



การพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

นางสาว จิตสุภา บุญทาธาตุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ



นางสาวจิตสุภา บุญทาธาตุ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

โดย นางสาว จิตสุภา บุญทาทุ

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

()

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพล พิสิฐพิพัฒนสิน)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล)

กรรมการ

(ดร.จักราวุธ ไม้ทิพย์)

ชื่อ : จิตสุภา บุญทาทาด
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ
สาขาวิชา : เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รองศาสตราจารย์ ดร.ภาณุพงศ์ ใจบาล
ปีการศึกษา : 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำที่เกิดจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ อาทิเช่น เสียงจากกิจกรรมของมนุษย์ การก่อสร้าง การทำงานของเครื่องจักรในอุตสาหกรรม และการคมนาคมขนส่ง วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อมุ่งศึกษาและพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากรอบตัวให้เกิดประโยชน์มากที่สุด โดยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถประกอบใช้งานง่ายและมีราคาถูกลง ประกอบไปด้วยกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ทำให้เกิดการสะสมพลังงานคลื่นเสียงภายในโพรงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการสร้างพลังงานไฟฟ้าและวัสดุสร้างพลังงานทางไฟฟ้าแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติกมีคุณสมบัติถ่ายโอนประจุบวกและฟิล์มพอลิเอไมด์มีคุณสมบัติในการถ่ายโอนประจุลบ ประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อวัสดุสองชนิดสัมผัสกันหรือถูกันทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุระหว่างสองวัสดุ สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าสูงสุด 98 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าสูงสุด 2.01 ไมโครแอมแปร์ ซึ่งสามารถทำให้ไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์สีเขียวสว่างได้ 70 ดวง ผลลัพธ์การผลิตไฟฟ้าที่ทำการวัดอยู่ในช่วงคลื่นเสียงความถี่ต่ำ 100 110 120 130 140 และ 150 เฮิรตซ์ ระดับความดังเสียง 100 เดซิเบล

คำสำคัญ : อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน, คลื่นเสียงความถี่ต่ำ, กล่องเรโซแนนท์, แผ่นอะลูมิเนียม, ฟิล์มพอลิเอไมด์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : JITSUPA BOONTATHAT
Thesis Title : Development of device for energy harvesting from low-frequency sound wave
Major Field : Energy Technology and Management
King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Thesis Advisor : Associate Professor Dr.PANUPONG JAIBAN
Academic Year : 2023

Abstract

This research has developed a device for harvesting energy from low-frequency sound waves generated by the surrounding environment, such as human activities, construction noise, factory machinery, and transportation. The research aims to study and develop energy harvesting from sound waves in the ambient environment to maximize the benefits. The chosen devices are easy to use and low-cost. The device consists of a resonant cavity that builds up acoustic energy within the cavity to enhance the efficiency of electricity generation. The power generation unit comprises an aluminum sheet with distributed pinholes for positive charge transfer and a polyimide film for negative charge transfer. An electrical charge is created when two different materials come into contact or are rubbed together, and electrons are transferred from one material to the other. Output performance can be generated with a maximum voltage of 98 volts and a maximum current of 2.01 microamps, powering 70 commercial light-emitting diodes (LEDs) in the low-frequency range between 100 110 120 130 140 and 150 hertz at a sound level of 100 decibels.

Keyword : harvesting energy, low-frequency sound waves, resonant cavity, aluminum sheet, polyimide film

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยคำปรึกษาและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งขอขอบพระคุณอาจารย์รองศาสตราจารย์ ดร. ภาณุพงศ์ ใจบาลอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษา เสนอแนะแนวทางการแก้ไขปัญหา และข้อบกพร่องต่าง ๆ ทำให้การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐพล พิสิฐพิพัฒน์สินประธานกรรมการและอาจารย์ ดร. จักราวุธ ไม้ทิพย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ได้กรุณาให้ข้อเสนอแนะ แก้ไข และให้แนวคิดต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม สาขาเทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลอง เครื่องมือวัด และอุปกรณ์ในการทดสอบต่าง ๆ และนักศึกษา ร่วมคณะที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือให้งานวิจัยนี้บรรลุได้อย่างสมบูรณ์ ข้าพเจ้าหวังว่าเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจที่จะพัฒนางานเรื่องนี้ต่อไปและยังสามารถนำมาใช้เป็นตัวอย่างประกอบการเรียนการสอนได้ด้วย

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จิตสุภา บุญทาทาตุ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 คลื่นเสียง (Sound Wave).....	3
2.1.1 การเกิดคลื่นเสียง.....	3
2.1.2 องค์ประกอบของคลื่น.....	6
2.1.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงผ่านตัวกลาง.....	6
2.1.4 การจำแนกประเภทของคลื่นเสียง.....	7
2.1.5 การแบ่งย่านความถี่คลื่น.....	7
2.1.6 แหล่งกำเนิดเสียง.....	8
2.1.7 ระดับเสียงและเดซิเบล (Sound Level).....	9
2.2 กล้องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	15

2.2.1	หลักการทำงานของกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)	15
2.2.2	การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion).....	16
2.2.3	หลักการออกแบบกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	18
2.3	สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties).....	19
2.3.1	วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material).....	20
2.3.2	ปรากฏการณ์ประจุไฟฟ้าสถิต (Static Electricity หรือ Electrostatic Charge).....	21
2.3.3	ปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect)	22
2.4	หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit).....	32
2.4.1	วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier Circuit)	33
2.4.2	วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier Circuit).....	34
2.4.3	วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (Full Bridge Rectifier Circuit).....	35
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3	อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	46
3.1	เครื่องมือวัดและทดสอบสำหรับคลื่นเสียง	46
3.1.1	เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator)	46
3.1.2	เครื่องขยายสัญญาณ (Power Amplifier)	46
3.1.3	เครื่องวัดความดังเสียง (Sound Level Meter).....	47
3.2	ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ.....	47
3.2.1	การออกแบบกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	47
3.2.2	วัสดุแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า	50
3.2.3	การประดิษฐ์อุปกรณ์.....	51
3.3	เครื่องมือทดสอบสัญญาณทางไฟฟ้า.....	52
3.4	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	53

3.4.1	การทดลองวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำภายในกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)	55
3.4.2	การทดลองแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุด	56
3.4.3	การทดลองการจ่ายประจุ	57
3.4.4	การทดลองต่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)	58
บทที่ 4 ผลการวิจัย		59
4.1	ผลการทดสอบวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำภายในกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)	59
4.2	ผลการสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม	61
4.2.1	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู	62
4.2.2	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 225 รู	63
4.2.3	ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 442 รู	64
4.3	ผลการทดสอบการจ่ายประจุไฟฟ้า	68
4.4	ผลการทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)	69
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ		71
5.1	สรุปผล	71
5.2	อภิปรายผล	72
5.3	ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม		74
ประวัติผู้เขียน		78

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 อัตราความเร็วของเสียงในตัวกลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	7
ตารางที่ 2-2 แหล่งกำเนิดเสียงตามช่วงความถี่.....	8
ตารางที่ 2-3 ข้อมูลเทียบค่าระหว่างระดับความดังเสียงและความดันที่เกิดขึ้นสภาวะแวดล้อม โดยรอบ.....	13
ตารางที่ 2-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียง ความถี่ต่ำจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2-1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเสียงโดยใช้คลื่นในหลอดสปริง.....	3
ภาพที่ 2-2 คลื่นเสียงผ่านอนุภาคของอากาศ.....	4
ภาพที่ 2-3 คลื่นตามขวาง (Transverse Waves)	5
ภาพที่ 2-4 คลื่นตามยาว (Longitudinal Waves).....	5
ภาพที่ 2-5 ส่วนประกอบของคลื่น.....	6
ภาพที่ 2-6 ย่านความถี่ (Frequency Band).....	8
ภาพที่ 2-7 กราฟระดับความดังของ Equal Loudness Contour ที่ความถี่ต่าง ๆ.....	11
ภาพที่ 2-8 แสดงแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนทั่วไปในช่วงความถี่ต่าง ๆ	12
ภาพที่ 2-9 ประเมินระดับความดังที่ย่านความถี่เฉพาะในการวิเคราะห์ระดับความดันเสียง.....	14
ภาพที่ 2-10 ลักษณะเคลื่อนที่ของอากาศภายในของกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	16
ภาพที่ 2-11 Resonant Cavity and Mass-Spring-Damper System.....	16
ภาพที่ 2-12 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion).....	17
ภาพที่ 2-13 Mass on Spring or Motion Sequence	17
ภาพที่ 2-14 โครงสร้างของกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	18
ภาพที่ 2-15 การถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electric Charge Transfer)	19
ภาพที่ 2-16 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน	21
ภาพที่ 2-17 ลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series).....	24
ภาพที่ 2-18 Network of electron acceptors and donors	25
ภาพที่ 2-19 Fraction of different materials used for electron acceptors and donors..	26
ภาพที่ 2-20 การแยกหน้าสัมผัส (Contact Separation).....	27
ภาพที่ 2-21 การเลื่อนด้านข้าง (Lateral-Sliding).....	28

ภาพที่ 2-22 โหมดอิสระ (Freestanding).....	29
ภาพที่ 2-23 โหมดอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-Electrode).....	29
ภาพที่ 2-24 Energy flow chart of triboelectric system.....	30
ภาพที่ 2-25 แรงดันไฟขาออกกระแสตรง (DC) ของเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น	33
ภาพที่ 2-26 การต่อวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier Circuit).....	34
ภาพที่ 2-27 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier Circuit).....	34
ภาพที่ 2-28 การทำงานด้านเต็มคลื่นบวก (Positive Half-cycle).....	35
ภาพที่ 2-29 การทำงานด้านเต็มคลื่นลบ (Negative Half-cycle).....	35
ภาพที่ 2-30 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (Full Bridge Rectifier Circuit).....	36
ภาพที่ 2-31 การทำงานด้านแบบบริดจ์บวก (Positive Half-cycle).....	36
ภาพที่ 2-32 การทำงานด้านแบบบริดจ์ลบ (Negative Half-cycle).....	37
ภาพที่ 2-33 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (CHR-TENG)	39
ภาพที่ 2-34 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (CHR-TENG).....	39
ภาพที่ 2-35 ผลประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงาน ...	39
ภาพที่ 2-36 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (A-TENG)	40
ภาพที่ 2-37 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (A-TENG).....	40
ภาพที่ 2-38 ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันเสียงแตกต่างกัน	41
ภาพที่ 2-39 ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายใต้ความต้านทานที่แตกต่างกัน	41
ภาพที่ 2-40 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (EH-TENG).....	42
ภาพที่ 2-41 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 170 Hz	42
ภาพที่ 2-42 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (HR-TENG).....	43
ภาพที่ 2-43 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (HR-TENG)	43
ภาพที่ 2-44 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 80 Hz	43
ภาพที่ 2-45 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ	44

ภาพที่ 2-46	ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ.....	44
ภาพที่ 2-47	ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 350 Hz ระดับแรงดัน 100 dB.....	45
ภาพที่ 3-1	เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Waveform Generator)	46
ภาพที่ 3-2	ชุดขยายระดับความดังเสียง (Power Amplifier).....	47
ภาพที่ 3-3	เครื่องวัดความดังเสียง Benetech รุ่น GM1352	47
ภาพที่ 3-4	กล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	49
ภาพที่ 3-5	ขั้นตอนการออกแบบและการขึ้นรูปกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	49
ภาพที่ 3-6	ขั้นตอนการเจาะรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม.....	50
ภาพที่ 3-7	แผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyimide Film).....	51
ภาพที่ 3-8	โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ	52
ภาพที่ 3-9	ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ	52
ภาพที่ 3-10	เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B	53
ภาพที่ 3-11	ไดอะแกรมของชุดทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ	54
ภาพที่ 3-12	ไดอะแกรมการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ	55
ภาพที่ 3-13	การทดลองชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ	55
ภาพที่ 3-14	การติดตั้งวงจรไมโครโฟนทำการวัดคลื่นเสียงภายในโพรงอากาศที่ถูกปิดทางด้านหลัง.....	56
ภาพที่ 3-15	การทดลองวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำภายในกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity).....	56
ภาพที่ 3-16	จำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม	57
ภาพที่ 3-17	การต่อวงจรทดลองการจ่ายประจุ	57
ภาพที่ 3-18	การต่อวงจรทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED).....	58
ภาพที่ 4-1	ผลการทดสอบเปรียบเทียบระดับแอมพลิจูด	59
ภาพที่ 4-2	กราฟผลการเปรียบเทียบระดับแอมพลิจูดสูงสุดในแต่ละย่านความถี่วัดระดับความดังเสียงที่ 80 dB.....	60
ภาพที่ 4-3	ผลการเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงของอุปกรณ์เมื่อเปิดและปิดแหล่งพลังงานเสียง	61

ภาพที่ 4-4 กลไกการทำงานของแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรู (ซี่บวก) และ แผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (ซี่ลบ)	62
ภาพที่ 4-5 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู	62
ภาพที่ 4-6 ทดสอบกระแสไฟฟ้าวงจรปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู	63
ภาพที่ 4-7 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 225 รู	63
ภาพที่ 4-8 ทดสอบกระแสไฟฟ้าวงจรปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 225 รู	64
ภาพที่ 4-9 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 442 รู	64
ภาพที่ 4-10 ทดสอบกระแสไฟฟ้าวงจรปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 442 รู	65
ภาพที่ 4-11 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิด	65
ภาพที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบวัดค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู 225 รู และ 442 รูตามลำดับ	66
ภาพที่ 4-13 การทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายในระยะเวลา 60 นาที	67
ภาพที่ 4-14 ผลลัพธ์การผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดช่วงความถี่ 100 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB	67
ภาพที่ 4-15 การทดสอบการจ่ายประจุไฟฟ้ากับค่าความจุที่แตกต่างกัน	68
ภาพที่ 4-16 ผลการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 220 μF ที่แรงดันไฟฟ้า 3 V	69
ภาพที่ 4-17 แหล่งจ่ายไฟให้กับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น	69
ภาพที่ 4-18 ชุดการทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีการคิดค้นเทคโนโลยีหรือวิธีการเพื่อนำมาช่วยในการเก็บเกี่ยวพลังงาน (Energy Harvesting หรือ Energy Scavenging) จากแหล่งพลังงานที่มีอยู่รอบตัวมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด แนวโน้มพลังงานที่กำลังได้รับความสนใจในยุคนี้นี้ พลังงานเสียงความถี่ต่ำที่เกิดจากการสั่นสะเทือนถูกแพร่กระจายจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น ห้องเครื่องของเรือ การทำงานของเครื่องจักร การขนส่งสาธารณะ และสถานที่อื่น ๆ ที่เกิดเสียงรบกวนเสียงดัง (Silva, Magalhães, Silva, & Fonseca, 2021) พลังงานเสียงจึงเป็นส่วนหนึ่งของแหล่งพลังงานใหม่ การเก็บเกี่ยวพลังงานจากสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นรอบตัวเรา แต่เสียงส่วนใหญ่ไม่ถูกนำมาใช้เนื่องจากพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำโดยทั่วไปมีข้อจำกัดในการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในความดันของพลังงานคลื่นเสียงและขาดเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานเสียงเพื่อแปลงพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้า (Yu et al., 2021)

เมื่อเร็ว ๆ นี้ งานวิจัยของ (Yu et al., 2021) ได้ทำการศึกษาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวบรวมพลังงานคลื่นเสียงที่ถูกแพร่กระจายโดยรอบ โดยใช้กลองเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) การเกิดลมกระเพื่อมเป็นปรากฏการณ์ของการสะท้อนของอากาศในโพรงจะบีบอัดและขยายตัวเป็นระยะ ทำจากภาชนะแข็งโดยมีคอท่อหรือรูที่ปลายด้านหนึ่งและรูที่ใหญ่กว่าในปลายอีกด้านหนึ่งในการขยายแรงดันเสียงภายในโพรงอากาศให้เกิดการกระทำเคลื่อนไหวยิงกลได้อย่างสม่ำเสมอและใช้วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงมีคุณสมบัติความเป็นขั้วบวกและลบในการสร้างพลังงานทางไฟฟ้าจากการแตะหรือสัมผัส ที่เกิดขึ้นจากแรงดันอากาศภายในโพรง (Yu et al., 2021; H. Zhao et al., 2019)

งานวิจัยนี้จึงนำเสนออุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้พลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ เลือกใช้วัสดุสร้างหรือให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติคมีค่าไดอิเล็กทริกให้ประจุเป็นบวกและฟิล์มพอลิเอไมด์มีค่าไดอิเล็กทริกให้ประจุเป็นลบมาประกอบเข้ากับกลองเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) จากนั้นทำการแปลงพลังงานทางกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า วัดค่าทางไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า (Electrometer) เพื่อวัดผลลัพธ์แรงดันทางไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาเพื่อพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นถือได้ว่าเป็นการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสภาพแวดล้อม

รอบตัวมาสร้างพลังงานไฟฟ้าเป็นการพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนำกลับมาใช้ใหม่แบบที่ไม่มีวันหมดไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากวัสดุที่หาใช้งานได้ง่ายและมีราคาถูก

1.2.2 เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานเสียงที่มีอยู่รอบตัวมาใช้ประโยชน์ได้สูงสุด

1.2.3 เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาการเก็บเกี่ยวพลังงานจากการสั่นสะเทือนของคลื่นเสียงมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าให้ได้ประสิทธิภาพและประโยชน์สูงสุด

1.3.2 สร้างชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานและทำการทดสอบกับคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

งานวิจัยนี้ผลแสดงให้เห็นถึงอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานนี้ต้องการให้ระบบทำงานเป็นอิสระ ไม่ต้องพึ่งพาพลังงานจากแบตเตอรี่ เพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานที่มีอยู่รอบตัวด้วยวิธีการและวัสดุที่หาใช้งานได้ง่าย

บทที่ 2

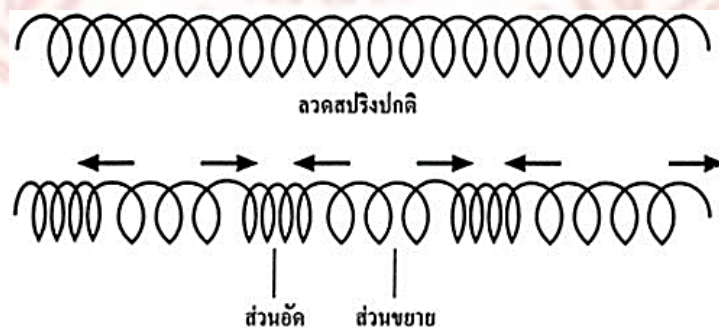
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี วิธีการ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบของการพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ การเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำ ทำให้เกิดลมกระเพื่อมภายในกล่องเรโซแนนซ์จากการสะท้อนของอากาศในโพรงปิดและขยายตัวเป็นระยะ ส่งผลให้เกิดการสัมผัสของวัสดุไดอิเล็กทริกที่มีความเป็นขั้วสูงระหว่างสองขั้วได้แก่ ขั้วบวก และ ขั้วลบ ที่สามารถแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาเกี่ยวกับหลักการทํางานและรายละเอียดของอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการออกแบบสำหรับสร้างชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

2.1 คลื่นเสียง (Sound Wave)

2.1.1 การเกิดคลื่นเสียง คือ คลื่นเสียงจากแหล่งกำเนิดเสียงต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันอยู่ตลอดเวลา เราจะได้ยินเสียงเกิดจากหูได้รับพลังงานจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงผ่านโมเลกุลของอากาศ ลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศจะอยู่ในรูปของคลื่นตามยาว มีผลทำให้ความดันของอากาศบริเวณที่มีการถ่ายทอดพลังงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากความดันปกติคลื่นเสียงประกอบด้วย 2 ส่วนได้แก่

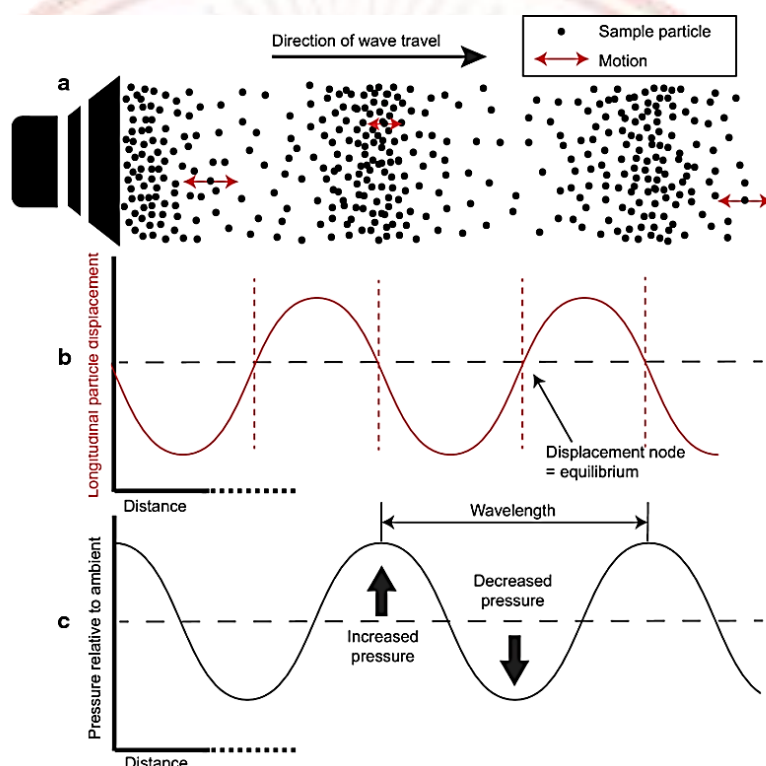
1. บริเวณที่มีความดันมากกว่าปกติเรียกว่า ส่วนอัด คือ ส่วนที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับคลื่น
2. บริเวณที่มีความดันน้อยกว่าปกติเรียกว่า ส่วนขยาย คือ ส่วนที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับคลื่น



ภาพที่ 2-1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของเสียงโดยใช้คลื่นในลวดสปริง

(Meeto, 2022)

บริเวณส่วนอัดจะมีความดันอากาศสูงกว่าปกติ อนุภาคอากาศกลางส่วนอัดไม่มีการกระจัด (ไม่เคลื่อนที่) บริเวณส่วนขยายจะมีความดันอากาศต่ำกว่าปกติ อนุภาคอากาศกลางส่วนขยายไม่มีการกระจัดเช่นกัน เมื่อพิจารณาคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ผ่านอากาศขณะหนึ่งลักษณะของอนุภาคอากาศตามแนวที่เสียง



ภาพที่ 2-2 คลื่นเสียงผ่านอนุภาคของอากาศ
(Meeto, 2022)

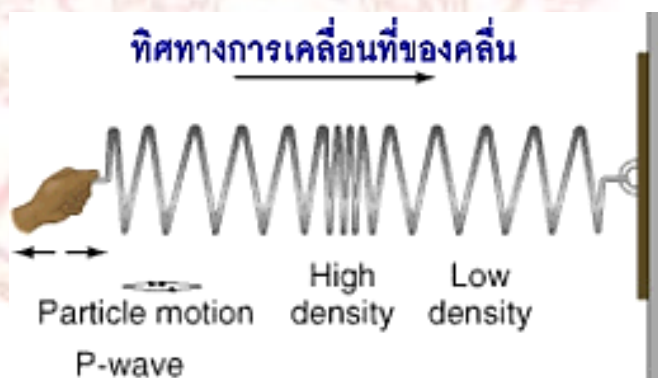
ให้กราฟ b เป็นการกระจัดของอนุภาคอากาศเมื่อเสียงผ่านและกราฟ c เป็นความดันอากาศ เมื่อคลื่นเสียงผ่านกราฟระหว่างความดันกับระยะทาง กราฟระหว่างการกระจัดกับระยะทาง จะมีเฟสต่างกัน 90 องศา ซึ่งหมายความว่าเมื่ออากาศมีความดันสูงจะเป็นบริเวณส่วนอัด แต่เมื่ออากาศมีความดันต่ำกว่าปกติจะเป็นบริเวณส่วนขยาย ระยะห่างจากบริเวณส่วนอัดหนึ่งถึงส่วนอัดที่อยู่ติดกันเป็นความยาว 1 ช่วงคลื่น หรือเป็นความยาวคลื่น (λ) จำแนกคลื่นตามลักษณะการสั่นของตัวกลางแบ่งเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. คลื่นตามขวาง (Transverse Waves) คือ คลื่นที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านมีการเคลื่อนที่ไปกลับในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่ ตัวอย่างเช่น คลื่นบนผิวน้ำ คลื่นในเส้นเชือก และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิด



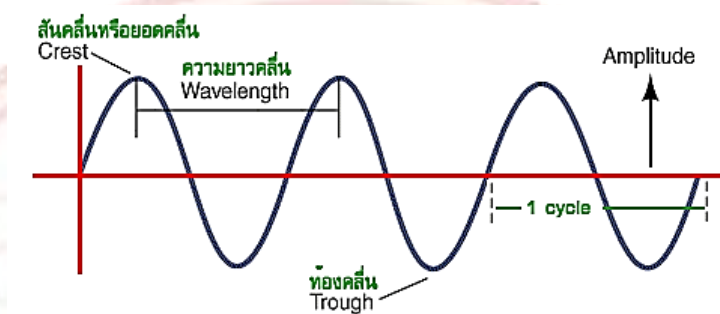
ภาพที่ 2-3 คลื่นตามขวาง (Transverse Waves)
(Theepphannee, 2022)

2. คลื่นตามยาว (Longitudinal Waves) คือ คลื่นที่ทำให้อนุภาคของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ไปกลับในทิศทางเดียวกันกับทิศทางที่คลื่นเคลื่อนที่หรือคลื่นมีทิศการสั่นของตัวกลางอยู่ในแนวขนานกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างเช่น คลื่นเสียง คลื่นใต้ผิวน้ำ คลื่นอัดขยายในสปริง (Meeto, 2022)



ภาพที่ 2-4 คลื่นตามยาว (Longitudinal Waves)
(Theepphannee, 2022)

2.1.2 องค์ประกอบของคลื่น บ่งบอกคุณลักษณะที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ตามความต้องการ โดยมีความเร็วในการแพร่กระจายต่างกันซึ่งความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นสามารถบอกเป็นรอบคลื่นใน 1 นาที เรียกว่า ความถี่ หน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz) ลักษณะทางกายภาพของคลื่นแสดงดังภาพที่ 2-5 ประกอบไปด้วย (College, 2020)



ภาพที่ 2-5 ส่วนประกอบของคลื่น

(College, 2020)

1. ขนาดของคลื่น (Amplitude) คือ ความสูงของรูปคลื่นจากยอดคลื่นจนถึงท้องคลื่น มีหน่วยเป็น (Vp-p)
2. คาบเวลา (Period : T) คือ ระยะจากจุดเกิดคลื่นลูกหนึ่งจนถึงจุดเกิดคลื่นลูกถัดไป มีหน่วยเป็น วินาที (s)
3. ความถี่ (Frequency) คือ จำนวนลูกคลื่นที่เดินทางใน 1 วินาที หรือ 1/คาบเวลา (T) มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์ (Hz)
4. ความยาวคลื่น (Wavelength) สัญลักษณ์ (λ) คือ ระยะจากยอดคลื่นหนึ่งถึงยอดคลื่นถัดไปหรือระยะระหว่าง 2 ตำแหน่งบนคลื่นที่เฟสตรงกันมีหน่วยเป็น เมตร (m)

2.1.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงผ่านตัวกลาง คือ เมื่อคลื่นเสียงหรือคลื่นกลการถ่ายทอดพลังงานออกไปจากการถูกรบกวนจากการสั่นของโมเลกุลตัวกลางมีสถานะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส แต่เสียงไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้ เมื่อคลื่นเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ความถี่ของคลื่นเสียงจะมีค่าคงตัวเท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง ส่วนอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางหนึ่ง ๆ จะคงตัว เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางนั้นคงตัวดังตารางที่ 2-1 (Theeppraphanee, 2022)

ตารางที่ 2-1 อัตราความเร็วของเสียงในตัวกลางต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ตัวกลาง	สถานะ	อัตรา (เมตร/วินาที)
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	แก๊ส	272
อากาศ	แก๊ส	346
แก๊สไฮโดรเจน	แก๊ส	1,339
น้ำ	ของเหลว	1,498
น้ำทะเล	ของเหลว	1,531
แก้ว	ของแข็ง	4,540
เหล็ก	ของแข็ง	5,200

ที่มา : (Theepraphanee, 2022)

2.1.4 การจำแนกประเภทของคลื่นเสียง การจำแนกประเภทของคลื่นเสียงจากการได้ยินและความถี่ของเสียงได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. คลื่นใต้เสียง (Infra Sound หรือ Infrasonic Waves) คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยินหรือมีความถี่ต่ำกว่า 20 Hz ซึ่งเกิดจากการสั่นของตัวแหล่งกำเนิดเสียงขนาดใหญ่ เช่น การสั่นของตึก แผ่นดินไหว เป็นต้น

2. คลื่นความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยิน (Audible Waves หรือ Sounds) ความถี่เสียงอยู่ในช่วงต่ำสุด 20 Hz และความถี่สูงสุดที่สามารถได้ยิน คือ 20,000 Hz

3. คลื่นเหนือเสียง (Ultrasound หรือ Ultrasonic Waves) คลื่นที่สูงกว่ามนุษย์สามารถได้ยินคุณสมบัติเด่นสามารถส่งคลื่นเสียงใช้ระบุตำแหน่ง รูปร่าง ทิศทาง ของวัตถุที่ขวางเส้นการเดินทางด้วยหลักการสะท้อนของคลื่นเสียงที่ว่ามุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน (Technology, 2020)

2.1.5 การแบ่งย่านความถี่คลื่น คือ พลังงานรูปหนึ่งที่เกิดขึ้นซึ่งมีหลายชนิดตามแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน อาทิเช่น คลื่นเสียง คลื่นความถี่วิทยุ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น สามารถแบ่งได้ 9 ย่านความถี่ และ 1 ช่วงความถี่แสดงดังภาพที่ 2-6

Band Name	Symbols	Frequency range
Very low frequency	VLF	3 to 30 kHz
Low frequency	LF	30 to 300 kHz
Medium frequency	MF	300 to 3000 kHz
High frequency	HF	3 to 30 MHz
Very high frequency	VHF	30 to 300 MHz
Ultra high frequency	UHF	300 to 3000 MHz
Super high frequency	SHF	3 to 30 GHz
Extremely high frequency	EHF	30 to 300 GHz
Terahertz (ITU, 2015b)	THz	300 to 3000 GHz

Source: ITU (2012), Radio Regulations Article 2

ภาพที่ 2-6 ย่านความถี่ (Frequency Band)
(Massaro, 2017)

2.1.6 แหล่งกำเนิดเสียง คือ การเกิดคลื่นเสียงความถี่จากสภาพแวดล้อมโดยรอบเสียงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือมนุษย์ไม่ว่าจะเป็นจากการกระทำที่เจตนาหรือไม่เจตนาดังตารางที่ 2-2 แหล่งกำเนิดเสียงตามช่วงความถี่

ตารางที่ 2-2 แหล่งกำเนิดเสียงตามช่วงความถี่

ช่วงคลื่นความถี่	คุณลักษณะของเสียงในสถานที่ต่าง ๆ
1–10 Hz	เสียงจากใบพัดเรือ เสียงระเบิด อุตสาหกรรมแร่
10–100 Hz	เสียงจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง กิจกรรมในการก่อสร้าง กิจกรรมอุตสาหกรรม และระบบโซนาร์ในการตรวจสอบทางเรือทหาร
100–1,000 Hz	เสียงจากกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง กิจกรรมในการก่อสร้าง กิจกรรมเครื่องจักรในอุตสาหกรรม เสียงการทำงานของห้องเครื่องเรือ
1,000–10,000 Hz	เสียงจากการสื่อสารใต้น้ำทะเล โซนาร์ทางเรือทหารทางยุทธศาสตร์ และระบบสำรวจพื้นมหาสมุทร
10,000–100,000 Hz	เสียงจากการสื่อสารใต้น้ำทะเล เรือต่อต้านทุ่นระเบิด อุปกรณ์หาปลา และระบบใช้ในการสื่อสารสมุทรศาสตร์
มากกว่า 100,000 Hz	โซนาร์ตรวจค้นแร่ อุปกรณ์ทำแผนที่ชั้นน้ำทะเลความละเอียดสูง

ที่มา : (Latusek-Nabholz, Whitt, Fertl, & Sidorovskaia, 2020)

จากตารางที่ 2-2 ย่านความถี่เสียงในระดับที่ต่างกันจะมีความดังที่หลายระดับตั้งแต่เสียงที่ดังเบามาก ๆ จนถึงเสียงดังมาก อาทิเช่น เสียงจิ้งหะงัดของหัวใจ เสียงกระซิบ เสียงเครื่องบิน เสียงจากการขนส่ง และเสียงจากการก่อสร้าง นอกจากนี้ยังมีเสียงที่ดังอย่างต่อเนื่องเป็นเวลาหลายชั่วโมง เช่น เสียงจากเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม เสียงการทำงานของห้องเครื่องเรือ และเสียงจากการจราจรบนถนนทางด่วน เป็นต้น โดยลักษณะของเสียงแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ ความดัง ความถี่ และคุณภาพของเสียง ในเรื่องของความดังได้แก่ เสียงดัง เสียงเบา เสียงกระซิบ เป็นต้น ในเรื่องของความถี่ได้แก่ เสียงสูงเสียงต่ำ เสียงทุ้มเสียงแหลม และในเรื่องของคุณภาพเสียง ได้แก่ เสียงเพราะ เสียงแสบ เสียงเครื่องดนตรีชนิดต่าง ๆ เป็นต้น

2.1.7 ระดับเสียงและเดซิเบล (Sound Level) คือ พลังงานที่เคลื่อนที่เป็นคลื่นวัดด้วยความถี่และแอมพลิจูด (Vp-p) ความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) วัดจำนวนการสั่นสะเทือนของเสียงในหนึ่งวินาที แอมพลิจูดที่รายงานในระดับเดซิเบล (dB) จะวัดความดันหรือความแรงยิ่งเสียงมีแอมพลิจูดมากเท่าใดก็ยิ่งดังมากขึ้นเท่านั้นมาตราส่วนเดซิเบลลอการิทึมวัดต่างจากมาตราส่วนเชิงเส้น ตัวอย่างเช่น ทุก ๆ 10 dB ที่เพิ่มขึ้นในระดับเดซิเบลจะเท่ากับการเพิ่มระดับความดันเสียง 10 เท่า ใกล้เคียงจะแสดงเป็น 0 dB แต่เสียงที่วัดที่ 10 dB นั้นดังกว่า 10 เท่า ถ้าเสียง 20 เดซิเบล แสดงว่าดังกว่าตอนใกล้เคียง 100 เท่า การวัดเสียงรบกวนที่เกี่ยวข้องกับเสียงดังมักจะให้ค่าเป็น dBA หรือ dBC ซึ่งเป็นการถ่วงน้ำหนักของความถี่ที่ใช้กับการวัดเดซิเบล การถ่วงน้ำหนักด้วยความถี่ 'A' และ 'C' ซึ่งถือเป็นการอ่านค่าระดับเดซิเบลที่พยายามจำลองความไวของหูของมนุษย์กับความถี่เสียงต่าง ๆ ระดับเดซิเบลแบ่งได้ 2 ประเภทได้แก่

1. ระดับเดซิเบล A-weighting หรือ เดซิเบลเอ (dBA) ครอบคลุมช่วงความถี่ 20 Hz ถึง 20 kHz หูของมนุษย์มีความไวต่อความถี่เสียงมากที่สุดระหว่าง 500 Hz ถึง 6 kHz ในขณะที่ความถี่ต่ำและสูงของมนุษย์จะไม่ไวมากการถ่วงน้ำหนัก A จะปรับการอ่านค่าความดันเสียงเพื่อสะท้อนความไวของมนุษย์ดังนั้นจึงกำหนดให้ทั่วโลกทำการวัดความเสี่ยงต่อความเสียหายจากการได้ยิน

2. ระดับเดซิเบล C-weighting หรือ เดซิเบลซี (dBC) พิจารณาผลกระทบของเสียงความถี่ต่ำในหูของมนุษย์มากขึ้นเมื่อเทียบกับเดซิเบล A โดยพื้นฐานแล้วจะเป็นเส้นตรงระหว่าง 31.5 Hz ถึง 8 kHz การวัดแรงดันเสียงสูงสุดทำโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยความถี่ C การวัดโดยทั่วไปจะแสดงเป็น dBC

ค่าระดับความดันเสียง (Sound Pressure Level : SPL) สามารถวัดด้วยเครื่องวัดระดับเสียง (Sound Level Meter) เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องวัดค่าระดับความเข้มเสียง ส่วนการตรวจวัดค่าระดับกำลังเสียงนั้นไม่สามารถตรวจวัดได้โดยตรงสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 2-1 (Chaichana, 2008)

$$L_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{P}{P_r} \right)^2 \quad (2-2)$$

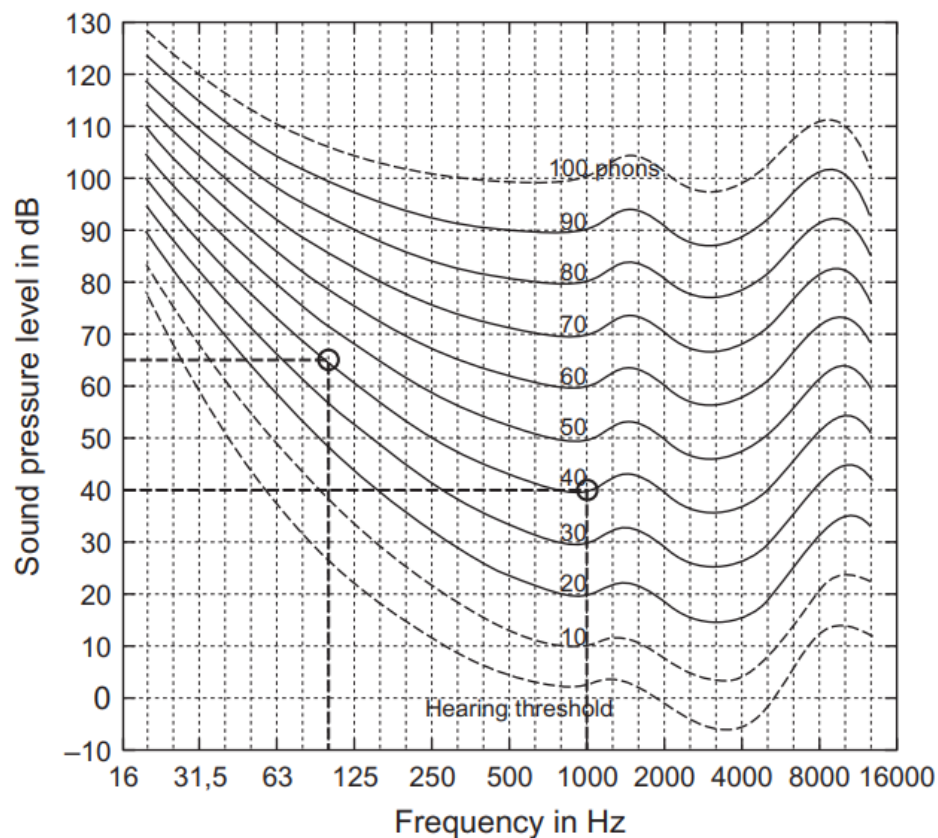
เมื่อ L_p คือ ระดับกำลังเสียง (dB)

P_1 คือ ความดันเสียง (Pa)

P_r คือ ความดันเสียงอ้างอิง เท่ากับ 2×10^{-5} Pa หรือ เท่ากับ 20 mPa

ผลลัพธ์ของสมการนี้หากเป็นบวกผลลัพธ์การเพิ่มหรือค่าความแรงของสัญญาณและหากเป็นลบผลลัพธ์คือการลดหรือค่าความสูญเสีย

2.1.8 ค่าการรับรู้หรือค่าระดับการฟังของมนุษย์ (Equal Loudness Contour) คือ ระดับการรับรู้ความถี่ของมนุษย์ที่ความดังต่าง ๆ ที่มนุษย์เรานั้นจะรับรู้ความดังของแต่ละความถี่ไม่เท่ากันแสดงดังภาพที่ 2-7 กราฟระดับความดังของ Equal Loudness Contour ที่ความถี่ต่าง ๆ จะกำหนดความถี่มาตรฐานที่ความถี่ 1000 Hz เป็นจุดอ้างอิง จากกราฟในแนวดิ่งจะเป็นระดับความดัง (SPL) มีหน่วยเป็น dB ในแนวนอนจะเป็นความถี่มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) สองที่มีความถี่ต่างกัน แต่มีระดับที่ตกอยู่บนเส้นเท่าความดังเดียวกันจะมีความดังเท่ากัน ตัวอย่างเช่น เสียงบริสุทธิ์ (Pure Tone) ที่มีความถี่ 1000 Hz ที่ระดับเสียง 40 dB จะมีความดังเท่ากับการปล่อยเสียงบริสุทธิ์ (Pure Tone) ที่ความถี่ 100 Hz และ ระดับเสียงประมาณ 64 dB เสียงที่มีความถี่ 100 Hz ที่ระดับความดัน (SPL) สูงกว่า 24 dB ในระดับเสียงเมื่อเปรียบเทียบกับเสียงที่มีความถี่ 1000 Hz ที่ระดับเสียง 40 dB เพื่อให้ได้รับรู้เสียงได้เท่ากัน



ภาพที่ 2-7 กราฟระดับความดังของ Equal Loudness Contour ที่ความถี่ต่าง ๆ
(Oxenham, 2013)

โดยทาง Fletcher (เฟลทเซอร์) และ Munson (มุนสัน) ได้ปรับโทนเสียงอ้างอิงจนผู้เข้ารับการทดสอบรู้สึกว่าเป็นเสียงเดียวกับเสียงความถี่ที่ทดสอบ ต่อมาในปี 1956 ทาง Robinson (โรบินสัน) และ Dadson (แดดสัน) ได้กำหนดการทดลองขึ้นมาใหม่ ซึ่งได้ผลที่แม่นยำกว่าจนกลายเป็นพื้นฐานสำหรับมาตรฐาน ISO226 ที่ถือได้ว่ามีความสมบูรณ์ จนกระทั่งถึงปี 2003 เมื่อ ISO ได้ปรับปรุงมาตรฐานใหม่ในการประเมินค่าสุดของนักวิจัยทั่วโลก ภาพที่ 2-8 แสดงแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนทั่วไปในช่วงความถี่ต่าง ๆ และตำแหน่งบนสเกลระดับเสียงจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ (Oxenham, 2013)

ตารางที่ 2-3 ข้อมูลเทียบค่าระหว่างระดับความดังเสียงและความดันที่เกิดขึ้นสภาวะแวดล้อม โดยรอบ

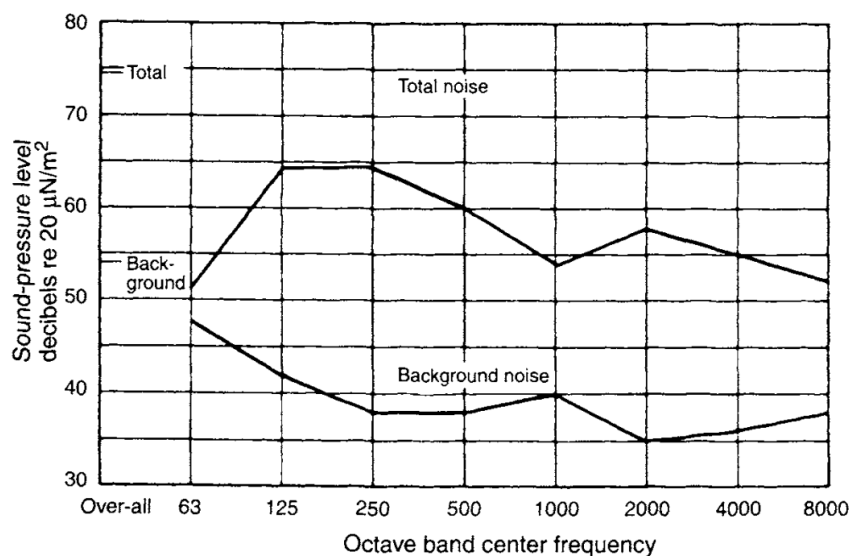
Decibels (dB)	Pressure (Pa)	Typical sound
160	2000	Jet Engie
140	200	Large Propeller Aircraft
120	20	Lound Concert/Club
100	2	Heavy Citi Traffic
80	0.2	Busy Office
60	0.02	Normal Speech
40	0.002	Quiet Residential Neighborhood
20	2×10^{-4}	Whisper
0	2×10^{-5}	Threshold

ที่มา : (Raboud, 2020)

ระดับความดันเสียง (SPL) สามารถอธิบายได้ตามอัตราสัยตามระดับเดซิเบล (dB) ได้ดังนี้

- ที่ช่วง 0 ถึง 40 dB เจียบถึงเจียบมาก
- ที่ช่วง 60 ถึง 80 dB มีเสียงดัง
- ที่ระดับความดันเสียง 100 dB มีเสียงดังมาก
- ที่ระดับความดันเสียงที่มากกว่า 120 dB มีเสียงดังมากในระดับที่ต้องใส่อุปกรณ์ป้องกัน

สามารถอธิบายถึงเสียงรบกวนด้วยปริมาณของความดันเสียงที่ปรากฏในช่วงความถี่เฉพาะการวิเคราะห์ความถี่ดังกล่าวแสดงดังภาพที่ 2-9 ใช้เพื่อประเมินระดับความดังที่ย่านความถี่เฉพาะในการวิเคราะห์ระดับความดันเสียงจากแอมพลิจูดและความถี่ โดยระดับเสียงที่ตรวจวัดในสิ่งแวดล้อม (Background Noise) ในขณะยังไม่เกิดเสียงหรือไม่ได้รับเสียงรบกวนจากแหล่งกำเนิดเสียง เทียบกับสัญญาณเสียงรบกวนทั้งหมด (Total Noise) จะเห็นได้ว่าย่านความถี่ในแต่ละช่วงจะมีค่าระดับความดันเสียงที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ("Chapter 22 - Noise Pollution," 2003)



ภาพที่ 2-9 ประเมินระดับความดังที่ย่านความถี่เฉพาะในการวิเคราะห์ระดับความดันเสียง จากแอมพลิจูดและความถี่ ("Chapter 22 - Noise Pollution," 2003)

คลื่นเสียงเกิดจากการสั่นเทือนของวัตถุและเกิดความถี่เมื่อเดินทางผ่านสื่อกลางก็จะกลายเป็นเสียง โดยเสียงจะมีลักษณะทางกายภาพ คือ ความถี่ของเสียงและความดังของเสียงที่แตกต่างกันจะก่อให้เกิดเสียงที่แตกต่างกัน ความถี่สูงหรือต่ำก็จะส่งผลต่อเสียงที่จะเกิดขึ้นต่างกัน ระยะทางในการเดินทางของเสียงนั้นส่งผลรวมไปถึงตัวกลางที่ผ่านและระยะในการเดินทางของเสียง ขึ้นอยู่กับความถี่รวมทั้งระดับเสียงที่เกิดขึ้นก็จะแตกต่างกันไปดังนี้

— ความถี่ต่ำจะสร้างเสียงทุ้ม-โตน (Bass) ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนผ่านสื่อกลางได้มาก เช่น การวิ่งผ่านอากาศสามารถที่จะทะลุผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นได้สูงและมีระยะเดินทางของคลื่นเสียงที่ยาว

— ความถี่สูงจะสร้างเสียงแหลม-โตน (Treble) ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนผ่านสื่อกลางได้ต่ำความสามารถในการทะลุผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นได้ต่ำและระยะเดินทางของคลื่นเสียงที่สั้น สามารถแบ่งช่วงคลื่นความถี่จากการรับรู้เสียงของมนุษย์เทียบย่านเครื่องดนตรีได้ดังนี้

— ย่านความถี่เสียงต่ำ (Low Frequency) ครอบคลุมความถี่เสียง 60 Hz – 250 Hz เป็นย่านที่สร้างความหนาให้กับเสียงและมีโตนเสียงต่ำ

— ย่านมิดโลว (Low Midrange) ครอบคลุมความถี่เสียง 250 Hz – 500 Hz ย่านความถี่เสียง Harmonics แรกของเครื่องดนตรีส่วนใหญ่

— ย่านกลาง (Midrange) ครอบคลุมความถี่เสียง 500 Hz – 2 kHz เป็นย่านความถี่ที่ทำให้เสียงฟังชัดขึ้นหากปรับเพิ่มระดับเสียงในย่านนี้มากเกินไปอาจจะทำให้ลำหู่ได้

— ย่านกลาง-แหลม (Upper Midrange) ครอบคลุมความถี่เสียง 2 kHz – 4 kHz ย่านที่ตอบสนองกับการได้ยินของมนุษย์มากที่สุด การปรับเพิ่มระดับเสียงในย่านนี้มากเกินไปจะทำให้ได้เสียงหยาบกระด้าง

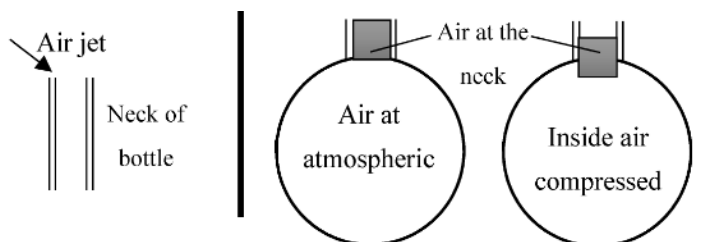
— ย่านแหลม (Presence) ครอบคลุมความถี่เสียง 4 kHz - 6 kHz ย่านนี้จะสัมพันธ์สอดคล้องกับความใส ความชัดเจน ฟังย่านความถี่นี้มากเกินไป จะทำให้เกิดเสียงแหลมที่บาดหูระคายหูได้

— ย่านแอร์ (Brilliance) ครอบคลุมความถี่เสียง 6 kHz - 20 kHz ย่านที่สร้างความ Hi-Fi ของเสียงการบรูสเสียงย่านแอร์มากเกินไปอาจจะทำให้เสียงรบกวนขึ้นมาได้

2.2 กล้องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)

ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมเสียงรบกวนแบบไม่ใช้ไฟฟ้า (Passive Control Noise) เนื่องจากมีลักษณะการสูญเสียการส่งผ่านสูงที่ความถี่ต่ำ โดยวิธีการควบคุมการรบกวนจากวัสดุสามารถเลือกความถี่เฉพาะจากเสียงที่ซับซ้อนได้จากการสะท้อนของอากาศภายในโพรงทำจากวัสดุแข็งที่มีรูปทรงและปริมาตรที่ถูกต้องแบบตามความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) มีรูปร่างทรงเรขาคณิต และมีคอท่อที่ปลายด้านหนึ่งวัสดุมีความเรียบง่ายของโครงสร้างในการประกอบใช้งาน

2.2.1 หลักการทำงานของกล้องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) เกิดจากการเคลื่อนที่ของอากาศภายในกล้องเมื่อมีคลื่นเสียงถูกส่งผ่านบริเวณคอท่อ กล้องที่ถูกออกแบบเป็นปริมาตรทรงกลมหรือสี่เหลี่ยมเชื่อมต่อกับคอท่อแบบระบบแมสสปริงแดมป์เปอร์ (Mass-Spring-Damper System) ช่องเปิดคอท่อด้านบนมีอากาศในคอท่อทำหน้าที่คล้ายมวล (Mass) เมื่อความกดอากาศที่เข้ามากระทบกับอากาศบริเวณคอท่อ ส่วนหนึ่งของอากาศจะเข้าไปในคอท่อทำให้เกิดความดันอากาศมากขึ้นชั่วขณะและดันมวลอากาศที่คอท่อลงไปเล็กน้อยจึงมีความดันเพิ่มขึ้นทำให้เกิดอากาศปั่นป่วนเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว (Turbulence Generation) ของอากาศภายในโพรงแสดงดังภาพที่ 2-10

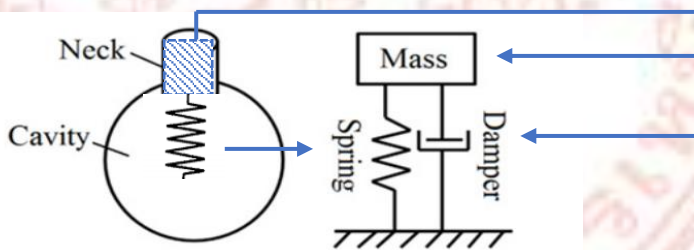


ภาพที่ 2-10 ลักษณะเคลื่อนที่ของอากาศภายในของกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)

แบบปริมาตรทรงกลม

(Hedayati & Lakshmanan, 2020)

แรงดันอากาศส่วนเกินเล็กน้อยภายในโพรงจะทำหน้าที่ขับมวลอากาศภายในคอกลับและสร้างเสียงสะท้อน (Acoustic Resonance) ที่สวนทางกลับคลื่นเสียง (Acoustic Wave) เริ่มต้นที่เข้ามา เป็นแดมเปอร์ (Damper) การยินยอมให้ปริมาณของอากาศที่ผ่านไม่เกินปริมาณที่กำหนดและต้านการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงไม่ให้หยุดนิ่งเพื่อให้เกิดการสะสมพลังงานทางเสียงส่งผลให้ระดับความดันเสียงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และเมื่อมวล (Mass) อากาศเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเดิมจะทำให้อากาศภายในโพรงแตกตัวและดูดมวล (Mass) อากาศที่คอกย้อนกลับเข้าไป สร้างการสั่นสะเทือนทำให้อากาศภายในโพรงคล้ายกับสปริง (Spring) ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นซ้ำหลายครั้งแสดงดังภาพที่ 2-11

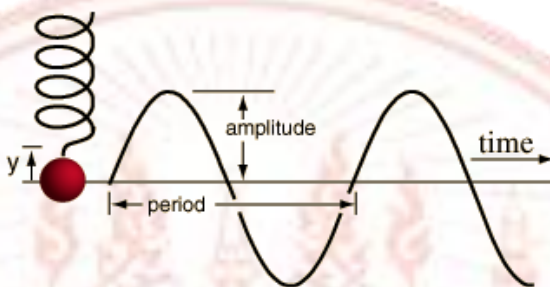


ภาพที่ 2-11 Resonant Cavity and Mass-Spring-Damper System

(Hedayati & Lakshmanan, 2020)

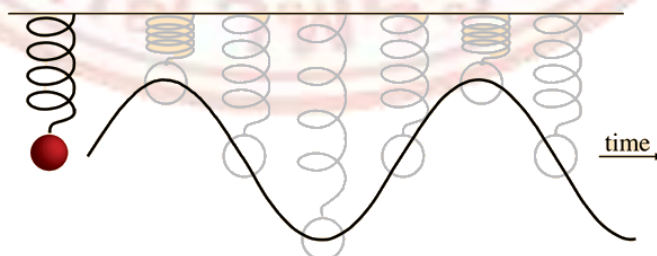
2.2.2 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion) การเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำทางเดิมโดยผ่านตำแหน่งกึ่งกลางหรือจุดสมดุล (Equilibrium) และมีคาบของการเคลื่อนที่คงตัว เมื่อมวล (Mass) ถูกกระทำโดยแรงยืดหยุ่นจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาสู่จุดเริ่มต้นหรือจุดสมดุลและเมื่อแรงนั้นเป็นสัดส่วนกับระยะห่างจากสมดุลเพิ่มเป็นสองเท่า (กฎแรงของฮุก Hooke's Law force) การเคลื่อนที่บางอย่างมีแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้อง

จึงจำเป็นต้องมีแรงหรือพลังงานป้อนให้กับระบบตลอดเวลาเรียกว่า การเคลื่อนที่เป็นคาบ (Periodic Motion) หรือ การแกว่ง (Oscillatory) โดยการกระจัดของมวล (Mass) จะถูกพล็อตตาม ฟังก์ชันของเวลา (Time) จะเคลื่อนที่ตามคลื่นไซน์บริสุทธิ์ (Pure Sine Wave) ออกมาแสดงดัง ภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (Simple Harmonic Motion)
(McLennan, 2005)

อากาศ (Air) ร่องรับการเคลื่อนที่เป็นระยะในรูปแบบของคลื่นไซน์ (Sine Wave) พิจารณาจากการเคลื่อนที่ของมวล (Mass) ติดอยู่กับสปริง (Spring) ซึ่งมีค่าคงที่ k และปลายอีกด้านหนึ่งของสปริง (Spring) ถูกยึดไว้กับผนัง แสดงดังภาพที่ 2-13 เนื่องจากมีความดันสมดุลและมีแรงคืนสภาพจากความดันบรรยากาศซึ่งจะนำกลับสู่ความดันสมดุล โดยที่แรงภายนอกจะกระทำกับมวล (Mass) เพื่อยืดสปริง (Spring) จะเปลี่ยนพลังงานไปมาระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ หากไม่มีการสูญเสียพลังงานจะถูกอนุรักษ์ตลอดเวลา (Conservation of Energy) เป็นตัวกำหนดว่าการเคลื่อนที่จะดำเนินต่อไปอย่างต่อเนื่อง สำหรับวัตถุที่มีการสั่นสะเทือนพลังงานไม่สามารถถูกสร้างขึ้นใหม่หรือถูกทำลายจะเปลี่ยนรูปแบบไปเป็นพลังงานรูปแบบอื่นเท่านั้นในการทำให้วัตถุเคลื่อนที่



ภาพที่ 2-13 Mass on Spring or Motion Sequence
(McLennan, 2005)

2.2.3 หลักการออกแบบกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) สามารถออกแบบกล่องได้จากความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) เป็นความถี่ลักษณะเฉพาะของเครื่องสะท้อนเสียงทั่วไปนี้สัมพันธ์กับปริมาตรโดยโพรงและขนาดของท่อคอสามารถออกแบบได้จากสมการที่ 2-2 ดังนี้ (Q. Zhang et al., 2022)

$$f = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL_n}} \quad (2-2)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ (Hz)

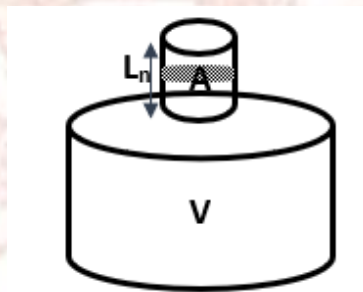
C คือ ความเร็วของเสียง (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอท่อ (cm^2) หรือ πr^2

V คือ ปริมาตรภายในโพรง (cm^3)

L_n คือ ความยาวของคอท่อ (cm)

จากสมการที่ 2-2 สามารถออกแบบจากโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2-14 ดังนี้



ภาพที่ 2-14 โครงสร้างของกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)

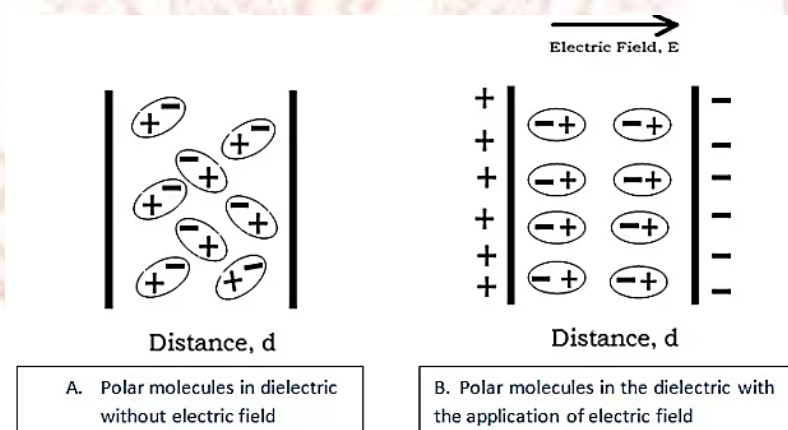
การออกแบบสามารถคำนึงถึงข้อจำกัดได้ดังนี้

1. พื้นที่หน้าตัดของคอท่อ (A) ที่มีขนาดกว้างจะตอบสนองต่อความถี่สูงและทำให้อากาศผ่านเข้าออกอย่างรวดเร็ว
2. ปริมาตรภายในโพรง (V) ปริมาตรที่ใหญ่สามารถตอบสนองต่อความถี่ต่ำทำให้อากาศภายในขยายตัวเข้า-ออก เพื่อคลายแรงดันอากาศส่วนเกิน
3. ความยาวของคอท่อ (L_n) ความยาวตอบสนองต่อคลื่นเสียงความถี่ต่ำทำให้เกิดความต้านทานต่อการเคลื่อนที่เข้าและออกของอากาศ

2.3 สมบัติไดอิเล็กทริก (Dielectric Properties)

สารหรือวัสดุเป็นไดอิเล็กทริก (Dielectric) สมบัติเป็นฉนวนสามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าได้ วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material) แต่ละชนิดบ่งบอกความเป็นขั้วค่าที่บอกความสามารถในการเก็บประจุหรือค่าความจุของตัวเก็บประจุในวัสดุไดอิเล็กทริกนั้น ๆ ที่จะเพิ่มเป็นกี่เท่าตัวของตัวเก็บประจุสุญญากาศ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกสูงจัดเป็นวัสดุที่มีความเป็นขั้วสูง สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าไว้ได้จึงเป็นตัวนำไฟฟ้าไม่ดีหรือเป็นฉนวนไฟฟ้า ทำหน้าที่ไม่ให้ประจุถ่ายถึงกันแต่ยอมให้อำนาจไฟฟ้าส่งผ่านถึงกันได้ ประจุไฟฟ้า (Electric Charge) มีสองชนิดได้แก่ ประจุไฟฟ้าบวก (Positive Charge) และ ประจุไฟฟ้าลบ (Negative Charge) ประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันจะดึงดูดกันแต่ประจุไฟฟ้าชนิดเดียวกันจะผลักกันทำให้พลังงานศักย์ไฟฟ้าของระบบสูงขึ้นจากค่าความต่างศักย์ระหว่างสองวัสดุ

จากภาพที่ 2-15 มีวัสดุบางชนิดที่มีโมเลกุลที่มีคุณสมบัติก่อตัวเป็นขั้วไฟฟ้าโดยไม่ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าทิศทางของขั้วคู่ไฟฟ้า (Electric Dipole) ซึ่งในทิศทางที่ไม่มีระเบียบจึงไม่สามารถแสดงสมบัติความเป็นขั้วออกมาได้จะแสดงก็ต่อเมื่อมีแรงจากสนามไฟฟ้า (Electric Field) ภายนอกมากระทำต่อโมเลกุลจะทำให้ขั้วคู่เล็ก ๆ เหล่านี้ถูกเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกันอย่างเป็นระเบียบ โดยโมเลกุลชนิดนี้เรียกว่าโมเลกุลมีขั้ว (Polar Molecule) และเรียกขั้วไฟฟ้างี้ว่าขั้วถาวร (Permanent Dipole) ซึ่งจากสภาพดังกล่าวทำให้วัสดุประเภทนี้เกิดประจุเหนี่ยวนำบวกและลบขึ้นที่พื้นผิวตรงข้ามกันแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาด้วยตัวเอง



ภาพที่ 2-15 การถ่ายเทประจุไฟฟ้า (Electric Charge Transfer)

(Electrical4U, 2023)

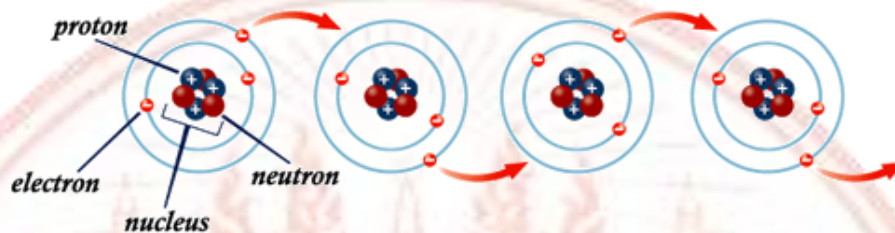
2.3.1 วัสดุไดอิเล็กทริก (Dielectric Material) คือ วัสดุสามารถเก็บประจุได้มากขึ้นต่อหน่วยพื้นที่สูงเป็นตัวบ่งชี้ว่าวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ที่สูง จะประกอบไปด้วยส่วนย่อยที่เรียกว่าโมเลกุลที่มีอะตอมของกลุ่มโปรตอนและกลุ่มอิเล็กตรอนมีศูนย์กลางมวลร่วมกันและอยู่ภายใต้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลและแรงยึดเหนี่ยวภายในอะตอม เมื่อมีแรงสนามไฟฟ้าให้แก่อะตอมทำให้ศูนย์กลางของอิเล็กตรอนและโปรตอนแยกออกจากกัน โดยกลุ่มโปรตอนจะถูกผลักไปในทิศทางของสนามไฟฟ้าหรือการทำให้เกิดการแยกประจุ โดยกลุ่มประจุบวกจะถูกผลักไปในทิศทางสนามไฟฟ้าและกลุ่มประจุลบจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางสวนทางกับสนามไฟฟ้า แต่กระบวนการดังกล่าวไม่ได้ทำให้ประจุหลุดออกจากอะตอมไปเป็นประจุอิสระ เรียกสภาพการเคลื่อนย้ายของศูนย์กลางประจุออกจากกันว่าการก่อตัวเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment) ซึ่งไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ได้ป้อนเข้าไปในวัสดุ ซึ่งวัสดุไดอิเล็กทริกประเภทนี้เป็นประเภทโมเลกุลไม่มีขั้ว (Non-Polar Molecule)

พลังงานทางไฟฟ้าเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยจะเคลื่อนที่ได้ นั้นจะต้องมีแรงดันไฟฟ้ามากระทำให้เกิดการเคลื่อนที่โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลไปในตัวนำจะขึ้นอยู่กับ ปริมาณการสะสมของประจุไฟฟ้าที่ต่างขั้วดึงดูดเข้าหากัน วัสดุที่มีอิเล็กตรอนยึดติดกันอย่างหนาแน่นอิเล็กตรอนในวัสดุที่เป็นฉนวนนั้นจะไม่สามารถหลุดออกจากอะตอมหรือโมเลกุลได้ง่ายดังนั้นจึงต้องใช้แรงดันไฟฟ้าจำนวนมากเพื่อมากระทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม โครงสร้างของอะตอมประกอบไปด้วยอนุภาค 3 ส่วนได้แก่

1. โปรตอน (Proton) คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นบวกมีสัญลักษณ์เป็น (P^+) อยู่รวมกับนิวตรอนในนิวเคลียสและมีจำนวนเท่ากับอิเล็กตรอนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
2. นิวตรอน (Neutron) คือ อนุภาคที่เป็นกลางทางไฟฟ้ามีสัญลักษณ์เป็น (N^0) อยู่รวมกับโปรตอนในนิวเคลียสไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
3. อิเล็กตรอน (Electron) คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเป็นลบมีสัญลักษณ์เป็น (e^-) เคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ นิวเคลียสและมีจำนวนเท่ากับโปรตอน อิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้กับนิวเคลียสที่สุดจะมีพลังงานที่ต่ำหลุดออกจากวงโคจรได้ยากที่สุด เนื่องจากมีแรงดึงดูดจากนิวเคลียสมากและอิเล็กตรอนที่อยู่วงนอกสุดจะเรียกว่าวาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron) จะมีระดับพลังงานสูงสุดสามารถหลุดออกจากวงโคจรได้ง่ายเมื่อมีศักย์ไฟฟ้ามากระทำเนื่องจากถูกแรงดึงดูดจากนิวเคลียสน้อยที่สุด อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรจะเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ (Free Electron)

โดยปกติอะตอมของธาตุย่อมเป็นกลางเสมอ คือ ไม่แสดงอำนาจไฟฟ้าประจุไฟฟ้าที่ปรากฏขึ้นบนวัสดุเกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ถ่ายอิเล็กตรอน เมื่อมีการหลุดของอิเล็กตรอนออกจากวงโคจรจะทำให้โครงสร้างของอะตอมเกิดการไม่สมดุลทำให้มีโปรตอนมากกว่าอิเล็กตรอน

โปรตอนจากอะตอมหนึ่งก็จะดึงดูดอิเล็กตรอนจากอะตอมข้างเคียงเข้ามาแทนที่ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอมหนึ่ง การเคลื่อนที่ดังกล่าว จะการเกิดกระแสอิเล็กตรอนหรือเรียกว่าการไหลของกระแสไฟฟ้าและแรงจากภายนอกที่มากระทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้เรียกว่าแรงดันไฟฟ้าแสดงดังภาพที่ 2-16



ภาพที่ 2-16 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน
(VERMA, 2020)

2.3.2 ปรัชญาการณประจุไฟฟ้าสถิต (Static Electricity หรือ Electrostatic Charge) เป็นไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยธรรมชาติไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์แก่มนุษย์ได้โดยตรง วัสดุที่ไม่มีอำนาจไฟฟ้าคือวัสดุที่เป็นกลางทางไฟฟ้า (นิวตรอน) โดยจะมีปริมาณประจุบวก (โปรตอน) และ ประจุลบ (อิเล็กตรอน) ในปริมาณที่เท่ากัน ส่วนวัสดุที่มีความเป็นขั้วสูง (Permanent Dipole) มีแรงดึงดูดระหว่างขั้วที่แตกต่างกัน เกิดจากวัสดุปริมาณประจุบวกกับประจุลบไม่เท่ากัน วัสดุที่รับประจุลบเข้ามาจะแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นลบส่วนวัสดุสูญเสียประจุลบจะแสดงอำนาจไฟฟ้าเป็นบวก ซึ่งอำนาจทางไฟฟ้าจะมากหรือน้อยจะขึ้นกับผลต่างของจำนวนประจุบวกกับประจุลบเรียกว่าประจุอิสระ ซึ่งไฟฟ้าสถิตสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในวัตถุที่เหมือนกันและแตกต่างกันทั้งในสถานะของเหลว ของแข็ง และก๊าซ อย่างเช่น การสัมผัส การแยกตัว การไหลของของเหลว การชนกันของของแข็ง และประจุไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นต้น

การเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Induction) คือ การทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนผิวของตัวนำโดยการนำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าเข้ามาใกล้เป็นกระบวนการที่ประจุไฟฟ้าของวัตถุถูกกระจายเข้าโดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับวัตถุที่มีประจุอื่น โดยปกติแล้วจะเป็นการตอบสนองต่ออิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายนอก มักจะเกิดขึ้นเนื่องจากการดึงดูดหรือการผลักกันของประจุภายในวัสดุเมื่อมีสนามไฟฟ้าโดยทั่วไปการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตทำงานดังนี้

— การกระจายประจุเริ่มต้น คือ วัตถุอาจมีประจุไฟฟ้าจำนวนหนึ่งกระจายไปทั่วพื้นผิวหรือภายในปริมาตร

— การเข้าใกล้วัตถุที่มีประจุ คือ เมื่อวัตถุที่มีประจุเข้าใกล้วัตถุที่ไม่มีประจุตั้งแต่แรก สนามไฟฟ้าจากวัตถุที่มีประจุจะส่งผลต่อการกระจายตัวของประจุภายในวัตถุที่ไม่มีประจุ

— การกระจายประจุใหม่ คือ อิเล็กตรอนภายในวัตถุที่ไม่มีประจุจะประสบกับแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้าจากวัตถุที่มีประจุ เป็นผลให้อิเล็กตรอนในวัตถุที่ไม่มีประจุถูกดึงดูดเข้าหาหรือถูกผลักออกจากวัตถุที่มีประจุ ทำให้เกิดการกระจายประจุใหม่ภายในวัตถุที่ไม่มีประจุ

— การสร้างไดโพล (Dipole) คือ การกระจายประจุใหม่นี้จะสร้างบริเวณที่มีประจุบวกและลบส่วนเกินภายในวัตถุที่ไม่มีคู่อิเล็กตรอนที่ไม่สมมาตรนี้จะสร้างประจุบวกและลบบางส่วนที่ปลายด้านต่าง ๆ ของพันธะทำให้เกิดโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment) ไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ

— การแยกประจุที่เหนี่ยวนำ คือ แม้ว่าจะไม่มีการสัมผัสกันทางกายภาพระหว่างวัตถุทั้งสอง แต่การกระจายประจุใหม่ในวัตถุที่ไม่มีประจุ จะสร้างการแยกประจุที่เหนี่ยวนำโดยด้านหนึ่งจะมีประจุบวกและอีกด้านจะมีประจุลบ

2.3.3 ปฏิกิริยาไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect) เป็นปรากฏการณ์ที่วัตถุบางชนิดจะมีประจุไฟฟ้าเมื่อมาสัมผัสกันและหลังจากนั้นจะแยกออกจากกัน สาเหตุเกิดจากการกระจายอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุเหล่านี้ในระหว่างกระบวนการสัมผัสและการแยกตัวคำว่า "Tribo" มาจากคำภาษากรีกที่หมายถึงการถู วิธีการที่มักเกิดปรากฏการณ์โดยการถู การแตะ หรือ การเสียดสีระหว่างวัสดุมีความเป็นขั้วสูงสองชนิด จากนั้นวัสดุจะกักเก็บพลังงานเชิงกลแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า ปรากฏการณ์ลักษณะนี้เรียกว่าการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตจากการสัมผัสของวัสดุหรือ Triboelectricity หรือ Tribocharge เกิดจากการถ่ายเทของอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสองขณะสัมผัสและเกิดขึ้นเมื่อวัสดุบางชนิดมีความสามารถในการได้หรือสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อถูกเสียดสี สิ่งนี้ทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตซึ่งสามารถนำปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นมาพัฒนางานวิจัยเพื่อการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ เช่น การเก็บพลังงาน เซนเซอร์ และการป้องกันการระบบไฟฟ้าสถิต วัสดุไตรโบอิเล็กทริกมักถูกใช้ในอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ผลิตพลังงานไฟฟ้าขนาดเล็กไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Generators) เซนเซอร์ (Sensor) เป็นต้น วิธีการทำงานของการเกิดไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect) สามารถอธิบายได้ดังนี้

— การสัมผัส (Contact) คือ เมื่อวัสดุสองชนิดสัมผัสกัน อะตอมที่พื้นผิวของวัสดุแต่ละชนิดจะมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างกัน ปฏิกริยาเหล่านี้อาจทำให้เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุได้ โดยวัสดุหนึ่งมีแนวโน้มที่จะดึงดูดอิเล็กตรอนได้แรงกว่าวัสดุอื่นเนื่องจากความแตกต่างในความสัมพัทธ์ของอิเล็กตรอน

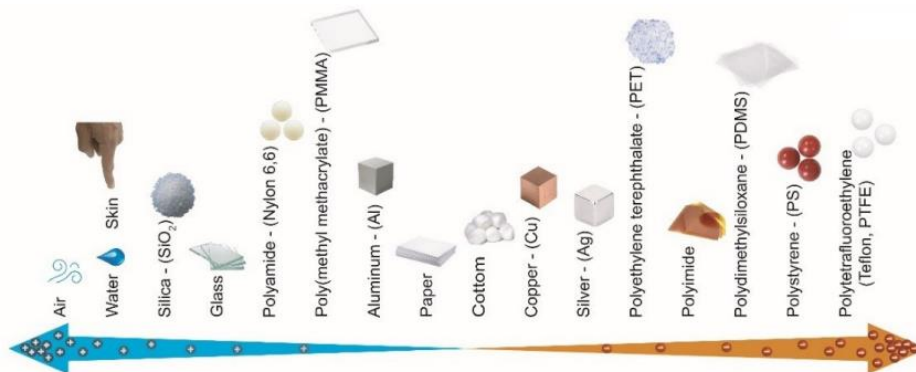
— การแยก (Separation) คือ เมื่อวัสดุทั้งสองถูกแยกออกจากกัน วัสดุทั้งสองจะคงประจุที่ได้รับระหว่างการสัมผัส การแยกประจุนี้สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุทั้งสองสามารถบ่งบอกคุณลักษณะจากการจัดลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series) คือ รายการวัสดุที่จัดอันดับตามแนวโน้มที่จะได้รับหรือสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อวัสดุสัมผัสกัน วัสดุที่อยู่ด้านบนสุดมีแนวโน้มที่จะได้รับอิเล็กตรอนและมีประจุลบ ในขณะที่วัสดุที่อยู่ด้านล่างมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนและมีประจুবวกอีกทั้งช่วยทำนายผลลัพธ์ของปฏิกิริยาระหว่างวัสดุต่าง ๆ

— ความไม่สมดุลของประจุ (Charge Imbalance) คือ หลังจากการแยกตัววัสดุหนึ่งกลายเป็นมีประจুবวกเนื่องจากมีการสูญเสียอิเล็กตรอน ในขณะที่อีกอันกลายเป็นมีประจุลบเนื่องจากมีการได้รับอิเล็กตรอนซึ่งสร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุสองชนิด

— การถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron Transfer) คือ ในระหว่างการสัมผัสอิเล็กตรอนบางตัวอาจถ่ายโอนจากวัสดุหนึ่งไปยังอีกวัสดุหนึ่ง วัสดุที่ได้รับอิเล็กตรอนจะมีประจุลบในขณะที่วัสดุที่สูญเสียอิเล็กตรอนจะมีประจুবวก

— การกระจายประจุไฟฟ้าสถิต (Charge Distribution) คือ เมื่อวัสดุที่มีประจุไฟฟ้าถูกนำเข้าไปใกล้กับตัวนำธรรมชาติหรือเป็นกลาง (Neutral Conductor) ก็จะเป็นสาเหตุทำให้เกิดการสมดุลของประจุของตัวนำกลางแยกออกจากกัน โดยขั้วของประจุที่เกิดขึ้นจะเกิดตรงกันข้ามกับประจุของวัตถุที่มีประจุไฟฟ้าสถิตโดยไม่ต้องมีการสัมผัสโดยตรง ซึ่งมีบทบาทในการใช้ในการประยุกต์ใช้ต่าง ๆ

— ลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series) คือ ลำดับความยากง่ายในการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าบวกและลบของวัสดุต่าง ๆ ตามความสามารถในการสูญเสียหรือได้รับอิเล็กตรอนเมื่อมีการสัมผัสกับวัสดุอื่น ๆ โดยวัสดุที่อยู่ในลำดับสูงขึ้นไปจะมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นมีประจুবวก ในขณะที่วัสดุที่อยู่ในลำดับต่ำกว่ามักจะมีแนวโน้มที่จะได้รับอิเล็กตรอนกลายเป็นมีประจุลบ วัสดุสองชนิดเกิดการเสียดสี ถู หรือสัมผัสกันอย่างต่อเนื่องด้วยแรงเชิงกลจะสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 2-17 ลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series)

(Rodrigues et al., 2020)

จากภาพที่ 2-17 การเลือกวัสดุที่อยู่บริเวณสูงสุดด้านซ้ายมีแนวโน้มการให้ประจุบวกมากที่สุดและบริเวณสูงสุดด้านขวามีแนวโน้มการให้ประจุลบมากที่สุด วัสดุในแต่ละชนิดสามารถแบ่งประเภทของวัสดุไทรโบอิเล็กทริกที่นิยมใช้ในแต่ละงานและแต่ละประเภทได้แก่

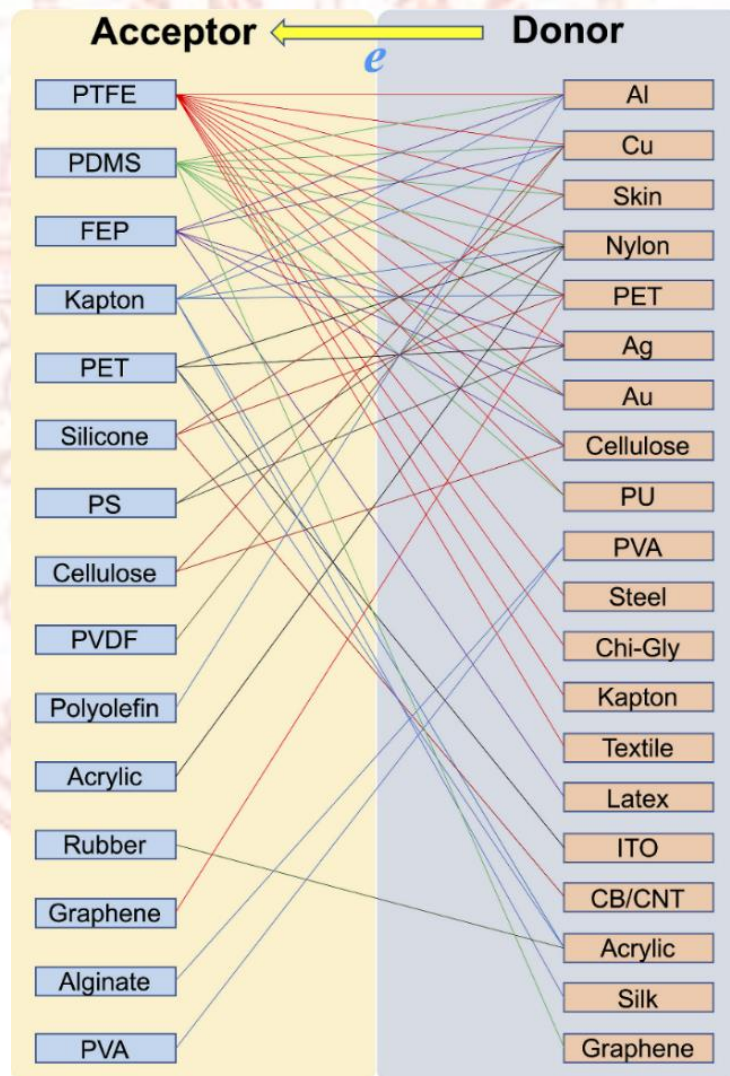
1. พอลิเมอร์ เช่น โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene) โพลีเอทิลีน (Polyethylene) และ ยางซิลิโคน (Silicone Rubber) นิยมใช้เป็นวัสดุไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Material) เนื่องจากสามารถสร้างประจุไฟฟ้าสถิตได้มากเมื่อถูกลูหรือสัมผัสกับวัสดุที่มีความต่างทางขั้วชนิดอื่น ๆ
2. โลหะ เช่น อลูมิเนียม ทองแดง และสแตนเลสสตีล สามารถแสดงคุณสมบัติไทรโบอิเล็กทริกเมื่อมีการสัมผัสกับวัสดุอื่น โลหะเหล่านี้สามารถใช้ในการสร้างประจุไฟฟ้าสถิตเมื่อต้องการส่วนของสูง
3. ผ้า เช่น ขนแกะ ไหม และโพลีเอสเตอร์ วัสดุเหล่านี้นิยมใช้ในเสื้อผ้าและสิ่งทอผ้าเพื่อสร้างประจุไฟฟ้าสถิต
4. เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductors) เช่น ซิลิคอนและเจอร์เมเนียม วัสดุเหล่านี้มักถูกใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และเซนเซอร์

จากการลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series) ข้างต้นจะใช้วัสดุมีคุณสมบัติที่ทำให้เกิดไหลของอิเล็กตรอนแตกต่างกันระหว่างวัสดุแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

1. วัสดุที่มีคุณสมบัติการให้อิเล็กตรอน (Electron Acceptors) คือ วัสดุที่มีความสามารถในการดึงดูอิเล็กตรอนน้อยลง ดังนั้นมักจะสูญเสียอิเล็กตรอนเมื่อมาสัมผัสกับวัสดุอื่น ๆ โดยผลลัพธ์ทำให้กลายเป็นมีประจุบวกในวัสดุ

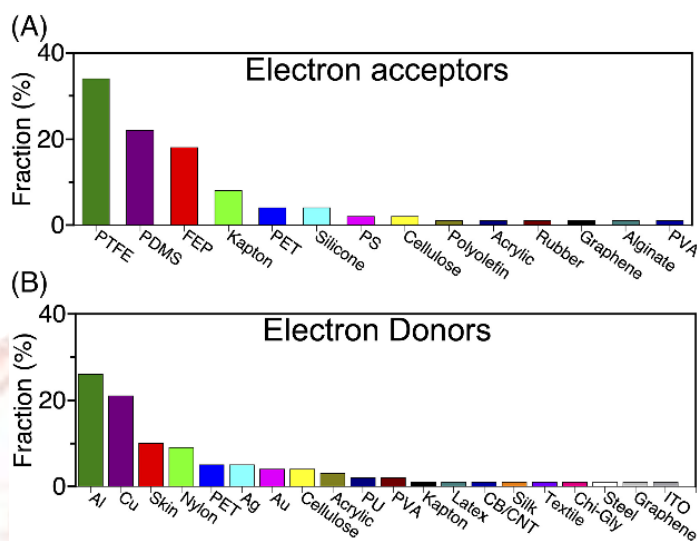
2. วัสดุที่มีคุณสมบัติการรับอิเล็กตรอน (Electron Donors) คือ วัสดุที่มีความสามารถในการดึงดูอิเล็กตรอนมากกว่ามักจะรับอิเล็กตรอนเมื่อสัมผัสกับวัสดุอื่น ๆ โดยผลลัพธ์ทำให้กลายเป็นกลายเป็นมีประจุลบในวัสดุ

ในการเลือกจับคู่กันเพื่อสามารถบรรลุประสิทธิภาพและประสิทธิผลในการแปลงพลังงานได้เพิ่มขึ้นสามารถพิจารณาได้จากภาพที่ 2-18 และ ภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-18 Network of electron acceptors and donors

(R. Zhang & Olin, 2020)



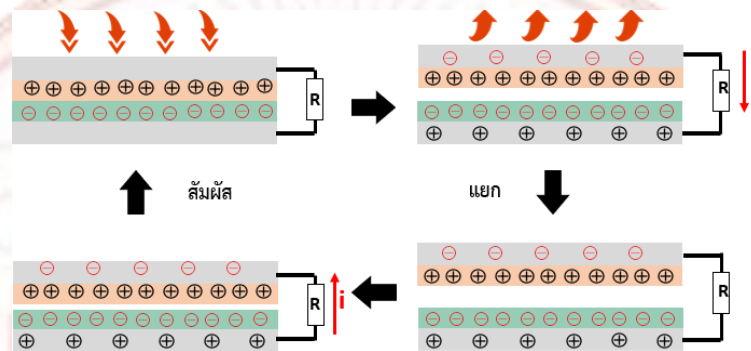
ภาพที่ 2-19 Fraction of different materials used for electron acceptors and donors
(R. Zhang & Olin, 2020)

โดยประจุที่สร้างขึ้นเมื่อวัสดุสองชนิดที่มีความแตกต่างที่ขั้วสูงเกิดการสัมผัสและแยกออกจากกันทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตเป็นกระบวนการที่วัตถุทั้งสองที่เดิมไม่มีประจุจะมีประจุเมื่อสัมผัสกันแล้วแยกออกจากกันวัสดุทั้งสองเป็นประจุโดยได้รับอิเล็กตรอนจากวัสดุอื่นซึ่งกระบวนการนี้เกิดขึ้นกับวัสดุที่มีฉนวนสูงจำพวกโพลีเมอร์ (Polymer) สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้เป็นระยะเวลาอันยาวนานหากมีความเป็นฉนวนไฟฟ้าเพียงพอ โดยที่ขั้วของประจุนั้นอยู่กับลักษณะของวัสดุทั้งสองที่ได้รับผลกระทบจากปัจจัยหลายประการ เช่น สภาพพื้นผิว ขนาดของพื้นที่สัมผัส ความเร็วของการแยก ความชื้น และการประกอบใช้งาน โดยใช้วัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น ทองแดง คาร์บอน และอะลูมิเนียมติดหรือเชื่อมต่ออยู่ด้านบนและด้านล่างของวัสดุสองชนิดเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วทางไฟฟ้า

สามารถจำแนกลักษณะการเกิดไตรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect) ได้จาก 4 ลักษณะดังนี้

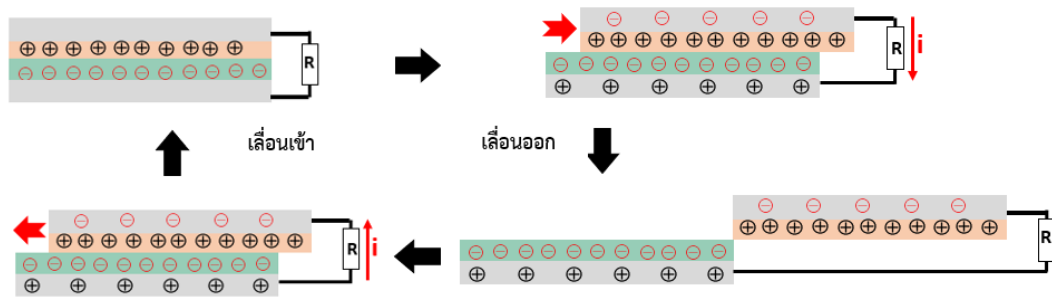
1. การแยกหน้าสัมผัส (Contact Separation) ทำงานโดยอาศัยการสัมผัสและการแยกวัสดุสองชนิดที่มีขั้วต่อสองขั้วที่มีขั้วคุณสมบัติลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series) ตรงข้ามกัน (ขั้วบวกและขั้วลบ) จะอยู่ที่ด้านบนและด้านล่าง กระบวนการสัมผัสและแยกตัวสามารถทำซ้ำได้ต่อเนื่องเรื่อย ๆ ตลอดจนมีการเคลื่อนที่หรือการกระตุ้นกล โครงสร้างการประกอบแสดงในภาพที่ 2-20 ขั้วต่อทั้งสองมีช่องว่างอากาศเล็กน้อยระหว่างกัน เมื่อแรงกลภายนอกมากจะทำให้เกิดการสัมผัสและแยกออกจากกัน อิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนระหว่างสองวัสดุเนื่องมาจากการคายหรือปลดปล่อยออกมาจากการรับอิเล็กตรอนวัสดุหนึ่งมีแนวโน้มที่จะได้รับอิเล็กตรอนและกลายเป็น

ประจุลบในขณะที่อีกชนิดมีแนวโน้มที่จะสูญเสียอิเล็กตรอนและกลายเป็นประจุบวก ทำให้เกิดการดึงดูดประจุต่างขั้วระหว่างกันส่งผลให้มีประจุบวกเกิดขึ้นที่ขั้วลบและมีประจุลบเกิดขึ้นที่ขั้วบวก เมื่อเกิดการสัมผัสและแยกตัวซ้ำ ๆ จากกระทำของแรงกลภายนอกทำให้เกิดการสะสมประจุที่มากขึ้น ทำให้เกิดการไม่สมดุลของประจุระหว่างวัสดุจนเกิดเป็นไฟฟ้าสถิตและประจุที่ถูกสร้างขึ้นจะไหลผ่านวงจรภายนอกเพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าได้



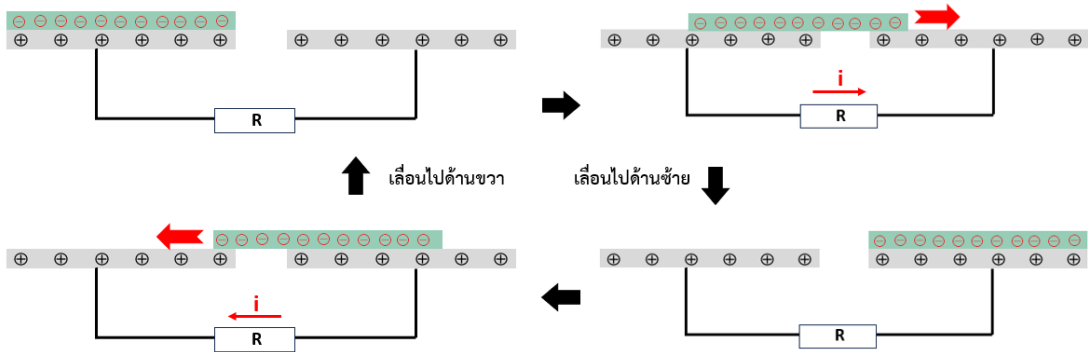
ภาพที่ 2-20 การแยกหน้าสัมผัส (Contact Separation)

2. การเลื่อนด้านข้าง (Lateral-Sliding) อาศัยแรงเสียดทานเลื่อนไปด้านข้างระหว่างวัสดุสองชนิดที่มีขั้วต่อสองขั้วที่มีขั้วคุณสมบัติลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series) ตรงข้ามกัน (ขั้วบวกและขั้วลบ) ประสิทธิภาพของไทรโบอิเล็กทริกในโหมดนี้ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนไหวยระหว่างวัสดุสองชนิดบนพื้นผิวสัมผัสสูงแทนที่จะการสัมผัสและแยกแบบรวดเร็ว โครงสร้างการประกอบแสดงดังภาพที่ 2-21 ลักษณะการสัมผัสกันระหว่างประจุขั้วบวกและขั้วลบ จะถูกนำไปในทิศทางที่สัมผัสเลื่อนด้านข้างกัน การเคลื่อนนี้สร้างการแบ่งประจุระหว่างชั้นของสองวัสดุชั้นหนึ่งติดประจุบวกและอีกชั้นหนึ่งติดประจุลบเมื่อพื้นผิวทั้งสองสัมผัสหรือแยกออก การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นระยะในพื้นสัมผัสระหว่างทั้งสองวัสดุที่ถูกเลื่อนเข้าและออกหากัน ส่งผลให้พื้นผิวเกิดการแยกตัวของประจุด้านข้างแรงเสียดทานจะทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างวัสดุทั้งสองทำให้เกิดการผลิตงานไฟฟ้า



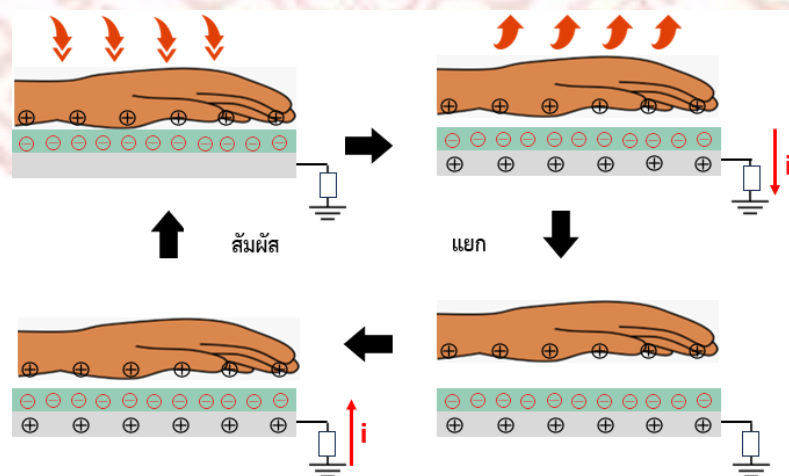
ภาพที่ 2-21 การเลื่อนด้านข้าง (Lateral-Sliding)

3. โหมดอิสระ (Freestanding) วัสดุเคลื่อนที่อย่างอิสระในอากาศหรือสื่อของของเหลว พวกเขามาสัมผัสและแยกตัวซ้ำ ๆ การเคลื่อนที่นี้สามารถกระตุ้นโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น ลม การสั่นสะเทือน และการไหลของเหลว ใช้วัสดุชนิดเดียวโดยส่วนใหญ่เพื่อให้มีโครงสร้างที่เรียบง่ายโดยใช้เพียงขั้วเดียวสามารถดำเนินการต่อไปได้ตลอดเวลาประกอบด้วยวัสดุสองชนิดที่มีขั้วคุณสมบัติลำดับประจุไฟฟ้า (Triboelectric Series) ตรงข้ามกัน (ขั้วบวกและขั้วลบ) ที่เรียงในโครงสร้างอิสระ วัสดุเหล่านี้มักมีน้ำหนักเบาและยืดหยุ่นเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหวในอากาศหรือสื่อของของเหลวได้ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสหรือการกระตุ้นกลไกให้เกิดการสัมผัสและการแยกตัวระหว่างขั้วกับวัสดุหรือพื้นผิวอื่น ๆ ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทั้งสองอยู่กับที่และไม่เชื่อมต่อกับกราวด์ (GND) จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) สมมาตรสองตัวที่เชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านโหลด (Load) การเหนี่ยวนำจะสร้างความไม่สมดุลในการกระจายประจุเมื่อส่วนประกอบที่เป็นวัสดุไดอิเล็กทริก ถูกเลื่อนออกระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้เกิดการถ่ายโอนประจุผ่านอิเล็กโทรดจะไหลผ่านโหลดภายนอก พื้นผิวของโครงสร้างการประกอบแสดงในภาพที่ 2-22 อาศัยการเคลื่อนไหวที่สัมพันธ์กันระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode) กับวัสดุไดอิเล็กทริกทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตจากแรงเสียดทาน (Triboelectric Friction) เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุบางชนิดจะมีประจุไฟฟ้าเมื่อมาสัมผัสกันและหลังจากการสัมผัสนั้น จะเป็นต้นทางสำหรับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุการถ่ายโอนนี้นำไปสู่การสร้างไฟฟ้าสถิตหรือประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของวัสดุ ประสิทธิภาพในการเหนี่ยวนำไฟฟ้าสถิตจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ประเภทของวัสดุ เนื้อผิวของวัสดุ และแรงที่ใช้ในขณะการขัด ถู เสียดสีกัน การประกอบลักษณะนี้ช่วยให้เกิดการพัฒนาดำเนินการได้จากการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode)



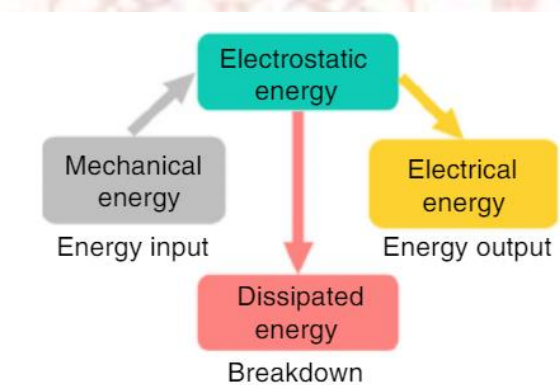
ภาพที่ 2-22 โหมดอิสระ (Freestanding)

4. โหมดอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-Electrode) ประกอบด้วยโครงสร้างขั้วเดียวช่วยให้โครงสร้างเรียบง่ายลงมักจะเคลื่อนบนฐานที่ยึดหยุ่น ขณะที่ขั้วนี้มีการสัมผัสกับวัสดุหรือพื้นผิวอื่น ๆ กับการทำงานแต่ละรอบของการสัมผัสและการแยกตัว ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้นและสามารถนำไปใช้ในการประยุกต์ที่ต่างกันได้ โครงสร้างการประกอบแสดงดังภาพที่ 2-23 การสัมผัสและการแยกตัวประกอบด้วยขั้วเดียวซึ่งมักจะเคลื่อนบนฐานที่ยึดหยุ่นขณะที่ขั้วนี้มีการสัมผัสกับวัสดุหรือพื้นผิวอื่น ๆ ที่มีค่าความแตกต่างทางขั้วกันจะเกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect) ขณะสัมผัสอิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนระหว่างวัสดุโดยทำให้เกิดประจุไฟฟ้าบนพื้นผิวของขั้วเดียว เมื่อวัสดุแยกออกจากกันประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะยังคงอยู่บนพื้นผิวของขั้วเดียวการแยกตัวของประจุนี้สร้างความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วเดียวและสิ่งรอบข้างสามารถใช้ในการผลิตไฟฟ้าได้โดยการเชื่อมต่อวงจรภายนอกกับขั้วเดียวประจุที่สะสมได้สามารถไหลผ่านวงจรไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 2-23 โหมดอิเล็กโทรดเดี่ยว (Single-Electrode)

กลไกและผลลัพธ์ของการเกิดปรากฏการณ์ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric Effect) โดยทั่วไปมีการนำเสนอการกำหนดรูปแบบและกลไกต่าง ๆ ที่ออกแบบเพื่อใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานจากแหล่งแหล่งต่าง ๆ และสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันสามารถอธิบายภาพรวมที่เกี่ยวข้องกันระหว่างพลังงานทางกล (Energy Input) การสูญเสียระหว่างกระบวนการ (Breakdown) และพลังงานไฟฟ้าที่ได้ (Energy Output) จากภาพที่ 2-24 พลังงานกล (Mechanical Energy) คือ การกระตุ้นทางกลพลังงานกลที่ใช้ในการนำวัสดุสองชนิดมาสัมผัสและแยกตัวออกจากแหล่งต่างๆ เช่น การเคลื่อนไหวของมนุษย์ การสั่นสะเทือน หรือแรงกระทำจากสิ่งแวดล้อม ส่งผลต่อประสิทธิภาพของพลังงานที่เก็บเกี่ยวในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Energy) ของประจุไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในระหว่างกระบวนการ (Xia, Fu, & Zi, 2019)



ภาพที่ 2-24 Energy flow chart of triboelectric system.

(Xia et al., 2019)

โดยพลังงานที่เก็บเกี่ยวในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Energy) มี 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกันในกระบวนการได้แก่

1. พลังงานที่สูญเสียระหว่างกระบวนการ (Dissipated Energy) คือ พลังงานที่สูญเสียหรือแปลงเป็นรูปแบบอื่นในระหว่างการทำงานของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นด้วยเหตุผลต่าง ๆ อย่างเช่น

— การสูญเสียจากการเสียดทาน (Frictional Losses) ระหว่างการสัมผัสและแยก มีแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบของความร้อนซึ่งพลังงานนี้จะถูกสูญเสียไปยังสิ่งแวดล้อมและไม่ได้ถูกแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า

— การสูญเสียจากความสูญเสียทางกล (Mechanical Losses) จากส่วนประกอบของอุปกรณ์ในการประกอบติดตั้งของสองวัสดุและการเลือกใช้วัสดุที่ไม่มีประสิทธิภาพมากพอในการเก็บเกี่ยวพลังงานทางกล

— การสูญเสียจากส่วนที่เกี่ยวข้องกับไฟฟ้า (Electrical Losses) เกิดความต้านทานภายใน กระบวนการทำให้การไหลของกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ผลลัพธ์น้อยลง

— ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม (Environmental Factors) เงื่อนไขสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และแรงดันของอากาศ

2. พลังงานทางไฟฟ้า (Electrical Energy) พลังงานที่ได้จากการถูกเก็บเกี่ยวเป็น พลังงานไฟฟ้าประจุไฟฟ้าที่สะสมขึ้นจากนั้นถูกเก็บรวบรวมและนำไปผ่านวงจรภายนอกซึ่งสามารถใช้ เป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถใช้ได้โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเป็นกระแสสลับ (AC) นำอุปกรณ์มาต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit) เพื่อเรียงกระแสเป็นไฟฟ้าแรงดันตรง (DC) เพื่อเป็น แหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถสร้างพลังงานไฟฟ้าได้ตั้งแต่ไมโครวัตต์ถึงวัตต์ ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้ การออกแบบอุปกรณ์ และเงื่อนไขการใช้งาน สามารถวัด ประสิทธิภาพของพลังงานที่ได้จากพารามิเตอร์การวัดค่าที่สำคัญดังนี้

— แรงดันไฟขาออก (Output Voltage) คือ แรงดันที่สร้างขึ้นเมื่อทำงานบ่งบอกถึง ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและลบของอุปกรณ์ 2 ลักษณะได้แก่

1. ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V) เป็นการวัดค่าที่บ่งบอกถึง ปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่พร้อมทำงานต่อหน่วยประจุระหว่างพื้นผิวทั้งสองส่วนความต่างนี้เป็น ค่าที่วัดปริมาณการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรภายนอกขณะที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์

2. ความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าในวงจรเปิดมีหน่วยเป็นโวลต์ (V_{oc}) วัดจาก ขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยตรงแบบไม่มีโหลดเชื่อมต่อเป็นตัวบ่งบอกที่สำคัญสำหรับการประเมิน ประสิทธิภาพและความเหมาะสมสำหรับการใช้งานต่าง ๆ

— กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (Short-Circuit Current) มีหน่วยวัดเป็นแอมป์ (A) โดยทั่วไป จะมีหน่วยเป็น (μA) หรือ (mA) บ่งบอกถึงความสามารถในการส่งออกกระแสสูงสุดของการผลิตไฟฟ้า ภายใต้เงื่อนไขที่ดีที่สุด โดยที่ขั้วบวกและลบถูกเชื่อมต่อโดยตรงโดยไม่มีโหลดภายนอกในวงจรที่ อาจถูกกระทบโดยปัจจัยต่าง ๆ เช่น พื้นที่ผิวของวัสดุ แรงกด และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ ในการสร้างอุปกรณ์

— พลังงานไฟฟ้าขาออก (Output Power) มีหน่วยวัดเป็นวัตต์ (W) อุปกรณ์ทำหน้าที่ เป็นแหล่งจ่ายพลังงานในปัจจุบัน มักจะเก็บพลังงานก่อนจะจ่ายพลังงานไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังนั้นความหนาแน่นของพลัง (Power Density) ที่สามารถจัดเก็บได้เป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการวัด ประสิทธิภาพการนำมาใช้งาน โดยทั่วไปจะมีการวัดจากค่ากระแสและแรงดันขณะกักเก็บพลังงาน ที่ตัวเก็บประจุ (Capacitor) สามารถคำนวณด้วยสมการที่ 2-3 ดังนี้

$$P_{Density} = \frac{P}{A} \quad (2-3)$$

เมื่อ $P_{Density}$ คือ ค่าความหนาแน่นของพลัง (W/m²)

P คือ ค่าพลังงานที่ถูกผลิต (W)

A คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (m²)

— การโอนย้ายประจุ (Transferred Charge Output) มีหน่วยวัดเป็นคูลอมบ์ (C) โดยทั่วไปจะมีหน่วยวัดเป็น (nC) ปริมาณของประจุที่ถูกโอนย้ายระหว่างวัสดุสองชนิดในขณะที่เกิดปรากฏการณ์โทรโบอิเล็กทริกการโอนย้ายประจุขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น วัสดุที่ใช้ คุณสมบัติของพื้นผิวของวัสดุ พื้นที่สัมผัส และแรงทางกลที่ใช้ การประเมินปริมาณการโอนย้ายประจุเป็นสิ่งสำคัญสำหรับเข้าใจกลไกการสร้างพลังงานและปรับปรุงประสิทธิภาพใช้เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่สามารถเก็บเกี่ยวได้ อีกทั้งการวัดความหนาแน่นประจุเชิงผิว (Surface Charge Density) สัญลักษณ์ σ มีหน่วยเป็น (μCm^{-2}) ยังเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อวัดปริมาณการกระจายประจุไปเฉพาะจุดบนพื้นผิวสามารถคำนวณด้วยสมการที่ 2-4 ดังนี้

$$\sigma = \frac{q}{A} \quad (2-4)$$

เมื่อ σ คือ ค่าความหนาแน่นประจุเชิงผิว (μCm^{-2})

q คือ ค่าปริมาณของประจุ (nC)

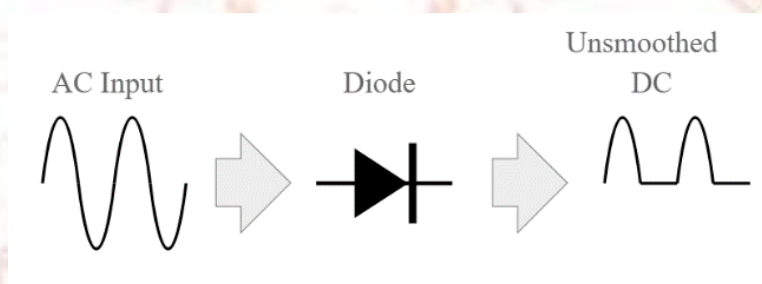
A คือ พื้นที่หน้าตัดสุทธิ (m²)

จากค่าพารามิเตอร์การวัดดังกล่าวมาข้างต้นเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการระบุประสิทธิภาพและการปรับปรุงการออกแบบของอุปกรณ์สำหรับการใช้งานต่าง ๆ ที่รวมถึงการเก็บเกี่ยวพลังงานทางไฟฟ้าที่ได้

2.4 หลักการทำงานของวงจรเรียงกระแส (Rectifier Circuit)

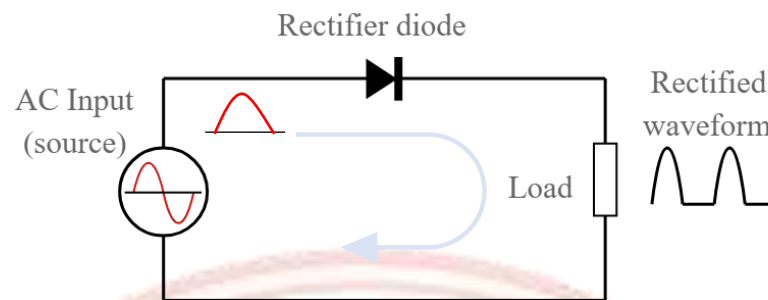
วงจรไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติในการแปลงสัญญาณกระแสสลับ (AC) ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง (DC) มีคุณสมบัติยอมให้ไฟฟ้าไหลผ่านไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ไดโอด คือ อุปกรณ์ที่นิยมใช้ในการแปลงสัญญาณแบ่งวงจรออกเป็น 3 ประเภทได้แก่

2.4.1 วงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier Circuit) จะเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ตัดเอาแรงดันไฟสลับที่ป้อนเข้ามาอาจเป็นครึ่งบวกหรือครึ่งลบ ขึ้นอยู่กับการจัดวงจรไดโอด แรงดันไฟที่ขาออกจะเป็นรูปครึ่งคลื่นบวกเท่านั้นช่วงที่มีแรงดันและช่วงไม่มีแรงดันสลับกันไป วงจรประกอบด้วยไดโอดตัวเดียวดังภาพที่ 2-25 การทำงานของวงจรไฟกระแสสลับจะมาปรากฏที่ขาแอโนด (Anode) โดยไดโอดจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียวในช่วงที่ได้รับไบอัสตรง ดังนั้นวงจรจะมีกระแสไหลเพียงช่วงบวกของไฟสลับเท่านั้น ถ้าช่วงลบจะไม่มีกระแสไหล แรงดันไฟขาออก (Voltage Output)



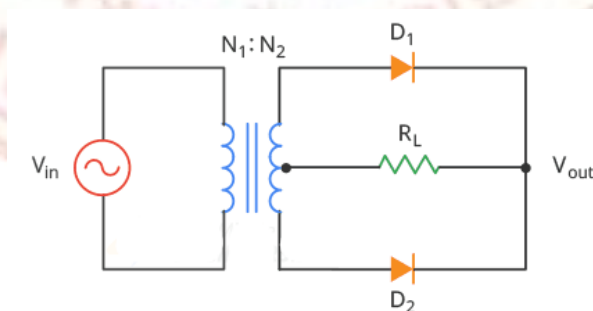
ภาพที่ 2-25 แรงดันไฟขาออกกระแสตรง (DC) ของเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Poole, 2018)

การทำงานของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half Wave Rectifier) มีลักษณะวงจรแสดงดังภาพที่ 2-26 จะพิจารณาครึ่งลูกคลื่นไฟกระแสสลับ (AC) การทำงานเมื่อจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ลักษณะแรงดันเป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) เข้าทางด้านบวกของขาแอโนด (Anode) ของไดโอดได้รับแรงดันซีกบวกทำให้แรงดันเป็นบวก ไดโอดจะได้รับไบอัสตรง (Forward Bias) ทำให้มีกระแสไหลผ่านโหลด (Load) เกิดแรงดันตกคร่อมทำให้แรงดันไฟออกเป็นรูปคลื่นซีกบวกและเมื่อรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ช่วงครึ่งคลื่นลบเข้ามาทำให้แรงดันเป็นลบ ไดโอดได้รับไบอัสกลับ (Reverse Bias) ไม่มีกระแสไหลผ่านไดโอด จะไม่เกิดแรงดันตกคร่อมที่โหลด (Load) ดังนั้นส่งผลให้แรงดันไฟขาออกมีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องมาจากแรงดันซีกลบจะไปตกคร่อมไดโอดทั้งหมด (Kittiamornkul, 2017)



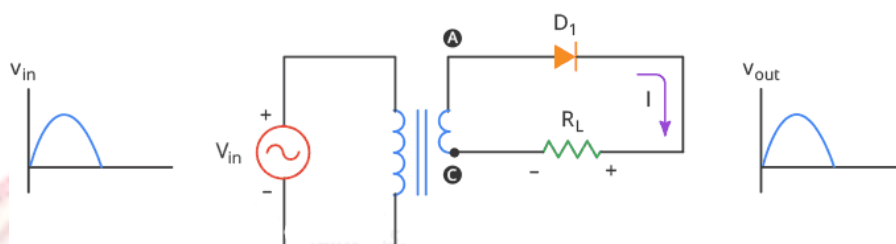
ภาพที่ 2-26 การต่อวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier Circuit)
(Poole, 2018)

2.4.2 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier Circuit) เนื่องจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่นเกิดปัญหาสัญญาณไฟฟ้าขาออก (Output) ไม่เรียบหรืออาจกล่าวได้ว่าเกิดรอยหยัก (Ripple) ของสัญญาณไฟฟ้า วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มถูกจัดเรียงไดโอดเพื่อลดปัญหาของรอยหยักที่เกิดขึ้นจากวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งคลื่น วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นจึงถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานประกอบด้วยไดโอด 2 ตัวจะผลัดกันทำงานฝั่งละครึ่งคลื่นโดยกระแสไฟฟ้าจะไหลมาครบวงจรที่จุดหม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แทป (Center Tap Transformer) ทำให้การเรียงกระแสออกมาครบทั้งซีกบวกและซีกลบเป็นการเรียงกระแสให้ออกมาเป็นซีกบวกเรียงกันไป (Poole, 2018) แสดงดังภาพที่ 2-27 สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นบวกและวงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่นลบ โดยขึ้นอยู่กับการจัดเรียงไดโอดเพื่อใช้งานพิจารณาการทำงานทั้งสองด้านได้จากภาพที่ 2-28 และ ภาพที่ 2-29



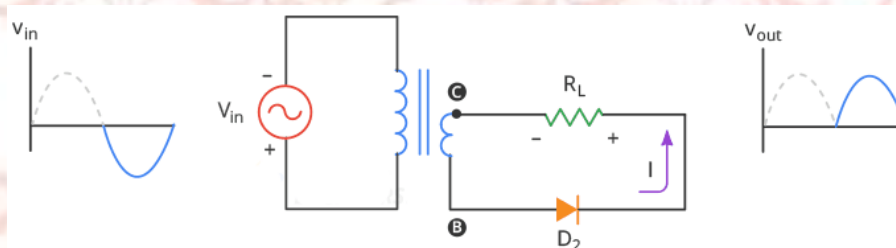
ภาพที่ 2-27 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบเต็มคลื่น (Full Wave Rectifier Circuit)
(Engineers, 2019)

จากภาพที่ 2-28 เมื่อมีสัญญาณขาเข้า (Input) ซึ่งเป็นสัญญาณครึ่งคลื่นบวกเข้ามา ไดโอดจะถูกไบอัสตรง (Forward Bias) เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร เกิดแรงดันไฟฟ้าคร่อมตัวต้านทาน R_L ตามลักษณะของสัญญาณขาเข้า



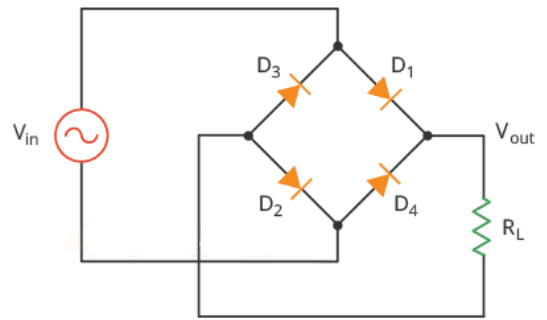
ภาพที่ 2-28 การทำงานด้านเต็มคลื่นบวก (Positive Half-cycle)
(Engineers, 2019)

จากภาพที่ 2-29 สัญญาณขาเข้า (Input) ผ่านตัวต้านทาน R_L กระแสไฟฟ้า สามารถไหลเข้ามาครบวงจรบริเวณจุด C หรือ center tap ของหม้อแปลงแบบ (Center tap transformer) ได้โดยจะผ่านมาได้เฉพาะสัญญาณซีกลบเท่านั้น



ภาพที่ 2-29 การทำงานด้านเต็มคลื่นลบ (Negative Half-cycle)
(Engineers, 2019)

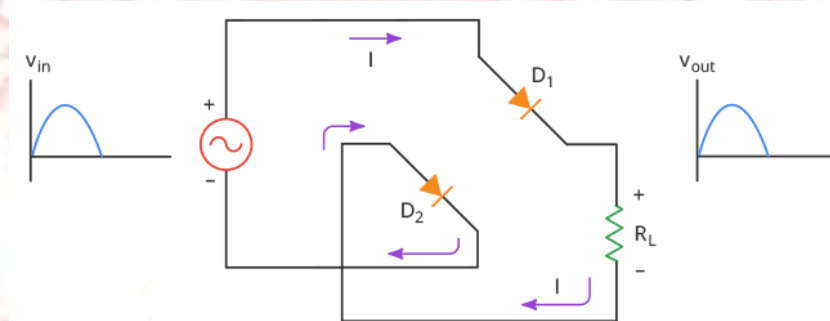
2.4.3 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (Full Bridge Rectifier Circuit) มีลักษณะเหมือนวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นแต่วงจรนี้ไม่จำเป็นต้องใช้หม้อแปลงชนิดเซนเตอร์แทป (Center Tap Transformer) เพราะแรงดันเอาต์พุตที่ได้เป็นแบบเต็มคลื่นข้อแตกต่างระหว่างวงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์และแบบเต็มคลื่นธรรมดาต่างกันตรงการต่อวงจรไดโอดแบบเต็มคลื่นจะใช้ไดโอด 2 ตัวแบบบริดจ์จะใช้ไดโอด 4 ตัวแสดงดังภาพที่ 2-30 สามารถอธิบายหลักการทำงานของไดโอดที่ทำงานในช่วงแบบบริดจ์บวกและลบพิจารณาได้จากภาพที่ 2-31 และ ภาพที่ 2-32



ภาพที่ 2-30 วงจรเรียงกระแสไฟฟ้าแบบบริดจ์ (Full Bridge Rectifier Circuit)

(Engineers, 2019)

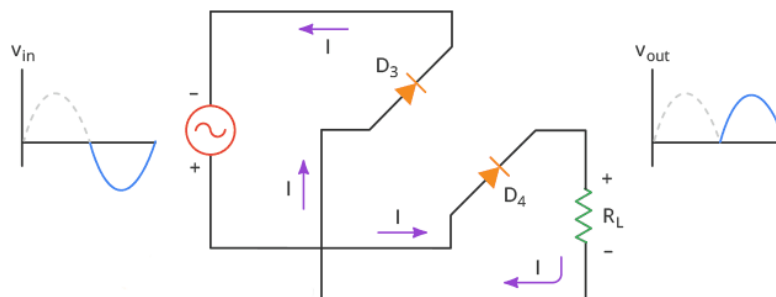
จากภาพที่ 2-31 สัญญาณขาเข้า (Input) ซีกบวกของไฟฟ้ากระแสสลับไดโอดตัวที่ D1 และ D2 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (Forward Bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก (Output) โดยไดโอดตัวอื่น ๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ (Reverse Bias)



ภาพที่ 2-31 การทำงานด้านแบบบริดจ์บวก (Positive Half-cycle)

(Engineers, 2019)

จากภาพที่ 2-32 เมื่อสัญญาณขาเข้า (Input) สลับเป็นสัญญาณซีกลบไดโอดตัวที่ D4 และ D3 จะอยู่ในสภาวะไบอัสตรง (Forward Bias) กระแสไฟฟ้าจึงไหลครบวงจรเกิดสัญญาณขาออก (Output) โดยไดโอดตัวอื่น ๆ จะอยู่ในสภาวะไบอัสกลับ (Reverse Bias)



ภาพที่ 2-32 การทำงานด้านแบบบริดจ์กลับ (Negative Half-cycle)
(Engineers, 2019)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปัจจุบันและอนาคตเทคโนโลยีมีการพัฒนาที่รวดเร็วและต่อเนื่องของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ Artificial Intelligence (AI) ในการสร้างคอมพิวเตอร์อัจฉริยะโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถวางแผน หาเหตุผล เรียนรู้ รับรู้ สร้างมุมมองความรู้ ที่สามารถสื่อสารได้อย่างเป็นธรรมชาติ และเทคโนโลยี Internet of Things (IoT) หรือ อินเทอร์เน็ตในทุกสิ่งๆ เพื่อถ่ายโอนหรือแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างเครือข่ายถูกเชื่อมโยงสิ่งต่าง ๆ เข้าหากันเพื่อตอบสนองความสะดวกสบายในการใช้งานในด้านต่าง ๆ ของมนุษย์ ทำให้ความต้องการใช้พลังงานมีเพิ่มมากขึ้นแต่มีข้อจำกัดในการผลิตที่เฉพาะจากแหล่งเชื้อเพลิงธรรมชาติไม่ได้มาจากพลังงานที่สะอาด ยั่งยืนและมาจากแหล่งพลังงานที่แพร่หลาย

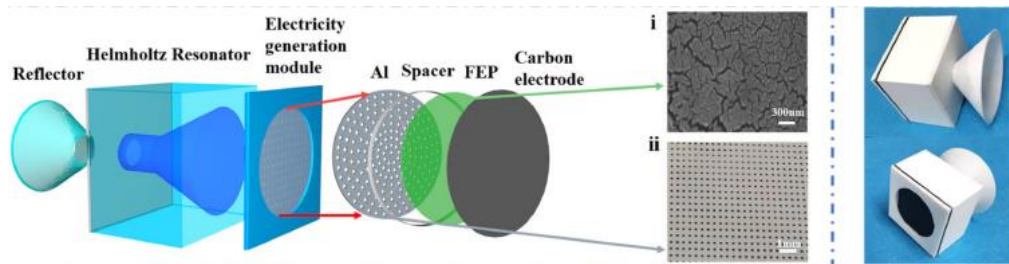
คลื่นอะคูสติก (Acoustic Wave) หรือ คลื่นเสียง (Sound Wave) ที่เกิดโดยรอบตัวเราในสภาพแวดล้อมหรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ อาทิเช่น การทำงานของเครื่องจักร เสียงเพลง และเสียงคมนาคมขนส่ง แต่น่าเสียดายที่พลังงานเสียงยังไม่ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานต่ำและขาดเทคโนโลยีพลังงานที่มีประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม ก่อนศึกษาก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่เน้นไปที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) หรือ การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Induction) แต่มีข้อเสียที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ อาทิเช่น ประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าต่ำและการประกอบโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อน จึงมีความจำเป็นเพื่อพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานเสียงที่มีประสิทธิภาพในการสร้างหรือกำเนิดพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้น ในปี 2012 ศาสตราจารย์ Wang Zhonglin ได้รายงานแนวทางใหม่ในการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมจากพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ไทรโบอิเล็กทริก (Triboelectric) กับเครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานโดยใช้แผ่นฟิล์มออร์แกนิก (Organic Film) และใช้

หลักการสะท้อนของคลื่นเสียง Helmholtz มาออกแบบกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ทำให้อุปกรณ์เพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้า ได้ระดับแรงดันไฟฟ้าออกสูงสุดที่ 60.5 V และไฟฟ้ากระแสตรงขาออกสูงสุดที่ 15.1 μA และความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด 60.2 mW/m^2 ประสิทธิภาพคลื่นความถี่เสียงต่ำที่ 240 Hz (Yu et al., 2021) จากการสำรวจงานวิจัยส่วนใหญ่ชิ้นนี้ เครื่องเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำแบบใหม่นี้ สามารถทำงานในช่วงความถี่ 50-425 Hz และมีการออกแบบโครงสร้างตะขวยช่วยเสริมประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเพิ่มความหนาแน่นของกระแสได้ 45 mA/m^2 แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดที่ 90 V (Wang et al., 2021)

อุปกรณ์เก็บเกี่ยวคลื่นเสียงได้ถูกพัฒนาเพื่อเก็บเกี่ยวพลังงานเสียงโดยรอบ อาศัยปรากฏการณ์ ไทโรโบอิเล็กทริก (Triboelectric effect) จากสมการของ Maxwell's Equations เรื่องการเคลื่อนที่ของกระแส (Displacement Current) เป็นแรงผลักดันในการแปลงพลังงานกลแบบกระจาย (Disorganized type) ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในการเก็บเกี่ยวพลังงานและระบบผลิตพลังงานด้วยตัวเอง (Self-Powered Systems) นอกจากนี้ยังมีลักษณะเด่นที่มีขนาดเล็ก ต้นทุนต่ำ น้ำหนักเบา ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยและมีประสิทธิภาพและคลื่นเสียงความถี่ต่ำสามารถนำมาแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ (Z. Zhang, Shao, Nan, Willatzen, & Wang, 2022)

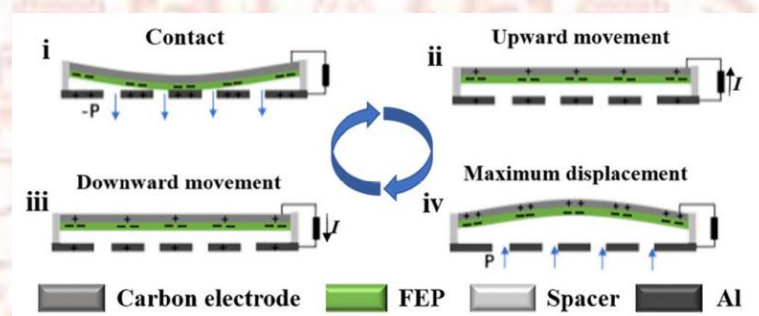
จากงานวิจัยของ (H. Yuan et al., 2021) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานจากการเก็บเกี่ยวพลังงานเสียงที่ถูกออกแบบให้มีรูปทรงเรขาคณิตที่หลากหลายภายใต้การทดลองในคลื่นความถี่เสียงที่ 140 Hz ที่ระดับแรงดันเสียง 90 dB อุปกรณ์สามารถบรรลุผลค่าความหนาแน่นของพลังงานได้สูงสุดที่ 2.88 $\text{W}/\text{Pa}\cdot\text{m}^2$ แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 110 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 42 μA จากค่าที่ได้สามารถให้พลังงานในการชาร์จตัวเก็บประจุ 1000 F ได้ถึง 3 V ภายใน 165 วินาที ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับเซนเซอร์ตรวจสอบอุณหภูมิและความชื้นได้อย่างต่อเนื่องและสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดส่องสว่างเชิงพาณิชย์หรือหลอด LED ขนาด 5 W ได้ถึง 5 ดวง ภาพที่ 2-33 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (CHR-TENG) ที่ประกอบไปด้วยกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ถูกออกแบบให้ได้ช่วงคลื่นเสียงความถี่ต่ำที่ต้องการเก็บเกี่ยว แผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติกมีความเป็นขั้วบวก ช่องว่างระหว่างขั้วใช้แผ่นคั่นกลาง (Spacer) และแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) มีความเป็นขั้วลบแสดงดังภาพที่ 2-33 และภาพการประกอบอย่างสมบูรณ์



ภาพที่ 2-33 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (CHR-TENG)

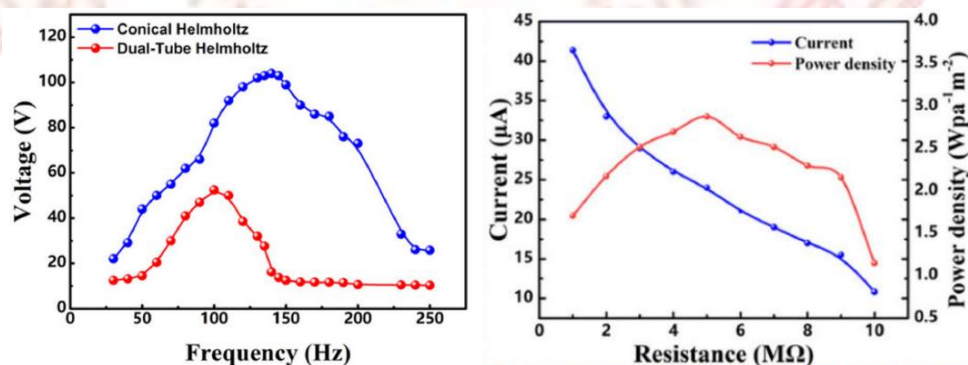
(H. Yuan et al., 2021)

จากภาพที่ 2-34 งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุที่มีความเป็นขั้วแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูและแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-34 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (CHR-TENG)

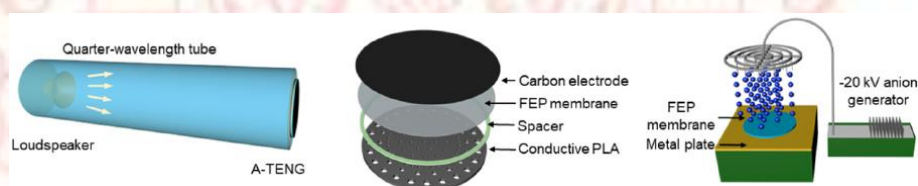
(H. Yuan et al., 2021)



ภาพที่ 2-35 ผลประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวพลังงาน

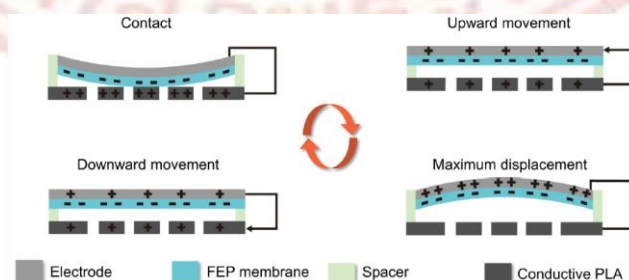
(H. Yuan et al., 2021)

จากงานวิจัยของ (Yuan, Li, Liu, Xu, & Xie, 2021) เสนอโครงสร้างที่ใช้วัสดุขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ สามารถควบคุมการขึ้นรูปครั้งเดียว การผลิตง่าย และต้นทุนต่ำ แสดงถึงภาพที่ 2-36 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (A-TENG) ที่ประกอบไปด้วยท่อขนาดความยาว 0.94 m รัศมี 50 mm เพื่อสร้างการสะท้อนของความยาวคลื่นเสียง $1/4\lambda$ แผ่นพอลิแลคติกแอซิดความนำไฟฟ้า (Conductive PLA) ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีความเป็นขั้วบวกช่องว่างระหว่างขั้วใช้แผ่นคั่นกลาง (Spacer) และแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) มีความเป็นขั้วลบนำมาเพิ่มประสิทธิภาพของสนามไฟฟ้าบนพื้นผิววัสดุด้วยเครื่องจ่ายแรงดันไฟฟ้าสูง 20 kV อุปกรณ์สามารถบรรลุผลประสิทธิภาพ พลังงานได้สูงสุดที่ 4.33 mW แรงดันไฟฟ้าสูงสุด 330 V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 40 μA ที่ระดับแรงดันเสียง 100 dB ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับเครื่องคิดเลขเชิงพาณิชย์ได้อย่างต่อเนื่องและสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดส่องสว่างเชิงพาณิชย์หรือหลอด LED สีเขียวได้ถึง 72 ดวง

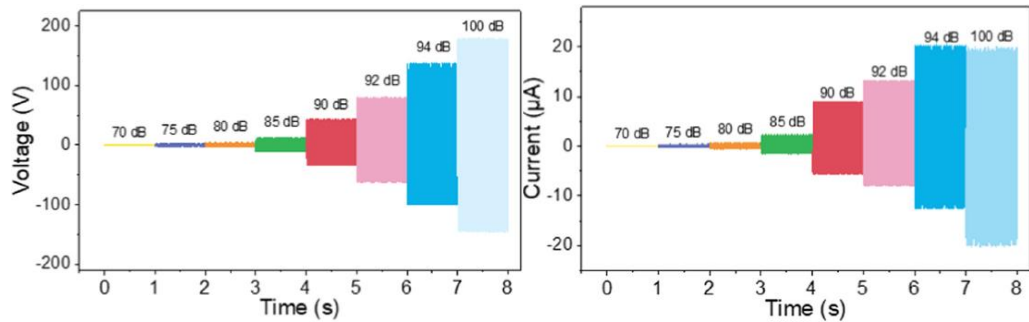


ภาพที่ 2-36 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (A-TENG)
(M. Yuan et al., 2021)

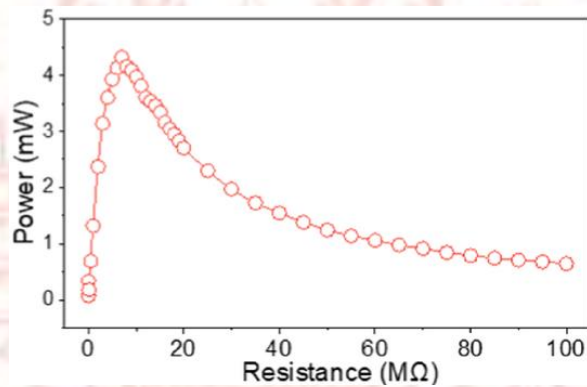
จากภาพที่ 2-37 งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุที่มีความเป็นขั้วแผ่นพอลิแลคติกแอซิดความนำไฟฟ้า (Conductive PLA) ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติและแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-37 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (A-TENG)
(M. Yuan et al., 2021)



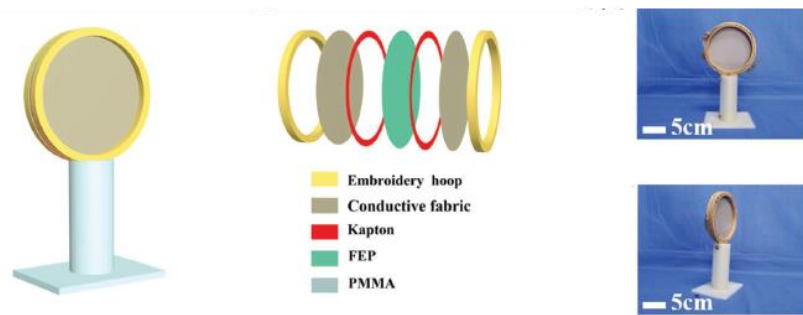
ภาพที่ 2-38 ค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่แรงดันเสียงแตกต่างกัน



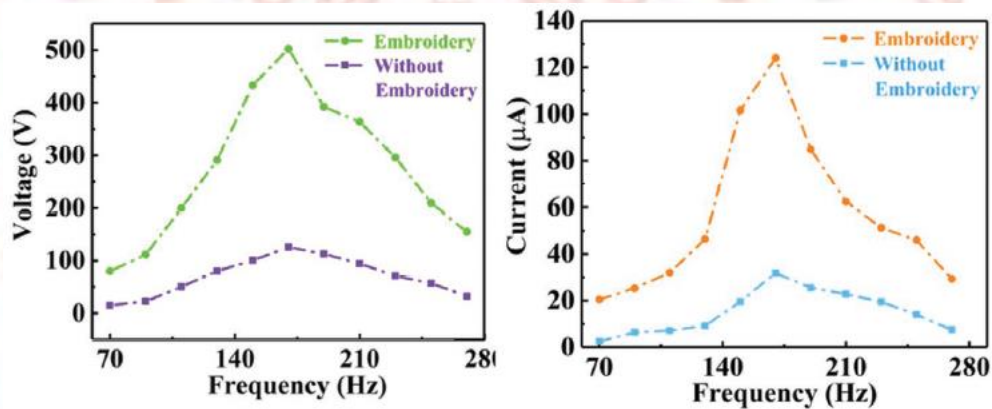
ภาพที่ 2-39 ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายใต้ความต้านทานที่แตกต่างกัน

(M. Yuan et al., 2021)

จากงานวิจัยของ (Wang et al., 2021) เสนอโครงสร้างที่ใช้การออกแบบมาจากสะดึงปักแบบ ไม่มีการใช้กล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ทำการกักเก็บเพื่อเพิ่มแรงอัดและขยายของอากาศ อุปกรณ์สามารถบรรลุผลประสิทธิภาพแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 500 V กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 124 µA ความถี่ 170 Hz ระดับแรงดันเสียง 100dB ใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับเครื่องคิดเลขเชิงพาณิชย์ ได้อย่างต่อเนื่องและสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดส่องสว่างเชิงพาณิชย์หรือหลอด LED สีเขียว ได้ถึง 55 ดวง แสดงดังภาพที่ 2-40 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงาน แบบ (EH-TENG) ที่ประกอบไปด้วยแผ่นผ้าความนำไฟฟ้า (Conductive Fabric) ทอขึ้นจาก ไยสังเคราะห์ที่มีส่วนผสมของวัสดุนำไฟฟ้ามีความเป็นขั้วบวกช่องว่างระหว่างขั้วใช้แผ่นคั่นกลาง (Spacer) ใช้แผ่นเทปโพลีอิมิด (Kapton) และแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) มีความเป็น ขั้วลบ นำมาประกอบเข้ากับสะดึงปักโดยมีวัสดุโพลีเมทิลเมทาไครเลต (PMMA) เป็นฐานรองและ ภาพการประกอบอย่างสมบูรณ์

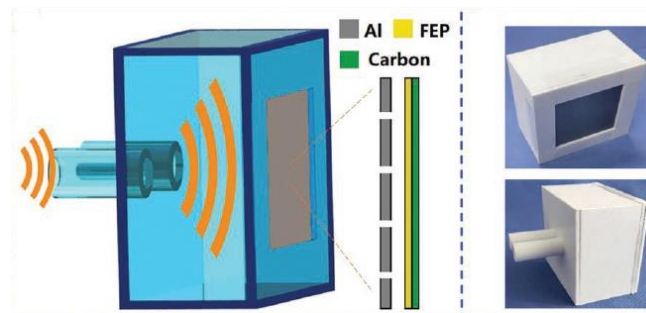


ภาพที่ 2-40 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (EH-TENG)
(Wang et al., 2021)



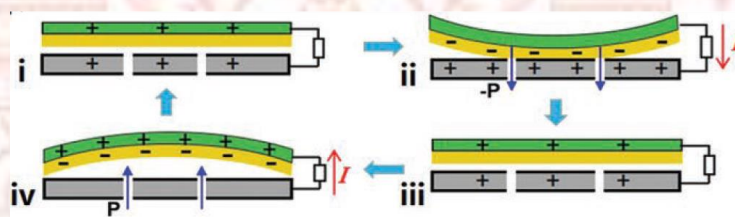
ภาพที่ 2-41 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 170 Hz
เปรียบเทียบระหว่างมีสะดึงปักและไม่มีสะดึงปัก (Wang et al., 2021)

จากงานวิจัยของ (H. Zhao et al., 2019) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานจากการเก็บเกี่ยวพลังงานเสียงที่ถูกออกแบบให้มีรูปทรงคอทอคู่ภายใต้การทดลองในคลื่นความถี่เสียงที่แตกต่างกัน อุปกรณ์สามารถบรรลุผลความถี่ 70 Hz ที่ระดับแรงดันเสียง 94.4 dB ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดที่ 132 V กระแสไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดที่ 32 μA สามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับหลอดส่องสว่างเชิงพาณิชย์หรือหลอด LED สีเขียวได้ถึง 464 ดวง แสดงดังภาพที่ 2-42 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (HR-TENG) ที่ประกอบไปด้วยกล่องเรโซแนนซ์ถูกออกแบบคอทอคู่ แผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติกมีความเป็นขั้วบวกช่องว่างระหว่างขั้วใช้แผ่นคั่นกลาง (Spacer) และแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) มีความเป็นขั้วลบ อีกด้านหนึ่งเคลือบพื้นผิวด้วยคาร์บอน (Carbon) เพื่อสร้างขั้วไฟฟ้า (Electrode) และภาพการประกอบอย่างสมบูรณ์

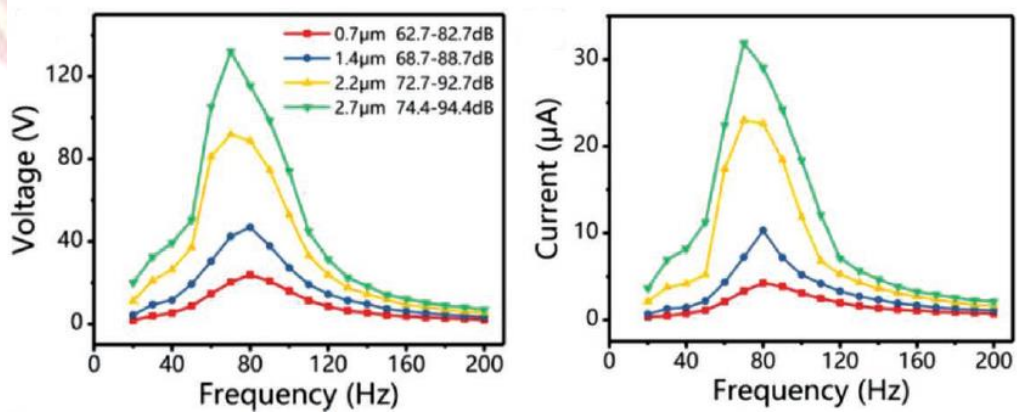


ภาพที่ 2-42 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (HR-TEG)
(H. Zhao et al., 2019)

จากภาพที่ 2-43 งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุที่มีความเป็นขั้วแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติกและแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า

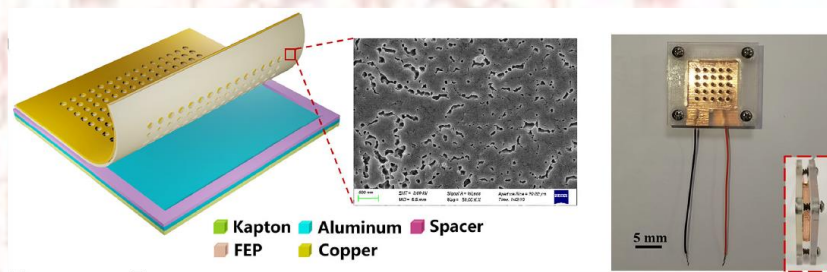


ภาพที่ 2-43 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (HR-TEG)
(H. Zhao et al., 2019)



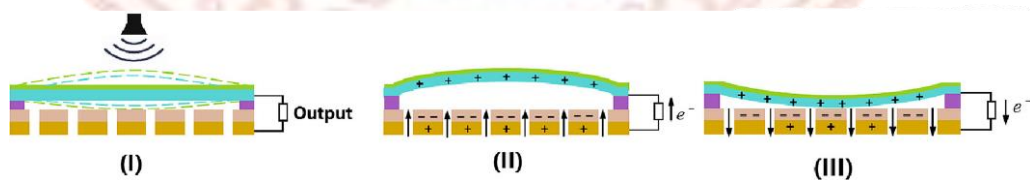
ภาพที่ 2-44 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดและค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 80 Hz
(H. Zhao et al., 2019)

จากงานวิจัยของ (Li et al., 2022) ทำการพัฒนาเซ็นเซอร์อะคูสติกขับเคลื่อนด้วยตนเอง (Self-Powered Acoustic Sensor) ประกอบด้วยโครงสร้างระยะห่างที่ปรับได้ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของพลังงานจากการเก็บเกี่ยวพลังงานเสียงที่ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างที่มีรูพรุน และวัสดุในการแตะสัมผัสลักษณะคล้ายกับเมมเบรนที่สามารถสั่นและมีความบาง อุปกรณ์สามารถบรรลุผลความถี่ 350 Hz ที่ระดับแรงดันเสียง 110 dB ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดที่ 6.28 V แสดงดังภาพที่ 2-45 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (Self-Powered Acoustic Sensor) ที่ประกอบไปด้วยแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติกที่มีความเป็นช่องว่างระหว่างซี่ใช้แผ่นคั่นกลาง (Spacer) และแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) เคลือบพื้นผิวด้วยทองแดง (Copper) เป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) และภาพการประกอบอย่างสมบูรณ์

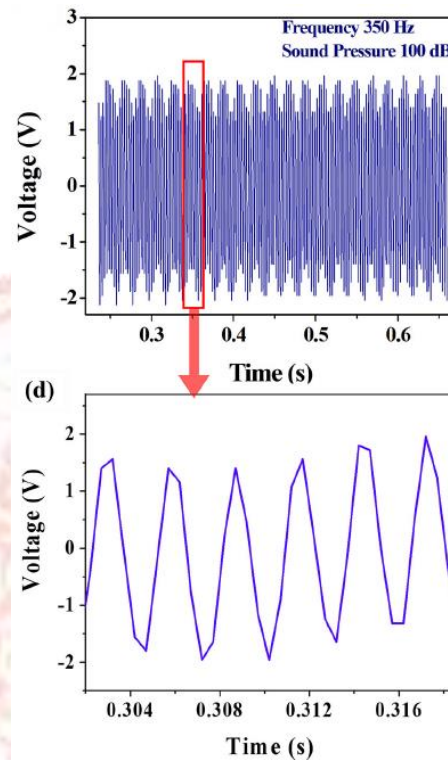


ภาพที่ 2-45 โครงสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานแบบ (Self-powered Acoustic Sensor)
(Li et al., 2022)

จากภาพที่ 2-46 งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุที่มีความเป็นขั้วแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรูอะคูสติกและแผ่นฟลูออไรด์เอทิลีนโพรพิลีน (FEP) ทำหน้าที่แปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า



ภาพที่ 2-46 ลักษณะการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของ (Self-powered Acoustic Sensor)
(Li et al., 2022)



ภาพที่ 2-47 ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ความถี่ 350 Hz ระดับแรงดัน 100 dB
(Li et al., 2022)

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Research paper	Voltage (V)	Current (μ A)	SPL (dB)	Frequency (Hz)
CHR-TENG	110	42	90	140
A-TENG	330	40	100	20-1000
EH-TENG	500	124	100	170
HR-TENG	132	32	94.4	70
Self-Powered Acoustic Sensor	6.28	N/A	110	350

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้จัดทำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำจะต้องสร้างชุดทดลองและใช้เครื่องมือทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงเพื่อแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้ามีรายละเอียดในการดำเนินงานดังนี้

3.1 เครื่องมือวัดและทดสอบสำหรับคลื่นเสียง

3.1.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) เครื่องที่สามารถผลิตสัญญาณความถี่ได้สองลักษณะได้แก่ สัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) สัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณมาตรฐานใช้เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณอ้างอิงเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบทดสอบในการส่งออกความถี่เพื่อใช้เป็นสัญญาณส่งออกไปยังอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ ของสัญญาณที่ผลิตขึ้นมาได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ฟังก์ชันสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (Sine Wave) ที่ย่านความถี่ระดับเฮิรตซ์ (Hz) ในการทดสอบอุปกรณ์แสดงดังภาพที่ 3-1



ภาพที่ 3-1 เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Waveform Generator)
รุ่น Siglent SDG1010 10 MHz

3.1.2 เครื่องขยายสัญญาณ (Power Amplifier) ทำการเพิ่มกว้างของคลื่นเสียงเพื่อให้มีระดับความดังของสัญญาณให้มากขึ้นความถี่ขาเข้า (Input Frequency) ซึ่งเป็นหน้าที่ในการเปลี่ยนผ่าน (Transfer Function) และความกว้างหรืออัตราขยายของหน้าที่นี้ถูกเรียกว่า เกน (Gain) ที่สัญญาณขาเข้า (Input Signal) มักจะเป็นแรงดันหรือกระแสในการใช้งานด้านเสียงจะเป็นตัวขับลำโพง ที่ใช้ในระบบขยายพลังเสียงเพื่อทำให้เสียงดังยิ่งขึ้น ในงานวิจัยทำการทดสอบเครื่องขยายเสียงจะถูกต่อใช้งานกับลำโพงที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองย่านคลื่นเสียงความถี่ต่ำที่ถูกปล่อยออกมาแสดงดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3-2 ชุดขยายระดับความดังเสียง (Power Amplifier)

3.1.3 เครื่องวัดความดังเสียง (Sound Level Meter) เครื่องมือวัดที่ใช้ในการประเมินเสียงหรือระดับเสียง มีหลักการทำงานคือวัดเสียงรอบข้างใช้ไมโครโฟนชนิดพิเศษเพื่อจับระดับเสียง จากนั้นเสียงจะถูกประเมินภายในเครื่องวัดและจะแสดงค่าบนจอแสดงผลในหน่วยเดซิเบล (dB) โดยทั่วไปจะสามารถเลือกโหมดการวัดเป็น dBA และ dBC ใช้สำหรับวัดค่าแรงดันเสียง (SPL) ที่ระดับต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3-3 เครื่องวัดความดังเสียง Benetech รุ่น GM1352

3.2 ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

3.2.1 การออกแบบกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ประกอบไปด้วยท่อเชื่อมต่อทำหน้าที่คล้ายกับมวล (Mass) ด้านการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงไม่ให้หยุดนิ่ง เพื่อให้เกิดการสะสมพลังงานทางเสียงส่งผลให้ระดับความดังเสียงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จากทางเข้าไปยังภายในโพรงจะเกิดเป็นสปริงและการสูญเสียความร้อนและการแผ่รังสีเสียงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของอากาศภายในท่อกลายมาแดมเปอร์ (Damper) การยินยอมให้ปริมาณของอากาศที่ผ่านไม่เกินปริมาณที่กำหนดสามารถกระจายความดังเสียงภายในโพรงได้อย่างสม่ำเสมอใช้สำหรับเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำทำการคำนวณเสียงสะท้อนของอากาศในโพรงจากความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency)

ประกอบไปด้วยปริมาตรรูปทรงสี่เหลี่ยม (Volume) โดยเชื่อมเข้ากับต่อคอท่อทรงกลม (A) ที่ความยาว (L_n) ได้จากสมการที่ 2-2 ดังนี้

$$f = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{VL_n}} \quad (2-2)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ (Hz)

C คือ ความเร็วของเสียง (m/s)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของคอท่อ (cm^2) หรือ πr^2

V คือ ปริมาตรภายในโพรง (cm^3)

L_n คือ ความยาวของคอท่อ (cm)

โดยกำหนดค่า

$C =$ ความเร็วเสียงในอากาศ 34600 cm/s

$A = 3.14 \times 0.6^2$ cm

$V =$ กว้าง 8 cm x ยาว 3 cm x สูง 8 cm

$L_n = 4$ cm

$$f = \frac{34600 \text{ cm/s}}{2\pi} \sqrt{\frac{3.14 \times (0.6)^2 \text{ cm}}{(8 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}) \times 4 \text{ cm}}}$$

$$f = 5509 \sqrt{\frac{1.131 \text{ cm}^2}{(192 \text{ cm}^3) \times 4 \text{ cm}}}$$

$$f = 5509 \sqrt{0.001473}$$

$$f = 5509 \times 0.038375$$

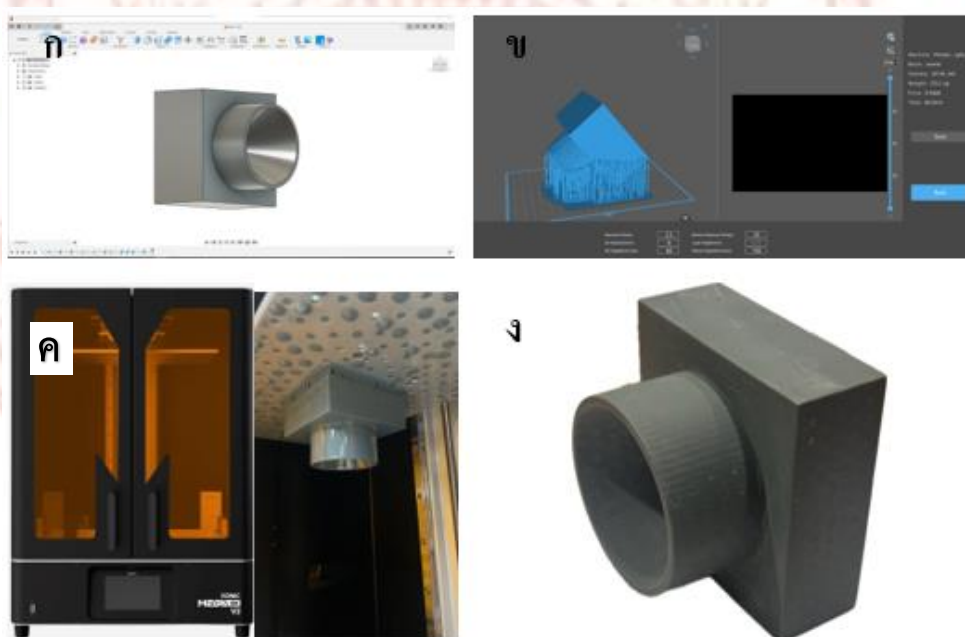
$$f = 211.409 \text{ Hz}$$

จะได้ผลลัพธ์ f เท่ากับ 211.40 Hz หรือความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) ที่ช่วง 200 Hz ถึง 220 Hz จากการคำนวณของงานวิจัยนี้ได้ผลลัพธ์การออกแบบใกล้เคียงกับ

งานวิจัยของ (H. Zhao et al., 2019) ความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) ที่ 280 Hz เมื่อระดับความดันเสียงที่สูงขึ้นภายในโพรงอากาศส่งผลต่อการเสียงสะท้อนและความต่างของเสียงที่ระดับความดันระหว่างทางเข้าและทางออกของแวนนอนของคอกที่จะเกิดการสูญเสียการส่งผ่านการออกแบบในย่านความถี่เฉพาะจะเน้นพลังงานที่สูงสุด แสดงดังภาพที่ 3-4 กล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) และ ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการออกแบบและการขึ้นรูปกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)



ภาพที่ 3-4 กล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)



ภาพที่ 3-5 ขั้นตอนการออกแบบและการขึ้นรูปกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)

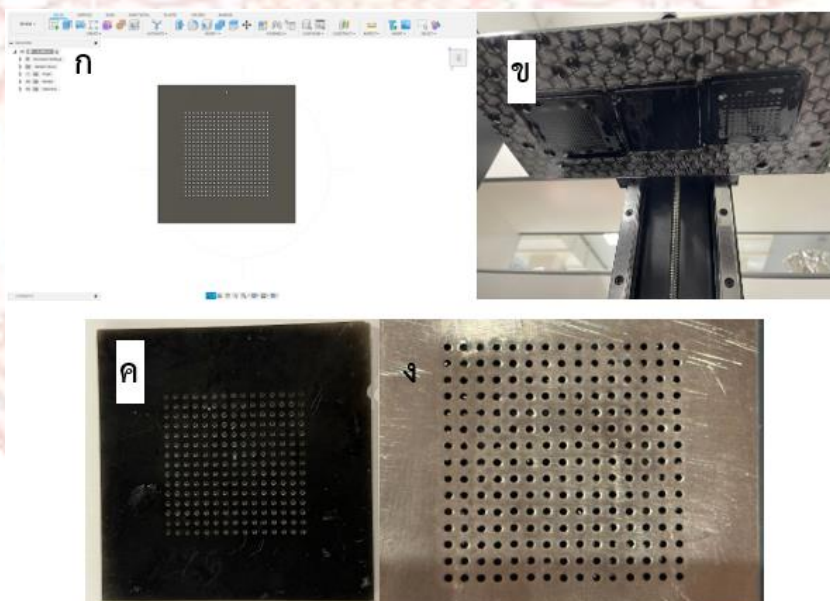
(ก) ใช้โปรแกรม Autodesk Fusion ในการออกแบบจำลองรูปทรงปริมาตร (ข) ทำการขึ้นรูปจากวัสดุ

Phrozen Aqua Gray 8K Resin (ค) เครื่องพิมพ์สามมิติ Phrozen Sonic Mega 8K

(ง) การขึ้นรูปโดยสมบูรณ์

3.2.2 วัสดุแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า การสร้างพลังงานไฟฟ้าจากแรงเชิงกลของการแตะและสัมผัสกันของสองวัสดุที่มีความเป็นขั้วแตกต่างกันทำให้เกิดประจุไฟฟ้าที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ จากค่าความต่างศักย์จะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุ ซึ่งสร้างประจุไฟฟ้าที่สามารถจัดเก็บและใช้ในอุปกรณ์และการใช้งานต่าง ๆ งานวิจัยนี้เลือกใช้วัสดุที่มีความต่างทางขั้วบวกและขั้วลบได้แก่

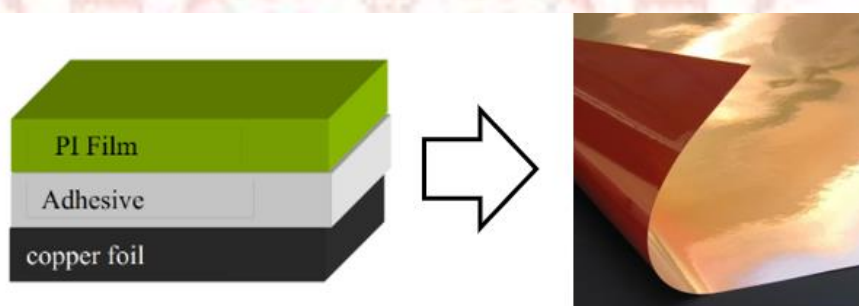
3.2.2.1 วัสดุที่มีค่าความเป็นขั้วบวก เลือกใช้แผ่นอะลูมิเนียมขนาดความกว้างและยาว 50 x 50 mm ความหนา 100 μm มาทำการเจาะรูอะคูสติค โดยอ้างอิงจากค่าการไหลของคลื่นเสียงที่มีความถี่ 100 Hz ในอากาศที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความดันอากาศ 1 atm เท่ากับ 0.22 mm และขนาดจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.5 mm เมื่อความถี่เสียงลดลงเหลือ 20 Hz ฉะนั้นการเจาะรูอะคูสติคจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 mm เพื่อลดแรงต้านอากาศ (Air Friction) เมื่อคลื่นเสียงกระจายผ่านรูอะคูสติคจะทำหน้าที่ปรับสมดุลพื้นที่สัมผัสระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดและการไหลของอากาศภายในโพรง (D. Zhao & Li, 2015) ออกแบบแผ่นต้นแบบรูอะคูสติคจากโปรแกรม Autodesk Fusion และทำการขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติ Phrozen Sonic Mega 8K จากนั้นนำมาประกบกับแผ่นอะลูมิเนียมและทำการเจาะรูแสดงดังภาพที่ 3-6



ภาพที่ 3-6 ขั้นตอนการเจาะรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม

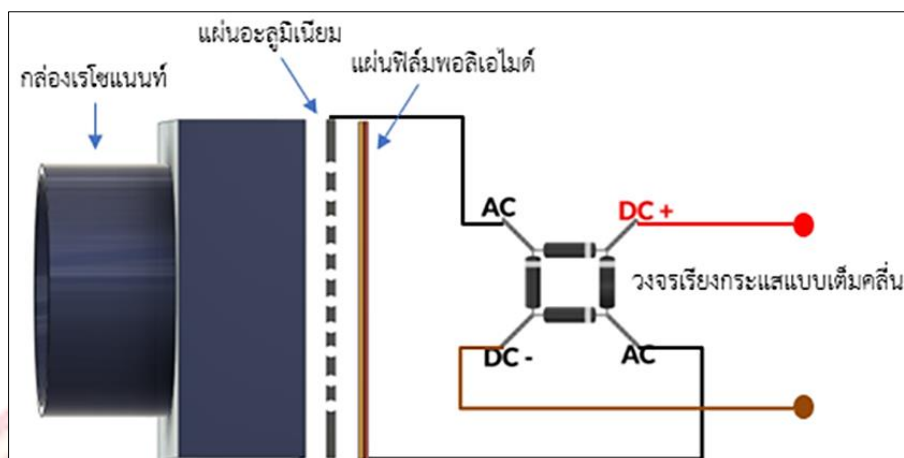
- (ก) ใช้โปรแกรม Autodesk Fusion ในการออกแบบจำลองรูปทรงปริมาตร
 (ข) ทำการขึ้นรูปจากวัสดุ Phrozen Aqua Gray 8K Resin (ค) ชิ้นงานที่ถูกขึ้นรูปสมบูรณ์
 (ง) เจาะรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม

3.2.2.2 วัสดุที่มีความเป็นขั้วลบ เลือกใช้แผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyimide Film) ประเภท Single Sided Copper มีขนาดความกว้างและยาว 50 x 50 mm ความหนา 25 μm ประกอบด้วยชั้นทองแดงที่ยึดติดกับสารตั้งต้นฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyimide film) ที่นำแผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyimide Film) ชุบด้วยเทปพอยล์ทองแดง โดยปกติแล้วจะใช้ร่วมกับฟิล์มเคลือบเทอร์โมเซตติงในอุตสาหกรรมบอร์ดวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่ออุณหภูมิสูงและประสิทธิภาพของฉนวนได้ดีเยี่ยม อุณหภูมิความต้านทานการบัดกรีสูงมากกว่า 288 องศาโดยไม่มีฟองอากาศและการหลุ่ร้อนส่วนใหญ่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแผงวงจรพิมพ์แบบยืดหยุ่น (PCB Laminated) ที่มีความยืดหยุ่นชั้นทองแดงเป็นทางเดินนำไฟฟ้าที่จำเป็นสำหรับการเชื่อมต่อไฟฟ้าภายในแผงวงจร โดยทั่วไปจะมีลวดลายโดยใช้การแกะสลักหรือกระบวนการอื่น ๆ เพื่อสร้างโครงร่างวงจรที่ต้องการแสดงดังภาพที่ 3-7

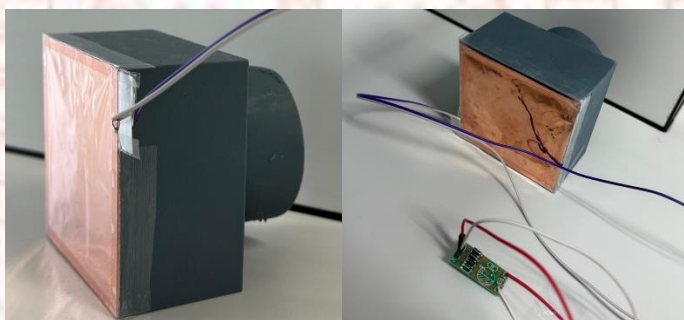


ภาพที่ 3-7 แผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (Polyimide Film)

3.2.3 การประดิษฐ์อุปกรณ์ จากภาพที่ 3-8 โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ ทำการขึ้นรูปกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) จากวัสดุ Epoxy resin โดยใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Phrozen Sonic Mighty 8K นำแผ่นอะลูมิเนียมขนาดความกว้างและยาว 50 x 50 mm ความหนา 100 μm เจาะรูอะคูสติกติดเข้ากับทางด้านหลังของกล่อง ใช้แผ่นเทปกาวคั่นกลางช่องว่างระหว่างขั้วบวกและลบ จากนั้นนำแผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ขนาดความกว้างและยาว 50 x 50mm ความหนา 25 μm ติดเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมทำการเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับขั้วบวกและขั้วลบเพื่อเชื่อมต่อกระแสสลับขาออก (Output) ของอุปกรณ์เข้ากับฝั่งขาเข้าของไดโอดวงจรเรียงแบบกระแสเต็มคลื่นเพื่อทำการเรียงกระแสสลับ (AC) เป็นกระแสตรง (DC) แสดงดังภาพที่ 3-9 ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ



ภาพที่ 3-8 โครงสร้างอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ



ภาพที่ 3-9 ชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

3.3 เครื่องมือทดสอบสัญญาณทางไฟฟ้า

การทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B เครื่องมือละเอียดอ่อนที่ใช้สำหรับวัดศักย์ไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้า หรือประจุ สามารถตรวจจับกระแสไฟฟ้าหรือประจุที่มีขนาดเล็กมากได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer จะใช้ในการวัดศักย์ไฟฟ้าสถิตและการกระจายประจุในฉนวนและตัวนำ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อวัดอัตราส่วนประจุต่อมวลของอนุภาคที่มีประจุ เช่น ไอออน และ อิเล็กตรอน ของไฟฟ้าสถิตซึ่งหมายถึงกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการไหลของอนุภาคที่มีประจุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งการวัดแรงดันและประจุสามารถทำได้โดยใช้กระแสรั่วไหลที่ต่ำมากเพียง 1 เฟมโตแอมแปร์ แสดงดังภาพที่ 3-10 ดิจิตอลอิเล็กทรอนิกส์โอมิเตอร์ Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B



ภาพที่ 3-10 เครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer ยี่ห้อ Keithley รุ่น 6517B

Specification:

- Measures currents from 1 aA to 20 mA
- Voltage measurements from 1 μ V to 200 V
- Measures resistances up to $10^{18} \Omega$
- Charge measurements from 1 fC to 2 μ C
- <20 μ V burden voltage on the lowest current ranges
- 200 T Ω input impedance
- <3 fA bias current
- 0.75 fA p-p noise
- Built-in ± 1 kV source

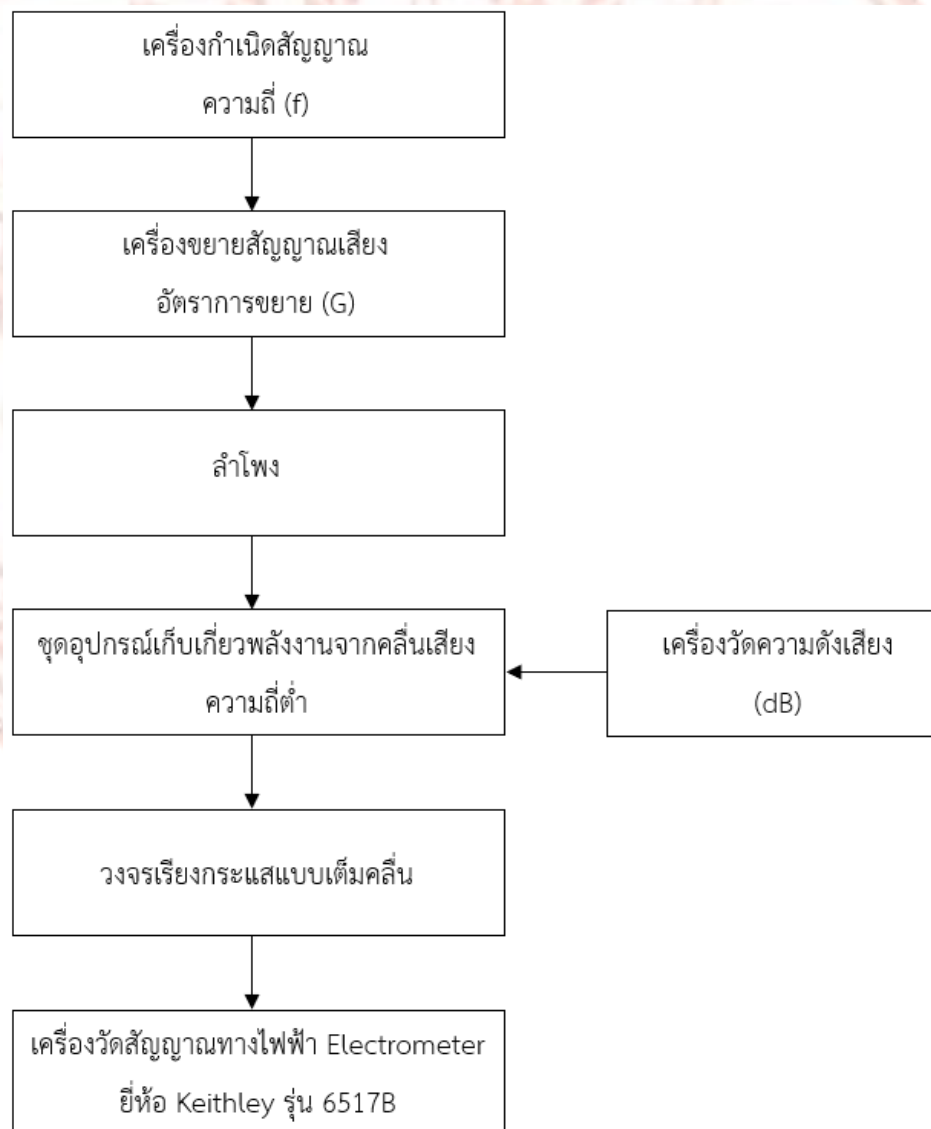
โดยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำที่เตรียมไว้ทำการทดสอบด้วยเงื่อนไขดังนี้

- ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าวงจรเปิด (V_{oc}) และ กระแสไฟฟ้าวงจรปิด (I_{sc})
- ทดสอบผลลัพธ์ทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับย่านความถี่ (Hz) และ ระดับความดังของเสียง (dB) ที่ใช้ในการให้แรงเชิงกล

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

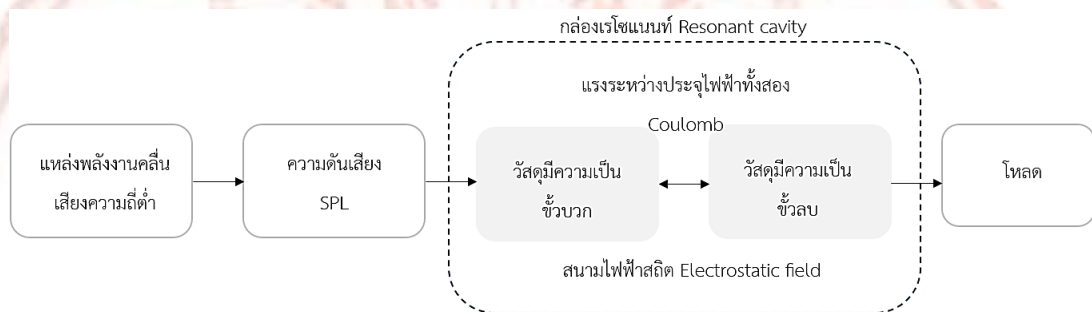
ไดอะแกรมของชุดทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำแสดงดังภาพที่ 3-11 ประกอบไปด้วยเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Function Generator) ใช้ในการจำลองการเกิดคลื่นเสียงความถี่ต่ำระดับเฮิรต์ (Hz) ถูกเชื่อมต่อกับเครื่องขยายสัญญาณ (Power Amplifier) ขยายสัญญาณไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดเสียงทำให้สัญญาณนั้นมีกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น สามารถขับเคลื่อนลำโพงให้เกิดเสียงที่ดังและชัดเจน ชุดลำโพง (Speaker) ที่ระดับเสียงเบสเพื่อให้อุปกรณ์ใช้งาน

ที่ย่านความถี่ 35 Hz - 15000 Hz ทำการติดตั้งชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ ประกอบด้วยกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ออกแบบและขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์สามมิติและติดเข้ากับแผ่นอะลูมิเนียมและฟิล์มพอลิเอไมด์ โดยใช้ชุดวัดระดับความดัง (Sound Level Meter) วัดระดับความดังของเสียงที่ออกจากลำโพงเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระดับความดังเสียง (SPL) ที่ย่านความถี่ต่าง ๆ นำสัญญาณกระแสสลับขาออกจากอุปกรณ์ต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อทำการเรียงกระแสไฟฟ้าสลับ (AC) เป็นไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ใช้แปลงสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากนั้นทำการต่อไปยังเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า (Electrometer) วัดค่าแรงดันและกระแสที่ได้จากการทดลอง

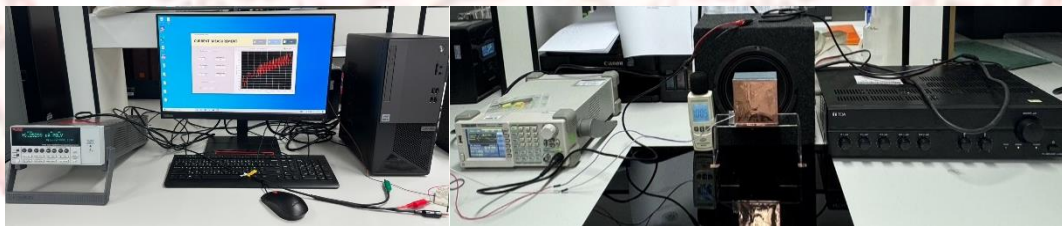


ภาพที่ 3-11 ไตอะแกรมของชุดทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

จากภาพที่ 3-12 อธิบายไดอะแกรมการทำงานอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ แสดงการเก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากแหล่งพลังงานเสียงโดยระดับความดันเสียงหรือระดับความดังของเสียง (SPL) ของคลื่นเสียงความถี่ต่ำจะส่งผลต่อการเกิดการอัดและปล่อยเป็นสปริงอากาศภายในโพรง ส่งผลทำให้เกิดการแตะและสัมผัสของวัสดุที่มีแรงกระทำระหว่างประจุต่างชนิดกัน (ขั้วบวกและขั้วลบ) ประจุไฟฟ้ามีการกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง จะมีแรงกระทำต่อกันเป็นแรงดึงดูดทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าส่งต่อไปยังโหลดและทำการทดลองแสดงดังภาพที่ 3-13 การทดลองชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ



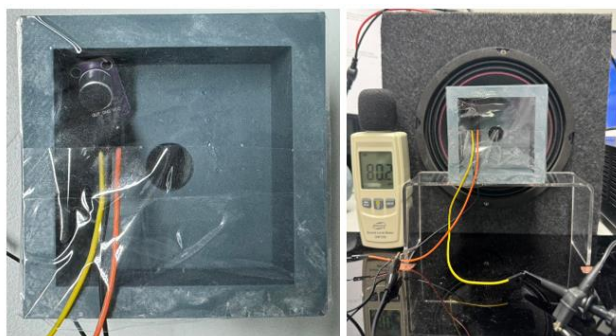
ภาพที่ 3-12 ไดอะแกรมการทำงานอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ



ภาพที่ 3-13 การทดลองชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ

3.4.1 การทดลองวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำภายในกล่องเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) ทำการวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำที่ถูกส่งผ่านจากคอท่อเข้ามาภายในโพรงอากาศของกล่อง ถ้าความถี่ของพลังงานที่ให้มีความถี่เท่ากับความถี่ของการสั่นตามธรรมชาติ (Resonant Frequency) เป็นผลทำให้รับพลังงานเข้าไปได้ดีที่สุดจึงทำให้สั่นด้วยแอมพลิจูดที่มากขึ้น การสั่นจะรุนแรงมากขึ้นเพื่อสร้างระดับความดันเสียง (SPL) ให้มากที่สุด สามารถทำการวัดได้โดยทำการปรับช่วงความถี่คลื่นเสียงต่ำจากเครื่องกำเนิดสัญญาณเชื่อมต่อไปยังเครื่องขยายสัญญาณเสียงและลำโพง ใช้วงจรไมโครโฟน

ทำการวัดคลื่นเสียงภายในโพรงอากาศที่ถูกปิดทางด้านหลังต่อเข้ากับเครื่องออสซิลโลสโคป เพื่อวัดสัญญาณแอมพลิจูดของช่วงความถี่ที่เกิดขึ้นภายในโพรงอากาศแสดงดังภาพที่ 3-14 และ ภาพที่ 3-15

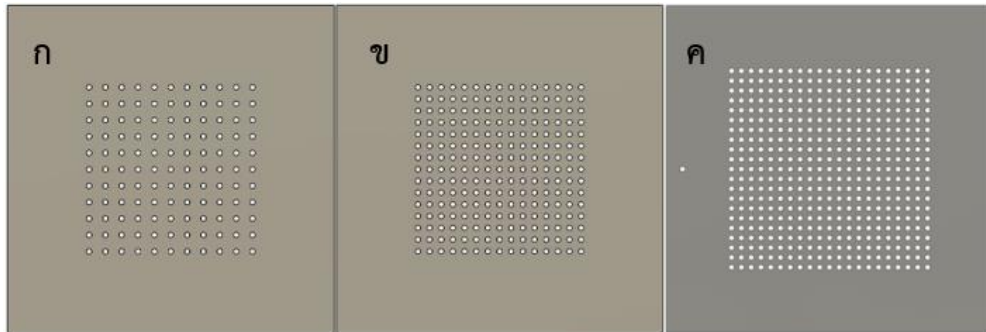


ภาพที่ 3-14 การติดตั้งวงจรไมโครโฟนทำการวัดคลื่นเสียงภายในโพรงอากาศที่ถูกปิดทางด้านหลัง



ภาพที่ 3-15 การทดลองวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำภายในกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity)

3.4.2 การทดลองแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม โครงสร้างรูคลื่นเสียงที่ได้รับการออกแบบให้เป็นวัสดุเพื่อควบคุมคลื่นเสียงสามารถควบคุมลักษณะต่าง ๆ ของการส่งผ่านคลื่นเสียง เช่น การดูดซับ การสะท้อนกลับ การเน้นพลังงานคลื่นเสียง และการแพร่กระจายของคลื่นเสียงด้วยการปรับขนาดและระยะห่างของรู สามารถควบคุมความถี่ที่ดูดซับและความถี่ที่ส่งหรือสะท้อนกลับ งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบจำนวนรูอะคูสติคแสดงดังภาพที่ 3-16 เพื่อวัดค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุดของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ



ภาพที่ 3-16 จำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียม

(ก) จำนวน 121 รู (ข) จำนวน 225 รู (ค) จำนวน 442 รู

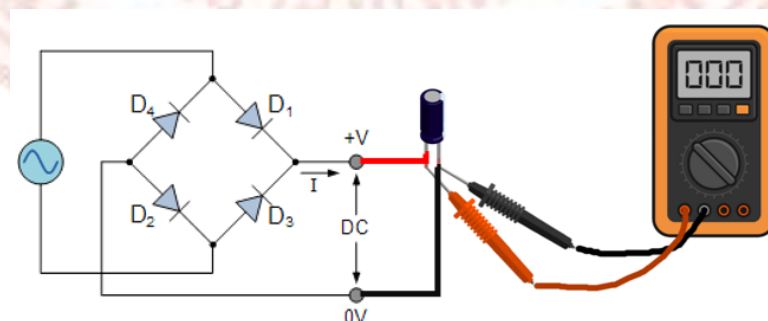
3.4.3 การทดลองการจ่ายประจุ เพื่อวัดความสามารถในการจ่ายประจุให้กับตัวเก็บประจุเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เมื่อตัวเก็บประจุเริ่มรับประจุไว้ก็จะเริ่มมีการต้านการไหลของประจุเนื่องจากที่ขั้วบวกของตัวเก็บประจุจะพยายามดึงอิเล็กตรอนไว ในขณะที่ขั้วลบของตัวเก็บประจุจะพยายามต้านการเพิ่มของจำนวนอิเล็กตรอนตัวเก็บประจุจะค่อย ๆ ถูกจ่ายประจุเพิ่มขึ้นจนค่าความต่างศักย์ก็จะอยู่ในสภาวะสมดุลและไม่มีกระแสไหลสามารถต่อวงจรทดลองแสดงดังภาพที่ 3-17

ค่าความจุ (สัญลักษณ์ C) เป็นตัววัดความสามารถเก็บประจุของตัวเก็บประจุ ค่าความจุมากหมายถึงสามารถเก็บประจุได้มาก ค่าความจุมิหน่วยวัดเป็นฟารัด แทนด้วย F

μ (micro) หมายถึง 10^{-6}

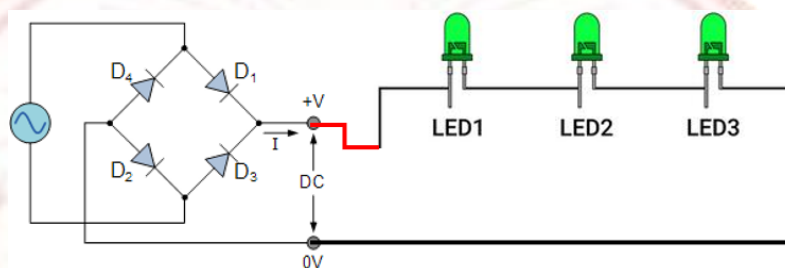
n (nano) หมายถึง 10^{-9}

p (pico) หมายถึง 10^{-12}



ภาพที่ 3-17 การต่อวงจรทดลองการจ่ายประจุ

3.4.4 การทดลองต่อเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED) เพื่อวัดความสามารถในการเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับไดโอดเปล่งแสงแรงดันไฟฟ้าในการทำงานของไดโอดเปล่งแสงโดยทั่วไปแรงดันตกคร่อมอยู่ระหว่าง 1.5 V และ 3.3 V ส่วนใหญ่จึงมีการจัดวงจรแบบอนุกรมจะใช้กระแสอยู่ช่วงระหว่าง 5 mA – 20 mA ไดโอดเปล่งแสงนี้มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กันตามการใช้งาน ไดโอดเปล่งแสงแบบหุ้มฉนวน โดยปกติจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm และ 5 mm ซึ่งทำด้วยพลาสติกโปร่งแสงสามารถต่อวงจรทดลองแสดงดังภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 การต่อวงจรทดลองแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)

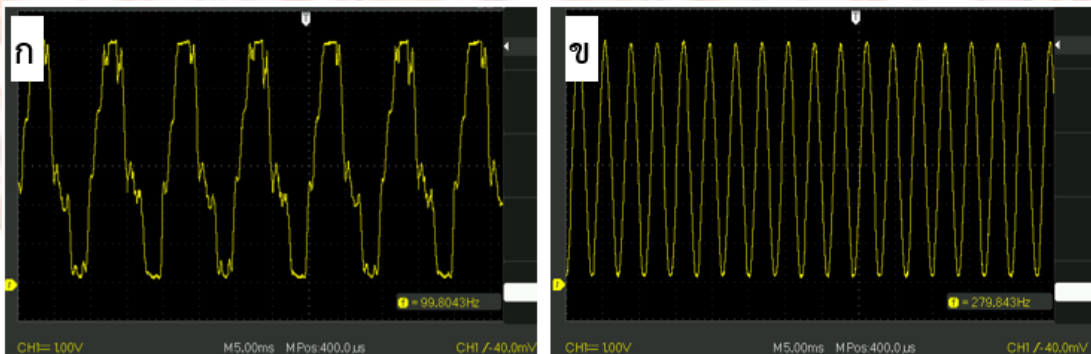
บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการวิจัยและการทดสอบชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำโดยทำการวัดผลจากการทดลองที่ช่วงคลื่นเสียงความถี่ต่ำระหว่าง 100 Hz ถึง 150 Hz ระดับความดังเสียงที่ 100 dB เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดโดยสามารถแบ่งเป็น 4 ส่วนดังนี้

4.1 ผลการทดสอบวัดคลื่นเสียงความถี่ต่ำภายในกล่องเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity)

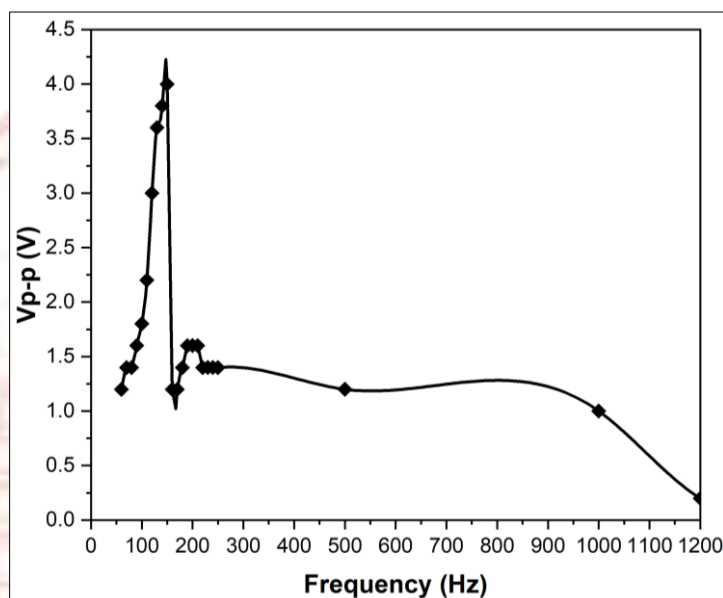
จากการทดลองการสะท้อนเสียงของกล่องเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) ที่ออกแบบคutoff และขนาดของโพรงอากาศภายในใช้ในการควบคุมความถี่เสียงเมื่อคลื่นเสียงผ่านคอจะทำให้อากาศภายในโพรงเกิดการสั่นสะเทือนที่ความถี่เฉพาะที่กำหนดสั่นพ้องโดยธรรมชาติหรือความถี่เรโซแนนซ์ (Resonant Frequency) ที่จะเกิดการสั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุดเมื่ออยู่ในค่าความถี่เฉพาะที่กำหนด การสั่นสะเทือนนี้จะเสริมหรือยกเลิกความถี่บางความถี่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของอุปกรณ์สะท้อนเสียง งานวิจัยนี้ออกแบบช่วงความถี่ที่ แสดงดังภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระดับแอมพลิจูดระหว่างคลื่นเสียงความถี่ต่ำและความถี่สูงเมื่อผ่านเข้าสู่คอท่อเข้ามาภายในโพรงอากาศ



ภาพที่ 4-1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบระดับแอมพลิจูด
(ก) คลื่นเสียงความถี่ 100 Hz และ (ข) คลื่นเสียงความถี่ 280 Hz

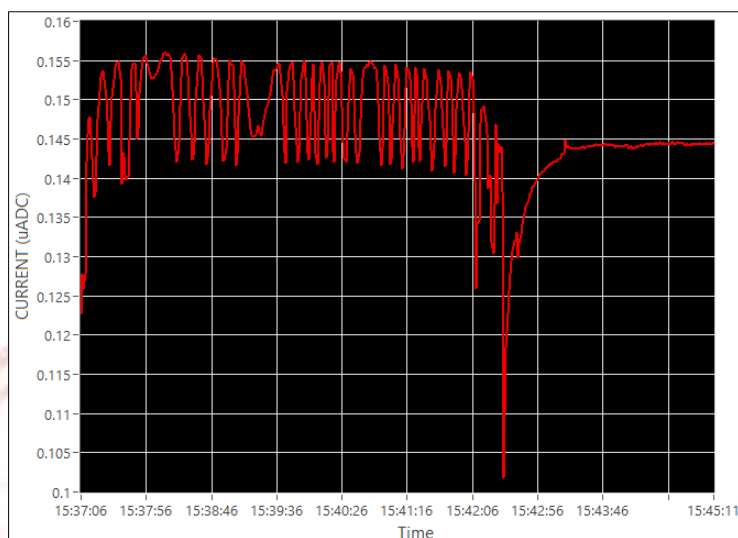
จากภาพที่ 4-1 ทำการทดสอบโดยการปรับความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณในย่านที่แตกต่างกันเพื่อวัดระดับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง ทำการติดตั้งวงจรมอเตอร์โฟนเข้าไปภายในโพรงอากาศของกล่องเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) เมื่อคลื่นเสียงผ่านเข้าคอท่อเข้ามาภายในโพรงอากาศภายในที่ถูกปิดทำการวัดค่าสัญญาณยอดคลื่นสูงสุด (V_p-p) ที่ได้จากการแสดงผลโดยเครื่องออสซิลโลสโคป

จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 100 Hz มีค่าแอมพลิจูดสูงกว่าความถี่ 280 Hz ตามย่านความถี่ตอบสนองเฉพาะของสัญญาณแสดงดังภาพที่ 4-2 กราฟผลการเปรียบเทียบระดับแอมพลิจูดสูงสุดในแต่ละย่านความถี่วัดระดับความดังเสียงที่ 80 dB



ภาพที่ 4-2 กราฟผลการเปรียบเทียบระดับแอมพลิจูดสูงสุดในแต่ละย่านความถี่วัดระดับความดังเสียงที่ 80 dB

จากภาพที่ 4-2 ผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่ากล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ที่ถูกออกแบบตามความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) ในงานวิจัยนี้สามารถตอบสนองในคลื่นเสียงความถี่ในช่วง 100 Hz ถึง 250 Hz และมีค่าแอมพลิจูดของสัญญาณลดลงเมื่อมีคลื่นเสียงความถี่สูงกว่า 250 Hz ขึ้นไป



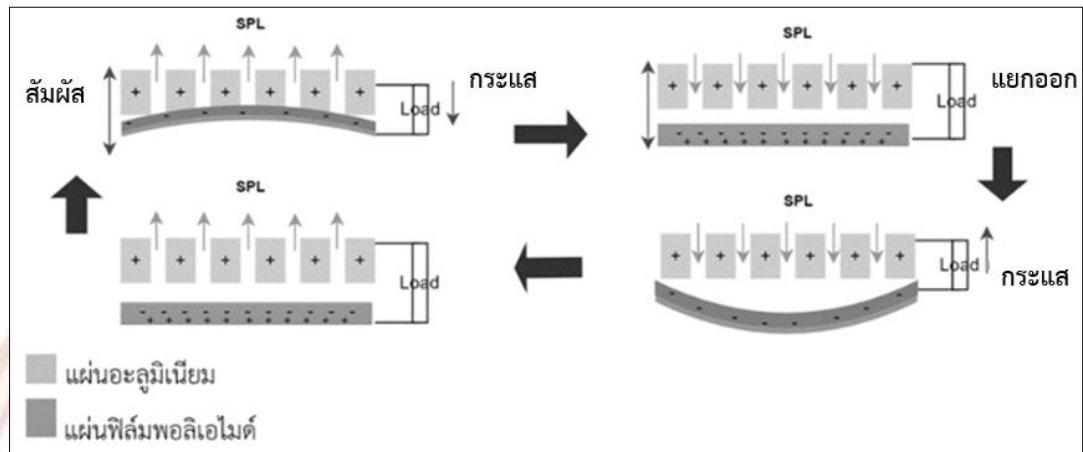
ภาพที่ 4-3 ผลการเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงของอุปกรณ์เมื่อเปิดและปิดแหล่งพลังงานเสียง

จากผลลัพธ์ที่ได้ข้างต้นทำการทดสอบเพื่อดูการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าของชุดอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำแสดงดังภาพที่ 4-3 ผลการเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงของอุปกรณ์เมื่อเปิดจ่ายแหล่งพลังงานเสียงให้อุปกรณ์และปิดแหล่งจ่ายพลังงานเสียงทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิดโดยเครื่องวัดสัญญาณทางไฟฟ้า Electrometer วัดไฟฟ้ากระแสตรง (ADC) ได้ที่ $0.155 \mu\text{A}$ ในช่วงเริ่มต้นและหยุดผลิตพลังงานไฟฟ้าเกิดการตกลงของกราฟมาที่ $0.1 \mu\text{A}$ เมื่อทำการหยุดเครื่องมือทดสอบระดับค่ากระแสค้อย ๆ ลดลงเกิดเป็นเส้นตรงในช่วงหลัง

4.2 ผลการสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดสูงสุดจากจำนวนรูอะคูสติกบนแผ่นอะลูมิเนียม

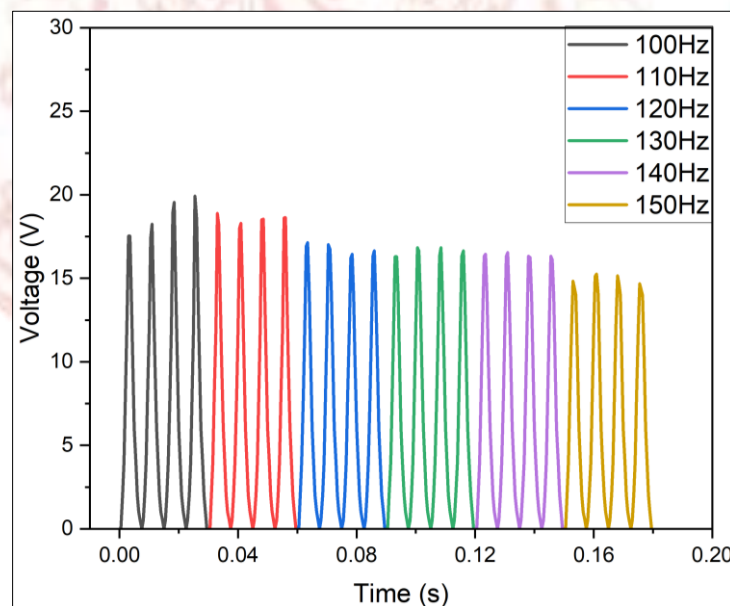
การวัดผลลัพธ์การผลิตไฟฟ้าในงานวิจัยนี้สามารถอธิบายกลไกการทำงานจากภาพที่ 4-4 ลักษณะการแพร่กระจายของคลื่นเสียงผ่านรูอะคูสติกทำให้เกิดระดับแรงดันเสียง (SPL) ที่แตกต่างกันของอากาศ การกระจายของอิเล็กตรอนในอะตอมระหว่างสองวัสดุมีลักษณะเป็นแบบกลุ่มหมอก (Electron Cloud) ที่มีประจุที่จะพบอิเล็กตรอนหนาแน่นอยู่ในบริเวณหน้าพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียม (ประจุบวก) อิเล็กตรอนอิสระบนพื้นผิวของฟิล์มอะลูมิเนียมจึงถ่ายโอนไปยังวงโคจรโมเลกุลว่างต่ำสุด (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) บนแผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (ประจุลบ) พื้นที่มีพลังงานศักย์ต่ำกว่า จึงเกิดเป็นไดโพลโมเมนต์ (Dipole Moment) ความเป็นขั้วของพันธะและศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวสัมผัสทั้งสอง เป็นผลให้อิเล็กตรอนอิสระถูกผลักดันให้ไหลจากขั้วไฟฟ้า (Electrode) บนแผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ไปยังขั้วไฟฟ้า (Electrode) บนแผ่นอะลูมิเนียมผ่าน

วงจรภายนอกเพื่อให้เกิดความสมดุลสนามไฟฟ้าเฉพาะที่และประจุระหว่างสองวัสดุจะกลับคืนสู่สภาวะเดิมเมื่อสัมผัสอีกครั้ง

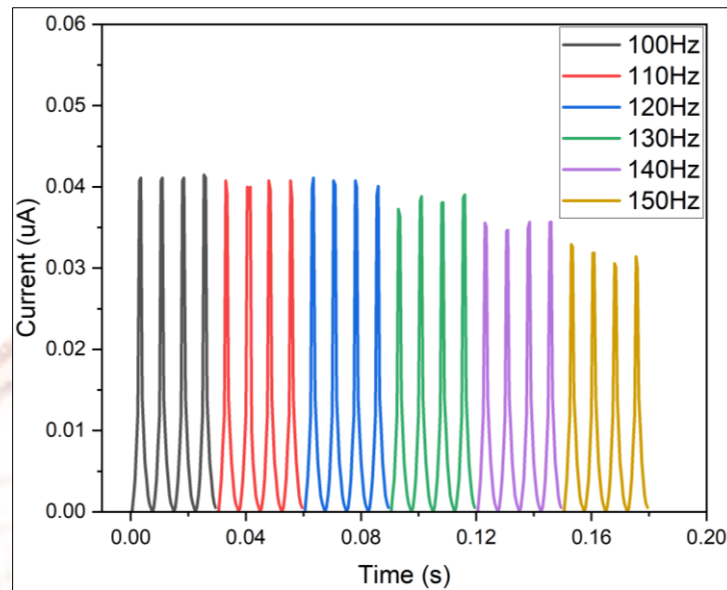


ภาพที่ 4-4 กลไกการทำงานของแผ่นอะลูมิเนียมเจาะรู (ซ้ายบน) และ แผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์ (ซ้ายบน)

4.2.1 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรปิดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู คลื่นเสียงความถี่ที่ช่วง 100 Hz 110 Hz 120 Hz 130 Hz 140 Hz และ 150 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB ที่ระยะเวลา 10 นาที แสดงดังภาพที่ 4-5 และ ภาพที่ 4-6

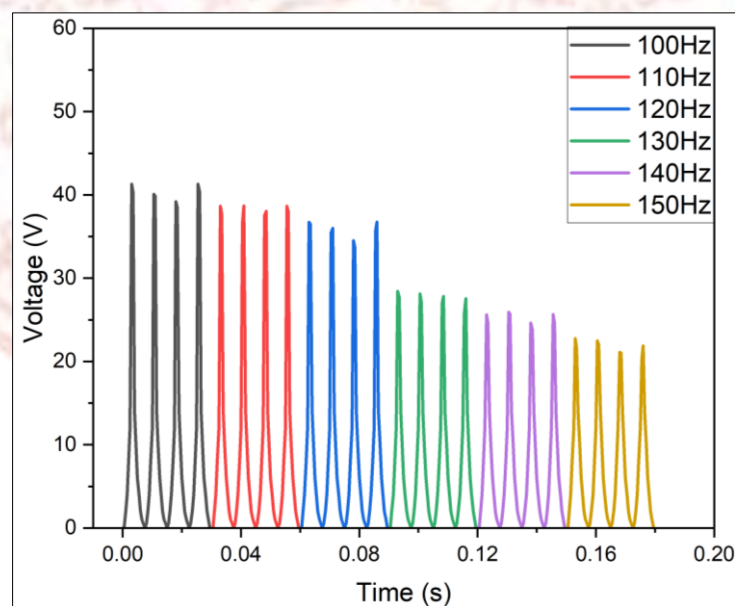


ภาพที่ 4-5 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู

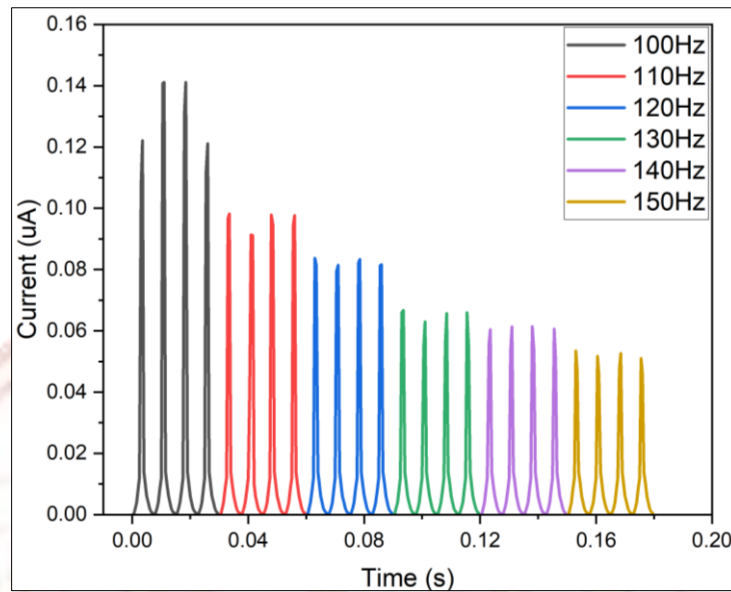


ภาพที่ 4-6 ทดสอบกระแสไฟฟ้าวงจรถูกเปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู

4.2.2 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรถูกปิดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 225 รู คลื่นเสียงความถี่ในช่วง 100 Hz 110 Hz 120 Hz 130 Hz 140 Hz และ 150 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB ที่ระยะเวลา 10 นาที แสดงดังภาพที่ 4-7 และ ภาพที่ 4-8

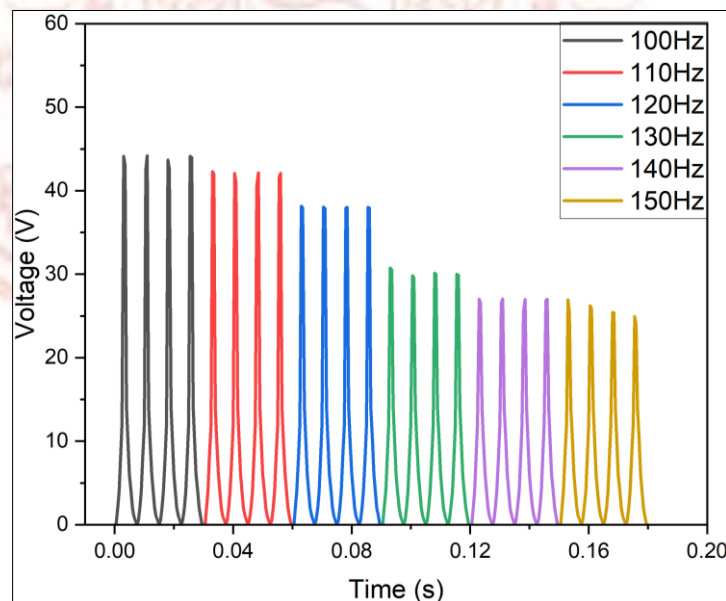


ภาพที่ 4-7 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 225 รู

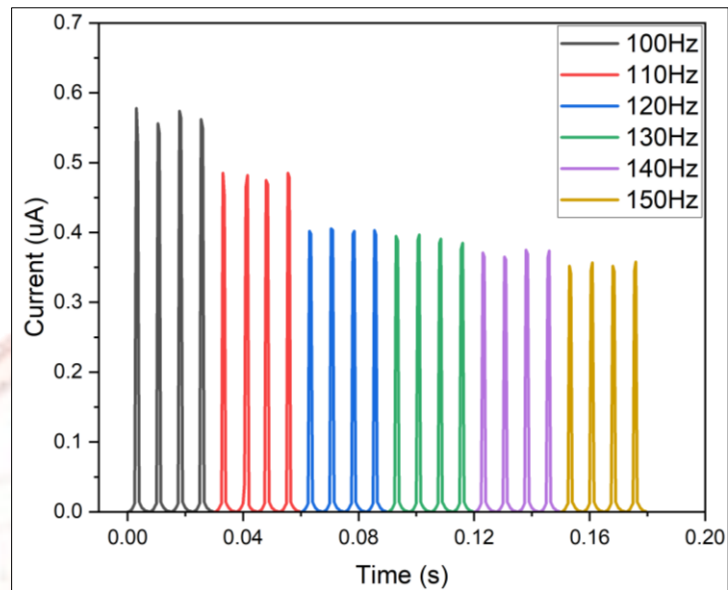


ภาพที่ 4-8 ทดสอบกระแสไฟฟ้าวงจรถูกกระตุ้นบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 225 รู

4.2.3 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดและกระแสไฟฟ้าวงจรถูกปิดจากจำนวนรูกระตุ้นบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 442 รู คลื่นเสียงความถี่ที่ช่วง 100 Hz 110 Hz 120 Hz 130 Hz 140 Hz และ 150 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB ที่ระยะเวลา 10 นาที แสดงดังภาพที่ 4-9 และภาพที่ 4-10

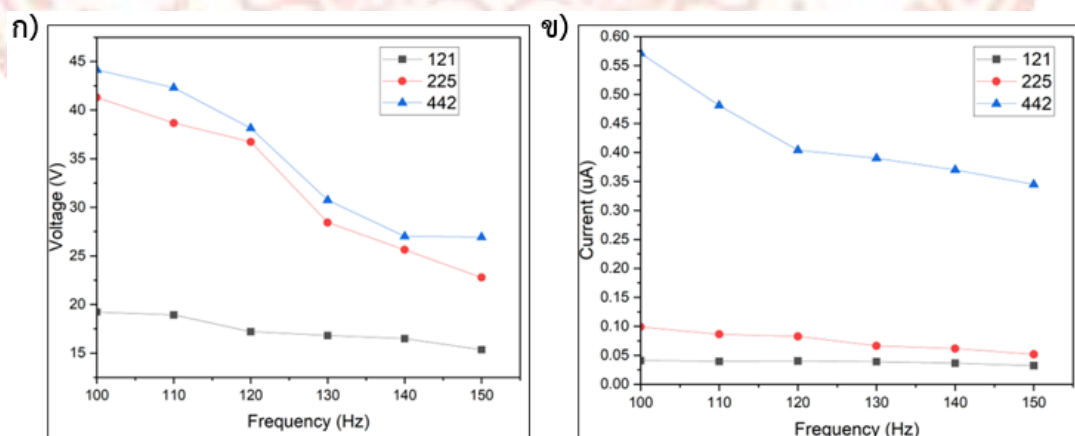


ภาพที่ 4-9 ทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถูกเปิดรูกระตุ้นบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 442 รู



ภาพที่ 4-10 ทดสอบกระแสไฟฟ้าวงจรถอดรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 442 รู

จากภาพที่ 4-11 สามารถเปรียบเทียบผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถอดรูอะคูสติคและกระแสไฟฟ้าวงจรถอดรูสูงสุดจากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู 225 รู และ 442 รู ทำการทดสอบคลื่นเสียงความถี่ที่ช่วง 100 Hz 110 Hz 120 Hz 130 Hz 140 Hz และ 150 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB ที่ระยะเวลา 10 นาที ต่อเนื่องในแต่ละย่านความถี่แสดงดังภาพที่ 4-11 (ก) แสดงผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้า และ ภาพที่ 4-11 (ข) แสดงผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้า

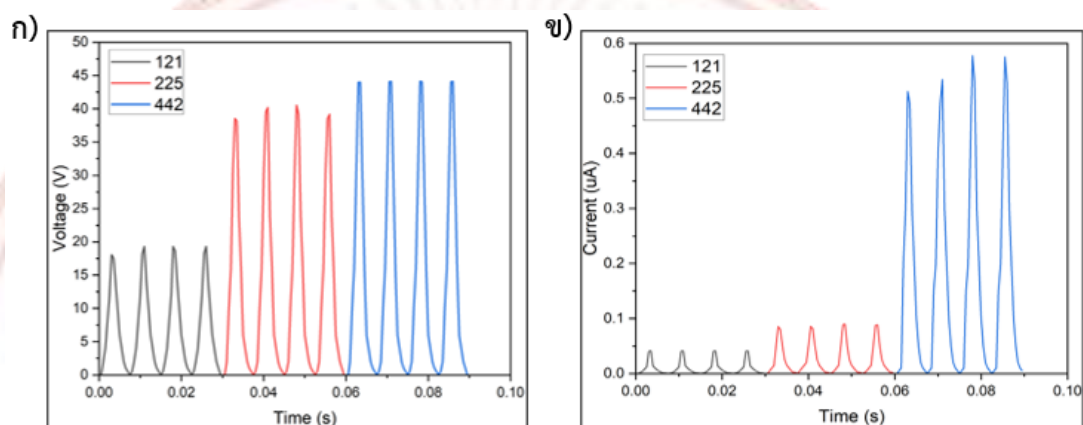


ภาพที่ 4-11 ผลการทดสอบแรงดันไฟฟ้าวงจรถอดรูอะคูสติคและกระแสไฟฟ้าวงจรถอดรู

จากจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมที่ความถี่แตกต่างกัน

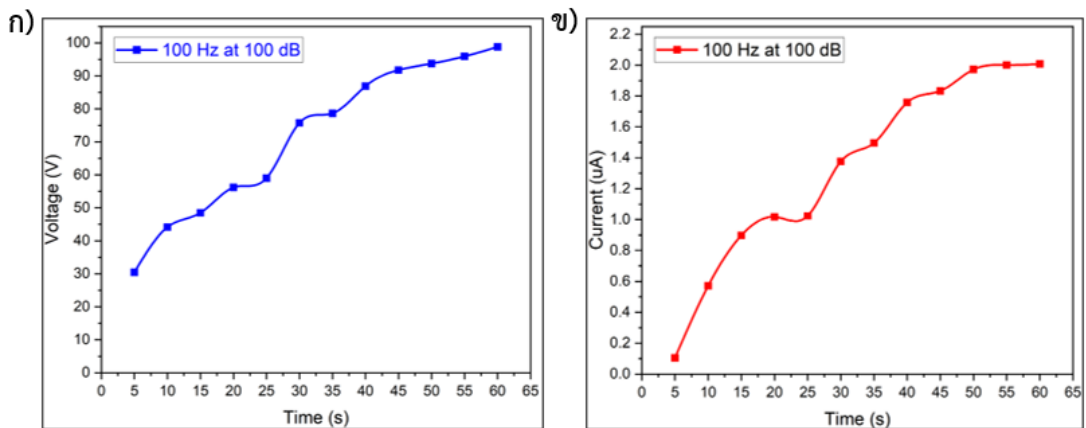
(ก) แสดงผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้า (ข) แสดงผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้า

ภาพที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบวัดค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดจากความแตกต่างของจำนวนรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมความถี่ 100 Hz ที่ระดับความดังเสียง 100 dB ภาพที่ 4-12 (ก) จำนวน 121 รู 225 รู และ 442 รู ได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรถัดที่ 19.24 V 41.25 V และ 44.14 V ตามลำดับ และ ภาพที่ 4-12 (ข) จำนวน 121 รู 225 รู และ 442 รู ได้ผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรถัดที่ 0.041 μA 0.10 μA และ 0.57 μA ตามลำดับ



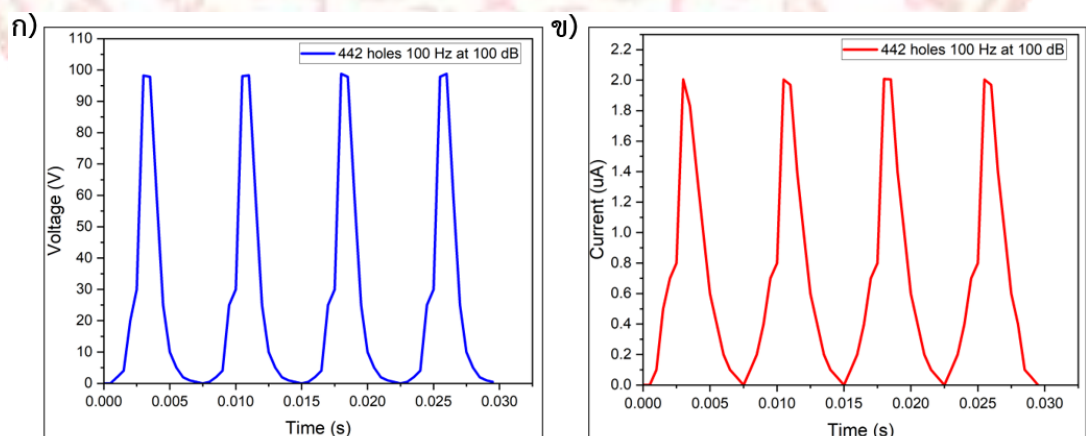
ภาพที่ 4-12 แสดงการเปรียบเทียบผลทดสอบวัดค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของรูอะคูสติคบนแผ่นอะลูมิเนียมจำนวน 121 รู 225 รู และ 442 รูตามลำดับ
(ก) แสดงผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้า (ข) แสดงผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้า

ผลการทดสอบพิจารณาได้จากทฤษฎีดังกล่าวมาข้างต้นการปรับขนาดและระยะห่างของรูมีผลต่อการควบคุมความถี่จำเพาะให้เกิดการสั่นสะเทือนเพื่อนำพลังงานคลื่นเสียงและการแพร่กระจายของคลื่นเสียงได้มีประสิทธิภาพ การทดสอบที่คลื่นเสียงความถี่ต่ำ 100 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB ให้ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าได้ดีกว่าความถี่เสียงต่ำ 150 Hz ที่ระดับความดังเสียงเท่ากัน การที่คลื่นเสียงได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นด้วยความถี่เท่าเดิมซ้ำ ๆ ทำให้คลื่นมีพลังงานมากขึ้นแอมพลิจูดของคลื่นสูงขึ้นผลอันเนื่องมาจากระดับแรงดันเสียงของคลื่นไซน์ (Sine Wave) จะไม่คงที่ในทุกความถี่ส่งผลทำให้ระดับความดังเสียงของคลื่นความถี่เสียงที่มีค่าที่ต่ำกว่าจะมีค่าระดับแรงดันเสียงที่สูงกว่า



ภาพที่ 4-13 การทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายในระยะเวลา 60 นาที
(ก) แสดงผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้า (ข) แสดงผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้า

จากผลลัพธ์ที่ได้ข้างต้นทำการทดสอบการเก็บเกี่ยวพลังงานไฟฟ้าสูงสุดภายในช่วงระยะเวลาที่ 5 นาที ถึง 60 นาที เพื่อวัดค่าพลังงานไฟฟ้าที่จำนวนรูอะคูสติก 442 รู ช่วงคลื่นเสียงความถี่ต่ำ 100 Hz ที่ระดับความดังเสียง 100 dB แสดงดังภาพที่ 4-13 จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำมีความสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำเพื่อทำการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง ภาพที่ 4-13 (ก) แสดงผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดที่ 30.461 V ถึง 98.797 V ภายในระยะเวลา 60 นาที และ ภาพที่ 4-13 (ข) แสดงผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้าวงจรปิดที่ 0.10 μA ถึง 2.01 μA ภายในระยะเวลา 60 นาที

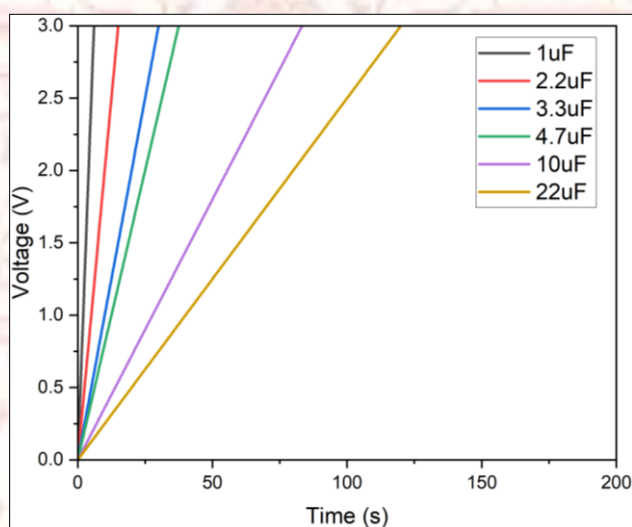


ภาพที่ 4-14 ผลลัพธ์การผลิตพลังงานไฟฟ้าสูงสุดช่วงความถี่ 100 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB
(ก) แสดงผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด (ข) แสดงผลลัพธ์ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด

จากผลประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้ที่คลื่นเสียงความถี่ 100 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB แสดงดังภาพที่ 4-14 สามารถให้ผลลัพธ์ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงสุดที่ 98.797 V ให้ผลลัพธ์ค่ากระแสวงจรปิดสูงสุดที่ 2.01 μA

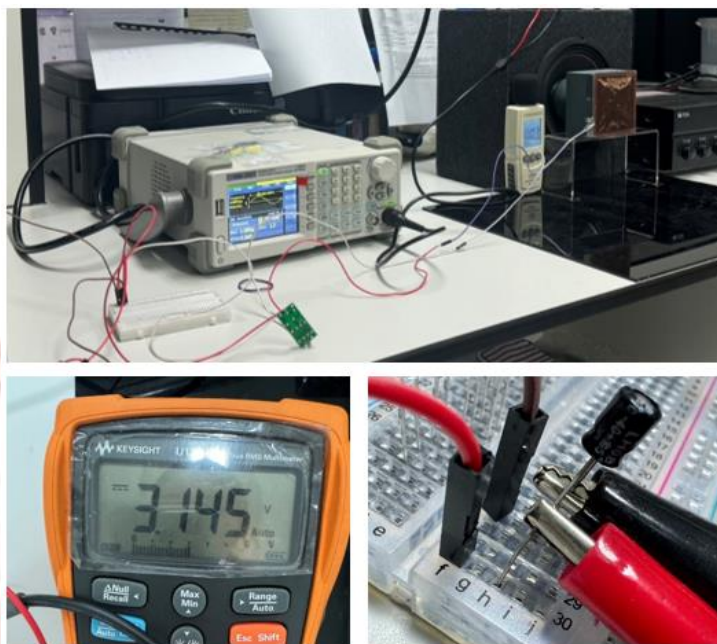
4.3 ผลการทดสอบการจ่ายประจุไฟฟ้า

การทดสอบประจุไฟฟ้ากับค่าความจุที่แตกต่างกันนำตัวเก็บประจุมาทำการประจุไฟฟ้าที่ 3 V ความสามารถในการประจุไฟฟ้าได้ที่ค่าความจุขนาด 1 μF ใช้เวลา 5 วินาที ค่าความจุขนาด 2.2 μF ใช้เวลา 18 วินาที ค่าความจุขนาด 3.3 μF ใช้เวลา 24 วินาที ค่าความจุขนาด 4.7 μF ใช้เวลา 40 วินาที ค่าความจุขนาด 10 μF ใช้เวลา 90 วินาที และค่าความจุขนาด 22 μF ใช้เวลา 120 วินาที ตามลำดับแสดงดังภาพที่ 4-15

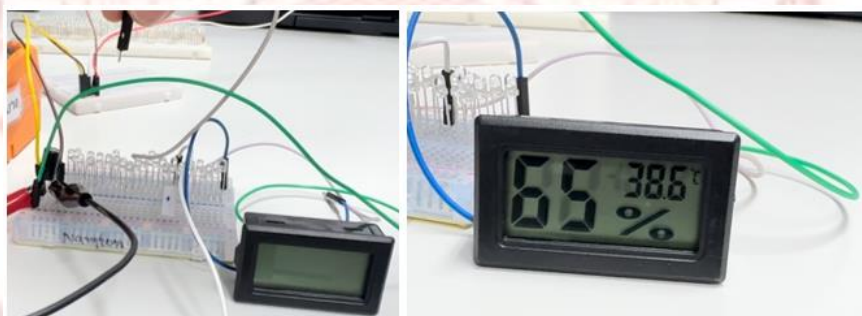


ภาพที่ 4-15 การทดสอบการจ่ายประจุไฟฟ้ากับค่าความจุที่แตกต่างกัน

จากผลการทดสอบข้างต้นอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำมีความสามารถในการจ่ายประจุให้กับตัวเก็บประจุเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้แก่ เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นหลังจากการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 220 μF ที่แรงดันไฟฟ้า 3 V แสดงดังภาพที่ 4-16 และ ภาพที่ 4-17



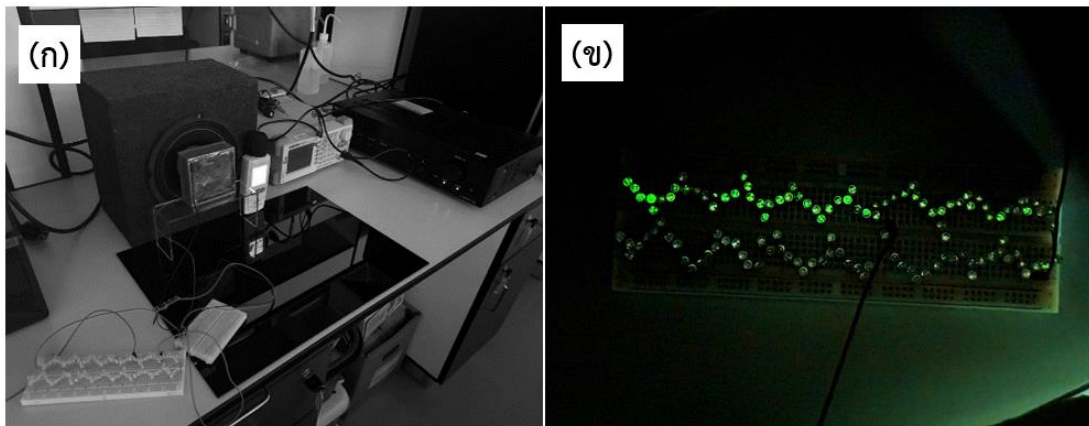
ภาพที่ 4-16 ผลการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ 220 μF ที่แรงดันไฟฟ้า 3 V



ภาพที่ 4-17 แหล่งจ่ายไฟให้กับเซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น

4.4 ผลการทดสอบเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับไดโอดเปล่งแสง (LED)

จากผลประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้ที่คลื่นเสียงความถี่ 100 Hz ระดับความดังเสียงที่ 100 dB สามารถให้ผลลัพธ์ค่าแรงดันไฟฟ้าวงจรเปิดสูงสุดที่ 98 V ให้ผลลัพธ์ค่ากระแสวงจรปิดสูงสุดที่ 2.01 μA จากภาพที่ 4-18 อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำมีความสามารถในการเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์สว่างได้สูงสุดถึง 70 ดวง



ภาพที่ 4-18 ชุดการทดลองอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ
(ก) การเชื่อมต่อการทำงานของอุปกรณ์ (ข) ไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์สว่างได้สูงสุดถึง 70 ดวง



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากรอบตัวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและเพื่อศึกษาวัสดุแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าที่สามารถหาได้ง่าย สะดวกและต้นทุนไม่สูง ผลการทดลองของอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าในช่วงความถี่ 100 Hz ที่ระดับความดังเสียง 100 dB ได้ผลลัพธ์ค่าแรงดันวงจรเปิดสูงสุดที่ 98 V และผลลัพธ์ค่ากระแสวงจรปิดสูงสุดที่ 2.01 μA เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สามารถเป็นแหล่งจ่ายไฟอิสระให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โดยไม่พึ่งพาแหล่งพลังงานแบตเตอรี่และเป็นแนวทางการเก็บเกี่ยวพลังงานจากสภาพแวดล้อมรอบตัวมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้งานเป็นการพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานในอนาคตต่อไปได้ สรุปผลได้ดังนี้

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงานคลื่นเสียงความถี่ต่ำจากหลักการเคลื่อนที่ของอากาศภายในรูปทรงปริมาตรเชื่อมต่อกับคอท่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนจากความสปริงตัวของอากาศ เมื่อบีบอัดปริมาตรอากาศแรงดันจะเพิ่มขึ้นและเกิดการดูดและอัดอากาศภายในโพรงแบบระบบแมสสปริงแดมป์เปอร์ (Mass-Spring-Damper System) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของระดับแรงดันอากาศ (SPL) ของคลื่นเสียงความถี่ต่ำตามที่ถูกออกแบบกล่องเรโซแนนท์ (Resonant Cavity) ผลลัพธ์ได้ความถี่เรโซแนนท์ (Resonant Frequency) ในช่วงไม่เกิน 210 Hz มีค่าแอมพลิจูดสูงกว่าความถี่ 280 Hz ขึ้นไป ผลลัพธ์เป็นไปตามย่านความถี่ตอบสนองเฉพาะของสัญญาณได้ตามต้องการ ส่งผลให้เกิดแรงเชิงกลการสัมผัสและแยกออกจากกันของวัสดุแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าให้เกิดการผลิตพลังงานไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง

จากผลการทดลองประสิทธิภาพพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำใช้วัสดุในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจากแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าไดอิเล็กทริกให้ประจุเป็นบวกเจาะรูอะคูสติกและแผ่นฟิล์มพอลิเอไมด์มีค่าไดอิเล็กทริกให้ประจุเป็นลบ จากการทดลองการปรับขนาดและระยะห่างของรูอะคูสติกจำนวน 442 รู ขนาดรัศมี 1 mm มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการควบคุมแรงดันอากาศตามความถี่จำเพาะเพื่อเน้นพลังงานคลื่นเสียงและการแพร่กระจายของคลื่นเสียงที่ส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นสัญญาณแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ยังคงมีเสถียรสามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้

เมื่ออยู่ในสภาวะการทำงานอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยหลักการดังภาพที่ 4-4 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Yu et al., 2021)

จากผลการทดลองการจ่ายประจุไฟฟ้าด้วยอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเพิ่มขึ้นจนกว่าจะถึงความจุสูงสุดเมื่อประจุตัวเก็บประจุแล้วจะสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าไว้เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับอุปกรณ์เซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้นสามารถทำงานได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

จากผลการทดลองเป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าอิสระไม่ต้องพึ่งพาแหล่งพลังงานแบตเตอรี่ อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำสามารถจ่ายไฟให้กับไดโอดเปล่งแสงเชิงพาณิชย์สว่างได้สูงสุดถึง 70 ดวงบรรลุตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

5.2 อภิปรายผล

การทดสอบที่คลื่นเสียงความถี่ต่ำ 100 Hz ระดับความดังเสียง 100 dB ให้ผลลัพธ์ทางไฟฟ้าได้ดีกว่าความถี่เสียงต่ำ 150 Hz แม้ว่าเสียงทั้งสองจะมีระดับความดังเสียง (SPL) เท่ากัน แต่คลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำกว่ามีความสามารถในการสั่นสะเทือนที่สูงและคลื่นเสียงมีความยาวมากกว่าเมื่อเทียบกับคลื่นความถี่ที่สูงกว่าจึงมีความสามารถในการกระตุ้นการสั่นสะเทือนในวัสดุได้ ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำตอบสนองดีในช่วงความถี่ 100 Hz สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้สูงสุด

5.3 ข้อเสนอแนะ

การเลือกใช้วัสดุในการแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้าจะต้องคำนึงถึงพื้นผิว ขนาด และความหนาของวัสดุ เพื่อประกอบใช้งานที่ตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวแรงเชิงกลได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งจะส่งผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์

การทดลองจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำและระดับความดังเสียงที่มีค่าคงที่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์วัดผลการผลิตพลังงานไฟฟ้าจะทำให้ทราบได้ว่าในการนำอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำไปประยุกต์ใช้งานจริงควรเลือกติดตั้งในพื้นที่สภาวะแวดล้อมโดยรอบที่เหมาะสมเพื่อประสิทธิภาพในการรับคลื่นเสียงความถี่ต่ำและระดับความดังเสียงอย่างเหมาะสม ลดการเกิดความคลาดเคลื่อนของช่วงความถี่เสียงต่ำ และระดับความดังเสียงที่ส่งผลต่อการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากตัวอุปกรณ์



บรรณานุกรม

- Çakır, O. (2012). *A System Proposal for Façade Apertures to Prevent Acoustic Problems of Naturally Ventilated Buildings*. (Master). Istanbul Technical University,
- Chaichana, P. (2008). การตรวจวัดเสียงจากอุตสาหกรรม Retrieved from https://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/book55_3/sanitation.html
- . Chapter 22 - Noise Pollution. (2003). In R. F. Weiner & R. A. Matthews (Eds.), *Environmental Engineering (Fourth Edition)* (pp. 423-446). Burlington: Butterworth-Heinemann.
- College, N. T. (2020). Frequency range of radio waves. Retrieved from <http://www.nayoktech.ac.th/webnew/attachments/article/932/>
- Electrical4U. (2023). Dielectric Materials. Retrieved from https://www.electrical4u.com/dielectric-material-as-an-electric-field-medium/#google_vignette
- Engineers, L. M. (2019). BASIC ELECTRONICS. Retrieved from <https://lastminuteengineers.com/the-full-wave-bridge-rectifier/>
- Hedayati, R., & Lakshmanan, S. (2020). Pneumatically-Actuated Acoustic Metamaterials Based on Helmholtz Resonators. *Materials*, 13(6). doi:10.3390/ma13061456
- Kittiamornkul, P. D. N. (2017). Rectifier Circuit. Retrieved from <https://navapadol.wordpress.com/>
- Latusek-Nabholz, J., Whitt, A., Fertl, D., & Sidorovskaia, N. (2020). *Literature Synthesis: Passive Acoustic Monitoring Projects and Sound Sources in the Gulf of Mexico*.
- Li, Y., Liu, C., Hu, S., Sun, P., Fang, L., Lazarouk, S., . . . Che, L. (2022). Self-Powered Acoustic Sensor Based on Triboelectric Nanogenerator for Smart Monitoring. *Acoustics Australia*, 50(3), 383-391. doi:10.1007/s40857-022-00275-4
- Massaro, M. (2017). *Thesis for the Degree of Licentiate of Philosophy. Radio Spectrum Regulation in the European Union: A three-level context*.
- McLennan, J. (2005). Music Science. Retrieved from <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html>
- Meeto, P. (2022). Sound wave. Retrieved from

- http://elsd.sru.ac.th/pennapha_me/pluginfile.php/682/course/summary/
- Oxenham, A. J. (2013). 1 - The Perception of Musical Tones. In D. Deutsch (Ed.), *The Psychology of Music (Third Edition)* (pp. 1-33): Academic Press.
- Poole, L. (2018). Rectifier Circuit. Retrieved from https://www.electronics-notes.com/articles/analogue_circuits/diode-rectifiers/half-wave-rectifier-circuits.php
- Raboud, D. L. W. D. D. (2020). SOUND AND ACOUSTICS. Retrieved from <https://engcourses-uofa.ca/books/vibrations-and-sound/12-sound-and-acoustics/sound-pressure-level/>
- Rodrigues, C., Nunes, D., Clemente, D., Mathias, N., Correia, J. M., Rosa-Santos, P., . . . Ventura, J. (2020). Emerging triboelectric nanogenerators for ocean wave energy harvesting: state of the art and future perspectives. *Energy & Environmental Science*, 13(9), 2657-2683. doi:10.1039/d0ee01258k
- Silva, L. T., Magalhães, A., Silva, J. F., & Fonseca, F. (2021). Impacts of low-frequency noise from industrial sources in residential areas. *Applied Acoustics*, 182, 108203. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108203>
- Technology, T. I. f. t. P. o. T. S. a. (2020). Physics Book. Retrieved from https://physics.ipst.ac.th/wp-content/uploads/sites/2/2020/08/Example_PhysicsBook04_2020.pdf
- Theeppraphanee, K. (2022). Types of Waves. Retrieved from <https://tuemaster.com/>
- VERMA, K. (2020). Atomic Particle. Retrieved from <https://goglobalways.com/blog/what-is-electricity-atom-structure/>
- Wang, Z., Wu, Y., Jiang, W., Liu, Q., Wang, X., Zhang, J., . . . Wang, Z. L. (2021). A Universal Power Management Strategy Based on Novel Sound-Driven Triboelectric Nanogenerator and Its Fully Self-Powered Wireless System Applications. *Advanced Functional Materials*, 31(34). doi:10.1002/adfm.202103081
- Xia, X., Fu, J., & Zi, Y. (2019). A universal standardized method for output capability assessment of nanogenerators. *Nat Commun*, 10(1), 4428. doi:10.1038/s41467-019-12465-2
- Yu, H., Du, T., Zhao, H., Zhang, Q., Liu, L., Mtui, A. E., . . . Xu, M. (2021, 25-29 April 2021). *Conical Helmholtz Resonator-Based Triboelectric Nanogenerator for Harvesting*

of Acoustic energy. Paper presented at the 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS).

Yuan, H., Yu, H., Liu, X., Zhao, H., Zhang, Y., Xi, Z., . . . Xu, M. (2021). A High-Performance Conformal Helmholtz Resonator-Based Triboelectric Nanogenerator for Acoustic Energy Harvesting. *Nanomaterials (Basel)*, 11(12). doi:10.3390/nano11123431

Yuan, M., Li, C., Liu, H., Xu, Q., & Xie, Y. (2021). A 3D-printed acoustic triboelectric nanogenerator for quarter-wavelength acoustic energy harvesting and self-powered edge sensing. *Nano Energy*, 85. doi:10.1016/j.nanoen.2021.105962

Zhang, Q., Ziyue, X., Wang, Y., Liu, L., Yu, H., Wang, H., & Xu, M. (2022). Multi-Tube Helmholtz Resonator Based Triboelectric Nanogenerator for Broadband Acoustic Energy Harvesting. *Frontiers in Materials*, 9, 896953. doi:10.3389/fmats.2022.896953

Zhang, R., & Olin, H. (2020). Material choices for triboelectric nanogenerators: A critical review. *EcoMat*, 2. doi:10.1002/eom2.12062

Zhang, Z., Shao, J., Nan, Y., Willatzen, M., & Wang, Z. L. (2022). Theory and shape optimization of acoustic driven triboelectric nanogenerators. *Materials Today Physics*, 27, 100784. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100784>

Zhao, D., & Li, X. Y. (2015). A review of acoustic dampers applied to combustion chambers in aerospace industry. *Progress in Aerospace Sciences*, 74, 114-130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.12.003>

Zhao, H., Xiao, X., Xu, P., Zhao, T., Song, L., Pan, X., . . . Wang, Z. L. (2019). Dual-Tube Helmholtz Resonator-Based Triboelectric Nanogenerator for Highly Efficient Harvesting of Acoustic Energy. *Advanced Energy Materials*, 9(46), 1902824. doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.201902824>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ จิตสุภา บุญทาธาตุ
ชื่อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ
สาขาวิชา เทคโนโลยีพลังงานและการจัดการ
ประวัติ เกิดเมื่อวันที่ 19 มีนาคม พ.ศ. 2537 จังหวัดระยอง
ปีการศึกษา 2560 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเทคโนโลยี
ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผลงาน
จิตสุภา บุญทาธาตุ*และภาณุพงศ์ ใจบาล
การพัฒนาอุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากคลื่นเสียงความถี่ต่ำ รายงานสืบ
เนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติพหุคูณสงครามวิจัย ครั้งที่ 9 ประจำปี
พ.ศ. 2567

