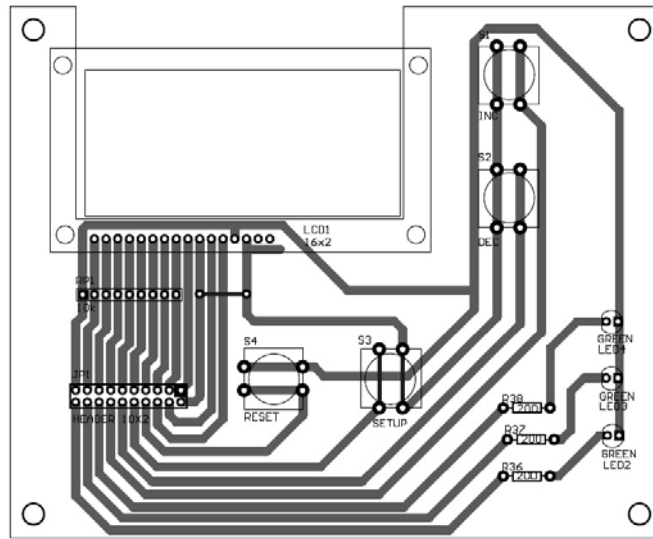


รูปที่ 3.27. ลายทองแดงแผ่น PCB วงจรการปรับค่าความเข้มของคลื่น.

สร้างวงจรการติดต่อกับผู้ใช้ประกอบด้วยจอแสดงผลแบบ LCD ขนาด 16 ตัวอักษร 2 บรรทัด, ใช้ขาควบคุม RS และ E ข้อมูลขนาด 8 บิต D0-D7. โดยติดต่อกับภาคควบคุมในการแสดงผลข้อมูลต่างๆ ต่อหลอด LED ทั้ง 3 หลอดแบบใช้ไฟบวกร่วม, รอรับสัญญาณจากภาคควบคุมในการแสดงโหมดการทำงานที่เลือก, ต่อสวิทช์กับ R pull up สำหรับสร้างสัญญาณให้ภาคควบคุมรับทราบการเลือกของผู้ใช้แสดงดังรูป 3.28.

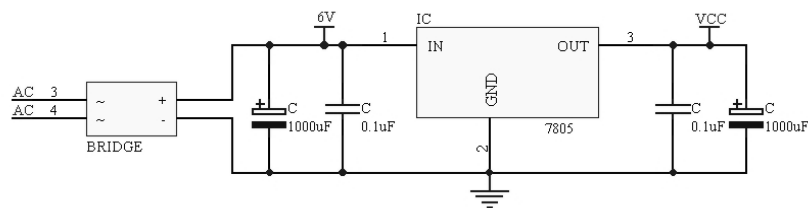


รูปที่ 3.28. การต่อวงจรการแสดงผลและสวิทช์อินพุต.



รูปที่ 3.29. ลายทองแดงแผ่น PCB วงจรติดต่อผู้ใช้.

สร้างภาคจ่ายไฟตรง 5 โวลต์ โดยต่อกับไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 9 โวลต์ ซึ่งได้มาจากหม้อแปลงแปลงระดับแรงดันไฟ ผ่านการเรียงกระแสโดยใช้ไดโอดทนกระแสได้สูงสุด 1.5 แอมแปร์ เป็นไดโอดแบบบริดจ์ ผ่านมายังวงจรกรองกระแสให้แรงดันเรียบใช้ค่าเก็บประจุ 1000 ไมโครฟารัด ส่งต่อมายังวงจรรักษาระดับแรงดันไฟใช้ ไอซีสำเร็จรูปเบอร์ 7805 ให้แรงดันเอาต์พุตคงที่ 5 โวลต์ทนกระแสสูงสุด 1 แอมแปร์ แสดงดังรูป.



รูปที่ 3.30 วงจรจ่ายไฟ.

เขียนโปรแกรมภาษาเครื่องสำหรับป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตามทิศทางกรไหลของโฟร์ตชาร์จ์ แสดงดังรูป 3.40 ในหัวข้อการออกแบบวงจรจับสัญญาณไฟฟ้า.

3.4.2 การพัฒนาชุดตรวจสอบการสัมผัสร่างกายของหุ่นยนต์เพื่อควบคุมการส่งคลื่น

จากการทดลองหาค่าความถี่ประจุของร่างกายมนุษย์ เพื่อนำไปใช้ออกแบบชุดตรวจรู้การสัมผัสร่างกาย (contact sensor) ในการส่งคลื่นอัลตราซาวด์ออกจากหุ่นยนต์. ในกรณีที่หุ่นยนต์ไม่ได้สัมผัสกับร่างกายมนุษย์หรือตัวกลางอื่นๆ จะทำให้คลื่นอัลตราซาวด์สะท้อนกับไปยังหุ่นยนต์และทำให้สารเพียโซอิเล็กทริกเกิดความเสียหายได้. ดังนั้น ชุดตรวจรู้การสัมผัสร่างกาย จะเป็นวงจรไฟฟ้าที่ใช้ตรวจสอบกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านร่างกาย. โดยธรรมชาติร่างกายมนุษย์จะมีสมบัติเทียบได้กับค่าตัวเก็บประจุค่าหนึ่ง. เมื่อหุ่นยนต์สัมผัสกับร่างกาย จะทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าไปยังร่างกายได้. โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการตรวจสอบจะเป็นระดับไม่เกิน 10 โวลต์ ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานหรือผู้ที่สัมผัสกับหุ่นยนต์. ขั้นตอนการออกแบบจะต้องหาข้อมูลค่าการเก็บประจุของร่างกายมนุษย์เพื่อนำไปออกแบบวงจรไฟฟ้าต่อไป. โดยต่อชุดกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ ไหลผ่านตัวเก็บประจุ 10 นาโนฟารัด และใช้หุ่นยนต์อะลูมิเนียมสัมผัสกับร่างกายมนุษย์. จากนั้นปล่อยสัญญาณไฟฟ้าที่ความถี่ต่าง ๆ แทนด้วย (Vs1) และทำการวัดค่าแอมพลิจูดของสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นก่อนและหลังการสัมผัสด้วยร่างกายมนุษย์ ด้วยเครื่อง Oscilloscope ที่จุด TPv1 ดังแสดงผังวงจรไฟฟ้าในรูปที่ 3.31. นำมาคำนวณหาค่าความแตกต่างของแรงดันไฟฟ้าก่อนและหลังการสัมผัสกับร่างกายมนุษย์ที่ความถี่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.32 และคำนวณหาค่าการเก็บประจุของมนุษย์ โดยสมการดังนี้.

$$\Delta V = R(Z_1 - Z_1 // Z_2)$$

$$Z_1 // Z_2 = \frac{Z_1 \times Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

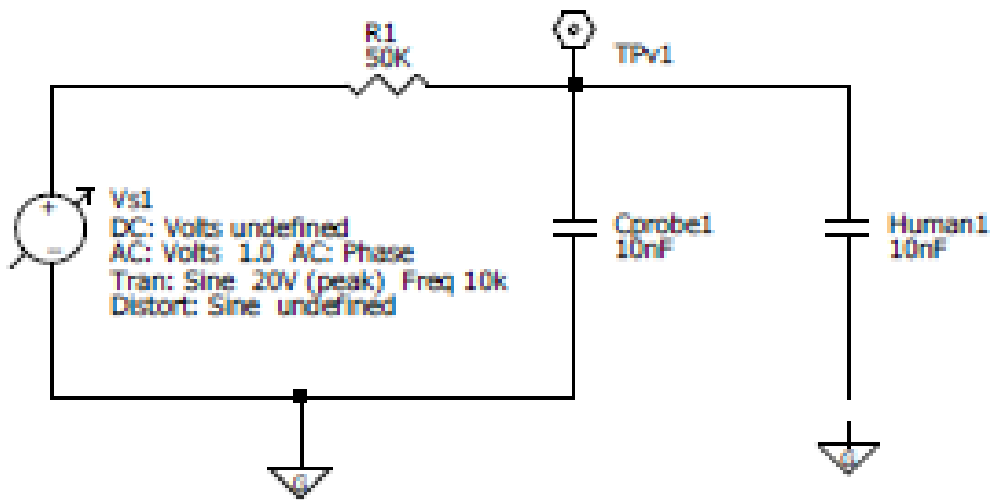
เมื่อ

$$Z_1 = \frac{1}{\omega C_1}, Z_2 = \frac{1}{\omega C_2}$$

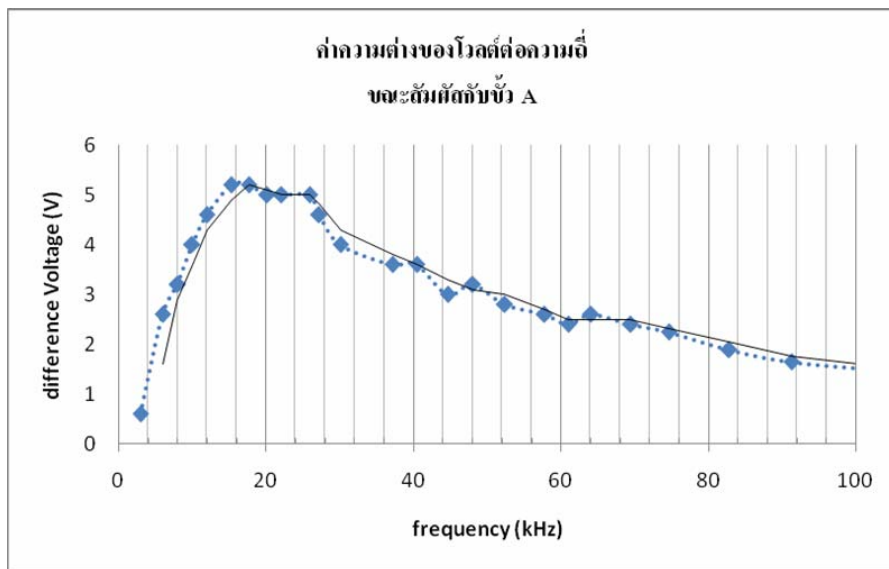
C1 = 10 นาโนฟารัด.

C2 = ค่าเป็นเก็บประจุของร่างกายมนุษย์.

R= ค่าความต้านทาน ในที่นี้ใช้ 100 kΩ.



รูปที่ 3.31. แผนผังการวงจรไฟฟ้าสำหรับการวัดค่าเก็บประจุของร่างกายมนุษย์.



รูปที่ 3.32. ค่าความต่างของแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณไฟฟ้าก่อนและหลังการสัมผัสร่างกายมนุษย์ ที่ความถี่ต่างๆ.

พบว่า ที่ความถี่ประมาณ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ จะมีค่าความต่างของแรงดันไฟฟ้าสูงกว่าที่ความถี่อื่นๆ และเมื่อนำค่าความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ มาคำนวณหาค่าความเก็บประจุของร่างกายมนุษย์จะได้ค่าประมาณ 7-10 พิโคฟารัด. โดยได้นำไปใช้ออกแบบวงจรร่วมกับส่วนวงจรขับสัญญาณไฟฟ้าในหัวข้อต่อไป.

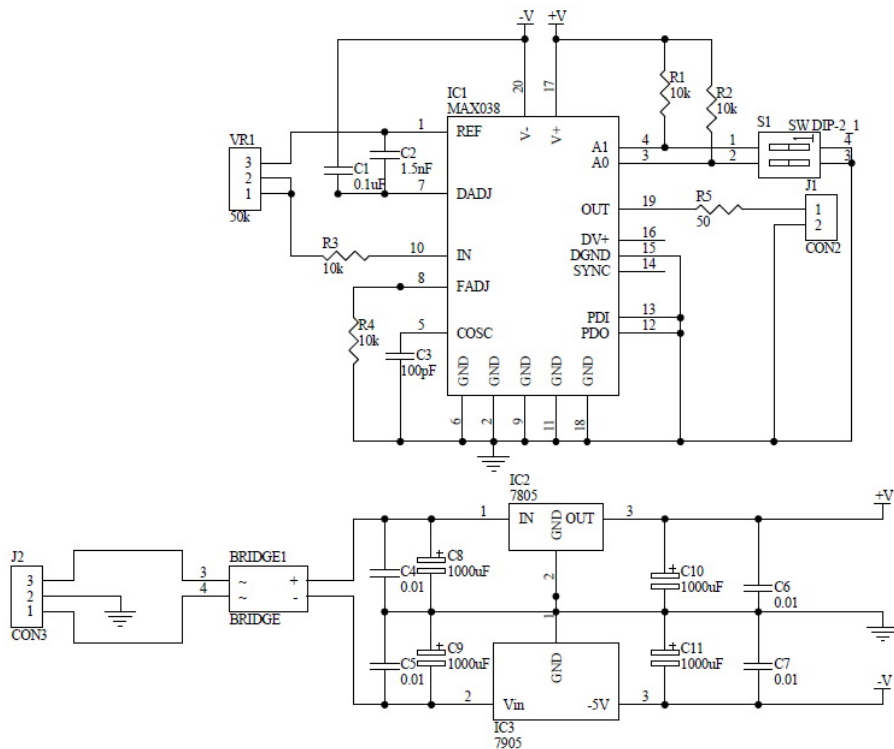
3.4.3 การออกแบบวงจรขับสัญญาณไฟฟ้า

3.4.3.1 การทดลองกำเนิดความถี่ด้วยไอซี MAX038

สร้างวงจรกำเนิดสัญญาณจากไอซี MAX038 โดยให้สัญญาณขา A1 และ A0 เป็นสวิตช์ สำหรับเลือกรูปแบบสัญญาณคลื่น และกำหนดค่าความถี่ที่ตัวเก็บประจุเลือกใช้ค่า 100 พิโคฟารัด และตัวต้านทานเลือกใช้แบบปรับค่าได้ใช้ค่าสูงสุด 50 กิโลโอห์ม. ดังนั้น ความถี่ต่ำสุดจะได้อ่า,

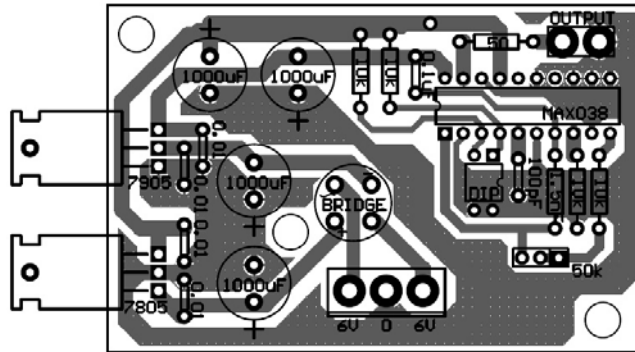
$$F_o = \frac{5}{50 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12}} = 1MHz$$

ถ้าต้องการความถี่ที่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ จะต้องปรับค่าความต้านทานมาที่ 16.66 กิโลโอห์ม, ประกอบวงจรตามค่าที่กำหนด, ใส่อุปกรณ์รอบข้างของไอซีและสร้างวงจรไฟเลี้ยงแบบบวก 5 โวลต์ โดยใช้ไอซีสำเร็จรูป 7805 สำหรับไฟบวก 5 โวลต์ และ 7905 สำหรับไฟลบ 5 โวลต์, แสดง ดังรูป 3.33.



รูปที่ 3.33. วงจรกำเนิดความถี่ด้วยไอซี MAX 038.

สร้างวงจรที่ออกแบบลงบนแผ่น PCB ดังรูป 3.34.



รูปที่ 3.34. ลายทองแดงแผ่น PCB วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่.

การทดลองที่ 1 ต่อวงจรตามรูป 3.34,

โดยให้

$$L_1 = 30 \text{ uH},$$

$$C_1 = 1.5 \text{ nF},$$

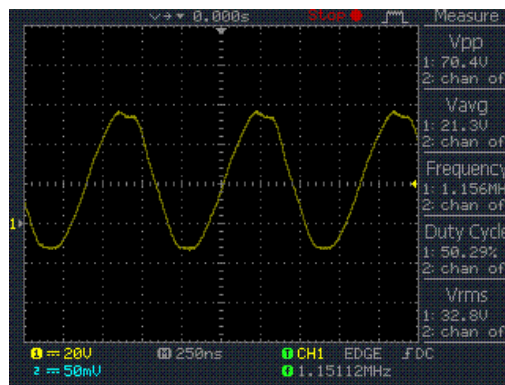
$$C_2 = 47 \text{ nF},$$

$$C_3 = 47 \text{ nF},$$

$$C_p = 1.6 \text{ nF},$$

ค่า F_r ที่ได้จากการคำนวณ
$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_T}} = 1.06 \text{ เมกะเฮิรตซ์}.$$

ค่า F_r ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณตกคร่อมทรานสดิวเซอร์.



รูปที่ 3.35. คลื่นสัญญาณไฟฟ้า 1 เมกะเฮิรตซ์.

การทดลองที่ 2 ต่อวงจรตามรูป 3.34,

โดยให้

$$L_1 = 10 \text{ uH},$$

$$C_1 = 1.5 \text{ nF},$$

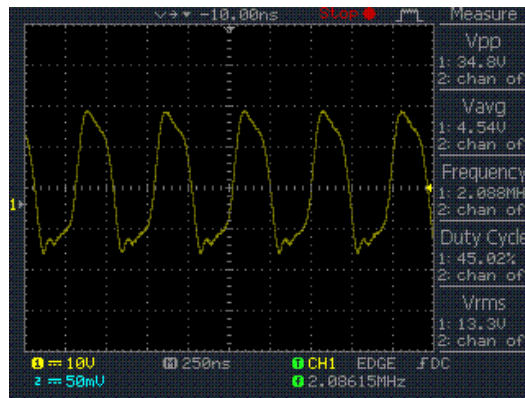
$$C_2 = 22 \text{ nF},$$

$$C_3 = 22 \text{ nF},$$

$$C_p = 1.2 \text{ nF},$$

ค่า f_r ที่ได้จากการคำนวณ $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_T}} = 2.01 \text{ เมกะเฮิรตซ์},$

ค่า f_r ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณตกรวมทรานสดิวเซอร์.



รูปที่ 3.36. คลื่นสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 2 เมกะเฮิรตซ์.

การทดลองที่ 3 ต่อวงจรตามรูป 3.34,

โดยให้

$$L_1 = 10 \text{ uH},$$

$$C_1 = 1 \text{ nF},$$

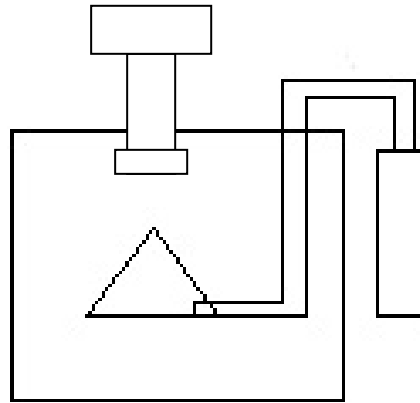
$$C_2 = 1.5 \text{ nF},$$

$$C_3 = 1.5 \text{ nF},$$

$$C_p = 0.8 \text{ nF},$$

ค่า f_r ที่ได้จากการคำนวณ $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_T}} = 3.01 \text{ เมกะเฮิรตซ์},$

ค่า f_r ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณตกรวมทรานสดิวเซอร์.



รูปที่ 3.38. เครื่องวัดความเข้มของคลื่นและการติดตั้งในการวัด.



รูปที่ 3.39. การทดสอบชุดหัวขนาด 3 เมกะเฮิร์ตซ์กับวงจรไฟฟ้า.



รูปที่ 3.40. การทดสอบชุดหัวขนาด 3 เมกะเฮิร์ตซ์กับวงจรไฟฟ้า.

ตารางที่ 3.11. ค่ากำลังคลื่นของหัวขนาดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์.

Power (วัตต์/ซม ²)	Power (วัตต์)	กระแส (mA)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	อัตราการเปลี่ยน รูปพลังงาน (%)
0.2	0.53	230	68	15.64	2.33
0.5	1.90	352	68	23.94	7.93
1.0	3.80	479	68	32.57	11.67
1.5	5.70	582	68	39.58	14.40

- การวัดความเข้มของคลื่นที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์

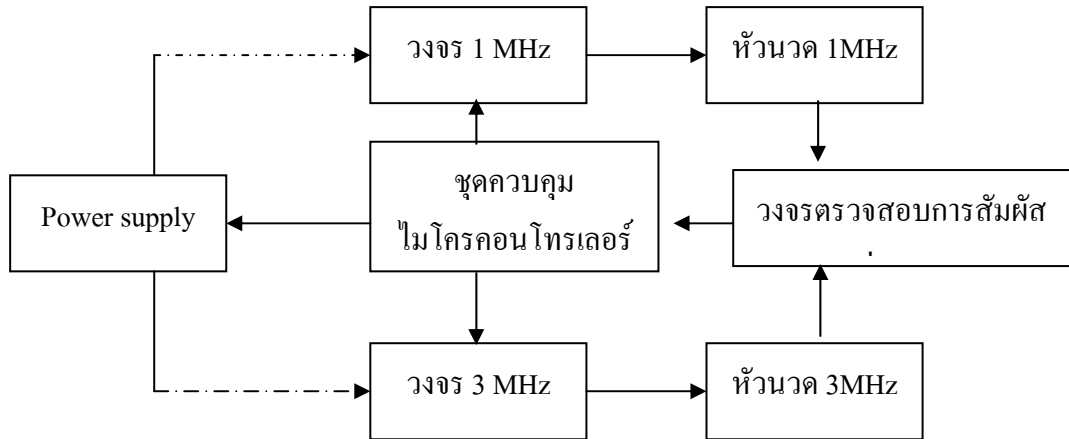
จากการทดลองประกอบหัวขนาดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่มีผิวหน้าของหัวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หรือมีพื้นที่เท่ากับ 0.78 cm² จะให้คลื่นที่มีความเข้มของคลื่น 0.5 วัตต์/ซม², ต้องวัดค่าความเข้มของคลื่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิคส์เพาเวอร์มิเตอร์ (UPM) ได้เท่ากับ 0.39 วัตต์. จากตาราง 3.12 แสดงผลการทดลองวัดกำลังคลื่นของหัวขนาดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยการวัดกระแสที่ไหลและแรงดันไฟฟ้าที่ไหลผ่านวงจรจับสัญญาณ เทียบกับกำลังคลื่นที่วัดได้, พบว่า อัตราการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานคลื่นได้เฉลี่ย 10 % ความถี่อยู่ในช่วงประมาณ 3.16 เมกะเฮิร์ตซ์, โดยไม่สามารถปรับค่าที่ความเข้มของคลื่น 0.1 วัตต์/ซม² ได้เนื่องจากมีกำลังคลื่นน้อย ทำให้ผลที่อ่านคลาดเคลื่อนสูง.

ตารางที่ 3.12. ค่ากำลังคลื่นของหัวขนาด 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร.

Power (วัตต์/ซม ²)	Power (วัตต์)	กระแส (mA)	ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้า (วัตต์)	อัตราการเปลี่ยนรูป พลังงาน (%)
0.1	0.078	-	18	-	-
0.2	0.156	90	18	1.62	9.60
0.3	0.234	170	18	3.06	9.80
0.4	0.318	210	18	3.78	10.50
0.5	0.39	270	18	4.86	10.30

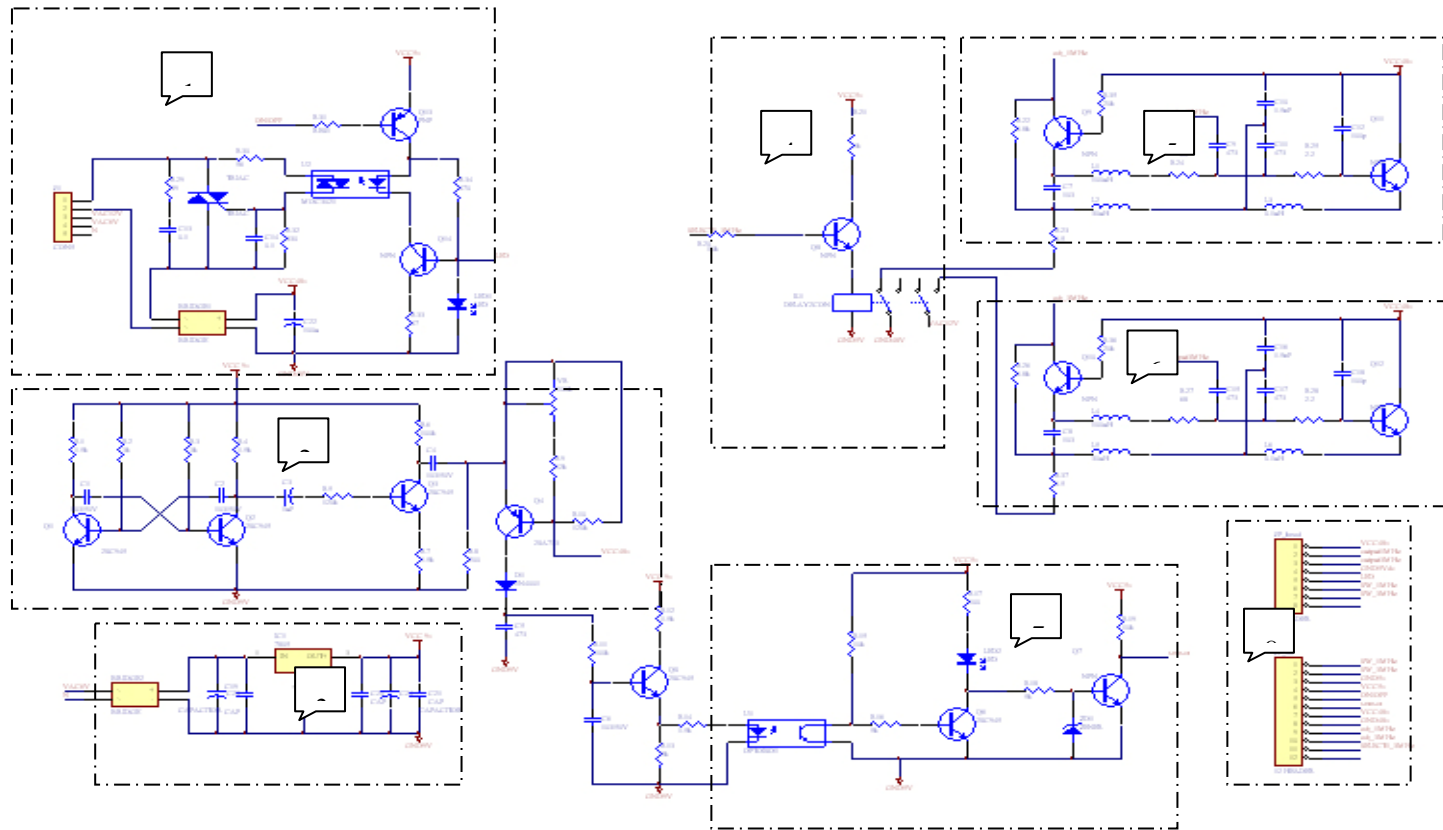
การออกแบบวงจรรวมของวงจรจับสัญญาณไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนทำงาน ได้แก่ วงจรจับสัญญาณไฟฟ้า 1 เมกะเฮิร์ตซ์, วงจรจับสัญญาณไฟฟ้า 3 เมกะเฮิร์ตซ์ และชุดตรวจสอบการ

สัมผัสร่างกาย. โดยแสดงผังการทำงานร่วมกับวงจรในส่วนควบคุม และหัวนวดอัลตราซาวด์ ดังรูปที่ 3.41.



รูปที่ 3.41. แผนภาพการทำงานของวงจรขับสัญญาณไฟฟ้า.

การทำงานของเครื่องเริ่มจากวงจรควบคุมส่งสัญญาณ เพื่อกำหนดให้วงจรขับสัญญาณไฟฟ้า 1 เมกะเฮิร์ตซ์หรือวงจรขับสัญญาณไฟฟ้า 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ทำงาน. ในขณะที่ทำงาน ส่วนวงจรควบคุม จะควบคุมเวลาการส่งคลื่น, ความเข้มของคลื่น, ลักษณะการปล่อยคลื่น และขณะที่หัวนวดทำการส่งคลื่นอัลตราซาวด์. ในส่วนชุดวงจรการตรวจสอบการสัมผัสร่างกายของหัวนวด จะคอยตรวจสอบการสัมผัสของหัวนวดกับร่างกายผู้บำบัด. หากไม่ได้สัมผัส, วงจรนี้จะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังส่วนควบคุม เพื่อทำการตัดสัญญาณให้ชุดขับสัญญาณไฟฟ้า และส่งเสียงเตือนให้ผู้ใช้งานทราบ, เพื่อเป็นการป้องกันการเสียหายและยืดอายุการใช้งานของหัวอัลตราซาวด์.



รูปที่ 3.42. วงจรรวมเครื่องนวด อัลตราชาวด์กายภาพบำบัด 2 ความถี่.

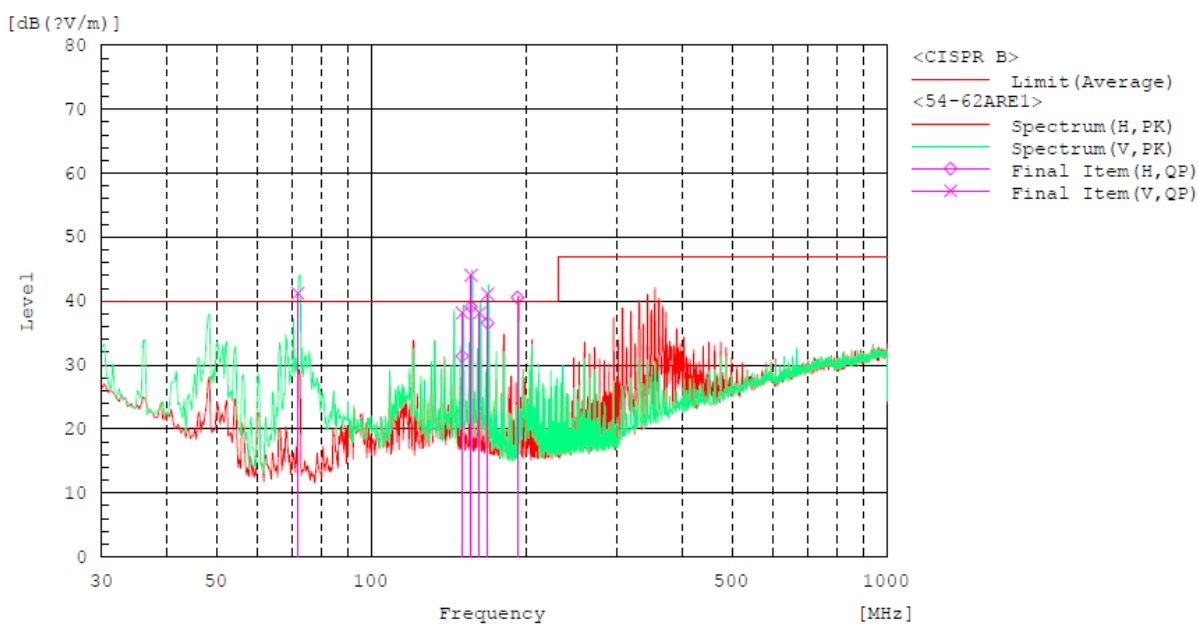
หลักการดำเนินงานของวงจรรวม สามารถแบ่งเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้ :

1. วงจรควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจรจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับหัวนวด.
2. วงจรผลิตความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ใช้สำหรับตรวจจับการสัมผัสที่หัวนวด.
3. วงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง.
4. วงจรควบคุมการเลือกใช้ความถี่ ระหว่าง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.
5. วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรภาคขับ ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์.
6. วงจรออสซิลเลเตอร์ และวงจรภาคขับ ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.
7. วงจรตรวจจับ และส่งสัญญาณ sensor เมื่อมีการสัมผัสที่หัวนวด.
8. ชุดเชื่อมต่อ ระหว่างหัวนวดและชุดไมโครคอนโทรลเลอร์.

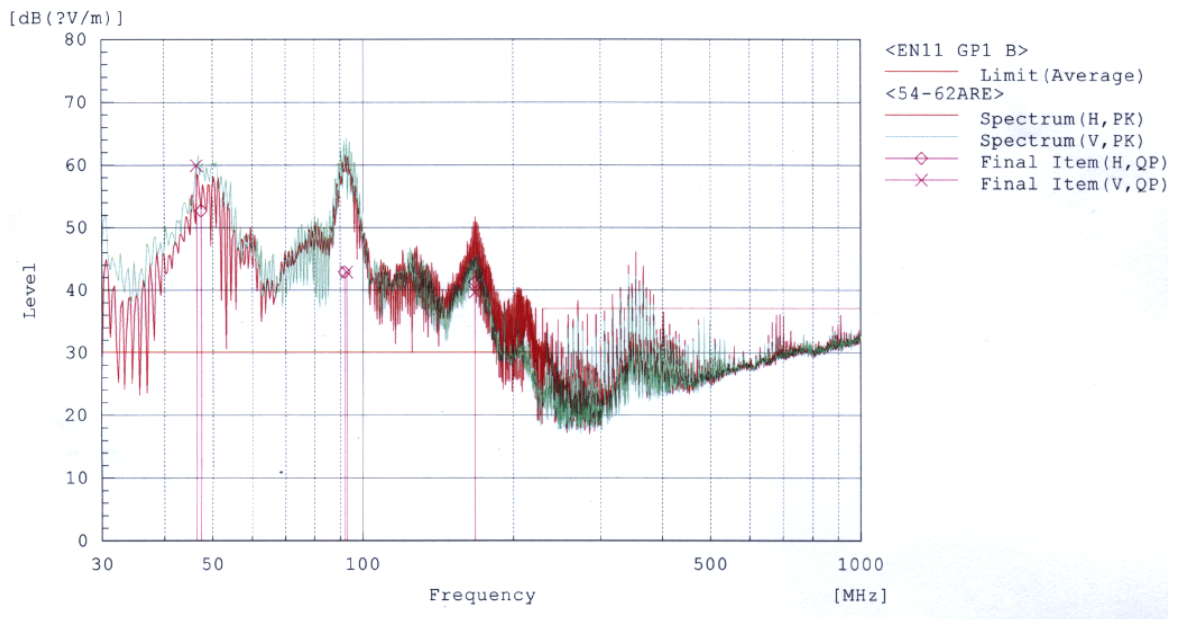
3.4.3.3 การทดลองการแพร่สนามแม่เหล็ก

การนำเครื่องนวดอัลตราซาวด์กายภาพบำบัดที่วิจัยได้ไปทดสอบด้านการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กในอากาศที่เป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์, โดยใช้เครื่องวัดค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กของศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ในหัวข้อ radiated emission.

การทดลองครั้งที่ 1 ได้ทดสอบผลการแพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กของเครื่องนวดกายภาพบำบัดรุ่น UC4701.



รูปที่ 3.43. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 1.



รูปที่ 3.44. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของการทดลอง ครั้งที่ 1.

จากกราฟในรูปที่ 3.43 เป็นผลการวัดค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่แพร่กระจายออกจากตัวเครื่องในโหมด standby หรือโหมดที่เปิดเครื่องนวดอัลตราซาวด์ให้ทำงาน แต่ยังไม่ได้เปิดให้หัวนวดอัลตราซาวด์ส่งคลื่น และตำแหน่งหัววัดอยู่สูงห่างจากตัวเครื่อง 100 เซนติเมตร. เส้นสีแดงที่ลากขนานแนวเส้นกราฟแกนนอนหรือแกนของความถี่ แสดงระดับความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่สามารถแพร่กระจายได้ในช่วงความถี่ 30 – 250 เมกะเฮิร์ตซ์ ต้องมีค่าความเข้มไม่เกิน 40 $\mu\text{V/m}$ และที่ความถี่ 250 เมกะเฮิร์ตซ์ – 1 จิกะเฮิร์ตซ์ ต้องมีค่าความเข้มไม่เกิน 48 $\mu\text{V/m}$. ส่วนเส้นกราฟสีแดงแสดงค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่ออกจากตัวเครื่องในแนวแกนนอน (horizontal) และเส้นสีเขียวแสดงค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่ออกจากตัวเครื่องในแนวแกนตั้งฉาก (vertical). พบว่าในช่วงความถี่ของคลื่นแม่เหล็กยังมีค่าความเข้มเกินข้อกำหนดมาตรฐาน ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กในแนวตั้ง (vertical) ที่ความถี่ 771.961, 149.976, 155.970, 161.976 และ 167.970 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับ 41.2, 38.1, 44.1, 38.2 และ 41.1 $\mu\text{V/m}$ ตามลำดับ และคลื่นแม่เหล็กในแนวนอน (horizontal) ที่ความถี่ 191.982 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับ 40.6 $\mu\text{V/m}$. นอกจากนั้นยังพบว่า คลื่นแม่เหล็กในแนวนอนที่มีโอกาสที่จะเกินเกณฑ์มาตรฐานอีกในตำแหน่งความถี่ 155.973, 167.973 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่าเท่ากับ 39.1 และ 36.6 $\mu\text{V/m}$ ตามลำดับ.

ในโหมดการส่งคลื่นอัลตราซาวด์ของเครื่องนวดอัลตราซาวด์, ค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กแสดงในรูปที่ 3.44 ที่พบว่า ในคลื่นแม่เหล็กที่แพร่กระจายช่วงความถี่ 30–250 เมกะเฮิร์ตซ์ ยังมีค่าสูงกว่าเกณฑ์อยู่มาก.

การทดลองครั้งที่ 2 ได้มีการปรับปรุงภายในเครื่องดังนี้ :

1. ใส่แผ่น ground plate ที่ด้านใต้ของแผ่นวงจรทั้ง 2 แผ่น โดยใช้แผ่นไมลากรันระหว่าง ground plate กับลายวงจรเพื่อป้องกันการลัดวงจร โดยใช้การต่อแบบขันนอตเข้ากับตัวต่อแบบหางปลา.

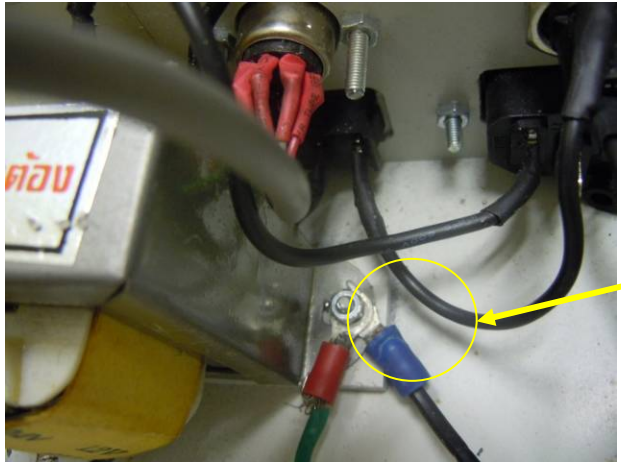


รูปที่ 3.45. การติดตั้งแผ่น ground plate ก่อนวางแผ่นวงจรไฟฟ้า (control PCB).

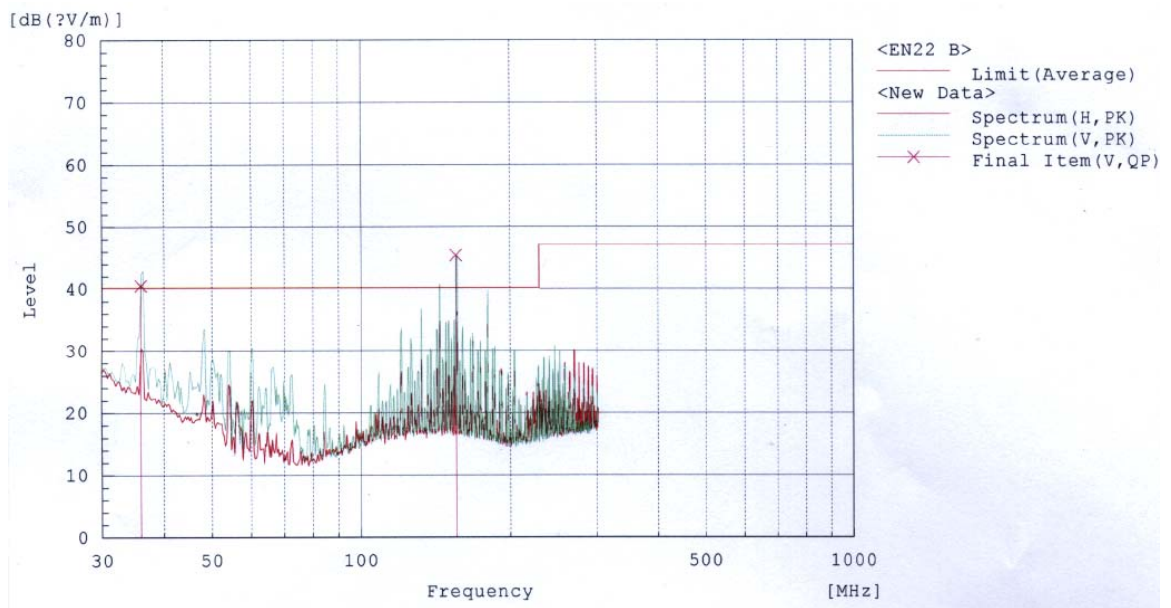


รูปที่ 3.46. การติดตั้งแผ่น ground plate หลังแผ่นวงจรไฟฟ้า (panel PCB).

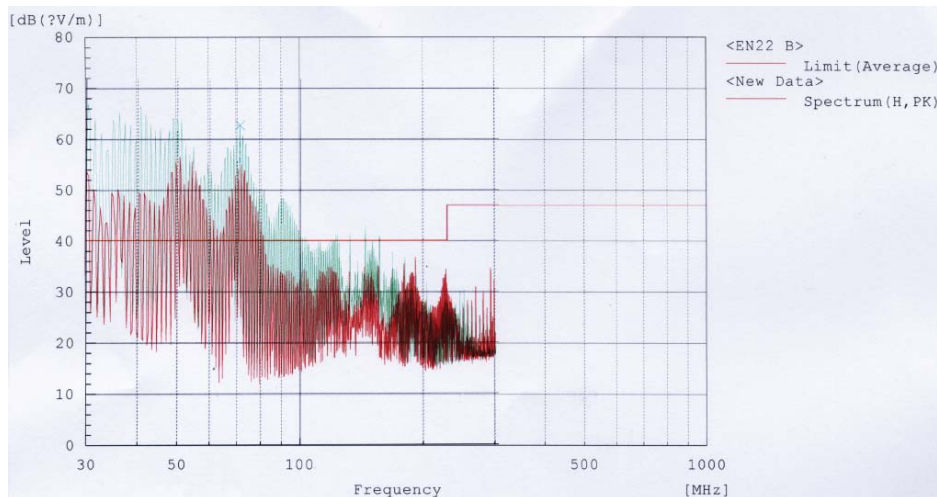
1. เชื่อมต่อ heatsink ของทรานซิสเตอร์ ลงกราวด์.
2. เชื่อมต่อตัวถังของหม้อแปลงไฟลงกราวด์ด้วยตัวต่อแบบหางปลา.



รูปที่ 3.47. การติดตั้งสายกราวด์กับหม้อแปลงไฟฟ้า.



รูปที่ 3.48. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 2.



รูปที่ 3.49. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราชาวด์ทำงานของการทดลองครั้งที่ 2.

จากกราฟค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กในโหมด stand-by ดังแสดงในรูปที่ 3.48 พบว่าการปรับปรุงในครั้งที่ 2 สามารถลดค่าความเข้มการแผ่กระจายของแม่เหล็กในแนวนอน ได้มากกว่า $10 \mu\text{V/m}$, ทำให้ค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กในแนวแกนนอนที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้. แต่การปรับปรุงนี้กลับไม่สามารถทำให้ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กในแนวตั้งหรือกราฟเส้นสีเขียวลดลงได้. จะเห็นได้ว่า คลื่นแม่เหล็กในตำแหน่งที่ความถี่ 771.961, 149.976, 155.970, 161.976 และ 167.970 เมกะเฮิร์ตซ์ ยังมีค่าใกล้เคียงกับรูปที่ 3.42 และพบว่า กลับทำให้ค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กความถี่ 35.964 เมกะเฮิร์ตซ์ เพิ่มขึ้นเป็น $40.4 \mu\text{V/m}$ อีกด้วย.

ในโหมดการส่งคลื่นอัลตราชาวด์ของเครื่องนวดอัลตราชาวด์จากรูปที่ 3.49 พบว่า การปรับปรุงมีผลต่อการแผ่กระจายของแม่เหล็กในแนวนอนลดลงประมาณ $10 \mu\text{V/m}$ เช่นเดียวกัน, แต่ไม่ทำให้ค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กลดลง.

การทดลองครั้งที่ 3 ได้มีการปรับปรุงภายในเครื่องต่อจากการทดลองครั้งที่ 2 ดังนี้ :

1. จัดสายไฟที่ต่อลงกราวด์ให้อยู่ด้านข้างตัวเครื่อง.
2. นำอุปกรณ์เก็บประจุ (capacitor) 0.1 ไมโครฟารัด ต่อคร่อมระหว่างขาไฟเลี้ยงของ LCD ทั้ง 2 ขา.
3. เปลี่ยน socket สำหรับต่อสายไฟ 220 โวลต์ เข้าเครื่องเป็นแบบ socket ที่มีวงจร filter ต่ออยู่

ดังรูปที่ 3.50.

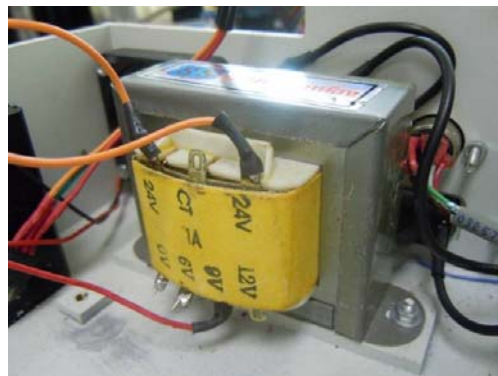


ก) socket แบบไม่มีวงจร filter

ข) socket แบบมีวงจร filter

รูปที่ 3.50. ชุด socket ที่มีวงจรกรองกระแส (filter) ประกอบเทียบกับแบบเดิม.

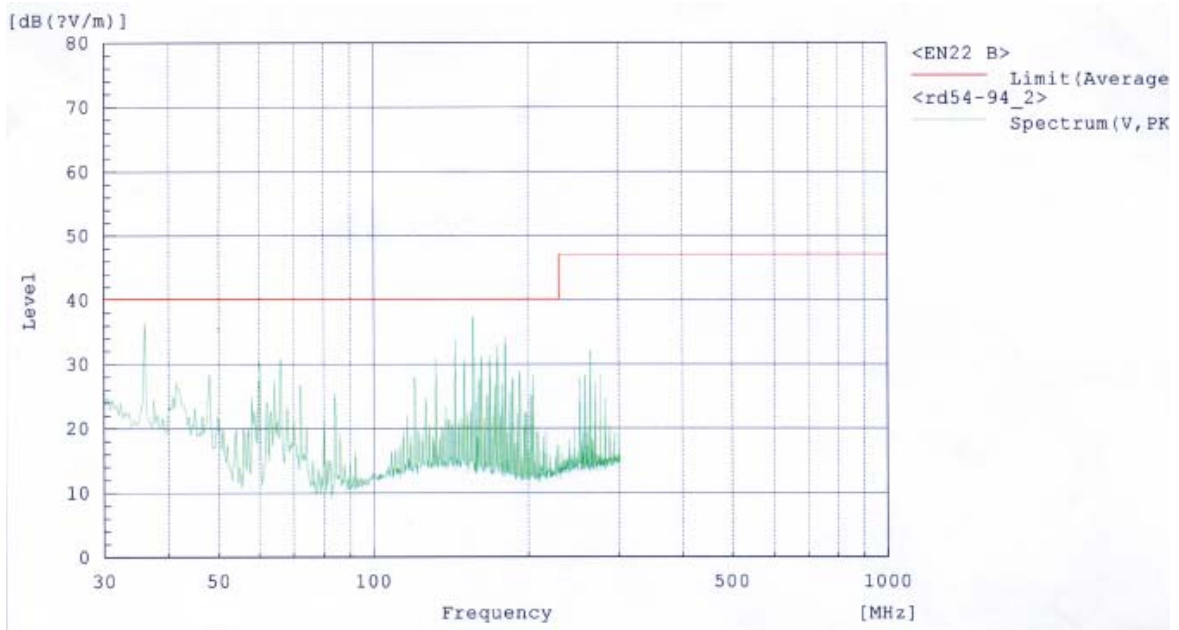
4. ทำการเชื่อมต่อสายสัญญาณไฟฟ้าภายในเครื่องที่จะส่งต่อไปยังหน่วยแทนการใช้แจ็คแบบเสียบ และพันหัวสายไฟทั้งสองด้านด้วยแผ่นอะลูมิเนียมฟอยล์เพื่อลดสัญญาณรบกวน.
5. นำแผ่นทองแดงมาพันรอบหม้อแปลงและต่อสายลงกราวด์.



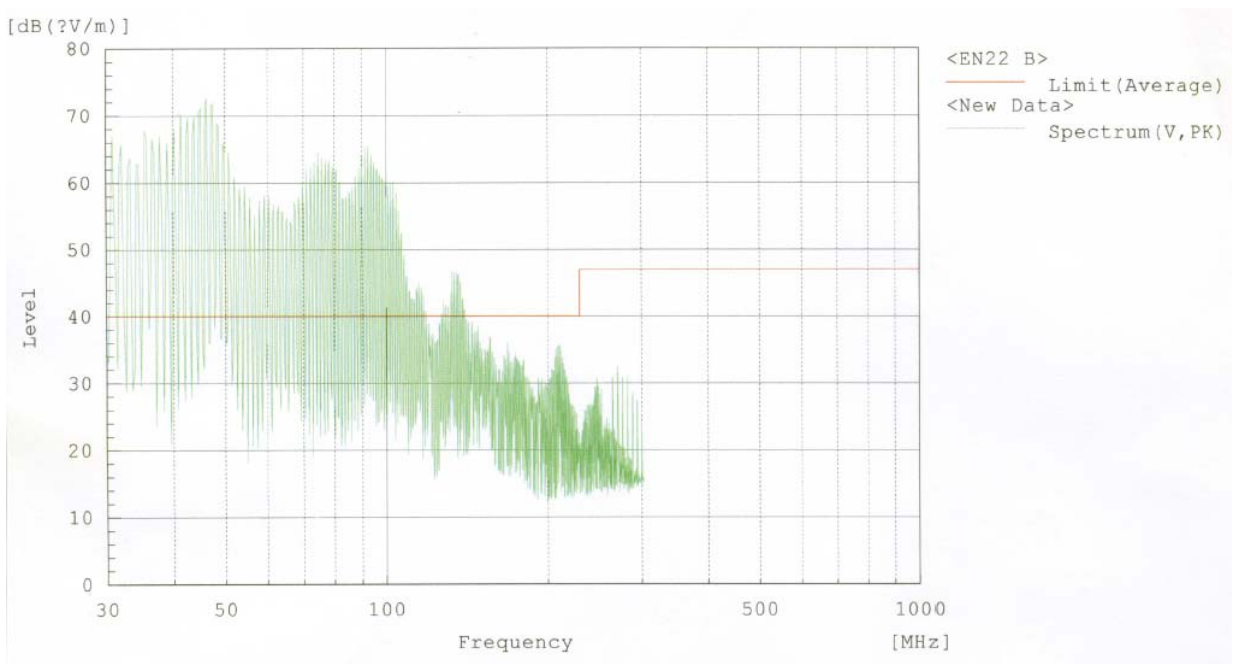
รูปที่ 3.51. หม้อแปลงไฟฟ้าก่อนพันด้วยทองแดง.



รูปที่ 3.52, การนำแผ่นทองแดงมาพันรอบหม้อแปลงไฟฟ้า และต่อลงสายกราวด์.



รูปที่ 3.53. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของการทดลองครั้งที่ 3.



รูปที่ 3.54. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของการทดลองครั้งที่ 3.

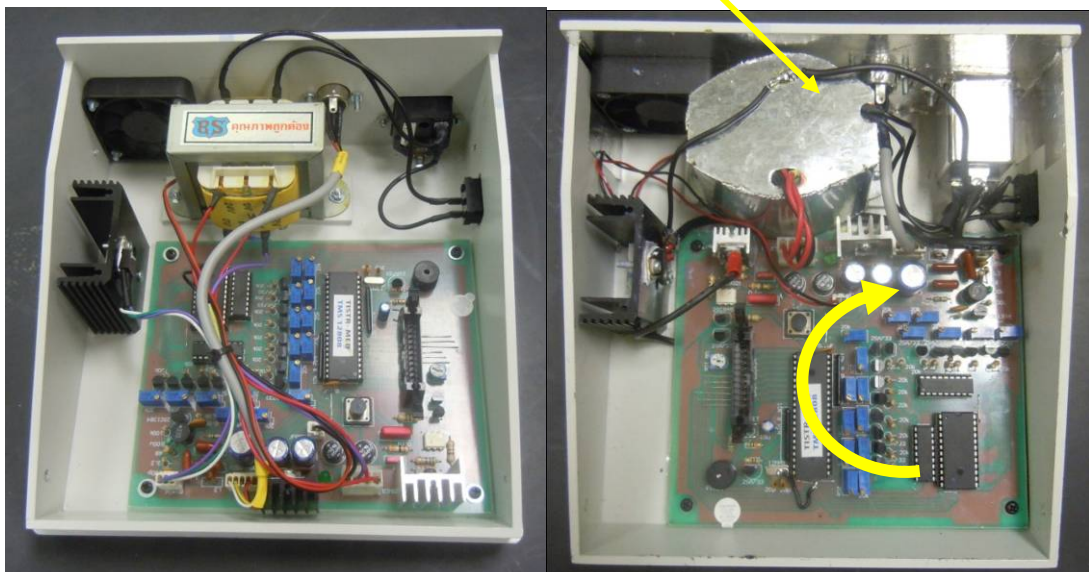
ในการปรับปรุงครั้งนี้จะวัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก, เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กในแนวแกนตั้งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์อยู่แล้วจากการทดลองครั้งที่แล้ว, จึงมุ่งเน้นการวัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กในแนวแกนนอน. จากกราฟค่าความเข้มของคลื่นแม่เหล็กในโหมด stand-by ดังแสดงในรูปที่ 3.53, พบว่าการแพร่กระจายของคลื่นในแนวตั้งฉากจะลดจนค่าความเข้มต่ำกว่าผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้.

ในโหมดการส่งคลื่นอัลตราซาวด์ของเครื่องนวดอัลตราซาวด์จากรูปที่ 3.54 พบว่า ยังไม่ส่งผลต่อการแพร่กระจายของแม่เหล็กในแนวตั้งฉาก.

การทดลองครั้งที่ 4 การปรับปรุงภายในเครื่องต่อจากการทดลองครั้งที่ 3 ดังนี้ :

1. กลับด้านแผ่นวงจรไฟฟ้าเพื่อให้สายไฟไม่ต้องต่อข้ามผ่านลายวงจร ดังแสดงในรูปที่ 3.55 ทำให้สายไฟแรงดันต่ำไปยังจุดต่างๆ ให้สั้นลง.

หม้อแปลงไฟฟ้า



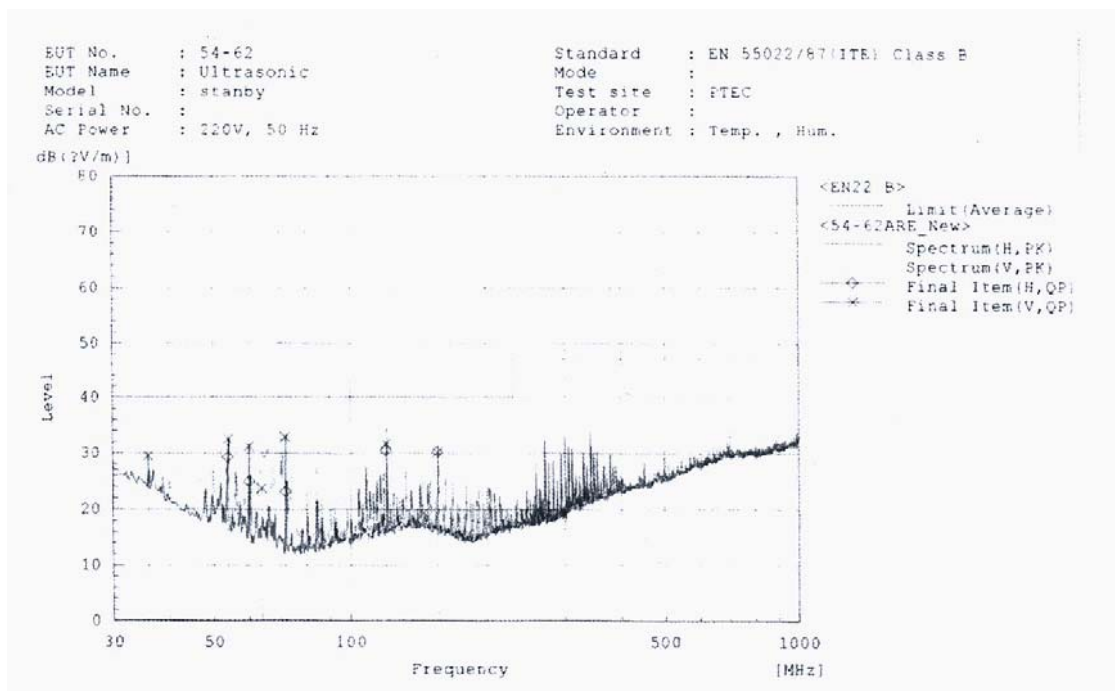
รูปที่ 3.55. ก่อนและหลังการหมุนกลับวงจรไฟฟ้าภายในเครื่อง.

1. นำแผ่นโลหะมาหุ้มรอบหม้อแปลงไฟฟ้างดรูปที่ 3.56.
2. ทำการเชื่อมต่อสายกราวด์ แทนการใช้ชั้นนอตแบบหางปลา.
3. ทำฝาครอบสังกะสีภาคขั้วสัญญาณไฟฟ้างดรูป 3.56.

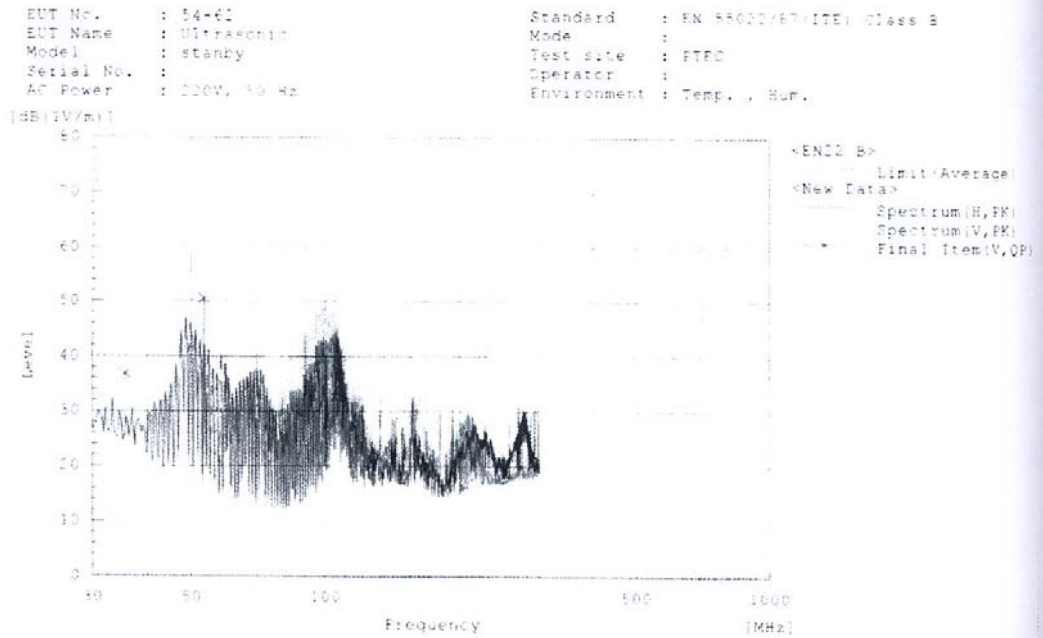


ภาคจับ
สัญญาณไฟฟ้า

รูปที่ 3.56. ทำฝาสังกะสีครอบภาคจับสัญญาณไฟฟ้าภายในเครื่อง.



รูปที่ 3.57. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด stand-by ของการทดลองครั้งที่ 4.



รูปที่ 3.58. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของการทดลองครั้งที่ 4.

ในการปรับปรุงครั้งนี้ พบว่า คลื่นแม่เหล็กในแนวตั้งฉากและแนวแกนอนมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ทั้งหมดสำหรับโหมด Stand-by. แต่ในโหมดการส่งคลื่นอัลตราซาวด์ที่ 1.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ยังพบว่ามีช่วงความถี่ต่ำกว่า 150 เมกะเฮิรตซ์ลงมาเกินค่ามาตรฐาน แต่ระดับความเข้มลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งที่ 3 อยู่ประมาณ 10 dB.

การทดลองครั้งที่ 5 การปรับปรุงภายในเครื่องต่อจากการทดลองครั้งที่ 4 ดังนี้ :

เพื่อค้นหาจุดที่ทำให้เกิดการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็ก จึงได้นำเครื่องที่เหมือนกันมาทดลองแบบเดิมอีกหนึ่งเครื่อง เพื่อทำการเปรียบเทียบกับเครื่องที่ทำในการทดลองครั้งที่ 3 ดังนี้ :

1. ตั้งชื่อเครื่องที่ทำมาจากครั้งที่ 3 ว่าเครื่อง A และเครื่องที่ทำใหม่ว่าเครื่อง B.
2. เครื่อง A ได้ทำเพิ่มคือ 1 ย้ายตำแหน่งทรานซิสเตอร์ขับสัญญาณให้มาอยู่ในตำแหน่งใกล้กับ

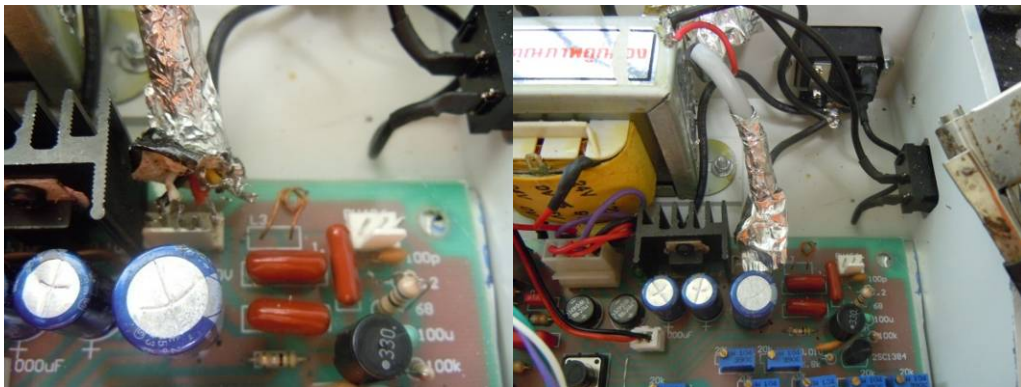
วงจรขับสัญญาณ และเอาแผ่นอะลูมิเนียมบางที่หุ้มหัวสายสัญญาณ 5 เส้นออก.

3. เชื่อมสายสัญญาณ 5 เส้น แทนการใช้ socket.

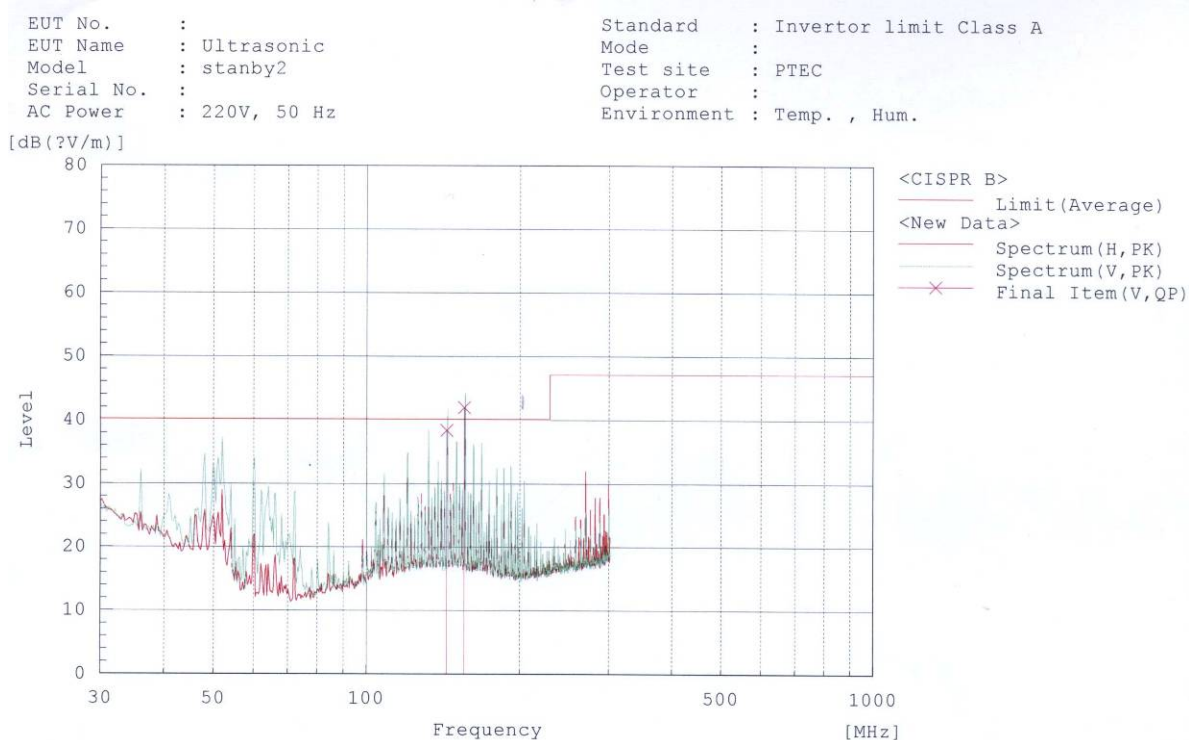
4. เครื่อง B ได้ทำ Ground plate รองใต้แผ่น PCB ทั้ง 2 แผ่น ได้แก่ แผ่นวงจรควบคุม และแผ่น panel โดยไม่ใช่สั้งกะสีหุ้มหม้อแปลง แต่ต่อเฉพาะสายกราวด์.
5. ทำการทดสอบการหุ้มสายด้วยแผ่นอะลูมิเนียมบางบริเวณสายสัญญาณ 5 เส้น.



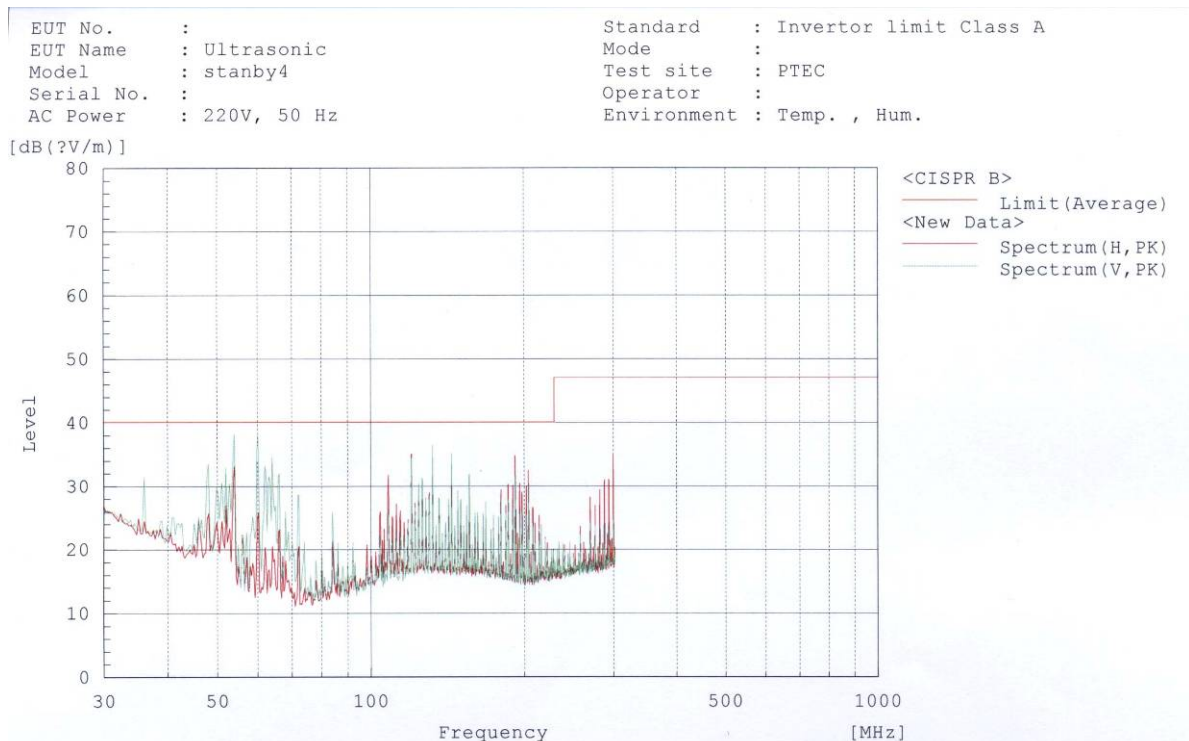
รูปที่ 3.59 การตำแหน่ง heat sink และ ทรานซิสเตอร์ที่ย้ายใหม่ในเครื่อง A.



รูปที่ 3.60 ตำแหน่งของสายสัญญาณ 5 เส้นและการหุ้มสายสัญญาณด้วยแผ่นอะลูมิเนียม ในเครื่อง B.

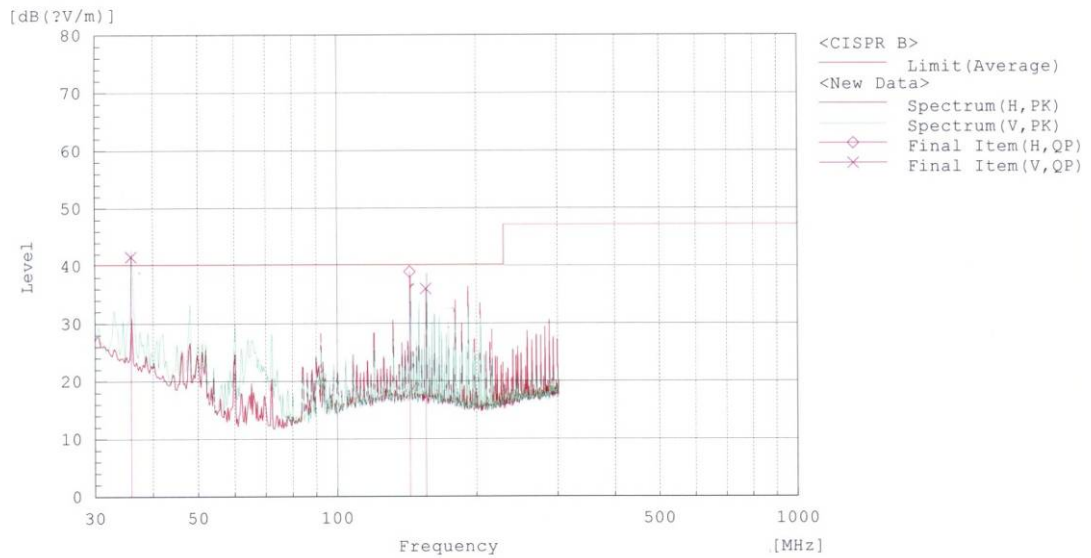


รูปที่ 3.61 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด stand-by ของเครื่อง A การทดลองครั้งที่ 5 แบบไม่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม.



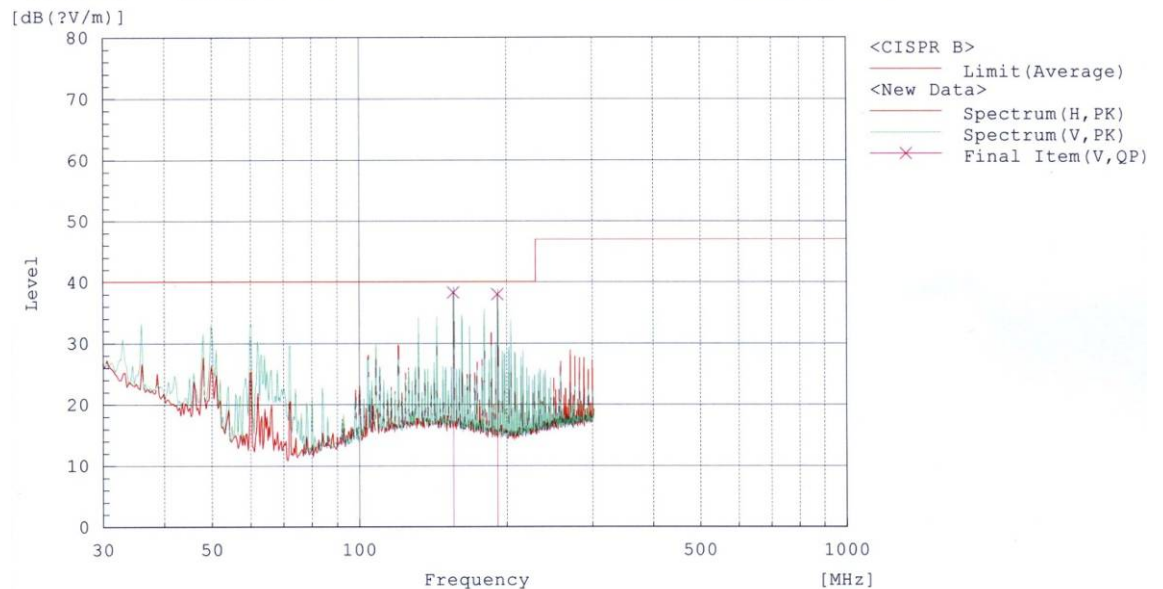
รูปที่ 3.62 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด stand-by ของเครื่อง A การทดลองครั้งที่ 5 แบบหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม.

EUT No. :	Standard : Invertor limit Class A
EUT Name : Ultrasonic	Mode :
Model : stanby1	Test site : PTEC
Serial No. :	Operator :
AC Power : 220V, 50 Hz	Environment : Temp. , Hum.

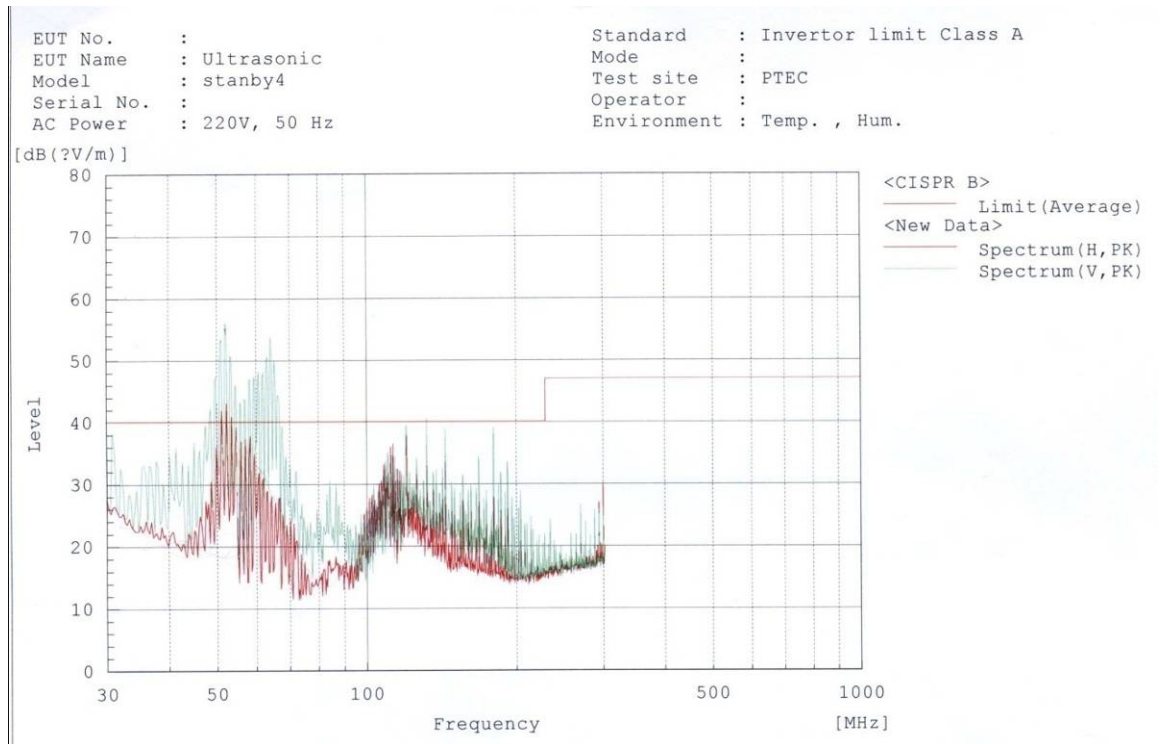


รูปที่ 3.63. ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด standby ของเครื่อง B การทดลองครั้งที่ 5 แบบไม่หุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม.

EUT No. :	Standard : Invertor limit Class A
EUT Name : Ultrasonic	Mode :
Model : stanby4	Test site : PTEC
Serial No. :	Operator :
AC Power : 220V, 50 Hz	Environment : Temp. , Hum.



รูปที่ 3.64 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมด stand-by ของเครื่อง B การทดลองครั้งที่ 5 แบบหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม.



รูปที่ 3.65 ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กที่วัดได้ในโหมดเปิดให้หัวอัลตราซาวด์ทำงานของเครื่อง A การทดลองครั้งที่ 5 แบบหุ้มด้วยแผ่นอะลูมิเนียม.

จากกราฟรูปที่ 3.61-3.64 เห็นได้ว่าการหุ้มสายสัญญาณ 5 เส้นด้วยแผ่นอะลูมิเนียม จะทำให้การแพร่สนามแม่เหล็กลดลงและผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ทั้งเครื่อง A และ B. จุดที่น่าสังเกตจะเห็นได้ว่าเครื่อง B ไม่ได้หุ้มหม้อแปลงด้วยสังกะสี. จึงสรุปได้ว่า หม้อแปลงไม่ทำให้เกิดการแพร่ของสนามแม่เหล็ก ถึงจะนำแผ่นอะลูมิเนียมไปพันรอบหม้อแปลง, ก็ไม่ทำให้การแพร่เกิดความแตกต่างออกไป. จากรูปที่ 3.65 เห็นได้ว่าการย้ายตำแหน่งทรานซิสเตอร์มาใกล้วงจรจับสัญญาณทำให้การแพร่สนามแม่เหล็กลดลง เมื่อเทียบกับการทดลองครั้งที่ 4, โดยเฉพาะช่วง 80-120 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน.

การทดลองครั้งที่ 6 ได้ปรับปรุงตัวเครื่องดังนี้ :

1. ปรับตำแหน่งการวางท้ายเครื่องใหม่ดังรูปที่ 3.66 เพื่อให้สายต่อระหว่าง PCB และ ทรานซิสเตอร์ภาคจับสัญญาณสั้นลง.
2. หุ้มฉนวนสาย 5 เส้น ลงกราวด์.
3. การทดลองใช้แผ่น PCB แบบ 2 หน้าโดยให้ลายวงจรด้านล่างมี ground loop ล้อมรอบ

4. วงจรไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.67, ซึ่งแต่เดิมจะมีบางส่วนของลายวงจรไฟฟ้าที่อยู่รอบนอกไม่ใช่กราวด์ และด้านบนของแผ่นมี ground plate เป็นลายวงจรไฟฟ้าโดยให้เคลือบฉนวนสีเขียวเพื่อป้องกันการลัดวงจรไฟฟ้ากับขาอุปกรณ์ ดังรูปที่ 3.68 (ground loop หมายถึงเส้นทองแดงที่มีลักษณะเป็นแถบวนล้อมรอบลายวงจรไฟฟ้าและต่อเข้ากับสายดินของวงจรไฟฟ้า, ground plate หมายถึงแผ่น โลหะหรือลายทองแดงที่มีลักษณะแผ่นและต่อเข้ากับสายดินของวงจรไฟฟ้า).

5. การเปลี่ยนแผ่น PCB เป็นแบบหน้าเดียวที่มี ground loop อยู่รอบแผ่น PCB ดังรูปที่ 3.68.

6. การสลับสายของหัวนวดจากเดิมที่สายสัญญาณไปหัวนวด 2 จะต่อเข้ากับไฟบวก จะย้ายไปต่อกับสายกราวด์แทน ดังลูกศรที่แสดงในรูปที่ 3.69.

7. การถอดสายสัญญาณ 5 เส้นออก.

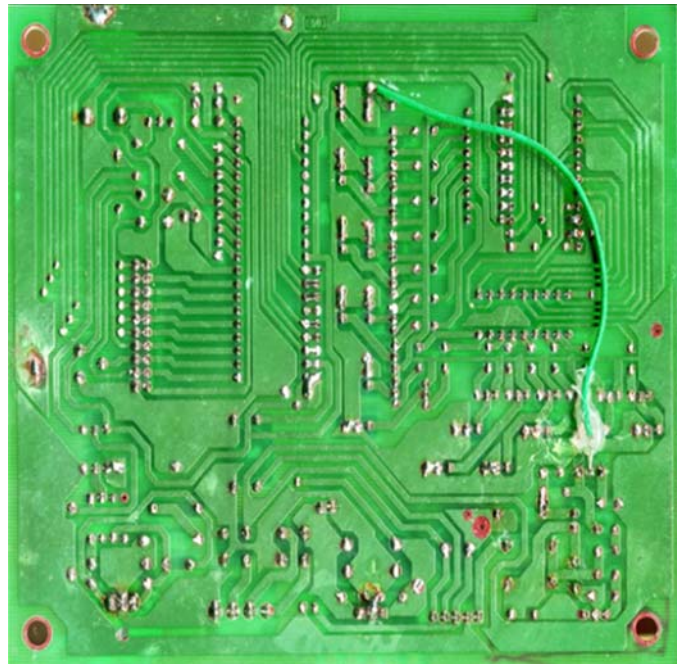
8. การถอดสายแพรที่ต่อไปยัง PCB ภาครับข้อมูลหรือ panel.

9. การตั้งค่าความเข้มของคลื่น 1.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเป็น 0.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.

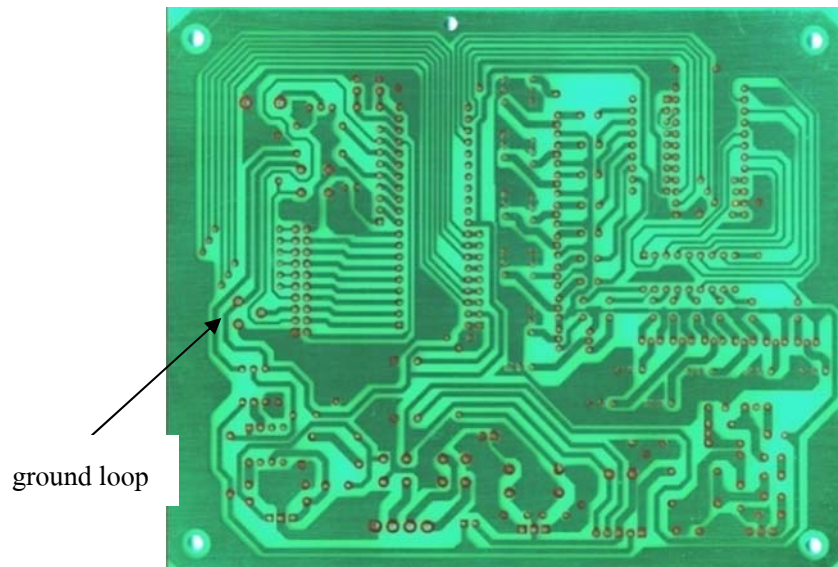
จากรูปที่ 3.70 ผลการทดลองพบว่า การใส่แผ่น PCB แบบ 2 หน้าไม่ได้ทำให้การแพร่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าออกจากเครื่องลดลง ทั้งในโหมด stand-by และ โหมดการส่งคลื่น ดังแสดงในกราฟรูปที่ 3.71. ทั้งนี้ นำมาจากการต่อสายกราวด์เข้ากับหม้อแปลงด้วยวิธีชันหางปลาแทนการเชื่อม. แต่เมื่อเชื่อมสายกราวด์เข้ากับตัวโครงของหม้อแปลงและทำการเปลี่ยนแผ่น PCB แบบ 2 หน้าออกและนำแผ่น PCB แบบหน้าเดียวที่ได้ปรับปรุงในรูปที่ 3.67 ใส่แทน, พบว่า กราฟในโหมด stand-by จะได้ผลเช่นเดียวกับแผ่น PCB แบบ 2 หน้า, แต่ทำให้ความถี่ 49 และ 59 ลดลง. แต่ในโหมดการส่งคลื่น จะพบว่า การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างดงามดังแสดงในรูปที่ 3.71, สามารถการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงต่ำกว่า 100 เมกะเฮิร์ตซ์ได้อย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 3.70, ยกเว้นช่วงความถี่ 36 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ยังมีค่าเกินมาตรฐาน. เมื่อทำการถอดสายแพรที่ส่งไปยังแผ่น PCB ภาครับคำสั่งและแสดงผล หรือแผ่นหน้าจอ จะทำให้หน้าจอไม่แสดงผล. พบว่า การแพร่กระจายของแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ขึ้นไป ลดลงจนเรียบ ซึ่งสรุปได้ว่า การแพร่กระจายในช่วงความถี่สูงนี้มาจากส่วนของสายแพรและแผ่น PCB ของหน้าจอเครื่อง ดังแสดงในรูปที่ 3.72.



รูปที่ 3.66 ตำแหน่งหม้อแปลงไฟและทรานซิสเตอร์ที่ได้จัดวางตำแหน่งใหม่ภายในและด้านหลังเครื่อง.

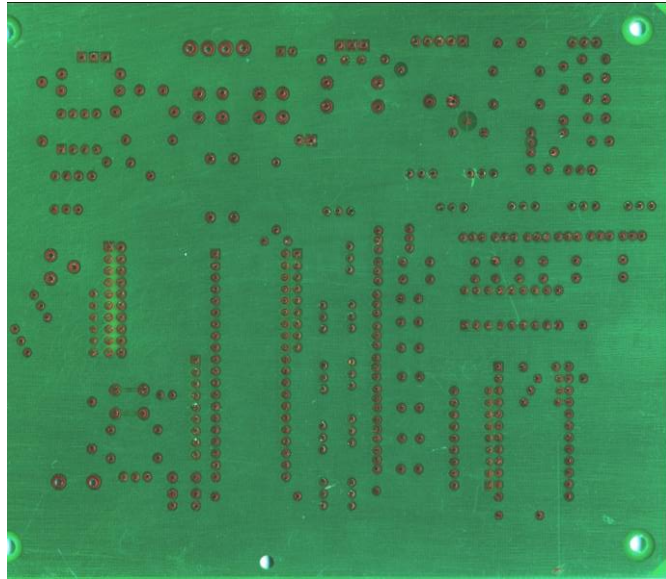


ก) วงจรก่อนการปรับปรุง

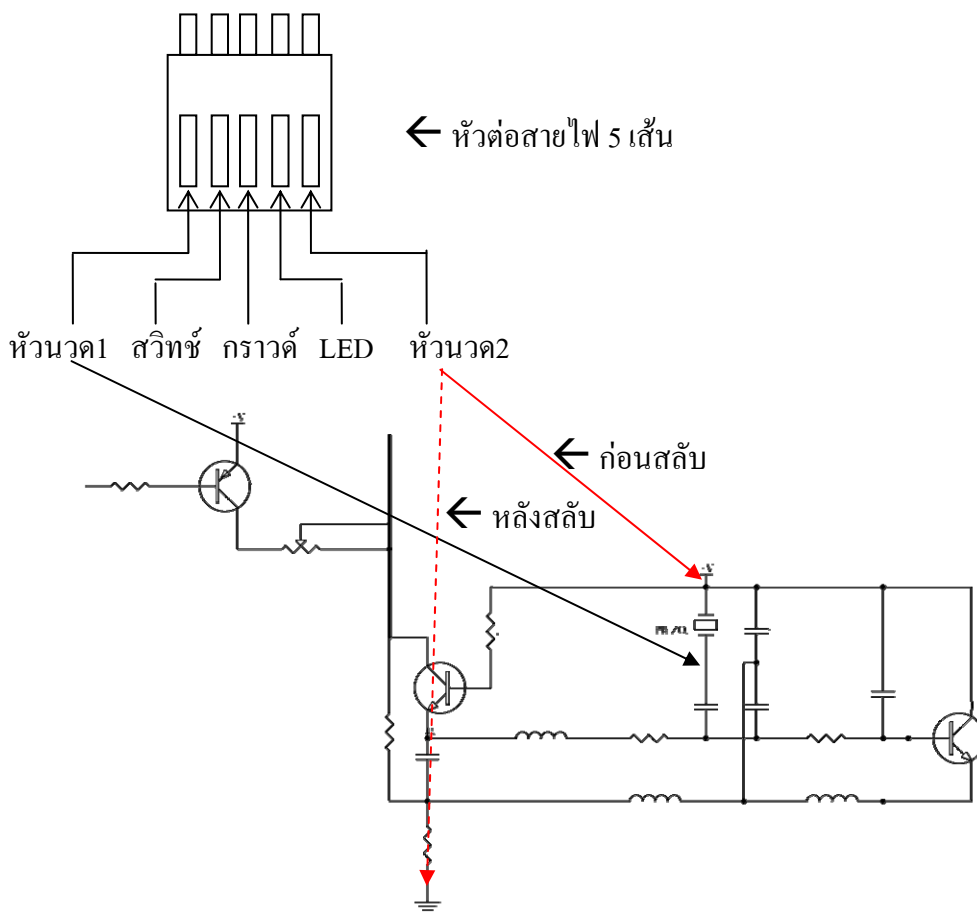


ข) วงจรหลังการปรับปรุง

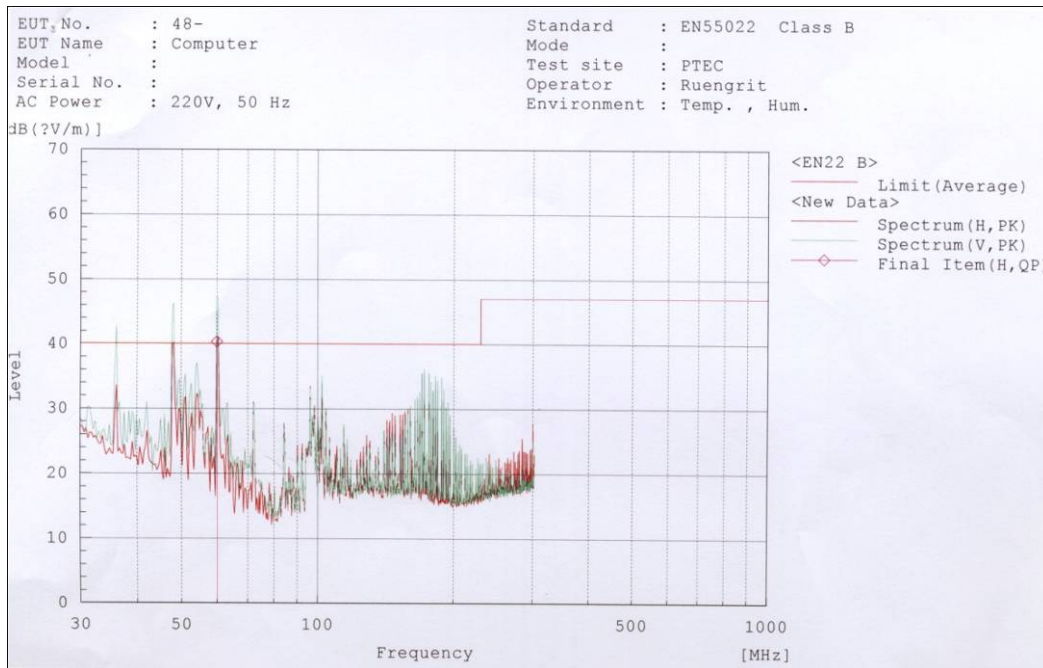
รูปที่ 3.67. ลายวงจรก่อน และหลังการปรับปรุงให้มีลายทองแดงวนล้อมรอบ.



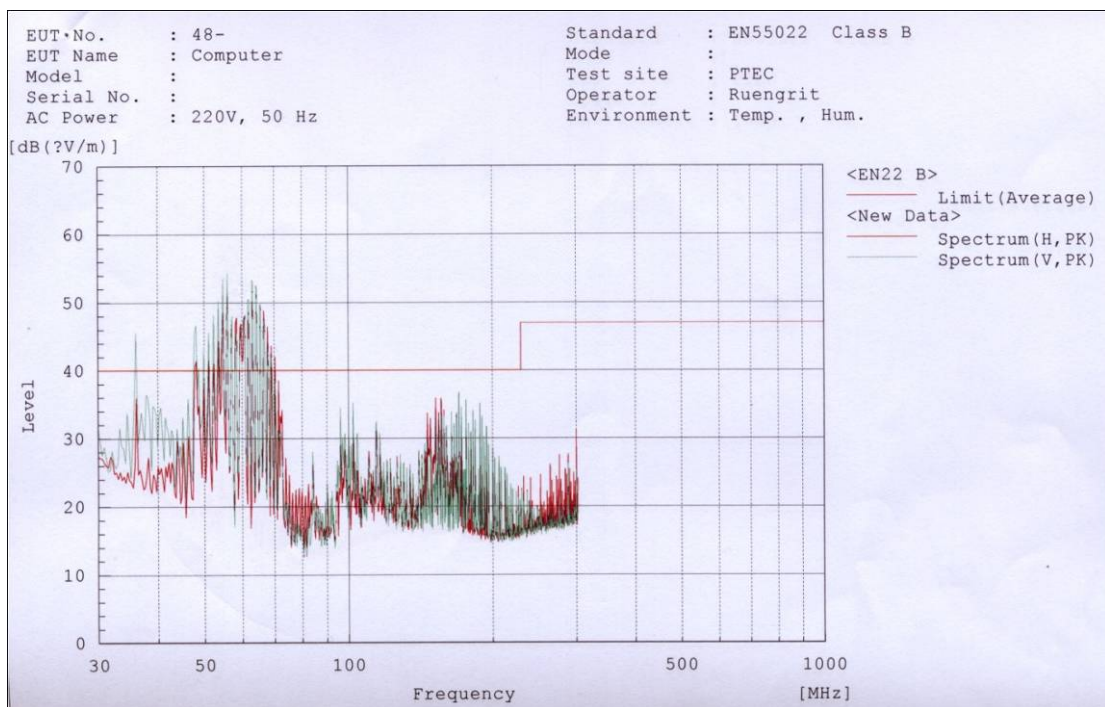
รูปที่ 3.68. ลายวงจรไฟฟ้าด้านบนของแผ่นที่มีลายทองแดงทั้งแผ่นต่อเข้ากับสายกราวด์ และเคลือบด้วยสารพลาสติกสีเขียว.



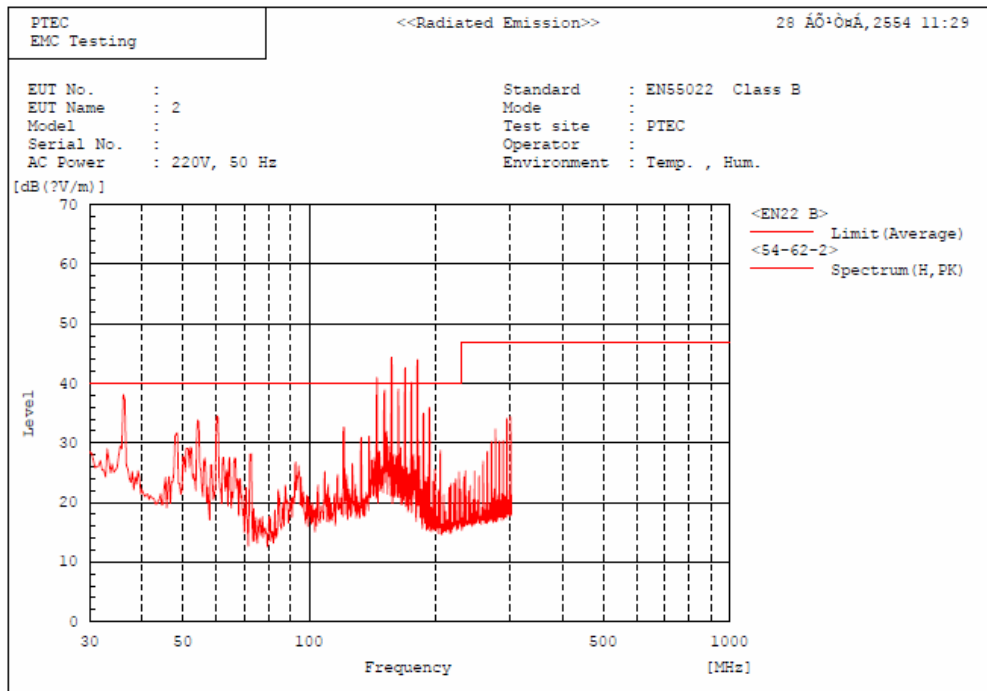
รูปที่ 3.69. การสลับสายสัญญาณไฟฟ้าของหัวนวด.



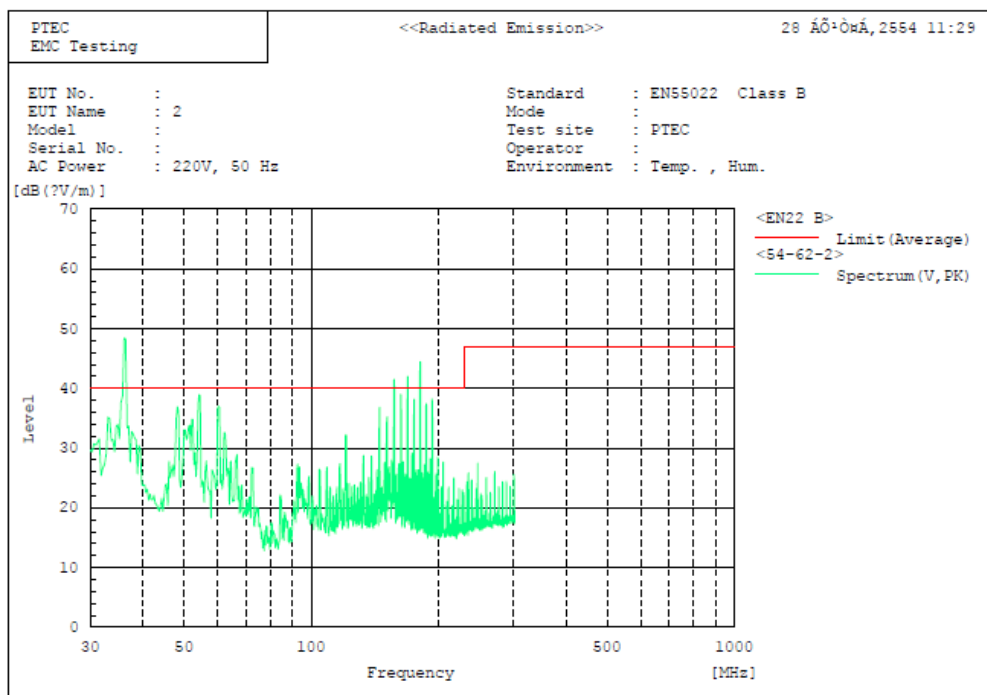
รูปที่ 3.70 กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนนอนของเครื่องวัดที่ใช้แผ่น PCB แบบ 2 หน้าในโหมด stand-by.



รูปที่ 3.71 กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนนอนและแนวตั้งของเครื่องวัดที่ใช้แผ่น PCB แบบ 2 หน้าในโหมดส่งคลื่น.

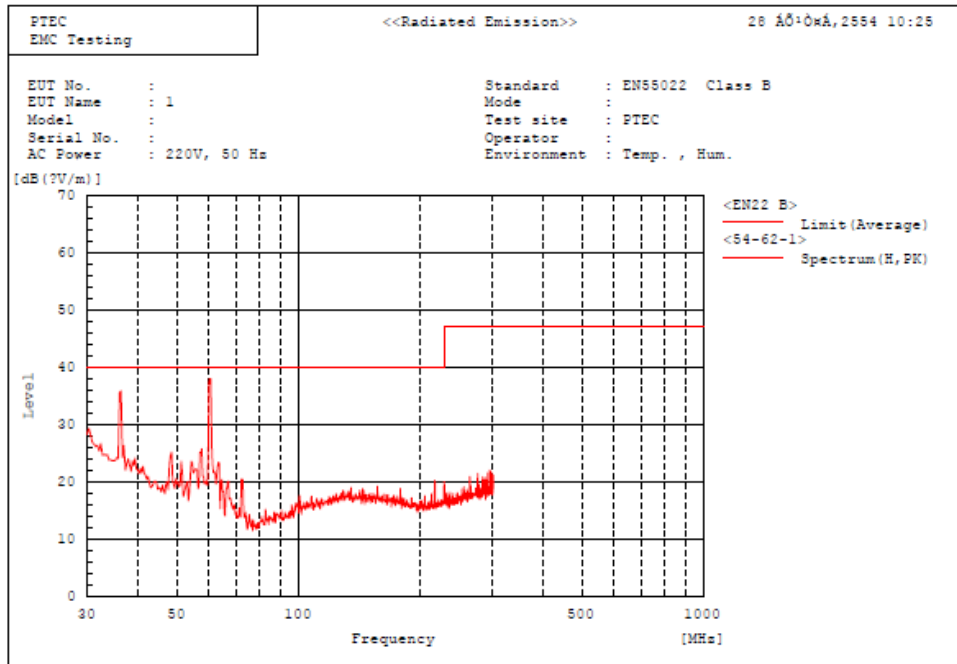


ก) กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนนอน

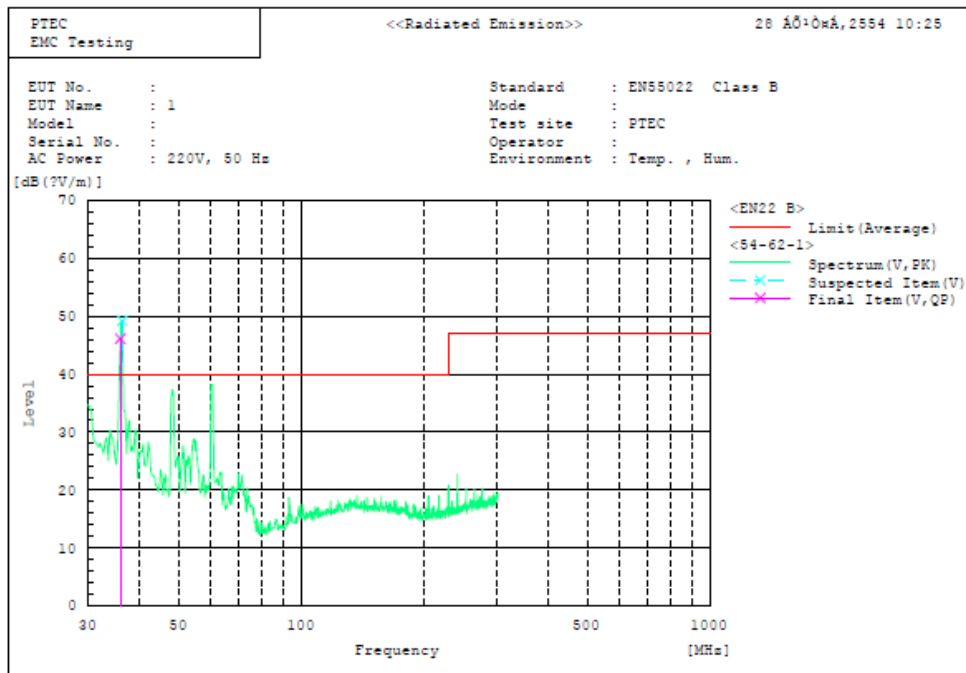


ข) กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้ง

รูปที่ 3.72 กราฟสนามแม่เหล็กแนวนอนและแนวตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องในโหมดส่งคลื่น 1.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.



ก) กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนนอน

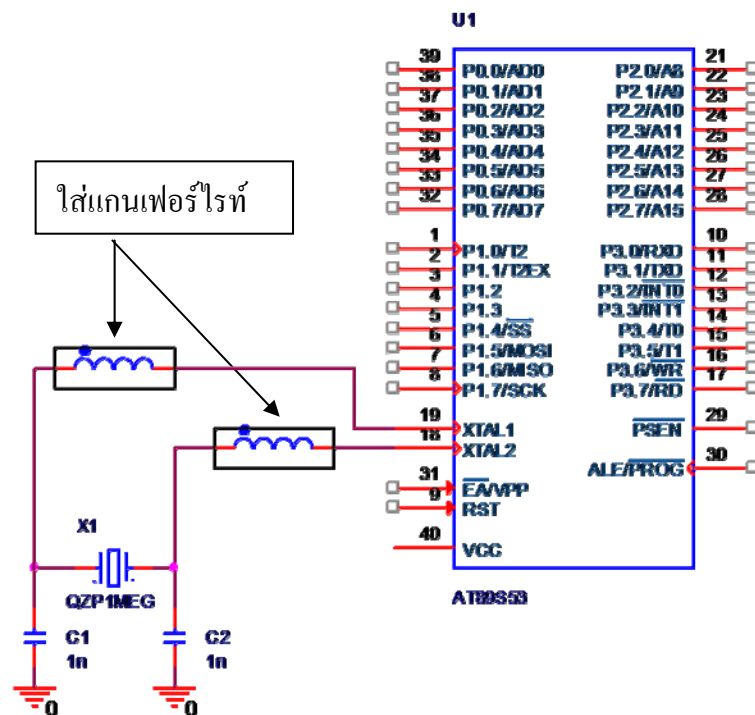


ค) กราฟสนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้ง

รูปที่ 3.73. กราฟสนามแม่เหล็กแนวนอนและแนวตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องในโหมด stand-by.

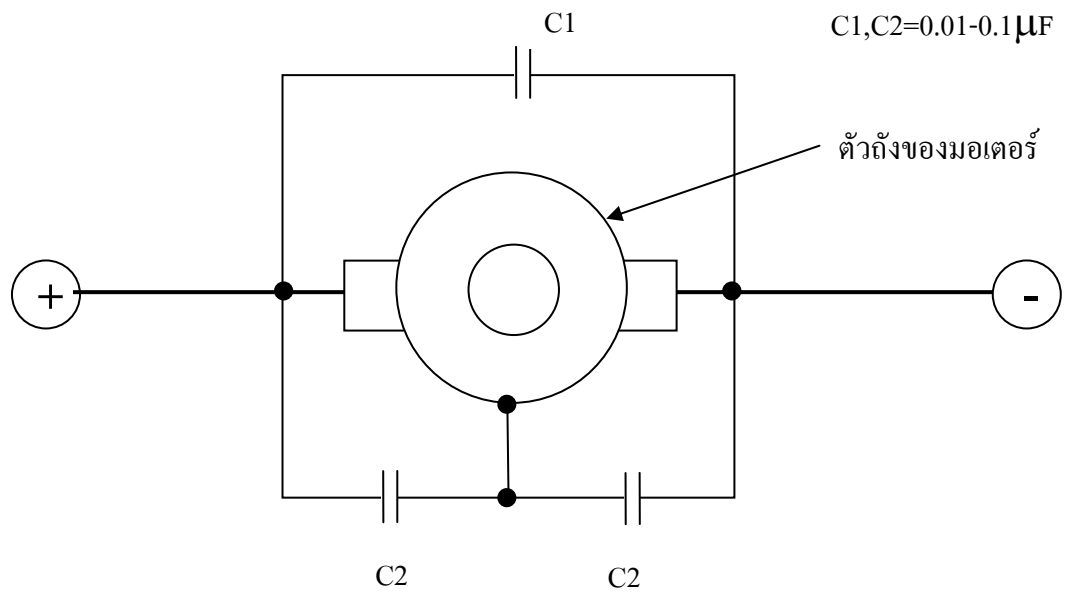
การให้คำปรึกษาของผู้เชี่ยวชาญ ดร. ไกรสร อัญชสิทธิ์พันธุ์ ผู้อำนวยการ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ได้พิจารณาจากการแพร่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกมาในแนวตั้งของเครื่องนวดกายภาพบำบัดที่ความถี่ 36, 49 และ 63 เมกะเฮิร์ตซ์ ไว้ดังนี้ :

1. ลักษณะคลื่นที่ออกมาจากความถี่ฮาร์โมนิกส์ของสัญญาณนาฬิกาของวงจรควบคุมที่ใช้ผลึกคริสตัล ความถี่ 12 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งใกล้เคียงกับจำนวนเท่าหรือเป็นฮาร์โมนิกส์ที่ 3, 4 และ 5.
2. ในการต่อสายไฟเพื่อทำให้ส่วนที่เป็นโลหะลงกราวด์ต่าง ๆ พบว่าภายในเครื่องมีสายไฟที่มีความยาวอยู่เป็นจำนวนมาก ควรลดให้มีความสั้นเท่าที่ทำได้ หรือใช้การวางลง ground plate จะดีกว่า.
3. ให้ต่อขาที่เป็น center tap หรือขาที่เป็นสายกราวด์ของหม้อแปลงลงกราวด์ของเครื่องด้วย.
4. การใช้แกนเฟอร์ไรต์ที่เป็นลักษณะดังรูป ต่อระหว่างขาคริสตัลกับของไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้ง 2 ด้าน เพื่อลดฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้น.



รูปที่ 3.74. ตำแหน่งภายในแผงผังวงจรไฟฟ้าที่ใส่แกนเฟอร์ไรต์เพิ่มเติม เพื่อลดทอนการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.

5. หากภายในเครื่องมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า เช่น พัดลมระบายความร้อนต้องพันสายทั้งสองเส้นให้เป็นเกลียว เพื่อลดการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือจะใช้ตัวเก็บประจุต่อ เพื่อลดปริมาณการแผ่รังสีของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.66, อาจจะใช้การต่อแบบเฉพาะ C1 หรือต่อแบบ C1 และ C2 ร่วมกัน.

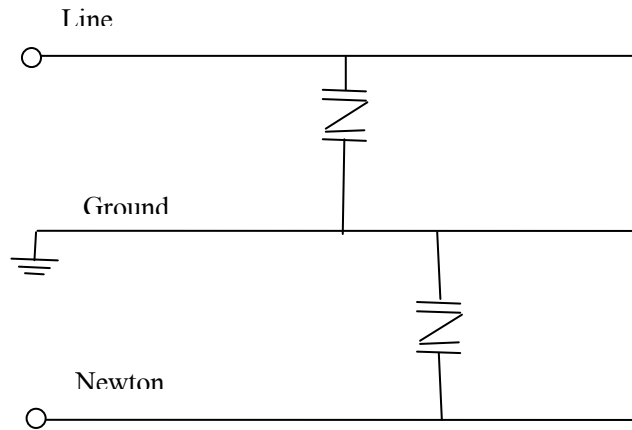


รูปที่ 3.75. การต่อเก็บประจุเข้ากับตัวถังของมอเตอร์เพื่อลดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.

6. ในส่วนสายไฟที่ทำการส่งสัญญาณระหว่างวงจรจับกับทรานซิสเตอร์ให้ทำการใช้สายชิลด์ (shield) โดยส่วนที่เป็นสายไฟในตำแหน่งที่พันหุ้มสายต้องต่อลงกราวด์ทั้งหัวและท้าย, เพื่อป้องกันเป็นสายอากาศให้กับความถี่ที่ไม่ต้องการ. หากต่อเฉพาะด้านใดด้านหนึ่งจะเป็นการเพิ่มสายส่งทำให้การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้ามากขึ้น.

7. การทำแผ่นกราวด์ หรือ ground plate ต้องให้ครอบคลุมอุปกรณ์ทั้งหมด อาจใช้วิธีทำแผ่นเป็นรูปตัวแอลเพื่อให้แนบไปถึงส่วนที่เป็น connector ของสายต่างๆ ที่ต่อออกนอกตัวเครื่อง.

8. การลดสัญญาณ surge ในสายไฟที่ทำให้เครื่องทำงานผิดพลาดได้ ต้องใช้อุปกรณ์ Metal oxide varistor (MOV) หรือ Gas discharge tube มาต่อดังรูป. ในบางครั้งขนาดของยอดพีกของ surge อาจสูงถึง 4 กิโลโวลต์ ซึ่ง MOV จะช่วยตัวสัญญาณให้มีแรงดันเหลือแค่ 300-400 โวลต์, เมื่อผ่านหม้อแปลงทำให้ไม่มีปัญหาต่อวงจรไฟฟ้าภายในเครื่อง.

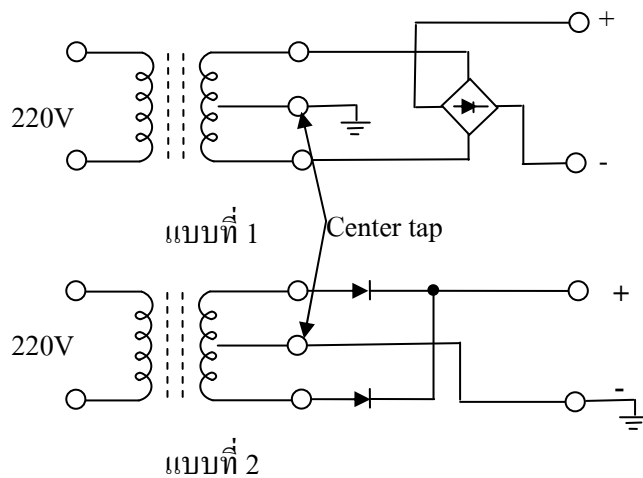


รูปที่ 3.76. การต่ออุปกรณ์ MOV เพื่อลดสัญญาณ surge ในสายไฟ.

9. การวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบง่าย ต้องใช้ร่วมกับเครื่องวัดสเปกตรัมหรือเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าที่ระดับ 1 กิกะเฮิรตซ์. แต่เครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าจะดูได้เห็นเฉพาะรูปคลื่นไม่สามารถบอกความถี่ได้ เนื่องจากเป็นการวัดสัญญาณในลักษณะ time domain.

การทดลองครั้งที่ 8

1. ได้ทำการปรับวงจร โดย นำตัวคริสตัลมาเชื่อมให้ติดกับขาไมโครคอนโทรลเลอร์ แทนการเชื่อมบน PCB.
2. ปรับให้ขา center tap ของหม้อแปลงมีการต่อลงวงจรเป็น 2 รูปแบบได้แก่, แบบที่ 1 ดังรูปที่ 3.77, จากเดิมที่ไม่ได้ต่อลงกราวด์ เป็นการต่อขา center tap ลงกราวด์. แบบที่ 2 เป็นการเปลี่ยนรูปแบบการเรกติไฟด้วยใหม่โดยใช้ขา center tap เป็นขาป้อนเข้าไดโอด แทนการใช้ไดโอดบริดจ์โดยที่ด้านสัญญาณไฟลบจะถูกนำไปต่อลงกราวด์ด้วย.



รูปที่ 3.77 การต่อขา center tap ของหม้อแปลง แบบที่ 1 และแบบที่ 2

3. นำตัวไมโครคอนโทรลเลอร์มาเชื่อมขาคริสตอลกับคาปาซิเตอร์แยกออกจากวงจรเพื่อใช้เสียบแทนไมโครคอนโทรลเลอร์ภายใน.

จากผลการวิเคราะห์ในการทดลองครั้งนี้ จะให้ผลเช่นเดียวกับการทดลองครั้งที่ 6.

การทดลองครั้งที่ 8 จากคำแนะนำคุณยุทธนา ตันติวิวัฒน์ ผอ.ฝ่ายวิศวกรรม ได้แนะนำให้ทำการแยกวงจรแต่ละภาคออกจากกันเพื่อหาแหล่งกำเนิดก่อน โดยได้แบ่งแผ่นวงจรเดิมออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ วงจรภาค rectifier เพื่อป้องกันไฟฟ้า 5 โวลต์, วงจรภาคควบคุมที่ประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์, ภาค buffer ที่ปรับกระแสไบแอสให้กับภาคขับสัญญาณไฟฟ้าให้กับหัวนวด และภาคขับสัญญาณไฟฟ้าให้กับหัวนวด และยังคงต่อวงจรแสดงผลแบบ LCD แบบเดิมอยู่.

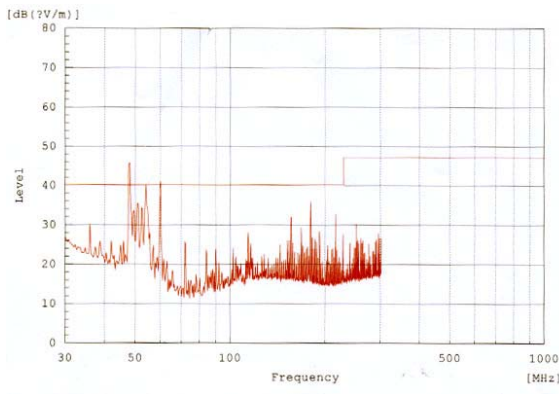
จากการทดลองพบว่า

1. หากต่อวงจรครบทั้ง 4 แผ่น ยังคงพบความเข้ม peak ที่ตำแหน่งเดิมปรากฏอยู่เท่าเดิม ดังรูปที่ 3.78 ก และ 3.79 ก.

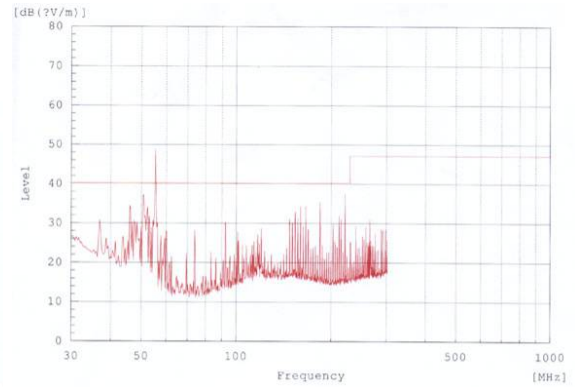
2. ปรับคริสตัล ที่ภาคควบคุม 12 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็น 18 เมกะเฮิร์ตซ์ พบว่า ทำให้ peak ของ Electromagnetic เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย และเมื่อใส่แผ่นวงจรไฟฟ้าเฉพาะภาค rectifier กับวงจรควบคุม ตำแหน่ง peak ของ Electromagnetic ที่พบยังเหมือนเดิมแต่มีค่าลดลง ดังรูป 3.78-3.79.

3. ปรับเปลี่ยนภาค rectifier และหม้อแปลงเป็นชุดแปลงไฟ 5 โวลต์แบบ switching พบว่า ไม่ทำให้ peak ของ Electromagnetic เปลี่ยนแปลงไป ดังรูป 3.78 ก และ 3.79 ก เทียบกับรูปที่ 3.80 ก และ 3.81ก.

จึงสรุปได้ว่า แผ่นวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์มีส่วนที่แพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้.

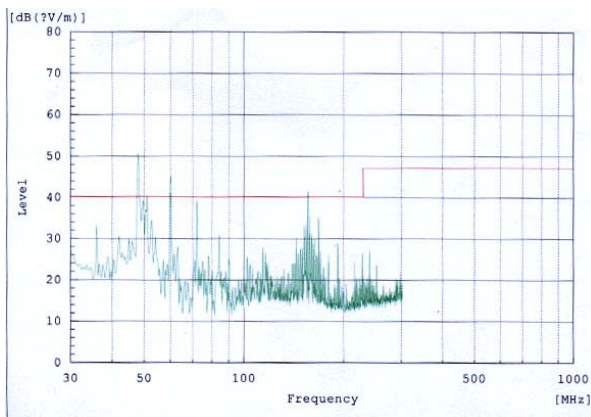


(ก)

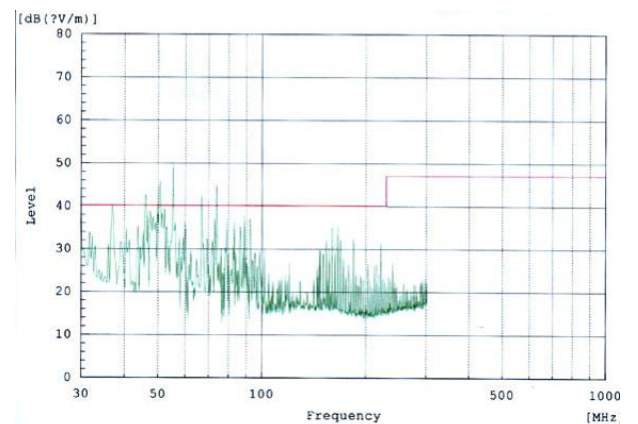


(ข)

รูปที่ 3.78. กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนนอนที่แพร่ออกจากเครื่องในโหมด stand-by โดยรูป ก)ใช้ คริสตัล 12 เมกะเฮิร์ตซ์ ข)ใช้ คริสตัล 18 เมกะเฮิร์ตซ์.

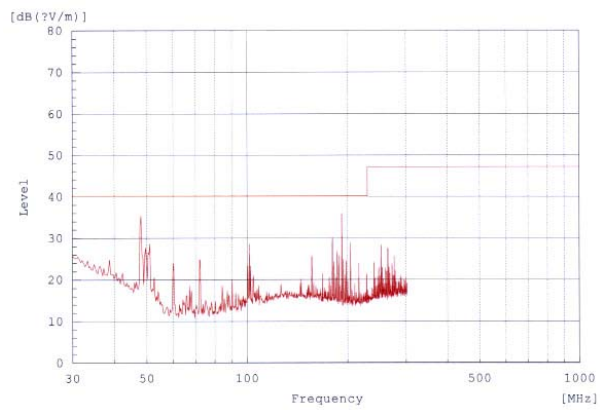


(ก)

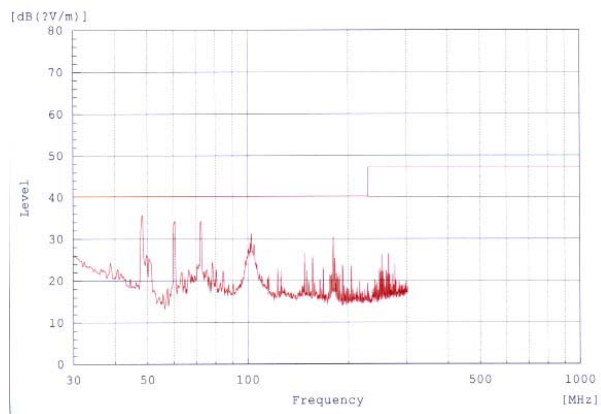


(ข)

รูปที่ 3.79. กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องในโหมด stand-by โดยรูป ก)ใช้ คริสตัล 12 เมกะเฮิร์ตซ์ ข)ใช้ คริสตัล 18 เมกะเฮิร์ตซ์.

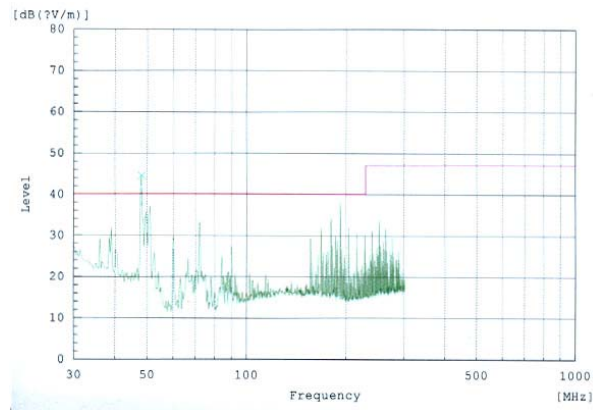


(ก)

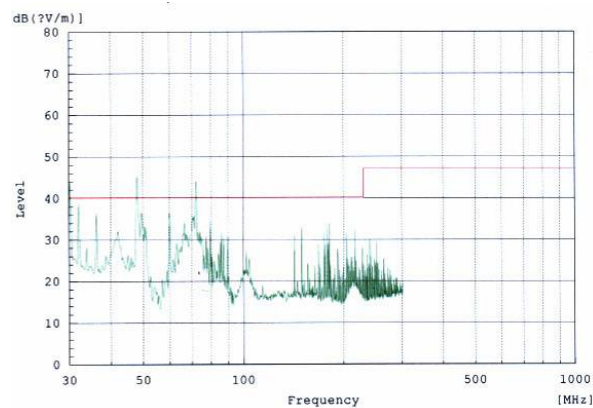


(ข)

รูปที่ 3.80. กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนนอนที่เพอร์ออกจากเครื่องในโหมด stand-by โดยรูป ก)ใช้ เฉพาะวงจรไฟฟ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาคจ่ายไฟ 7805. ข) ใช้ เฉพาะวงจรไฟฟ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาคจ่ายไฟ แบบ switching.



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.81. กราฟสนามแม่เหล็กแนวแกนตั้งที่แพร่ออกจากเครื่องในโหมด stand-by โดยรูป ก) ใช้ เฉพาะวงจรไฟฟ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาคจ่ายไฟ 7805. ข) ใช้ เฉพาะวงจรไฟฟ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ และภาคจ่ายไฟแบบ switching.

3.5 ประเมินความเป็นไปได้ทางเทคนิค

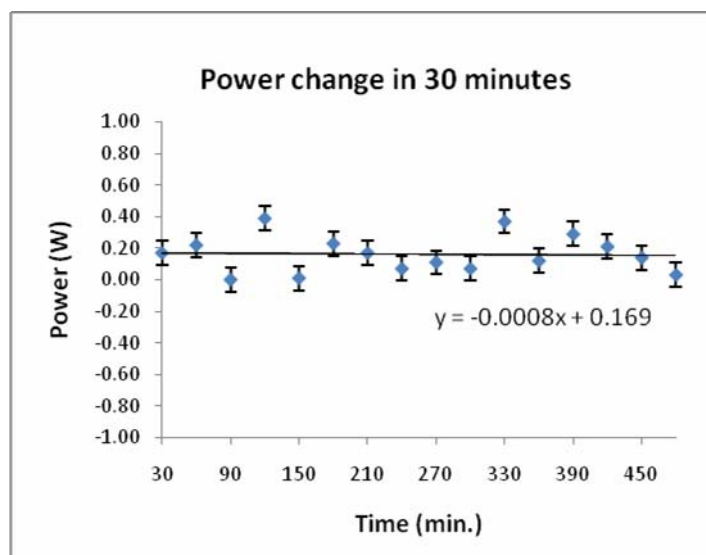
ในการทดสอบประสิทธิภาพของหัวนวดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ได้มีการนำไปทดสอบกับเครื่องทดสอบแรงดันของคลื่นอัลตราซาวด์ของบริษัท Ohmica รุ่น DT10. จึงได้ทำการศึกษากำล้างของคลื่นอัลตราซาวด์ที่เกิดจากหัวนวด เมื่อมีการนำไปใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลานาน. โดยศึกษาจากกำล้างคลื่นอัลตราซาวด์ก่อนและหลังการส่งคลื่นในแบบจำลองครั้งละ 30 นาที และพัก 5 นาที และทำซ้ำจนครบจำนวน 16 ครั้ง หรือระยะเวลารวมเป็น 8 ชั่วโมง. จากนั้น ประเมินค่าความเบี่ยงเบนของกำล้างคลื่นหัวอัลตราซาวด์ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังการปล่อยคลื่นในแต่ละครั้ง. แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง จะใช้ภาชนะที่มีขนาดกันความร้อน. ภายในภาชนะจะเติมด้วยน้ำซึ่งมีค่าอะคลูสติก-อิมพีแดนซ์และค่าความเร็วของคลื่นอัลตราซาวด์ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์. หัวนวดจะถูกติดตั้งไว้เหนือน้ำและให้ปลายหัวนวดจมอยู่ในน้ำ. คลื่นอัลตราซาวด์ที่ออกจากหัว

นวดจะเคลื่อนที่ไปในน้ำจนเกิดความร้อน. ด้วยความร้อนที่เกิดขึ้น สามารถนำมาใช้คำนวณหาพลังงานของคลื่นและในขณะที่ส่งคลื่นจะตรวจวัดการไหลของกระแสไฟฟ้าภายในวงจรไฟฟ้า เพื่อให้แน่ใจว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใส่ส่งให้หัวนวดเป็นค่าที่ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาการทดลอง.

จากการวัดค่ากำลังและกระแสไฟฟ้าของคลื่นอัลตราซาวด์ โดยการขยับและไม่ขยับหัวอัลตราซาวด์จากตำแหน่งเดิม พบว่า การขยับหัวอัลตราซาวด์ไม่ส่งผลต่อกำลังคลื่นอัลตราซาวด์มากนัก ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังที่วัดได้มีค่าประมาณ 5.78 วัตต์ และมีค่าความเบี่ยงเบนไม่เกิน 0.08. ในขณะที่การขยับหัวอัลตราซาวด์จะไปส่งผลมากในค่ากระแส-ไฟฟ้า. โดยค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนของกระแสไฟฟ้าที่ขยับและไม่ขยับหัวอัลตรา-ซาวด์ มีค่าเท่ากับ 484.6 และ 498.3 วัตต์ และ 2.797 และ 6.378 mA ตามลำดับ. เมื่อนำค่าความเบี่ยงเบนที่ได้ไปคำนวณหาจำนวนการทำซ้ำ เพื่อให้ได้ค่าความแม่นยำในการวัดคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่า มีค่าประมาณ 2.5, ซึ่งหมายความว่า ต้องทำการทดสอบค่าดังกล่าวทั้งสิ้น 3 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำ.

การขยับ หมายถึง การถอดหัวนวดออกจากเครื่อง และทำการติดตั้งหัวนวดบนที่จับใหม่ ก่อนการวัดค่าซ้ำ.

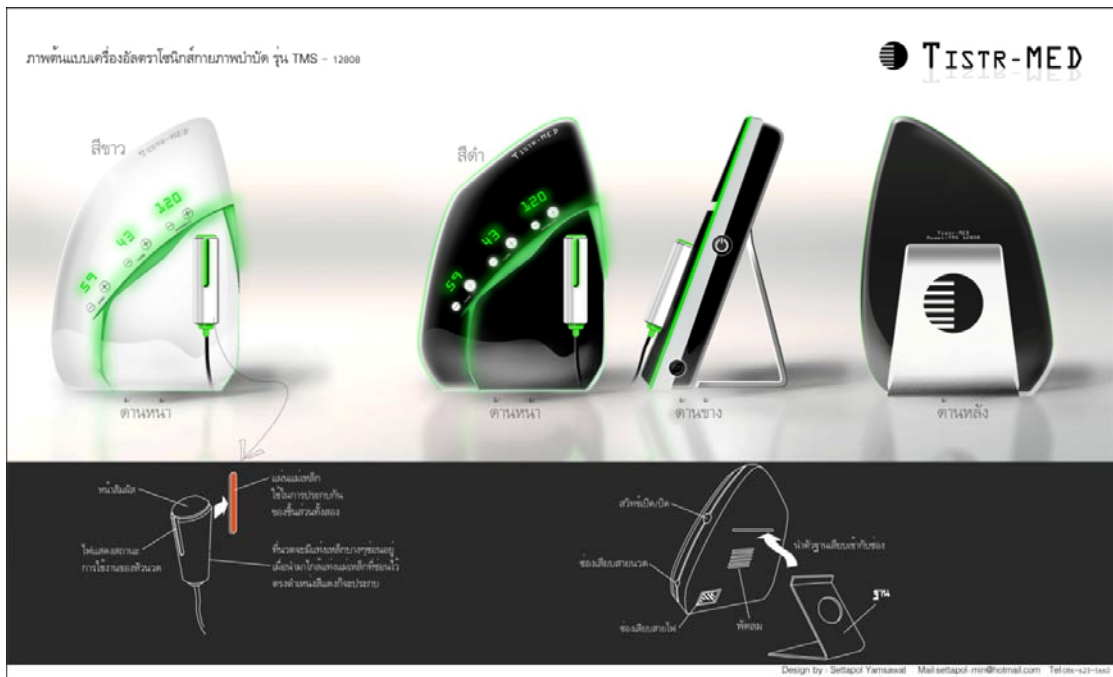
การไม่ขยับ หมายถึง การติดตั้งหัวนวดไว้บนที่จับตลอดการวัดค่าซ้ำ.



รูปที่ 3.82. ค่ากำลังคลื่นหลังการเปิดเครื่องนานเป็นระยะเวลาต่างๆ.

3.6 การพัฒนารูปแบบตัวเครื่อง

การพัฒนาต้นแบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่ ได้ดำเนินการออกแบบรูปร่างภายนอกเครื่อง ดังรูปที่ 3.83 และได้สร้างเครื่องต้นแบบดังกล่าวแสดง ดังรูป 3.84.



รูปที่ 3.83. แบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่ แบบที่ 1.



รูปที่ 3.84. แบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่ แบบที่ 2.



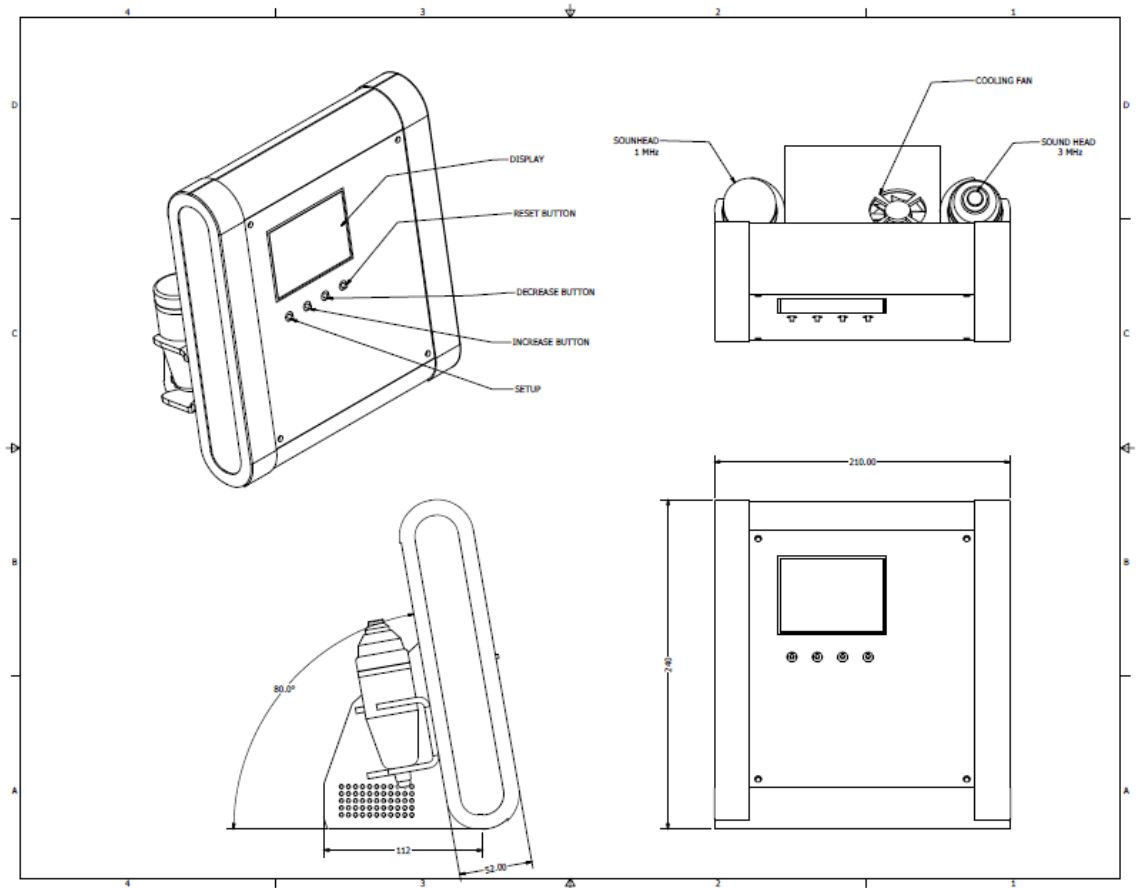
ด้านหน้า

ด้านหลัง



รูปที่ 3.85. ต้นแบบเครื่องนวดกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่.

จากต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ ได้นำมาออกแบบในโปรแกรม CAD เพื่อนำไปสร้างเป็นเครื่องนวดกระดูกสันหลังเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่. รายละเอียดโครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 3.86 และได้สร้างเป็นต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริงดังรูป 3.87.



รูปที่ 3.86. แบบเครื่องนวดกระดูกสันหลังเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่.



รูปที่ 3.87. ต้นแบบเครื่องวัดกระตุ่นกล้ามเนื้อด้วยอัลตราซาวด์ชนิด 2 ความถี่หลังการปรับปรุง.

4. สรุปผลการทดลอง

โครงการพัฒนาเครื่องกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์ชนิด 2 ความถี่ ได้มีแบ่งการวิจัยเป็น 4 ส่วน ได้แก่

1. การพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก เพื่อนำไปพัฒนาเครื่องกระตุ้นกล้ามเนื้อด้วยคลื่นอัลตราโซนิคส์ชนิด 2 ความถี่ ซึ่งผลที่ได้จากการพัฒนาสารเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก ดังกล่าวสามารถสรุปดังนี้ :

1.1 การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 1-5 โมลเปอร์เซ็นต์ ลงในผง PZT (Zr/Ti=53/47) นั้น ส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าของชิ้นงาน PZT มากเกินไป ทำให้ไม่สามารถทำขั้วได้ เนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ให้แก่ชิ้นงานตกลงขณะทำขั้วไฟฟ้า.

1.2 การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) ในปริมาณ 0.1-0.7 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน PZT (Zr/Ti 52/48) นั้น พบว่า ปริมาณ MnO_2 0.1% จะช่วยปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้าได้ดี โดยมี $d_{33} = 312$ pC/N , $K = 1129$ และค่า $Q_m = 646$ ซึ่งสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณการเติม MnO_2 ในสูตรอื่นๆ.

1.3 การเติมแมงกานีสไดออกไซด์ในปริมาณ 0.1- 0.3 โมลเปอร์เซ็นต์ ใน Ba และ Fe doped PZT (Zr/Ti = 52/48) นั้น พบว่า ปริมาณ MnO_2 0.1% ให้ค่าทางไฟฟ้าที่ดีขึ้น คือ มี $d_{33} = 274$ pC/N , $K = 1129$ และ Q_m ประมาณ 967.

1.4 การศึกษาความหนาของชิ้นงานเพียโซอิเล็กทริกต่อความถี่เรโซแนนซ์ที่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์นั้น พบว่า ความหนาที่ 0.7 มิลลิเมตร เป็นความหนาที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาหัวนำคลื่นอัลตราซาวด์เพื่อใช้งานที่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์.

2. การพัฒนาชิ้นชุดทรานสดิวเซอร์ ที่เป็นหัวนำคลื่นอัลตราซาวด์ จำนวน 2 ชุด ได้แก่ ชุดหัวนำคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยมีส่วนประกอบหลักคือ ชิ้นเพียโซอิเล็กทริกที่ได้จากการพัฒนาในส่วนแรกนำมาประกอบกับหัวนำคลื่นอะลูมิเนียมที่ได้ออกแบบให้มีรูปทรงเหมาะสมสำหรับการส่งคลื่นในแต่ละความถี่ ส่วนค้ำจับที่ทำด้วยพลาสติก และแผ่นวงจรไฟฟ้าภายในที่ทำหน้าที่นำสัญญาณไฟฟ้าไปยังชิ้นเพียโซอิเล็กทริกเซรามิก.

3. การพัฒนาส่วนวงจรไฟฟ้า แบ่งการพัฒนาวงจรตามหน้าที่การทำงานได้ดังนี้ การพัฒนาส่วนควบคุมการทำงานและการแสดงผล ทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้และการประมวลผล เพื่อควบคุมสัญญาณไฟฟ้าด้วยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ร่วมกับจอแสดงผล LCD การพัฒนาวงจรขับสัญญาณไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ส่งคลื่นสัญญาณไฟฟ้าความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3

เมกะเฮิรตซ์ ให้กับหัวนวดอัลตราซาวด์ทั้ง 2 ชุด และชุดตรวจสอบการสัมผัสหัวนวดกับร่างกายผู้
บำบัด (contact sensor).

4. การประเมินประสิทธิภาพการส่งคลื่นกรณีใช้หัวนวดอัลตราซาวด์เป็นระยะเวลานาน ได้
ดำเนินการทดสอบเฉพาะหัวนวดอัลตราซาวด์ 1 เมกะเฮิรตซ์เนื่องจาก หัวนวดอัลตราซาวด์ 3
เมกะเฮิรตซ์กำเนิดคลื่นมีความเข้ม 0.5 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรและมีขนาดเล็ก ทำให้ไม่สามารถทำการ
ตรวจสอบได้แน่นอน สำหรับหัวนวดอัลตราซาวด์ 1 เมกะเฮิรตซ์ได้ทำการทดสอบที่กำลังคลื่น 1.5
วัตต์ต่อตารางเซนติเมตรเพื่อให้ได้ค่าความแม่นยำในการวัดคลื่นอัลตราซาวด์ พบว่า ความเข้มของ
คลื่นอัลตราซาวด์มีค่าความเบี่ยงเบนไม่เกิน 0.08 วัตต์ต่อตารางเซนติเมตร.

5. การทดสอบการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์
อิเล็กทรอนิกส์ภายในเครื่องเพื่อไม่ให้ไปรบกวนเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่นๆ เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน
ของเครื่องมือทางการแพทย์ในหัวข้อของ EN-60601-2 ทางด้าน EMC (electro-magnetic
compatibility) 9 โดยในโครงการได้ดำเนินการทดสอบทั้งหมด 9 ครั้ง เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลการ
แพร่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่า ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์มีผลการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
ลายทองแดงที่มีลักษณะวนเป็นลูปบนแผ่นวงจรไฟฟ้าจะมีผลการกระจายคลื่นที่เกิด
ไมโครคอนโทรลเลอร์ และการควบคุมการแพร่ด้วยการทำล่องโลหะครอบลายวงจรจะมีส่วนช่วย
ลดทอนคลื่นได้บางส่วน ทั้งนี้วิธีที่ดีที่สุดคือการเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีการแพร่กระจาย
คลื่นต่ำ และออกแบบลายทองแดงของแผ่นวงจรไฟฟ้าไม่ให้เกิด ground loop หรือไม่ให้เกิดการวน
เป็นลูปของเส้นลายทองแดงที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าความถี่สูง.

6. การพัฒนาตัวเครื่องโดยมีการดำเนินการออกแบบ และสร้างต้นแบบ ก่อนนำไป
ออกแบบเชิงวิศวกรรมและนำไปสร้างเป็นเครื่องต้นแบบ โดยดำเนินการสร้างต้นแบบที่มีลักษณะ
ของเครื่องดังนี้ :

6.1 Parameter Selector :- ปุ่มกดเลือกตั้งค่าของการส่งคลื่นอัลตราซาวด์ (รูปแบบ/
เวลา/ความเข้ม)

6.2 Parameter Set Display :- ใ้แสดงสถานะการตั้งค่าการส่งคลื่นอัลตราซาวด์
หมายเลข 2

- Mode :- ใ้แสดงสถานะการตั้งค่ารูปแบบการส่งคลื่นอัลตราซาวด์
- Time :- ใ้แสดงสถานะการตั้งค่าระยะเวลาการส่งคลื่นอัลตราซาวด์
- Intensity :- ใ้แสดงสถานะการตั้งค่าความเข้มของคลื่นอัลตราซาวด์

6.3 Decrease Value Set :- ปุ่มปรับลดค่าการส่งคลื่น (รูปแบบ/เวลา/ความเข้ม)

6.4 Increase Value Set :- ปุ่มปรับเพิ่มค่าการส่งคลื่น (รูปแบบ/เวลา/ความเข้ม)

6.5 Treatment Parameter Display :- จอแสดงรูปแบบ/เวลา/ความเข้มที่ใช้ในการบำบัด เป็นระบบตัวเลข

6.6 ปุ่ม Reset :- ปุ่มตั้งค่าการส่งคลื่นกลับสู่ค่าเดิม(Default) คือ รูปแบบการส่งคลื่น แบบต่อเนื่อง (Continuous) เวลาการบำบัด 5 นาที และความเข้ม (Intensity) 1.5 W/cm^2 สำหรับหัวนวดอัลตราซาวด์ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 0.5 W/cm^2 สำหรับหัวนวดอัลตราซาวด์ 3 เมกะเฮิร์ตซ์

6.7 ใช้ไฟ 220 V, 50 Hz

6.8 Fuse :- ฟิวส์ขนาด 1 แอมแปร์ สำหรับตัดกระแสไฟฟ้า เมื่อกระแสเกิน

6.9 Main Power ON/OFF :- สวิตช์หลักใช้ เปิด/ปิด การทำงานของเครื่อง

6.10 Probe Connector :- ช่องเสียบสายไฟของหัวอัลตราซาวด์เข้ากับตัวเครื่องจำนวน 2 จุด

6.11 ลักษณะตัวเครื่อง โครงสร้างของเครื่องทำด้วยพลาสติกชนิด PVC เคลือบสี

6.12 หัวนวดอัลตราซาวด์ ขนาดความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาดพื้นที่ หน้าตัด 8.8 cm^2 จำนวน 1 หัว

- ความเข้มสูงสุด (แบบคลื่นต่อเนื่อง) $1.5 \text{ W/cm}^2 (\pm 10\%)$ หัวนวดอัลตราซาวด์ ขนาดความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาดพื้นที่ หน้าตัด 0.75 cm^2 จำนวน 1 หัว

- ความเข้มสูงสุด (แบบคลื่นต่อเนื่อง) $0.5 \text{ W/cm}^2 (\pm 10\%)$

6.13 ขนาดของเครื่อง : กว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 210 x 120 x 240 มิลลิเมตร น้ำหนัก

2.7 กิโลกรัม

6.14 คลื่นอัลตราซาวด์ที่ส่งออกมามี 2 แบบ คือ

- แบบคลื่นต่อเนื่อง (Continuous)

- แบบคลื่นเป็นช่วง (Pulse)

6.15 คาบเวลาของสัญญาณคลื่น (Pulse Period) :- 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 และ 200 milisec. ($\pm 2\%$)

6.16 ความกว้างของสัญญาณคลื่น (Pulse Width) :- 20 milisec. ($\pm 2\%$)

6.17 เวลาที่ใช้ในการรักษานานที่สุด :- 30 นาที ($\pm 2\%$)

6.18 เมื่อหมดเวลาในการรักษา จะมีเสียงสัญญาณเตือนดังประมาณ 2 วินาที

6.19 มีระบบควบคุมส่งผ่านคลื่นของหัวอัลตราซาวด์ แสดงการส่งผ่านของคลื่นที่หัวอัลตราซาวด์ โดยดูจากไฟที่ด้ามจับ ไฟเป็นสีเขียว แสดงว่าหัวอัลตราซาวด์กำลังทำงาน ทั้งนี้เพื่อ

ป้องกันมิให้หัวอัตรชาวด์ถูกทำลายเนื่องจากการส่งผ่านคลื่น โดยไม่มีตัวกลางรองรับ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่น.

5. เอกสารอ้างอิง

- Lundeberg, T. "A comparative study of continuous ultrasound, placebo ultrasound and rest in epicondylalgia", *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine* 20, p.99-101, 1988
- Zipparo, M.J., *et. Al.* 1996 "Piezoceramic for High frequency (50 to 100 เมกะเฮิรตซ์) Single Element Imaging Transducer", *IEEE Ultrasonic Symposium*, p.929-934.
- Lockwood, G.R.,*et.al.*, "Fabrication of High Frequency Spherically Shaped Ceramic Transducer", *IEEE Trans. Ultrasonic Ferroelectric Freq. Contr.*, 41,2, p.231-5, 1994.
- Stewart, C, Bushong, Benjamin R. Archer. 1996 *Diagnostic Ultrasound Physics, Biology and Instrumentation.*
- He, L. X., Li, C. E., *J. Mater. Sci.*, Vol. 35, p. 2477, 2000.
- Lee, S.-Mi., Lee, S-Ho, C.-Bun Yoon, H.-Ee Kim and K.-Woo Lee, "Low-temperature sintering of MnO₂-doped PZT-PZN piezoelectric ceramics", *J. Electroceram*, Vol. 18, pp.311-315, 2007.
- Guiffard, B., *et al*, "Influence of donor co-doping by niobium or fluorine on the conductivity of Mn doped and Mg doped PZT ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 25, p. 2487-2490, 2005.
- Michale G. Miller, "Intramuscular temperature differences between the mid-point and peripheral effective radiating area with ultrasound" *Journal of Sports Science and Medicine*, vol. 7, p. 286-291, 2008
- David Levine "Effects of 3.3-เมกะเฮิรตซ์ Ultrasound on Caudal Thigh Muscle Temperature in Dogs" *Veterinary Surgery* 30 : 170-174, 2001
- Miclea, C., *et.al.*, "Effect of lead content on the structure and piezoelectric properties of hard type lead titanate-zirconate ceramics", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 27, p. 4055-4059, 2007.
- Tu ro, A *et al.* "Performance improvement of ultrasonic therapy equipment by modifying the classical transducer design" *IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, vol. 146, no 2, pp. 107-112, 1999.
- Jaffe, B., Cook,W.R., and Jaffe, JR.H., in *piezoelectric ceramics* Academic Press Inc., 1971.
- Rosalina Ramli, "The effect of ultrasound on angiogenesis : an in vivo study using the chick

chorioallantoic membrane”, *The International journal of Oral & Maxillofacial Implants*,
vol. 25, p.591-596, 2009

Bernard, J. Piezoelectric Ceramic, R : AN Publishers, OH, 1971

Swartz, S. L., 1990. “Conference on electrical insulation and dielectric phenomena” *IEEE transactions on electrical insulation*, 25(5) : 935-987.

<http://www.morganelectroceramics.com> , 14 December 2010

ภาคผนวก 1

ตารางแสดงลักษณะการใช้งานทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C52

รายละเอียด	ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 8031
การกำหนดขา	
- จำนวนขาทั้งหมด	40 ขา
- ขาของบัสดำแหน่ง	16 ขา
- ขาของบัสข้อมูล	8 ขา
- ขาอินเทอร์รัพท์	2 ขา
- ขาอินพุตเอาต์พุต	32 ขา
โครงสร้าง	
- รีจิสเตอร์ขนาด 8 บิต	34
- รีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต	2
- ขนาดของแอสติก	128 Bytes
- ขนาด Flash memory	8 k Bytes
- แรมภายใน	256 Bytes
- หน่วยความจำภายนอก	64 K bytes
- แฟล็ก	4
- ไทมเมอร์	3
- พอร์ตขนาน	4
- พอร์ตอนุกรม	1

ไอซีเบอร์ AT89C52 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51 ไอซีเบอร์ AT89C52 มีหน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 8 K Bytes หรืออาจใช้หน่วยความจำโปรแกรมภายนอกซึ่งสามารถติดต่อกับได้ 64 K Bytes ไอซีเบอร์ AT89C52 มีพอร์ตอินพุตหรือเอาต์พุต มีไทม์เมอร์หรือเคาน์เตอร์อยู่ภายในตัว มีการอินเทอร์รัพท์ได้ 6 แหล่ง มีพอร์ตควบคุมการสื่อสารแบบอนุกรม

ภาคผนวก 2

จอแสดงผลแบบ LCD module (Liquid คลิสตัล Display module)

- ตัวแสดงผล ภายในเป็นผลึกเหลวที่สามารถแสดงผลให้เห็น โดยอาศัยแสงจากภายนอก
- ตัวควบคุม เป็นตัวรับข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อมาควบคุมการทำงานของ LCD module (Liquid คลิสตัล Display module) เช่น การลบจอภาพ การแสดงตัวอักษร เป็นต้น
- ตัวขับ เป็นตัวรับข้อมูลมาจากตัวควบคุมมาขับให้ตัวแสดงผลแสดงข้อมูลตามที่กำหนด







รูปแสดง LCD module (Liquid คลิสตัล Display module)

ตารางแสดงรายละเอียดการต่อใช้งานขาของ LCD module

ขา	สัญลักษณ์	การต่อใช้งาน
1	GND	ต่อเข้ากับกราวด์ของวงจร
2	VCC	ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันขนาดบวก 5 โวลต์
3	VO	ใช้ปรับความสว่างของจอแสดงผลด้วยแรงดันขนาด 0-5 โวลต์
4	RS	ใช้เลือกรีจิสเตอร์ (“0” = รีจิสเตอร์คำสั่ง, “1” = รีจิสเตอร์ข้อมูล)
5	R/W	ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูล (“0” = เขียน, “1” = อ่าน)
6	E	ใช้รับสัญญาณพัลส์เพื่อสั่งให้ LCD module ทำงาน
7-14	D0-D7	เส้นทางเดินข้อมูล

ในการเขียนคำสั่งลงในตัวควบคุม ต้องกำหนดให้ขา RS และ R/W มีระดับลอจิกเป็น “0” แล้วจึงเขียนคำสั่งตามไป คำสั่งในควบคุมจอแสดงผล LCD module ที่สำคัญมีดังนี้

ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขา RS,R/W และ E ของ LCD module

RS	R/W	E	การทำงาน
0	0		เขียนคำสั่ง
0	1		อ่านสถานะของ LCD
1	0		เขียนข้อมูล
1	1		อ่านข้อมูล

ตารางแสดงรายละเอียดการต่อใช้งานขาของ LCD module

ขา	สัญลักษณ์	การต่อใช้งาน
1	GND	ต่อเข้ากับกราวด์ของวงจร
2	VCC	ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายแรงดันขนาดบวก 5 โวลต์
3	VO	ใช้ปรับความสว่างของจอแสดงผลด้วยแรงดันขนาด 0-5 โวลต์
4	RS	ใช้เลือกรีจิสเตอร์ (“0” = รีจิสเตอร์คำสั่ง, “1” = รีจิสเตอร์ข้อมูล)
5	R/W	ใช้เลือกการอ่านหรือเขียนข้อมูล (“0” = เขียน, “1” = อ่าน)
6	E	ใช้รับสัญญาณพัลส์เพื่อสั่งให้ LCD module ทำงาน
7-14	D0-D7	บัสข้อมูล
15	GND	ต่อเข้ากับกราวด์ของวงจร
16	+ V	แหล่งจ่ายไฟ สำหรับให้ LCD สว่าง