

การป้องกันตะกรันในหม้อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แมกนีโตสตรีกทีฟ
ทรานสดิวเซอร์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

**SCALE PREVENTION IN HEAT EXCHANGER BY
USING MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCER**



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the

Degree of Master of Engineering in

Electronics and Photonics Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การป้องกันตระกรันในหม้อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แมกนีโตสตริกทิฟ
ทรานสดิวเซอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.ชนเสถียร ทศดิกรพัฒน์)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสธรา)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์)

กรรมการ

(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์จร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐฐากร พุกสีแสง : การป้องกันตะกรันในหม้อแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ (SCALE PREVENTION IN HEAT EXCHANGER BY USING MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCER) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ, 60 หน้า

การป้องกันตะกรันในหม้อแลกเปลี่ยนความร้อนได้มีการนำเทคโนโลยีแบบแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์มาใช้งานที่โรงงานอุตสาหกรรมน้ำมัน และอุตสาหกรรมที่มีการใช้หม้อต้มแลกเปลี่ยนความร้อน เป็นต้น ซึ่งในอุตสาหกรรมมักจะประสบปัญหาการมีตะกรันมาอุดตันและเกาะติดที่พื้นผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน การเกิดตะกรันแบบนี้เนื่องจากในน้ำหรือน้ำมันจะมีสารจำพวกแคลเซียม และแมกนีเซียมเหล่านี้ผสมอยู่ในน้ำ เมื่อมีการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้เกิดการตกผลึกตรงพื้นผิวของท่อ ทำให้เกิดเป็นฉนวนกันความร้อนไม่ให้เกิดถ่ายเทความร้อนไปยังส่วนของน้ำที่ทำการแลกเปลี่ยนกันอยู่ได้ จึงเกิดการสูญเสียพลังงานที่ในการทำงานของหม้อแลกเปลี่ยนความร้อนเหล่านี้ ดังนั้นนักวิจัยจึงได้ทำการออกแบบวงจรขับทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟ เพื่อทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการป้องกันตะกรันที่เกาะและลดขนาดของคราบตะกรันที่พื้นผิวของท่อแลกเปลี่ยนความร้อน และการทำงานของเครื่องจะเปิดตลอดเวลาทำให้เกิดความร้อน เมื่อความร้อนเพิ่มมากขึ้นก่อให้เกิดการแตกหักทำให้เกิดการเสียหายต่ออุปกรณ์ ดังนั้นการพัฒนาแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ จะทำการแก้ปัญหาคความร้อนควบคู่ไปด้วย ซึ่งจะช่วยลดความเสียหายที่เกิดขึ้น ทำให้แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์มีการใช้งานยาวนานมากขึ้น ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงมีเป้าหมายเพื่อออกแบบวงจรให้สามารถขับทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟนี้ได้ ทั้งนี้ยังมีการออกแบบสัญญาณที่ได้มีการกำหนดรูปแบบมาควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ โดยรูปแบบที่ได้ทำการกำหนดจะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถี่และค่าความถี่ไซเคิลที่ใช้เพื่อนำมาสรุปช่วงการทำงานที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการสั่นที่แรงเพื่อนำไปใช้งาน และการป้อนสัญญาณในครั้งนี้นี้ยังสามารถนำมาควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ไม่ให้สูงจนทำให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ได้

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2560

ลายมือชื่อนักศึกษา ณัฐฐากร พุกสีแสง
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา [ลายมือ]

NUTTAKORN PUKSEESANG : SCALE PREVENTION IN HEAT
EXCHANGER BY USING MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCER.

THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. CHANCHAI THONGSOPA. Ph.D.,
60 PP.

MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCER

Magnetostrictive Transducer technology have been apply to prevention of scale in heat exchanger in Oil and the other industries that use Heat Exchanger boiler. The industry mentioned above often get the the problem from scale blocked and stick coating to the surface of Heat Exchangers tube. This scale is comes from mixed of Calcium and Magnesium substance in water or oil. When bringing mixtures water like this to Heat Exchange causes stain on the surface of the pipe. Scale formed, caused insulation and prevent heat to transfer to water that is exchanging. Cause of energy wasted on Heat Exchanges boiler operation. Therefore, we, researchers have designed a Magnetostrictive Transducer to apply for prevent and reduce scale forming to the surface of Heat Exchangers tube. Because, the transducer vibrated the Exchangers tube. With vibration of Magnetostrictive Transducer all the time, causes the heat of its. Increased of temperature causes damage to the equipment from fracture. Therefore, the development of Magnetostrictive Transducer will solve the heat problem along with it. This will reduce the damage and make it more long lasting. The purpose of this research is to design a Magnetostrictive Transducer circuit. And also designed defined signal to control the Transducer. The defined model will be compare to fine frequency and duty cycle to summarize optimize operation to vibrate

force enough. This signal input can be control the heat of Magnetostrictive Transducer that not so high to make damage to equipment.



School of Electronics Engineering

Academic Year 2017

Student's Signature รัชฎาภกร พุกสันต์แสง

Advisor's Signature P. Chanlai

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับคำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความรู้ อบรม สั่งสอน ชี้แนะ และช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ดร. อภิชาติ อินทรพานิชย์ กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำแนวทางการทำงาน และช่วย ตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง สุตะพันธ์ และอาจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์สาขา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำและคำปรึกษาการ ทำวิจัย

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุน ใน การวิจัยในการทดลอง เครื่องมือการทดลอง และอาคารสถานที่ต่างๆในมหาวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณัฐภากร พุกสีแสง

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
1.5 บริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันการเกิด ตะกรันในการแลกเปลี่ยนความร้อน.....	8
2.1 อัลตราโซนิก.....	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและความเครียด.....	9
2.3 การหาช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการทำงาน.....	11
3 การศึกษาและออกแบบระบบป้องกันตะกรันโดยใช้หลักการอัลตราโซนิกที่เป็น แบบแมกนีโตสตรีกทีฟทรานสดิวเซอร์.....	12
3.1 การออกแบบวงจรขับแมกนีโตสตรีกทีฟทรานสดิวเซอร์.....	12
3.2 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ.....	19
3.2.1 สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation).....	19
3.2.2 สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกันระหว่างความถี่ที่ 1 และ 2.....	20
3.3 การดำเนินการทำงานของวงจรขับทรานสดิวเซอร์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

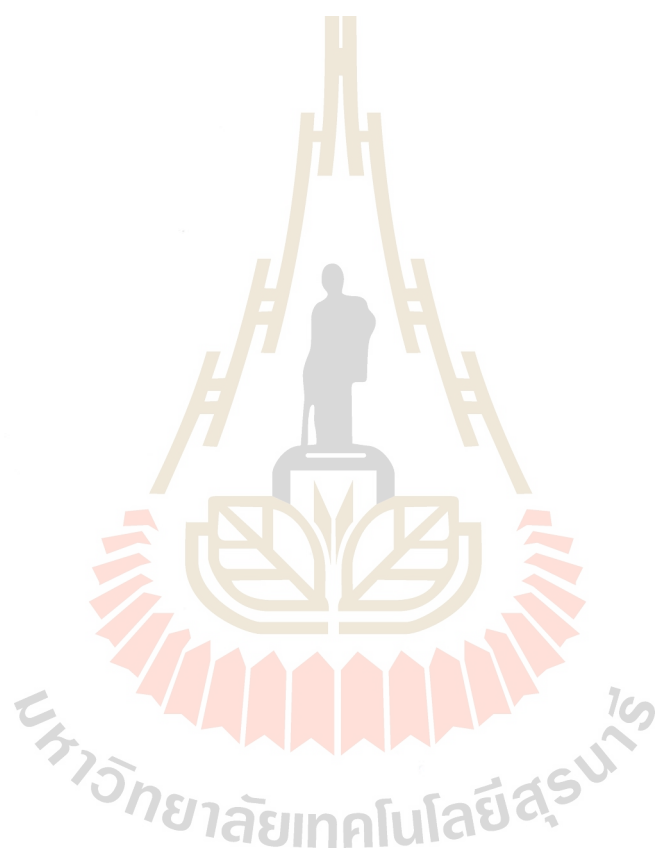
หน้า

3.3.1	การหาช่วงการทำงานของทรานสดิวเซอร์	21
3.2.2	การทดลองความร้อนที่เกิดที่เกิดจากการทำงานของตัว ทรานสดิวเซอร์	22
3.3.3	การทดสอบทำงานในเบื้องต้น.....	22
3.4	การวัดค่าพารามิเตอร์และอุปกรณ์การวัด.....	23
3.4.1	การวัดค่าแอมพลิจูด.....	23
3.4.2	การวัดอุณหภูมิ	25
4	การทดลองและผลการทดลอง	26
4.1	วิธีการทดลอง	26
4.1.1	การทดลองแบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่ม	26
4.1.2	การทดลองแบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่ม	27
4.1.3	การทดลองแบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์ที่ไม่มีการ เพิ่มความยาว	28
4.1.4	การลองความร้อนที่เกิดที่เกิดจากการทำงานของตัวอุปกรณ์	28
4.1.5	การทดสอบการทำงานเบื้องต้นกับน้ำบาดาล.....	29
4.2	ผลการทดลอง.....	30
4.2.1	การหาค่าแอมพลิจูดเมื่อใช้สัญญาณ PWM มาขับการทำงานของ แมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์ที่ต่อความยาวเพิ่ม	30
4.2.2	การหาค่าแอมพลิจูดเมื่อใช้สัญญาณมอดูเลตในการขับแมกนีโตสตริก ที่ฟทรานสดิวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์ เพิ่มจากของเดิม	34
4.2.3	การหาค่าแอมพลิจูดเมื่อใช้สัญญาณมอดูเลตในการขับแมกนีโตสตริก ที่ฟทรานสดิวเซอร์แบบแบบที่ยังไม่ได้ต่อความยาวของ ทรานสดิวเซอร์ต่อเพิ่ม.....	41
4.2.4	การหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ตัวทรานสดิวเซอร์	50
4.2.5	การทดลองติดตั้งเครื่องในเบื้องต้น.....	52
5	สรุป.....	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

เอกสารอ้างอิง.....	56
ภาคผนวก.....	58
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา.....	59
ประวัติผู้เขียน.....	60



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	โครงสร้าง TMS-40 transducer specifications..... 18
4.1	การวัดค่าแอมพลิจูด (Vp-p) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ในการทดสอบแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่มจากของเดิม 30
4.2	การวัดค่าแอมพลิจูด (Vp-p) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน 35
4.3	ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน 41
4.4	บันทึกอุณหภูมิของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่มโดยใช้สัญญาณ PWM..... 50
4.5	บันทึกอุณหภูมิของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่มโดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน 50
4.6	บันทึกอุณหภูมิของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่มโดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน 50

สารบัญรูป

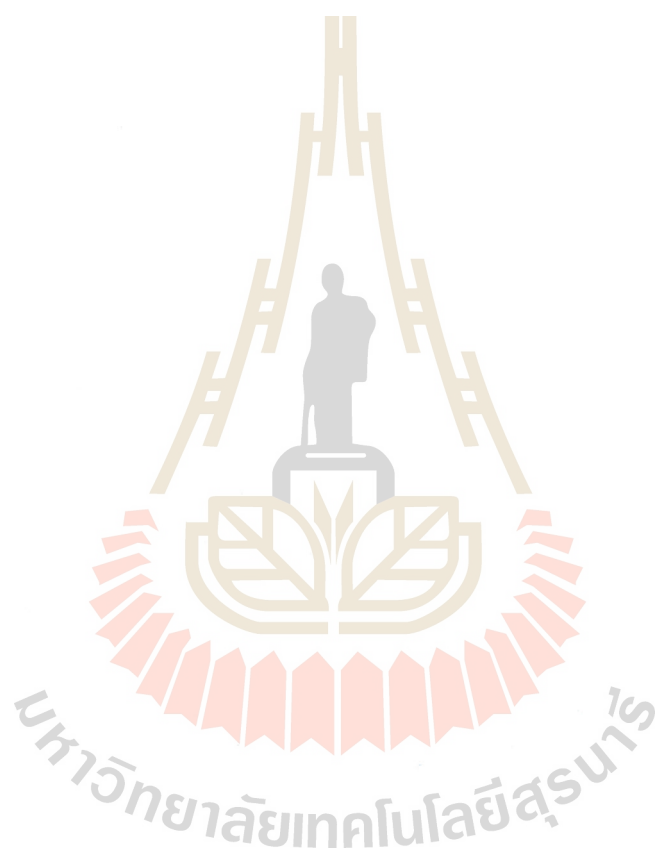
รูปที่		หน้า
1.1	แบบร่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทดลอง.....	2
1.2	การพันลิต่อทั้ง 4 แบบเพื่อแทนคราบสิ่งสกปรก.....	2
1.3	แผนภาพการฉายรังสีของอัลตราโซนิกเพื่อทำการปรับ CaSO_4 ให้เกิดการกระจายตัว.....	3
1.4	ความแตกต่างของขนาดอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์.....	4
1.5	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับตัวทรานสดิวเซอร์ทั้ง 6 แบบ.....	4
1.6	แผนภาพระบบการทำงานของ Ultrasonic generator.....	4
1.7	แผนภาพการทำงานของ Ultrasonic processor.....	5
1.8	สัญญาณมอดคูเลตที่เกิดขึ้นในทำงานของ Ultrasonic scale.....	7
1.9	(ก) ก่อนป้อนซีเมนต์ก่อนการทดสอบ และ (ข) ก่อนป้อนซีเมนต์มีขนาดเล็กลงเมื่อผ่านการทดสอบ.....	7
2.1	แมกนีโตทรานสดิวเซอร์.....	9
2.2	แบบจำลองทรานสดิวเซอร์.....	11
3.1	(ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ และ (ข) วงจรขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์.....	13
3.2	แสดงชุดวงจรสำเร็จรูป STM32F4DISCOVERY.....	14
3.3	(ก) แสดงวงจรทางไฟฟ้าของชุด Drive สัญญาณ (ข) แสดงอุปกรณ์ที่ต่อลงบนแผ่น PCB สำหรับชุด Drive สัญญาณ.....	15
3.4	ไดอะแกรมของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์.....	16
3.5	(ก) วงจร LC Resonance ของทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (ข) รูปร่างของทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟที่ใช้ในการทดสอบ (ค) แสดงหม้อแปลงที่ได้ทำการพันขดลวดทองให้เป็นสเต็ปอับ 5 เท่า.....	18
3.6	แสดงสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.7	สัญญาณที่ใช้ในการขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์.....	20

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8	(ก) แสดงในส่วนของทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม และ (ข) แสดงในส่วนทรานสดิวเซอร์ที่ยังไม่มีการต่อความยาว 21
3.9	การติดตั้งเครื่องขับทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทรีฟ 22
3.10	แสดง Hydrophone ที่วัดสัญญาณ 23
3.11	แสดงตำแหน่งในการจุ่ม Hydrophone เพื่อวัดสัญญาณ 24
3.12	แสดงสัญญาณที่ได้จาก hydrophone 24
3.13	ภาพถ่ายจากกล้องส่องความร้อน Keysight U5857A series True/R Thermal Imager 25
4.1	เปรียบเทียบค่า Vp-p ที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง duty cycle 35% 33
4.2	เปรียบเทียบค่า Vp-p ที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง duty cycle 40% 33
4.3	เปรียบเทียบค่า Vp-p ที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง duty cycle 45% 34
4.4	กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 35% ของแมกนีโตสตริกทรีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม 38
4.5	กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง Duty cycle 40% ของแมกนีโตสตริกทรีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม 39
4.6	กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง Duty cycle 45% ของแมกนีโตสตริกทรีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม 40
4.7	กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 35% ของแมกนีโตสตริกทรีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม 47
4.8	กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง Duty cycle 40% ของแมกนีโตสตริกทรีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม 48
4.9	กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง Duty cycle 45% ของแมกนีโตสตริกทรีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม 49
4.10	เปรียบเทียบอุณหภูมิของแต่ละผลการทดลอง 51
4.11	(ก) รูปท่อน้ำที่ทำความสะอาดก่อนไปติดตั้ง (ข) รูปท่อน้ำหลังจากเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ไว้ทิ้งไว้ 15 วัน 52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	(ก) รูปท่อน้ำที่ทำความสะอาดก่อนที่จะทดลองในรอบที่สอง (ข) รูปท่อหลังจากเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ไว้ทิ้งไว้ 15 วัน..... 53



บทที่ 1

บทนำ

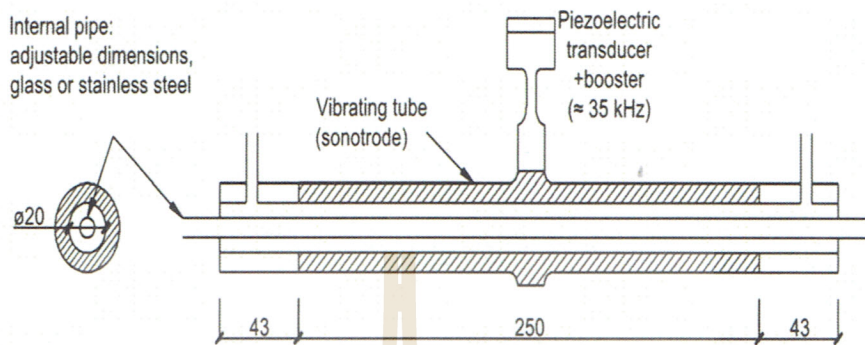
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีระบบแลกเปลี่ยนความร้อนจะประสบปัญหาเรื่องการเกิดตะกรันในระบบแลกเปลี่ยนความร้อน สาเหตุของการเกิดตะกรันเหล่านั้นคือความแตกต่างของอุณหภูมิและความดัน โดยจะทำให้สารละลายที่มีเกลือของแร่ธาตุตกผลึกแยกออกจากน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นจำพวกหินปูนมาเกาะและพอกพูนในท่อน้ำหรือถังเก็บน้ำ ซึ่งจะพบในชีวิตประจำวันเช่น ก้นกาต้มน้ำในหม้อไอน้ำและในการแลกเปลี่ยนความร้อนรูปแบบต่างๆ กลายเป็นปัญหาหนักของโรงงานอุตสาหกรรมเพราะตะกรันจะเป็นฉนวนกั้นความร้อนทำให้การถ่ายเทความร้อนไปยังท่อน้ำได้ไม่ดี ทำให้ต้องมีการล้างหม้อต้มน้ำด้วยสารเคมีบ่อยครั้ง การล้างทำให้เกิดมลพิษ ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่สูง และทำให้ต้องหยุดการทำงานของหม้อต้มน้ำทำให้เกิดความล่าช้าในการผลิต ดังนั้นทางโรงงานจึงค้นหาเทคนิคต่างๆ เพื่อใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรันพบว่าเทคโนโลยีหนึ่งที่เรียกว่าแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ ซึ่งนำมาใช้ทำการสันสะเทือนบริเวณท่อแลกเปลี่ยนความร้อนไม่ให้ตะกรันมาเกาะติดบริเวณพื้นผิวของท่อ การทำการสันนี้จะทำตลอดเวลาทั้งกลางวันและกลางคืนในระยะเวลาที่ยาวนานหลายเดือน จะทำให้แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์เกิดความเสียหายที่ข้อต่อระหว่างแกนเฟอร์ไรท์กับแกนเหล็ก

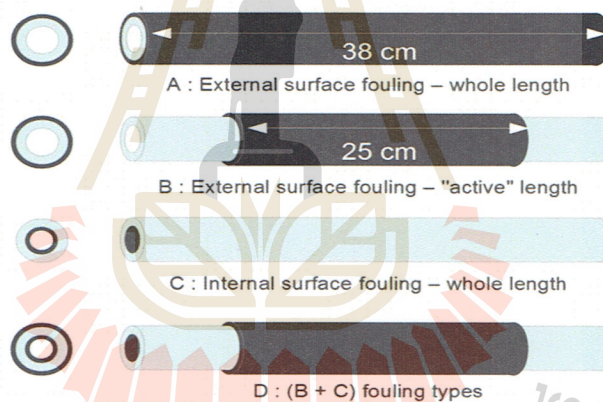
อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการสันที่ทำให้ตะกรันไม่มาเกาะติดบริเวณพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนเรียกว่าแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ (Magnetostrictive transducer) เป็นอุปกรณ์ทรานสดิวเซอร์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลได้โดยมีคุณสมบัติของแมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction) ซึ่งเป็นผลมาจากการที่อุปกรณ์นี้มีสารเฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic materials) เช่น นิกเกิลหรือเหล็ก เป็นต้น ซึ่งในการวิจัยที่ผ่านมาค้นคว้าแมกนีโตสตริกทีฟมาพัฒนาให้สามารถใช้งานได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น และมีการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน

ระบบการทดสอบศักยภาพของคลื่นอัลตราโซนิกที่นำมาต่อกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อทำการลดความเปราะเปื้อนของสิ่งสกปรกที่ติดผิวของท่อ (Legay, Allibert et al. 2013) โดยนักวิจัยกลุ่มนี้ได้สร้างเครื่องออกแบบจำลองการแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 1.1 ในการทดลองของระบบนี้จะใช้วิธีพ่นสลิกลงในท่อเพื่อแทนคราบสกปรกที่ติดผิวดังรูปที่ 1.2 เพื่อสอบการหลุดออกของสิ่งสกปรกหรือดูความสะอาดของท่อเมื่อผ่านกระบวนการนี้ว่าใช้ได้จริง ในครั้งต่อไปกลุ่มวิจัยหรือ

คณะวิจัยได้นำเสนอการพัฒนา โดยจะทดลองทำซ้ำแบบเดิมเพื่อดูค่าพารามิเตอร์ถ้าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะใช้ระบบการลดคราบสิ่งสกปรกมาเป็นอุตสาหกรรมต้นแบบ

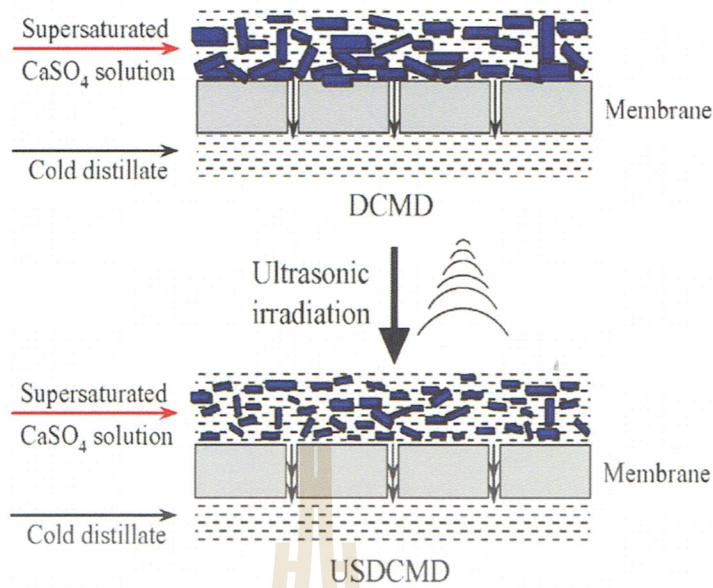


รูปที่ 1.1 แบบร่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในการทดลอง



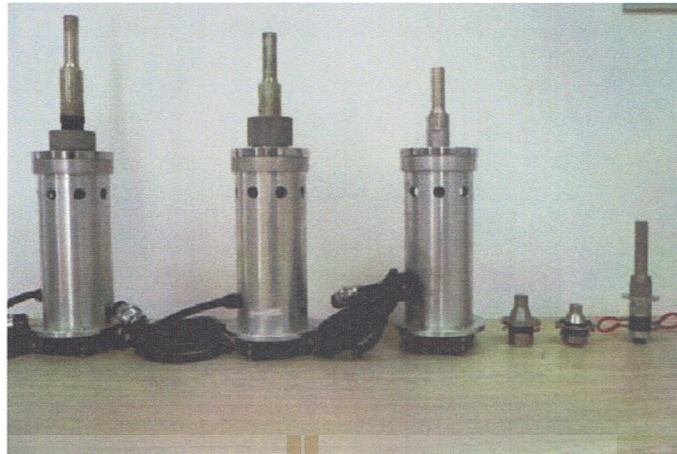
รูปที่ 1.2 การพ่นสีท่อทั้ง 4 แบบเพื่อแทนคราบสิ่งสกปรก

ระบบนี้จะเป็นกระบวนการกลั่นผ่านเยื่อที่ต่อเข้ากับอัลตราโซนิกเพื่อลดการอุดตันของเยื่อ
 นูฟิว (Hou, Wang et al. 2015) ในกระบวนการ Direct contact membrane distillation (DCMD) โดย
 จะทำการฉายรังสีอัลตราโซนิกลงในกระบวนการกลั่นผ่านเยื่อ ทำให้ของเหลวผ่านเยื่อนูฟิวได้อย่าง
 ต่อเนื่อง เนื่องจากการปรับค่าของ Calcium Sulfate (CaSO_4) ให้เกิดการกระจายตัวและยังยับยั้ง
 การเกิดผลึกของ Calcium carbonate (CaCO_3) ทำให้พื้นผิวของเยื่อนูฟิวสะอาด ในการทดลองครั้งนี้
 พบว่าสามารถแก้ไขปัญหของ CaSO_4 ได้ดีดังรูปที่ 1.3 ส่วนอัตราการตกตะกอนที่เร็วของเกลือที่ไม่
 ละลายน้ำ CaCO_3 จะตกตะกอนในสารละลายมากกว่าตกบนพื้นผิวเยื่อหุ้มเซลล์



รูปที่ 1.3 แผนภาพการฉายรังสีของอัลตราโซนิคเพื่อทำการปรับ CaSO_4 ให้เกิดการกระจายตัว

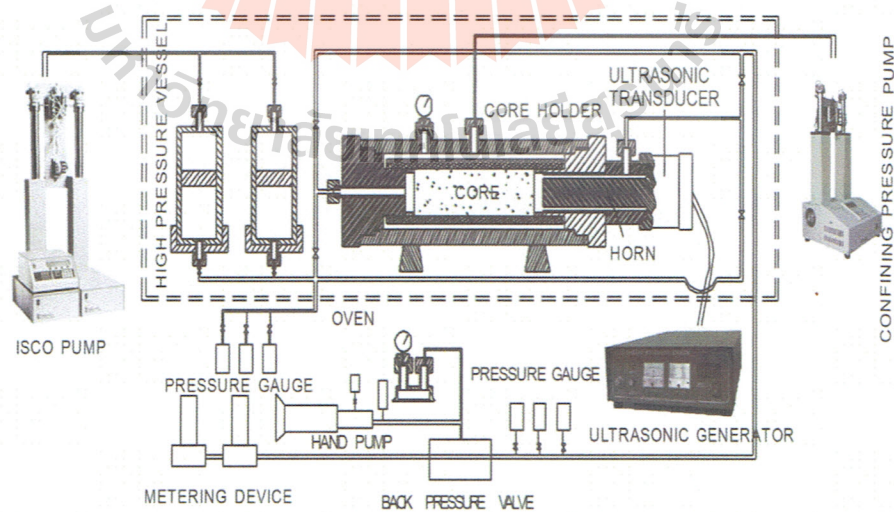
ระบบนี้จะนำของเหลวที่ทำการขูดเจาะขึ้นมาส่วนใหญ่เป็นโคลน ซึ่งจะมีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีพอลิเมอร์สายยาวไปแทรกทำให้เกิดการเสียหายมาก จึงได้มีการประยุกต์ใช้อัลตราโซนิคเพื่อมาทำให้เกิดความเสียหายในพอลิเมอร์ (Shi, Xu et al. 2017) ซึ่งในการทดลองจะนำอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์มาทั้งหมด 6 แบบ แสดงให้เห็นขนาดที่แตกต่างกันดังรูปที่ 1.4 และดังรูปที่ 1.5 จะเป็นความถี่และกำลังงานที่แตกต่างกันที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าทั้ง 6 รูปแบบ รูปแบบอัลตราโซนิคทรานสดิวเซอร์แบบไหนจะมีการช่วยให้ค่าการซึมผ่านของของเหลว (permeability) ได้ดีที่สุด โดยมีระบบการทำงานดังรูปที่ 1.6 ในการทดลองครั้งนี้อีกส่วนหนึ่งยังพบว่าความร้อนและการผันผวนที่เกิดขึ้นจะมีโพรงอากาศอิสระ โดยที่โพรงอากาศนี้เกิดการออกซิเดชันหรือการถูกกระตุ้นทำให้เป็นสาเหตุของขนาดพอลิเมอร์บางส่วนแตกหัก



รูปที่ 1.4 ความแตกต่างของขนาดอัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์

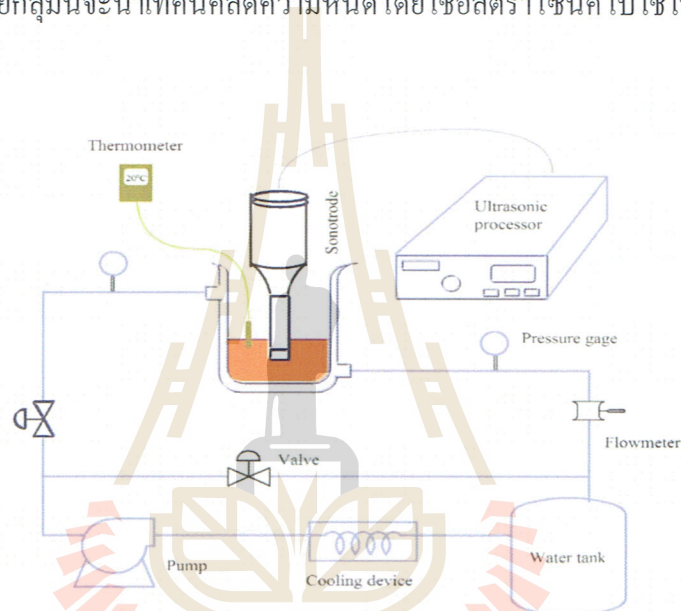
Transducer No.	Transducer frequency	Transducer power ratings
1	18	1000
2	22	1000
3	25	1000
4	30	60
5	40	60
6	50	200

รูปที่ 1.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับตัวทรานสดิวเซอร์ทั้ง 6 แบบ



รูปที่ 1.6 แผนภาพระบบการทำงานของ Ultrasonic generator

ระบบนี้จะใช้อัลตราโซนิกในการลดความหนืดของน้ำมันที่มีความหนืดมาก (Yan, Zheng et al. 2010, Xu, Deng et al. 2015) ซึ่งเป็นน้ำมันดิบเพื่อนำไปใช้ในการผลิตและในการขนส่งในระดับอุตสาหกรรม ในการทดลองจะใช้อัลตราโซนิกทำการปรับปรุงแก้ไขคุณสมบัติพฤติกรรมเชิงกลของวัสดุในการตอบสนองต่อแรงที่มากกระทำ โดยการตอบสนองที่เกิดขึ้นนั้นอยู่ในลักษณะการเสียรูปทรงและการไหล การทดสอบพบว่าสามารถลดความหนืดที่เกิดขึ้นในน้ำมันดิบที่มีค่า Heavy crude oil (HCO) และ Ultra heavy crude oil (UHCO) ได้ และการทดลองครั้งนี้ในรูปแบบที่ 1.7 ยังมีการหาค่าอุณหภูมิของอัลตราโซนิกที่อยู่ในอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำของ UHCO ในการพัฒนาครั้งต่อไปคณะวิจัยกลุ่มนี้จะนำเทคนิคลดความหนืดโดยใช้อัลตราโซนิกไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 1.7 แผนภาพการทำงานของ Ultrasonic processor

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นนักวิจัยจึงได้ทำการออกแบบวงจรขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ ในการทดลองในถังแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งในถังจะมีน้ำมันดิบกับน้ำมันที่กลั่นแล้วถ่ายเทความร้อนให้กันอยู่ เมื่อการแลกเปลี่ยนผ่านไประยะเวลาต่างๆ จะมีตะกักรันเกาะติดอยู่ทำให้เกิดการจับกลุ่มจนมีขนาดใหญ่ ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้น้อยลง ซึ่งทำให้โรงงานอุตสาหกรรมต้องหยุดเพื่อทำการล้างภายในถังแลกเปลี่ยนความร้อน ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายสูงในการล้างและยังเสียเวลาในการล้างถังแลกเปลี่ยนความร้อน

ผู้วิจัยจะทำการวิเคราะห์การทำงานของระบบป้องกันการเกิดตะกักรันในเรื่อง ความร้อนที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อเข้ากับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน

เพื่อไม่ให้เกิดการแตกหักเมื่อมีเวลาในการใช้นานๆ โดยจะทำการบันทึกค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความถี่ที่ใช้ ความร้อนที่เกิดขึ้นของแมกนีโตสตริกทิฟ กำลังงานที่ใช้ไป เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1.2.1 สามารถทำการออกแบบสร้างวงจรขับทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทิฟได้
- 1.2.2 สามารถควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ได้
- 1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทำงานของแมกนีโตสตริกทิฟ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

แมกนีโตสตริกทิฟทรานสดิวเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทำการสั่นสะเทือน ซึ่งได้ถูกพัฒนาให้สามารถใช้ร่วมกันในการทำงานของการแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อนำมาใช้ในการลดการเกิดตะกรันที่มาจากพื้นผิว ดังนั้นจึงมีการจำลองถึงแลกเปลี่ยนความร้อนและติดตั้งอุปกรณ์ลงในตัวถังทำการควบคุมการทำงาน โดยใช้แบบวงจรอินเวอร์เตอร์ฟูลบริดจ์สวิตชิงซึ่งความถี่ที่ 12 - 24 kHz แบบปรับค่าความถี่ได้ เพื่อประเมินติดตามผลและหาความสัมพันธ์ที่เป็นเงื่อนไขการทำงานของวงจร

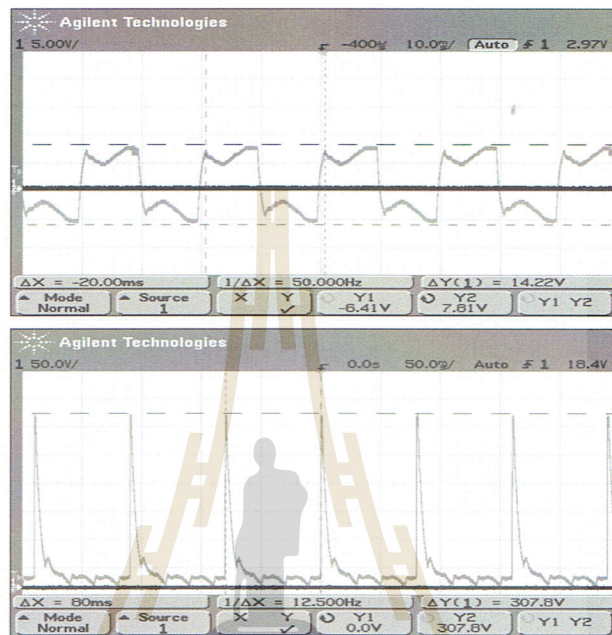
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถช่วยให้การทำงานของแมกนีโตสตริกทิฟทรานสดิวเซอร์ทำงานได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีผลกระทบของความร้อนมารบกวนทำให้เกิดความเสียหาย
- 1.4.2 เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาแก่ผู้ที่มีความสนใจ สำหรับคนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ หรือนำไปพัฒนาและออกแบบต่อยอดใช้กับการทำงานแบบอื่นให้เกิดความหลากหลายในการใช้งาน

1.5 ปรัชญ์นวัตรกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คณะวิจัยจากประเทศจีนได้มีการใช้ Ultrasonic scale มาทำการป้องกันตะกรันที่เกิดขึ้นและยังทำให้ตะกรันที่ติดอยู่นั้นมีขนาดที่เล็กลง (Xu, Li et al. 2009) ระบบนี้จะมีการควบคุมการทำงานของ Ultrasonic scale โดยใช้ STC12C2052AD เป็นตัวส่งสัญญาณ Pulse width modulation (PWM) จากนั้นจะถูกส่งไปยัง SG3525 ซึ่งเป็นชุด Driver ในการควบคุมการเปิดปิดของ Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) โดยที่อุปกรณ์ IGBT จะต่อเข้ากับโหลดหรือทรานสดิวเซอร์ และ IGBT ยังมีไฟเข้ามา 220 V เพื่อเป็นแหล่งจ่ายให้กับการขับโหลด เมื่อ Ultrasonic scale ทำงานจะมีเซนเซอร์ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้นส่งมายังออสซิลโลสโคป สัญญาณที่มอดูเลตออกมานั้นแสดงดัง

รูป 1.8 ในการทดสอบของการวิจัยกลุ่มนี้จะใช้ปูนซีเมนต์มาแทนการเกิดตะกรัน โดยได้ทำการหยดปูนซีเมนต์ลงบนแผ่นเหล็ก ซึ่งผลการทดสอบที่ได้เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง พบว่าขนาดของก้อนปูนซีเมนต์มีขนาดเล็กดังรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.8 สัญญาณมอดูเลตที่เกิดขึ้นในทำงานของ Ultrasonic scale



(ก)

(ข)

รูปที่ 1.9 (ก) ก้อนปูนซีเมนต์ก่อนการทดสอบ และ (ข) ก้อนปูนซีเมนต์มีขนาดเล็กลงเมื่อผ่านการทดสอบ

บทที่ 2

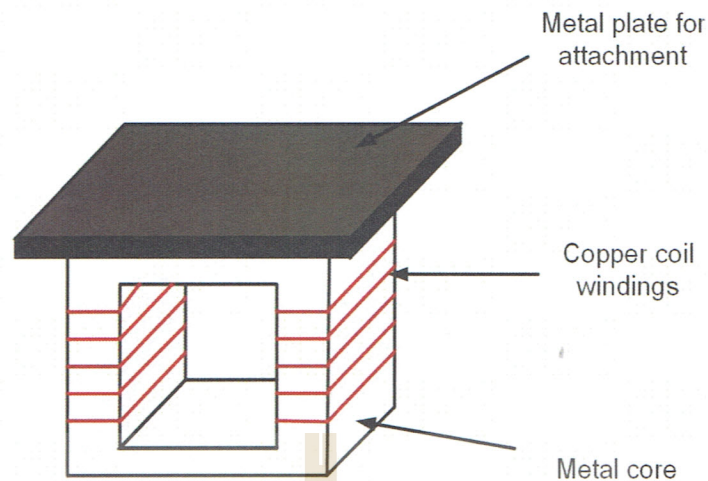
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันการเกิดตะกรันในการแลกเปลี่ยนความร้อน

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์และออกแบบระบบป้องกันการเกิดตะกรันในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะทำการศึกษาหลักการการทำงานของอัลตราโซนิกว่ามีกี่แบบและการทำงานของรูปแบบนั้น และยังได้หาหลักความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าและความเครียด การหาช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการใช้งาน และชนิดหม้อต้มไอน้ำ

2.1 อัลตราโซนิก

อัลตราโซนิก คือคลื่นเสียงอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป จึงมีการพัฒนาคัลล์อัลตราโซนิกให้สามารถใช้ได้หลายหลายเช่น เครื่องล้างอุปกรณ์ โดยใช้ความถี่สูงทำให้เกิดการสั่นของน้ำ และนำไปใช้กับการทดสอบการรั่วไหลของท่อ เป็นต้น อัลตราโซนิกยังนำมาประยุกต์ใช้กับการทำงานเชิงกล โดยการสั่นไปสั่นมาของตัวอุปกรณ์ ซึ่งเรียกว่า อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบแต่ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ แบบพีโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Transducer) ซึ่งแปลงพลังงานทางไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยมีความถี่เรโซแนนซ์คงที่อยู่หนึ่งค่า และแบบแมกนีโตสตริกทีฟ (Magnetostrictive Transducer) ซึ่งให้พลังงานกับขดลวด โดยมีแกนแกนเหล็กอยู่ตรงกลางทำให้แท่งเหล็กเกิดการสั่น เนื่องจากมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น

โดยในการวิจัยครั้งนี้เป็นแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์มาใช้งาน เนื่องจากแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์มีความแข็งแรงในการทำงาน โดยลักษณะดังกล่าวนี้ประกอบด้วยแผ่นนิกเกิล หลายแผ่นประกบกันอยู่หลายชั้น ซึ่งมีลักษณะเป็นวงสี่เหลี่ยมมีขดลวดทองแดงพันอยู่ทั้งสองข้างดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์

หลักการทำงานเมื่อมีกระแสผ่านเข้าสู่ขดลวดทองแดงที่พันอยู่กับแกนที่ทำมาจากเฟอร์โรแมกเนติก จะทำให้เกิดการลดขนาดของแกนและทรานสดิวเซอร์ เรียกวิธีการนี้ว่า แมกนีโตสตริกชัน (Magnetostriction) เมื่อทำการหยุดให้กระแสจะทำให้ขนาดของแกนและทรานสดิวเซอร์กลับมาสู่สภาพปกติ เมื่อเวลาในการทำงานต่อเนื่องกันจะทำให้เกิดแรงสั่น

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กและความเครียด

ในปรากฏการณ์ของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ สิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงก็คือความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กที่ป้อนให้กับวัสดุหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่หรือการสั่นสะเทือนของวัสดุได้อย่างไร ในหัวข้อนี้ได้นำเสนอในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสนามแม่เหล็กกับความเครียด (Strain) ที่เกิดขึ้นในสมการที่ (1) และ (2) (Chopra, Sirohi et al. 2014)

$$\epsilon_3 = s_{33}^H \sigma_3 + d_{33} H_3 \quad (2.1)$$

$$B_3 = d_{33}^* \sigma_3 + \mu_{33}^\sigma H_3 \quad (2.2)$$

โดยที่ ϵ_3 คือ ค่าความเครียด

s_{33}^H คือ ส่วนกลับของยังโมดูลัส (m^2/N)

σ_3 คือ ค่าความเค้น (N/m^2)

$d_{33} = d_{33}^*$ คือค่าคงที่ของแมกนีโตสตรีกทิฟ (m/A)

H_3 คือ สนามแม่เหล็ก (A/m)

B_3 คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)

μ_{33}^σ คือ ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็กมีหน่วยเป็น (H/m) หรือ (Tm/A)

จากสมการที่ (1) พบว่าค่าความเครียด (ϵ_3) จะเป็นผลรวมของค่าความเค้น (stress) ในพจน์แรกกับค่าสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน โดยที่ในพจน์แรกนั้นจะเป็นค่าความเค้น ที่เกิดจากแรงทางกล ซึ่งในกรณีของแมกนีโตสตรีกทิฟทรานสดิวเซอร์นั้น จะไม่มีแรงเชิงกลภายนอกมากระทำ จึงสามารถตัดพจน์แรกออก จะทำให้ได้สมการที่ (3)

$$\epsilon_3 = d_{33}H_3 \quad (2.3)$$

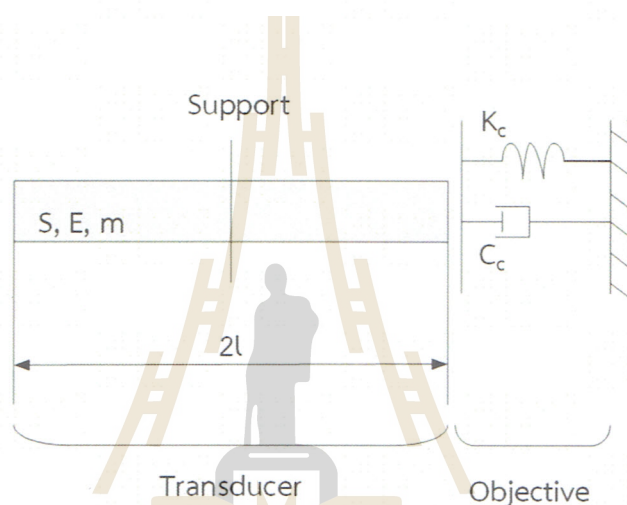
จากสมการที่ (3) ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ของความเครียดที่เกิดขึ้นและสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไปให้แก่วัสดุ จากสมการที่ (2) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B_3) แล้วยังเป็นผลรวมของค่าความเค้นและสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่าน โดยที่พจน์แรกนั้นเป็นค่าความเค้นที่เกิดจากแรงทางกล ซึ่งก็เช่นเดียวกับสมการที่ (1) กรณีไม่มีแรงเชิงกลภายนอกมาเกี่ยวข้อง จึงสามารถตัดพจน์ที่ไม่เกี่ยวข้องออก ดังสมการที่ (4)

$$B_3 = \mu_{33}^\sigma H_3 \quad (2.4)$$

จากสมการที่ (3) และ (4) พบว่าเมื่อทราบค่าของความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (B_3) เราสามารถหาค่าสนามแม่เหล็กได้ โดย $H = B/\mu$ และเมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนที่ในสมการที่ (3) เราจะได้ผลลัพธ์สุดท้าย ซึ่งก็คือค่าความเครียดออกมา

2.3 การหาช่วงความถี่ที่เหมาะสมในการทำงาน

การหาความถี่ที่ใช้ให้เหมาะสมในการทำงานเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะช่วยให้อุปกรณ์มีการทำงานได้ดีขึ้น และการใช้งานที่นานขึ้นแล้วยังทำให้เกิดทำงานที่เต็มประสิทธิภาพ หรือมีศักยภาพสูงในการทำงาน ซึ่งในการทำงานหากความถี่ที่ใช้นั้น ไม่สอดคล้องกับอุปกรณ์จะทำให้การทำงานนั้นมีประสิทธิภาพที่ต่ำลง ซึ่งการหาความถี่ได้ทำการต่อแมกนีโตสตรัคทีฟทรานสดิวเซอร์เข้ากับโหลด ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งจะเป็นการแสดงตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ (Takasaki, Maruyama et al. 2007, Yutaka, Masaya et al. 2007)



รูปที่ 2.2 แบบจำลองทรานสดิวเซอร์

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{m} \left(\frac{SE}{l} + k_c \right) - 2 \left(\frac{C_c}{2m} \right)^2} \quad (2.5)$$

เมื่อ $f = \frac{1}{\omega}$ (2.6)

โดยที่ f คือความถี่ที่เหมาะสมที่จะได้หลังจากการคำนวณในสูตร S คือพื้นที่หน้าตัดของทรานสดิวเซอร์ E คือค่าความยืดหยุ่นยังโมดูลัสของวัสดุ l คือความยาวครึ่งหนึ่งของความยาวทั้งหมดของทรานสดิวเซอร์ m คือน้ำหนักของทรานสดิวเซอร์ทั้งหมด k_c คือความแข็งแกร่ง หมายถึง สมบัติของวัสดุที่แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง และ C_c สัมประสิทธิ์ความหน่วงที่เกิดขึ้นในระบบการสั่นสะเทือน

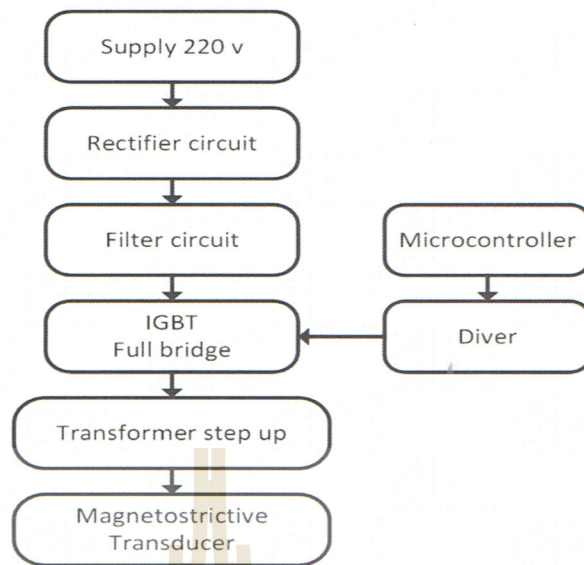
บทที่ 3

การศึกษาและออกแบบระบบป้องกันตะกรันโดยใช้หลักการอัลตราโซนิกที่เป็น แบบแมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์

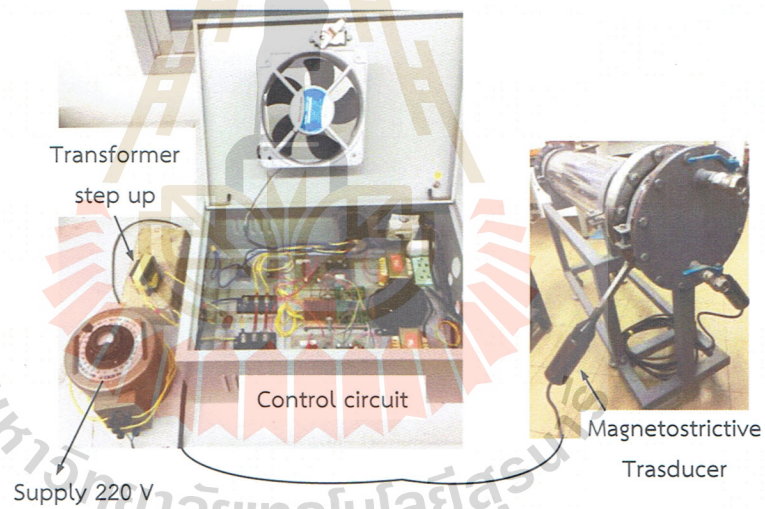
ในบทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงการศึกษาและออกแบบระบบ สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล การทำงานของระบบป้องกันการเกิดตะกรัน โดยใช้หลักการอัลตราโซนิกให้สามารถทำการ สั่นสะเทือนได้ดีที่สุดและควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นของตัวอุปกรณ์โดยการปรับการสัญญาณที่ ป้อนเข้าไปควบคุมการทำงาน เพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อความเสียหายต่ออุปกรณ์ ทำการบันทึก ความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตัวแมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์ กระแส และแอมพลิจูดของการสั่น ที่ ส่งผลต่อการป้องกันการเกิดตะกรันในถังแลกเปลี่ยนความร้อน

3.1 การออกแบบวงจรขับแมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้นคลื่นอัลตราโซนิกหรือคลื่นความถี่เหนือเสียง (Zhang and Li 2017, Taheri-Shakib, Naderi et al. 2018) ได้เริ่มถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการป้องกันการเกิดตะกรันใน ระบบท่อลำเลียงหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มมากขึ้นและงานอื่นๆอีกมากมาย โดยจะมี หลักการทำงานในการสร้างคลื่นความถี่เหนือเสียงอาศัยการป้อนสัญญาณไฟฟ้าให้กับหัวทรานสดิว เซอร์ (Transducer) เพื่อให้เกิดการสั่นภายในทรานสดิวเซอร์ ดังนั้นการควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ให้ได้ตามวัตถุประสงค์และยังจำเป็นต้องอาศัยแหล่งจ่ายพลังงานที่มีความสามารถในการปรับทั้งความถี่และขนาดของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าได้ จึงได้ทำการออกแบบวงจรขับแมกนีโต สตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์สามารถแสดงเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.1



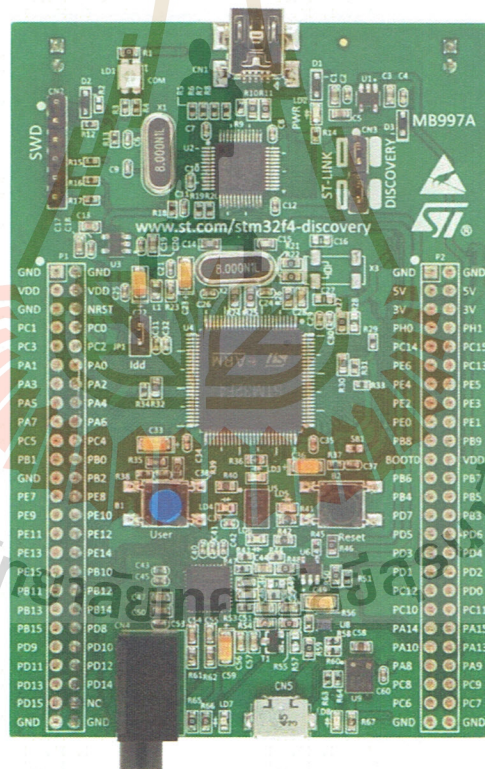
(ก)



(ข)

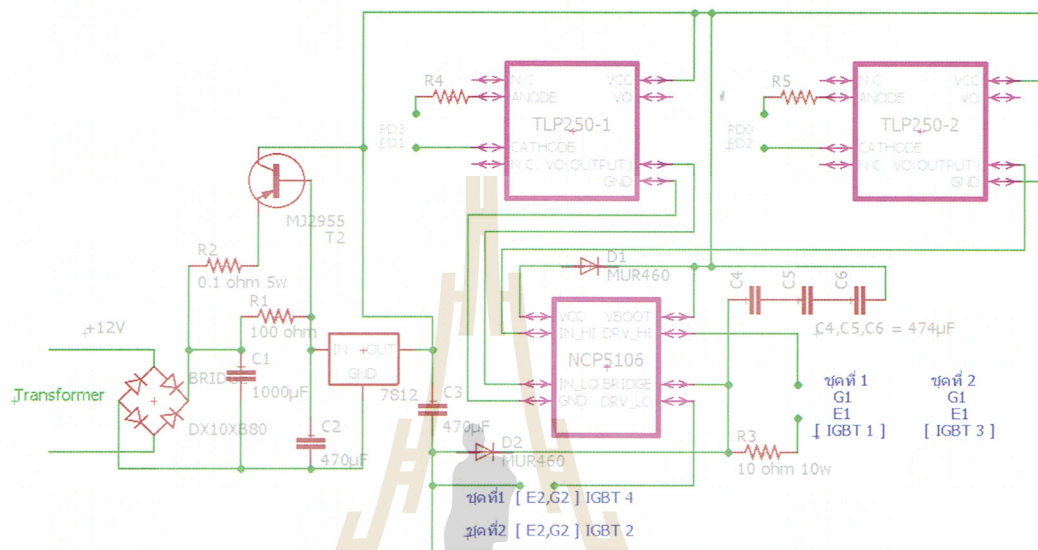
รูปที่ 3.1 (ก) บล็อกไดอะแกรมการทำงานของวงจรขับแมกนีโตสทริกทีฟทรานสดิวเซอร์ และ (ข) วงจรขับแมกนีโตสทริกทีฟทรานสดิวเซอร์

การทำงานของวงจรขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์เริ่มจากแหล่งจ่ายไฟ 220 V เป็นกระแสสลับส่งผ่านไปยังวงจรเรียงกระแส (Rectifier circuit) และวงจรกรองความถี่ (Filter circuit) เพื่อให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เรียบ ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้าสูงถึง 320 V เป็นแหล่งจ่ายกระแสตรงสำหรับวงจรกำลังงานสูงแบบวงจรอินเวอร์เตอร์หรือวงจรความถี่สวิตชิงที่มีกำลังสูงสุด ซึ่งเรียกว่า Insulated-gate bipolar transistor (IGBT) และในส่วนนี้ยังมีการควบคุมการเปิดปิดของเฟสการทำงาน ของ IGBT โดยใช้ชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านชุด Driver ซึ่งในการควบคุมสัญญาณความถี่สวิตชิงนี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 8 - 24 kHz โดยจะควบคุมพร้อมกัน 4 เฟสในวงจรอินเวอร์เตอร์ จากสี่นี้จะส่งต่อสัญญาณไปที่ Transformer step up เพื่อเพิ่มกำลังงานในการขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ให้สูงเพิ่มขึ้นแต่จะไม่เกิน 1200 V สำหรับขับโหลดที่เป็นแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ให้เกิดการสั่นสะเทือน



รูปที่ 3.2 แสดงชุดวงจรสำเร็จรูป STM32F4DISCOVERY

จากรูปที่ 3.2 เป็นชุดวงจรสำเร็จรูป STM32F4DISCOVERY ที่ใช้ผลิตความถี่รูปแบบของคลื่นพัลส์อยู่ในช่วงความถี่ 8 - 24 kHz รวมถึงปรับความกว้างของพัลส์ความถี่ให้เหมาะสมกับตัวทรานซิสเตอร์แบบแมกนีโทสตริกที่ไฟในแต่ละความถี่ก่อนส่งสัญญาณไปยังชุด Drive



(ก)

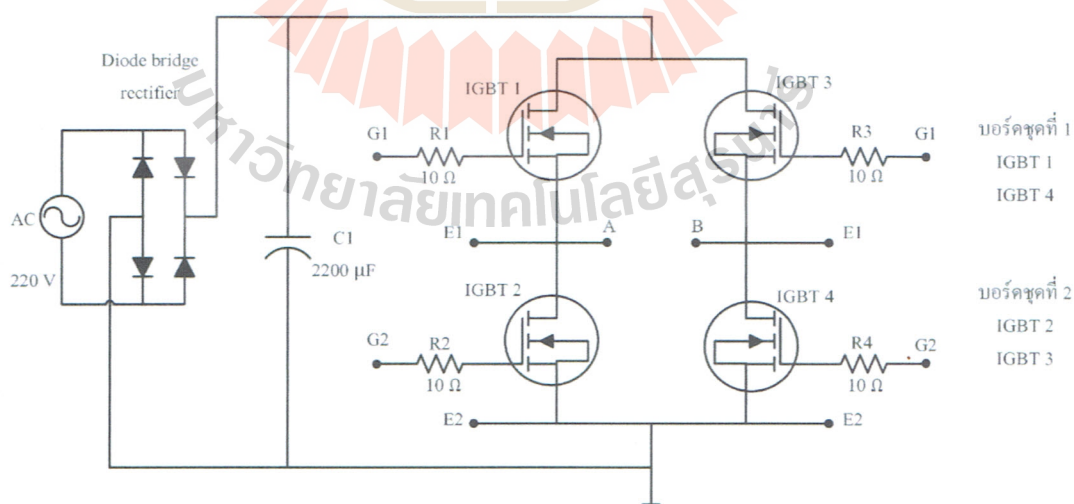


(ข)

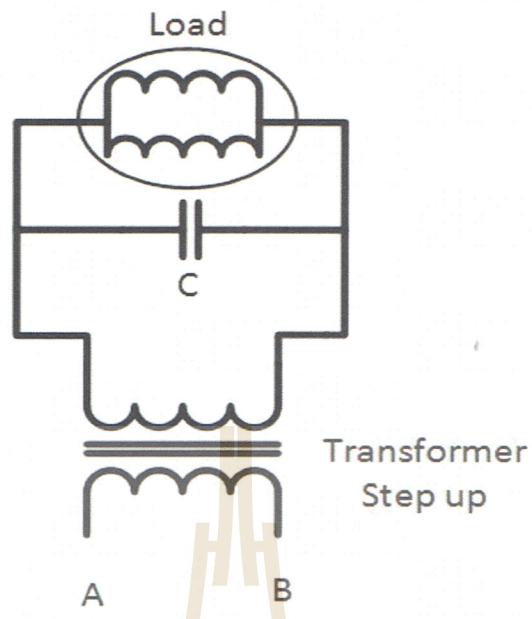
รูปที่ 3.3 (ก) แสดงวงจรทางไฟฟ้าของชุด Drive สัญญาณ (ข) แสดงอุปกรณ์ที่ต่อลงบนแผ่น PCB สำหรับชุด Drive สัญญาณ

จากวงจรดังรูปที่ 3.3 เมื่อมีแหล่งจ่ายไฟป้อนแรงดันเข้ามา 12 V ผ่าน Bridge rectifier ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง จากนั้นจะมีวงจร Regulate ทำหน้าที่คงแรงดันไฟฟ้าให้เป็น 12 V เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับ ไอซีที่ใช้เป็นตัว Drive สัญญาณให้กับวงจรสวิตช์แรงดันสูงเป็นวงจรขยายสัญญาณเพื่อไปขับวงจร IGBT และยังคงควบคุมความสูงต่ำของค่าแรงดันเอาท์พุท ส่วน ไอซีอีกแบบหนึ่งจะเป็นส่วนขยายสัญญาณจากชุดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะส่งสัญญาณความถี่ในรูปแบบของคลื่นพัลส์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Opto Isolator กับส่วนที่เป็น Current boost ซึ่ง Opto Isolator มีหน้าที่แยกไฟแรงสูงกับไฟแรงต่ำ

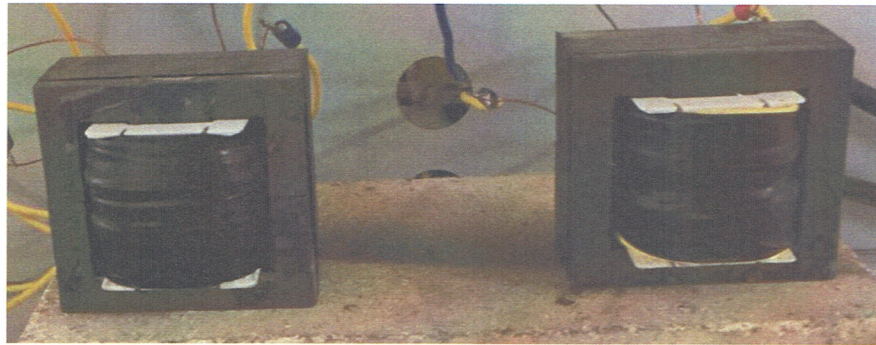
ชุดวงจรขับโหลด Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) หรือฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ ในส่วนนี้ถ้าขับทรานส์ดิวเซอร์หนึ่งชิ้นงานจะใช้ชุดขับ โหลด 1 ชุด ถ้าขับทรานส์ดิวเซอร์สองชิ้นงานจะใช้ 2 ชุด ซึ่งชุดขับโหลดนี้จะแสดงวงจรไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งจะมีการต่อเข้ากับวงจรในรูปที่ 3.3 ผ่านจุด G1, G2, E1 และ E2 ของ IGBT ทั้ง 4 จุดซึ่งเป็นจุดในการควบคุมการเปิดปิดของ IGBT ซึ่งในการทำงานของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์จะรับแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟ 220 V และแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงโดยที่อุปกรณ์ IGBT จะทำงานโดยที่ชุด IGBT1, IGBT4 ทำงานพร้อมกันและชุด IGBT2, IGBT3 ทำงานพร้อมกัน ซึ่งทั้ง 2 ชุดนี้จะทำงานสลับกันเปิดปิดการทำงาน โดยจะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการไหลของกระแส จากรูปที่ 3.3 จะมี A ต่อเข้ากับโหลดที่จุด A และ B ต่อเข้ากับโหลดที่จุด B โดยโหลดที่นำมาต่อเป็นวงจร LC Resonance ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ไลอะแกรมของฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์



(ก)



(ก)

รูปที่ 3.5 (ก) วงจร LC Resonance ของทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟ (ข) รูปร่างของทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟที่ใช้ในการทดสอบ (ค) แสดงหม้อแปลงที่ได้ทำการพันขดลวดทองให้เป็นสเต็ปอับ 5 เท่า

จากรูปที่ 3.5 (ข) ทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟที่ใช้ในการทดลองในครั้งนี้ได้ถูกออกแบบมาจากทางบริษัทที่มีชื่อว่า TMS-40 transducer specifications ที่นำมาศึกษาและนำมาวิจัยออกแบบสร้างวงจรขับ ซึ่งจะมีโครงสร้างของทรานสดิวเซอร์ตามตารางที่ 3.1 ดังนี้

ตารางที่ 3.1 โครงสร้าง TMS-40 transducer specifications

Cross-sectional area of magnetostrictive package	16 cm ²
Curie temperature	950°C
Voltage	500 - 600 V
Working frequency	18 - 26 kHz
Maximum allowable electric power	180 W
Diameter of the ultrasonic tool	25 mm
Waveguide material	AISI 1020
Weight	2.7 kg
Dimension	Ø65 x 265 mm
Cooling	Aerial
Mode of operation	streaming
Service life minimum	12 years

ตารางที่ 3.1 โครงสร้าง TMS-40 transducer specifications (ต่อ)

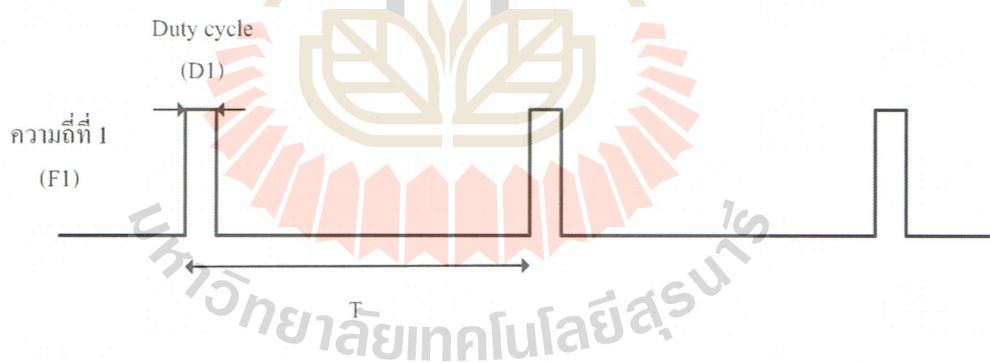
Maximum working temperature as standard	+220°C
Maximum working temperature as special	+300°C

3.2 รูปแบบสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบ

การวิจัยครั้งนี้ผู้พัฒนาได้ทำการกำหนดสัญญาณรูปแบบของคลื่นพัลส์ในการส่งกำลังงานขับเคลื่อนสควิเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีพีเอ็มทั้งหมด 2 รูปแบบคือ สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) และสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกันระหว่างความถี่ที่ 1 และ 2 โดยสัญญาณที่ป้อนเข้าจะเขียน

3.2.1 สัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation)

จะมีการใช้ความถี่เดียวของสัญญาณแต่จะต่างกันที่ค่าของ Duty cycle ซึ่งในการทดลองจะใช้ค่า Duty cycle ตั้งแต่ 0.0450%, 0.0475% และ 0.0450% ตามลำดับการทดลอง แสดงสัญญาณที่ใช้ในการทดลองตามรูปที่ 3.6

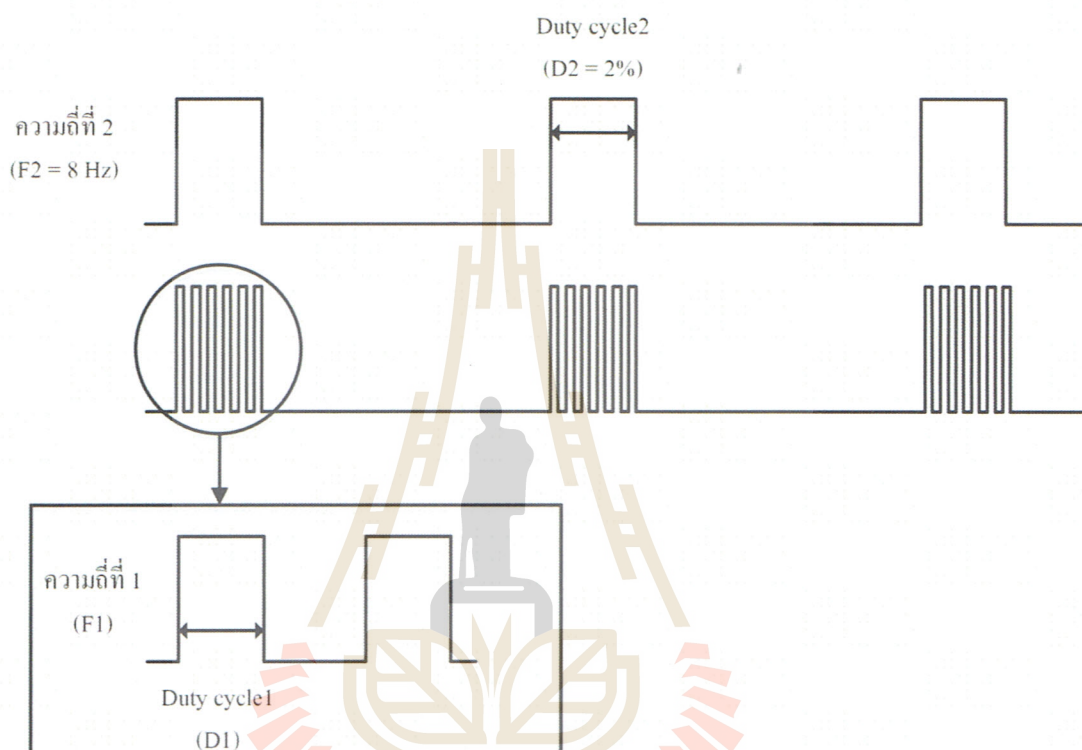


รูปที่ 3.6 แสดงสัญญาณ PWM ที่ใช้ในการทดลอง

3.2.2 สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกันระหว่างความถี่ที่ 1 และ 2

โดยได้มีการกำหนดค่า $F1$ คือความถี่ที่ 1 Duty cycle1 ของความถี่ที่ 1 และ $F2$ คือความถี่ที่ 2 ส่วนค่า Duty cycle2 ของความถี่ที่ 2 ในการมอดูเลตในครั้งนี้เพื่อใช้ในการเปิดปิดคลื่นพัลส์ ดังในรูปที่ 3.6 โดยที่ทรานสควิเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีพีเอ็มรูปร่างหรือโครงสร้างของทรานสควิเซอร์ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.6 ในการทดลองในส่วนนี้จะทำการกำหนดค่าของ $F2$ มี

ความถี่ที่ 8 Hz Duty cycle2 ของความถี่ที่ 2 กำหนดให้มีค่า D2 เท่ากับ 2% ซึ่งจะมีคาบเวลาเปิดเท่ากับ 0.0025 วินาที ส่วนคาบเวลาปิดเท่ากับ 0.1275 วินาที เพื่อช่วยในการลดความร้อนที่เกิดขึ้นกับตัวทรานซิสเตอร์ ส่วนความถี่ที่ F1 จะมีการเปลี่ยนความถี่ตั้งแต่ 8 kHz – 16 kHz ส่วนของค่า Duty cycle1 หรือ D1 จะเริ่มต้นที่ 35%, 40% และ 45% ตามลำดับการทดลอง



รูปที่ 3.7 สัญญาณที่ใช้ในการขับแมกนีโตสตริกที่ฟทรานซิสเตอร์

3.3 การดำเนินการทำงานของวงจรขับทรานซิสเตอร์

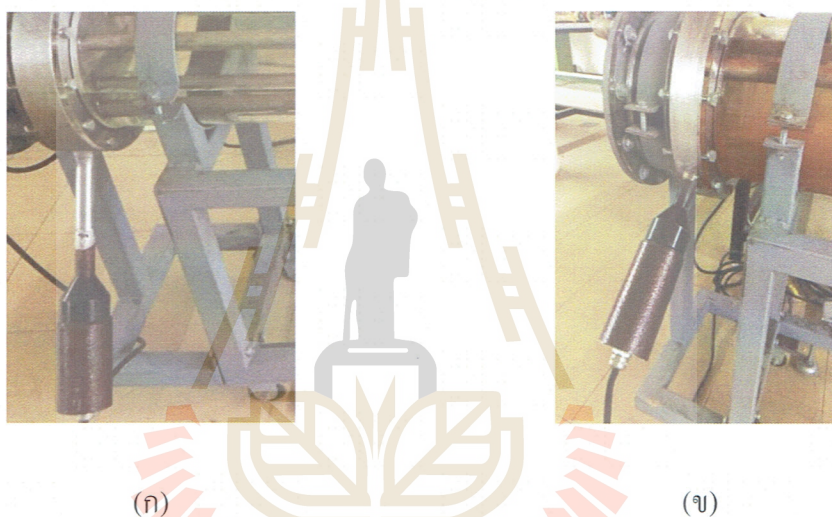
ในการทดลองนั้นจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการหาช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์ และส่วนการทดสอบทำงานในเบื้องต้น ซึ่งการติดตั้งท่อน้ำบาดาลเข้ากับตัวเครื่องเพื่อเป็นการจำลองการเกิดตะกอนที่พื้นผิวของท่อโดยการให้น้ำบาดาลไหลผ่านท่อตลอดเวลา

3.3.1 การหาช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์

การทดลองการวัดสัญญาณหาค่าความถี่ที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนได้ดีที่สุดในการทำงานของเครื่องขับทรานซิสเตอร์สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

1. แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่มจากของเดิม โดยใช้สัญญาณ PWM
2. แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่มจากของเดิม โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน
3. แบบที่ยังไม่ได้ต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์ต่อเพิ่ม โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน

ซึ่งในการทดลองแต่ละแบบนี้จะทำการเปิดการทำงานของทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีป ทั้ง 2 ชุด พร้อมกันในการทดลองจะมีการต่อทรานสดิวเซอร์อยู่ 2 แบบ แสดงให้เห็นในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 (ก) แสดงในส่วนของทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม และ (ข) แสดงในส่วนทรานสดิวเซอร์ที่ยังไม่มีการต่อความยาว

3.3.2 การทดลองความร้อนที่เกิดที่เกิดจากการทำงานของตัวทรานสดิวเซอร์

การทดสอบความร้อนในครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกเก็บบันทึกผลการทำงานของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ 1 ตัว แทนการทำงานแมกนีโตสตริกทีฟ 2 ตัว เพื่อให้ง่ายในการบันทึกผลเนื่องจากใช้วงจรขับที่เหมือนกัน และได้ทำเลือกความถี่และ Duty cycle ที่ดีที่สุดในตาราง มาทดสอบความร้อนที่เกิดขึ้นว่ามีอุณหภูมิสูงสุดเท่าไรและอุณหภูมิเริ่มคงที่ที่เวลากี่นาที ในการทดลองนี้จะกำหนดเวลา 2 ชั่วโมง 30 นาที ทำการเปิดเครื่องขับแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ เพราะคาดว่าอุณหภูมิที่จะขึ้นสูงสุดไม่เกิดเวลาที่ได้กำหนดไว้

3.3.3 การทดสอบทำงานในเบื้องต้น

จะเป็นการนำเครื่องไปต่อเข้ากับท่อน้ำบาดาลที่มีตะกอนอยู่ในน้ำ จากนั้นปล่อยให้ น้ำไหลผ่านตัวเครื่องในระยะเวลา 10 วัน จากนั้นเก็บผลการทดลองโดยภาพถ่ายเพื่อเปรียบเทียบกับ การนำเครื่องไปต่อเข้ากับท่อน้ำบาดาลที่มีการเปิดเครื่องขั้วทรานสดิวเซอร์ โดยจะมีการแสดง ภาพการติดตั้งดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การติดตั้งเครื่องขั้วทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทรีฟ

3.4 การวัดค่าพารามิเตอร์และอุปกรณ์การวัด

การวัดค่าพารามิเตอร์เป็นสิ่งสำคัญในการตรวจสอบว่าระบบการทำงานของเครื่องขั้ว ทรานสดิวเซอร์ทำงานได้ดีจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ผลการทดลองจากค่าที่วัดมาได้ โดยในการ ทดลองนี้จะมีการวัดค่าแอมพลิจูดที่อยู่ในน้ำโดยใช้เครื่องมือวัด และการวัดอุณหภูมิในการทำงาน ของเครื่องขั้วทรานสดิวเซอร์นี้

3.4.1 การวัดค่าแอมพลิจูด

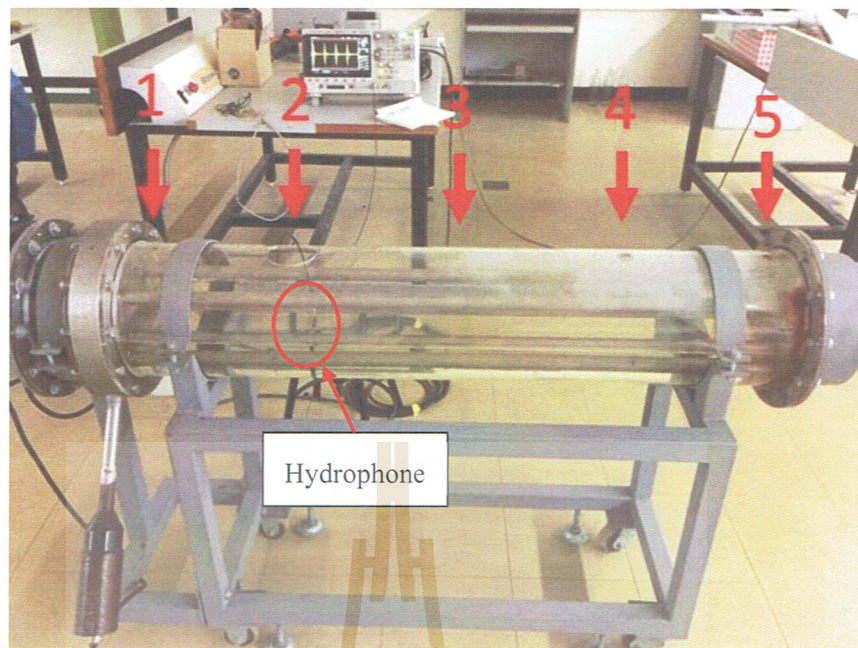
วงจรถานสดิวเซอร์จะมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าที่เรียกว่า Hydrophone เป็นเครื่องมือวัดสัญญาณของคลื่นการสั่นสะเทือนที่อยู่ในน้ำโดยค่าของการวัดจะออกมาในรูปแบบ

ของสัญญาณที่หน้าจอมอนิเตอร์ของออสซิลโลสโคป ซึ่งอุปกรณ์การวัดนี้จะมีช่วงการทำงานของ ความถี่ตั้งแต่ 1 Hz ถึง 170 kHz โดยจะแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.10

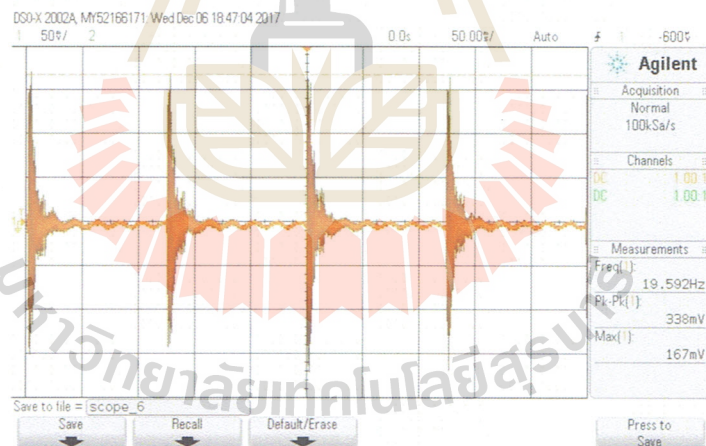


รูปที่ 3.10 แสดง Hydrophone ที่วัดสัญญาณ

การวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนภายในน้ำจะทำการจุ่ม Hydrophone ลงในท่อน้ำ โดยให้อยู่กึ่งกลางระหว่างท่อเหล็ก ซึ่งในการทดลองจะมีการกำหนดจุดจุ่มการวัดสัญญาณไว้ ทั้งหมด 5 ตำแหน่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.11 เพื่อดูว่าสัญญาณหรือคลื่นที่ตัวทรานสดิวเซอร์ สั่นสะเทือนออกมาระจายตัวไปยังส่วนท้ายของท่อหรือไม่ และความแรงที่จับโดยวงจรถับ ทรานสดิวเซอร์แต่ละตำแหน่งมีค่าแอมพลิจูดสูงสุดต่ำสุดที่ตำแหน่งไหนหรือเท่ากันทุกตำแหน่ง ในการวัดสัญญาณจะต้องต่อ Hydrophone เข้ากับออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงสัญญาณที่ออกมาทาง จอมอนิเตอร์ ซึ่งสัญญาณที่ออกมานั้นจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แสดงตำแหน่งในการจุ่ม Hydrophone เพื่อวัดสัญญาณ

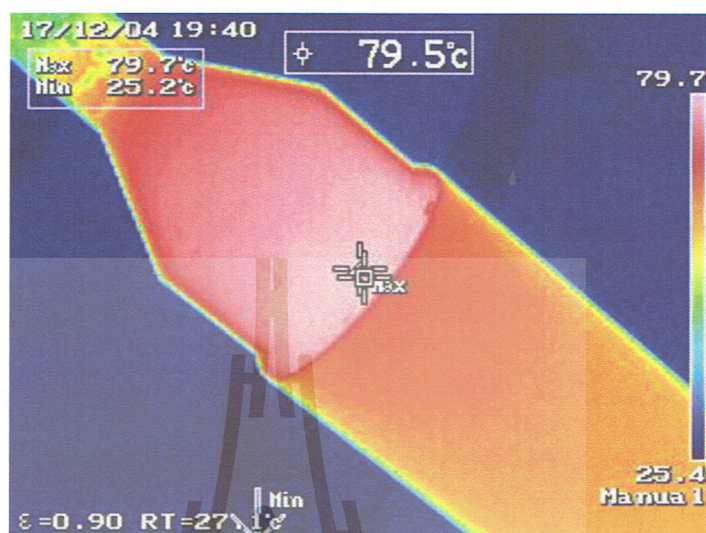


รูปที่ 3.12 แสดงสัญญาณที่ได้จาก hydrophone

3.4.2 การวัดอุณหภูมิ

จะเป็นในส่วนการวัดอุณหภูมิเพื่อจะดูความร้อนของทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกที่ฟวามีอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมากหรือน้อยอย่างไรเพื่อไปวิเคราะห์เพื่อหาความร้อนที่เหมาะสม

ในการทำงานของเครื่องนี้ โดยในการวัดความร้อนจะใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า Keysight U5857A series True/R Thermal Imager เป็นตัววัดอุณหภูมิโดยจะแสดงภาพความร้อนที่ออกมาให้เห็นดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายจากกล้องส่องความร้อน Keysight U5857A series True/R Thermal Imager

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองเครื่องป้องกันตะกั่วที่ได้ทำการออกแบบวงจรไฟฟ้ามาเพื่อขับทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทีฟ ซึ่งได้บอกวิธีการดำเนินงานไว้ในส่วนของบทที่ 3 ในส่วนของบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง ขั้นตอนการทำงาน และเก็บผลการทดลอง นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีการส่งผลการทดลอง และนำข้อมูลที่ได้นำมาสรุปผลการทดลอง เพื่อหาช่วงการทำงานที่เหมาะสม

4.1 วิธีการทดลอง

4.1.1 การทดลองแบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่ม

การทดลองนี้จะใช้สัญญาณ PWM มาควบคุมการทำงานของทรานสดิวเซอร์ 1 หัว มีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ใส่ น้ำลงในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ท่วมท่อเหล็ก 4 ท่อ ที่อยู่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
- ขั้นตอนที่ 2 นำสายไฟของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ได้เชื่อมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อน มาต่อเข้ากับเครื่องขับทรานสดิวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวเพิ่ม
- ขั้นตอนที่ 3 นำ Hydrophone เข้ากับออสซิลโลสโคปและทำปรับหน้าต่างออสซิลโลสโคปให้เป็นการวัดค่า Vp-p
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการนำโค้ดที่เขียนไว้ใส่ลงในบอร์ดรันโปรแกรม โดยได้ทำการกำหนดความถี่ F1 ที่ใช้ตั้งแต่ 9 kHz – 12 kHz และค่า Duty cycle1 ที่ได้กำหนดไว้เริ่มจาก 35%, 40% และ 45% ตามลำดับ
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ เมื่อเครื่องทำงานก็ทำการจุ่ม Hydrophone ทั้ง 5 ตำแหน่ง ที่ได้มีการเจาะรูที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการบันทึกผลลงตารางที่ 4.1
- ขั้นตอนที่ 6 ทำการเปิดเครื่องใหม่ทำการ วัดสัญญาณแบบเดิมอีก 2 ครั้ง

- เพื่อหาค่าเฉลี่ย บันทึกผลลงตารางการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 7 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างแผนภูมิแท่ง และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาช่วงการทำงานของความถี่และ Duty cycle ที่เหมาะสม

4.1.2 การทดลองแบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่ม

จะมีการป้อนสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 และ ความถี่ที่ 2 มามอดดูเลตกัน สั่งให้ทำการควบคุมทรานสดิวเซอร์ทั้ง 2 หัว จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ใส่น้ำลงในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ท่วมท่อเหล็ก 4 ท่อ ที่อยู่ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
- ขั้นตอนที่ 2 นำสายไฟของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ได้เชื่อมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 หัว มาต่อเข้ากับเครื่องขับทรานสดิวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวเพิ่ม
- ขั้นตอนที่ 3 นำ Hydrophone เข้ากับออสซิลโลสโคปและทำการปรับหน้าต่างออสซิลโลสโคปให้เป็นการวัดค่า Vp-p
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการนำโค้ดลงบอร์ดรัน โปรแกรม โดยได้ทำการกำหนดความถี่ F1 ที่ใช้ตั้งแต่ 8 kHz – 12 kHz และ Duty cycle1 ที่ใช้ 35%, 40% และ 45% ตามลำดับ และกำหนดค่าของ F2 มีความถี่ที่ 14 Hz Duty2 คือค่า Duty cycle ของความถี่ที่ 2 กำหนดให้มีค่า D2 เท่ากับ 2%
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ เมื่อเครื่องทำงานก็ทำการจุ่ม Hydrophone ทั้ง 5 ตำแหน่ง ที่ได้มีการเจาะรูที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ทำการบันทึกผลลงตารางที่ 4.2
- ขั้นตอนที่ 6 ทำการเปิดเครื่องใหม่ทำการวัดสัญญาณแบบเดิมอีก 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย บันทึกผลลงตารางการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 7 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างแผนภูมิแท่ง และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาช่วงการทำงานของความถี่และ Duty cycle ที่เหมาะสม

4.1.3 การทดลองแบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์ที่ไม่มีการเพิ่มความยาว
จะมีการป้อนสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 และ ความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน สั่งให้
ทำการควบคุมทรานสดิวเซอร์ทั้ง 2 หัว จะมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ใส่ น้ำลงในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ท่วมท่อเหล็กที่อยู่ภายใน
ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
- ขั้นตอนที่ 2 นำสายไฟของแมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์ที่ได้เชื่อมกับ
ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนทั้ง 2 หัว มาต่อเข้ากับเครื่องขับ
ทรานสดิวเซอร์แบบที่ยังไม่ได้ต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์
เพิ่ม
- ขั้นตอนที่ 3 นำ Hydrophone เข้ากับออสซิลโลสโคปและทำการปรับหน้าต่าง
ออสซิลโลสโคปให้เป็นการวัดค่า Vp-p
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการนำโค้ดลงบอร์ดรัน โปรแกรม โดยได้ทำการกำหนด
ความถี่ F1 ที่ใช้ตั้งแต่ 8 kHz – 16 kHz และ Duty cycle1 ที่ใช้
35%, 40% และ 45% ตามลำดับ และกำหนดค่าของ F2 มีความถี่
ที่ 14 Hz Duty2 คือค่า Duty cycle ของความถี่ที่ 2 กำหนดให้มี
ค่า D2 เท่ากับ 2%
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ เมื่อเครื่องทำงานก็ทำการจุ่ม
Hydrophone ทั้ง 5 ตำแหน่งที่ได้มีการเจาะรูที่ท่อแลกเปลี่ยน
ความร้อน ทำการบันทึกผลลงตารางที่ 4.3
- ขั้นตอนที่ 6 ทำการเปิดเครื่องใหม่ทำการวัดสัญญาณ
แบบเดิมอีก 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย บันทึกผลลงตารางการทดลอง
และนำข้อมูลมาวิเคราะห์
- ขั้นตอนที่ 7 นำข้อมูลที่ได้มาสร้างแผนภูมิแท่ง และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์
หาช่วงการทำงานของความถี่และ Duty cycle ที่เหมาะสม

4.1.4 การลองความร้อนที่เกิดที่เกิดจากการทำงานของตัวอุปกรณ์
เมื่อทดลองหาช่วงของความถี่ของทั้งสองทรานสดิวเซอร์ที่ต่อความยาวเพิ่มและ
ไม่ได้ต่อเพิ่ม ผู้วิจัยจะทำการเลือกค่าจากตารางที่ดีที่สุดของทั้งสองมาเปรียบเทียบความร้อนที่
เกิดขึ้นตามขั้นตอนดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ใส่ น้ำลงในท่อแลกเปลี่ยนความร้อนให้ท่วมท่อเหล็กที่อยู่ภายในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน
- ขั้นตอนที่ 2 นำสายไฟของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ได้เชื่อมกับท่อแลกเปลี่ยนความร้อนมาต่อเข้ากับเครื่องขับทรานสดิวเซอร์
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการนำโค้ดัดลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยได้ทำเลือกความถี่และ Duty cycle ที่ดีที่สุดในตารางที่ 4.1- 4.3 ของการทดลองหาช่วงความถี่ที่เหมาะสม
- ขั้นตอนที่ 4 ทำการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ เมื่อเครื่องทำงานก็บันทึกอุณหภูมิเริ่มต้นไปจนถึงเวลา 150 นาที ลงในตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 ตามลำดับการทดลอง
- ขั้นตอนที่ 5 นำตารางที่ 4.4 และตารางที่ 4.5 มาวิเคราะห์เรื่องของความร้อนที่เกิดขึ้น พร้อมทั้งสรุปผลการทดลอง

4.1.5 การทดสอบการทำงานเบื้องต้นกับน้ำบาดาล

เมื่อผู้วิจัยได้ทำการวัดหาช่วงการทำงานที่เหมาะสม และอุณหภูมิ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จะนำเครื่องไปติดตั้งกับน้ำบาดาลที่สูบน้ำจากแท่งแก้วไว้ในแทงค์ เพื่อดูว่าตะกอนและตะกอนเป็นอย่างไร โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ต่อก่อน้ำจากแทงค์ที่มีน้ำบาดาลอยู่เข้ากับตัวท่อของเครื่องที่ต่อกับทรานสดิวเซอร์ไว้
- ขั้นตอนที่ 2 ทำการเปิดน้ำให้ไหลผ่านท่อเครื่องป้องกันตะกอนที่เป็นท่อปิดให้น้ำไหลออกได้ทางเดียว
- ขั้นตอนที่ 3 ทำการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ โดยเปิดให้ทำงานตลอดเวลา 10 วัน
- ขั้นตอนที่ 4 เมื่อครบ 10 วัน ทำการเปิดเครื่องเพื่อถ่ายภาพเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดลองในเบื้องต้นนี้
- ขั้นตอนที่ 5 ทำการล้างเครื่องประกอบกลับเข้าที่เดิม และทำการทดลองแบบเดิมแต่ในรอบนี้ไม่มีการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ เมื่อครบ 10 วันก็ถอดอุปกรณ์ออกแล้วทำการบันทึกรูปภาพที่เกิดขึ้น

4.2 ผลการทดลอง

4.2.1 การหาค่าแอมพลิจูดเมื่อใช้สัญญาณ PWM มาขับเคลื่อนการทำงานของแมกนีโตสตรีกที่ฟทรานสดีวเซอร์ที่ต่อความยาวเพิ่ม

จากตารางที่ 4.1 ในการทดลองในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปิดการทำงานของทรานสดีวเซอร์เพียง 1 ตัวในการทดลอง โดยใช้สัญญาณ PWM เพื่อเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนว่าช่วงการทำงานที่ความถี่ 9 kHz – 12 kHz จะสามารถสั่นได้ดีที่ความถี่ และค่า Duty cycle เท่าไรเมื่อใช้สัญญาณ PWM มาควบคุมการทำงานนี้ พร้อมทั้งนำค่าตารางไปทำเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบในครั้งนี้

ตารางที่ 4.1 การวัดค่าแอมพลิจูด (Vp-p) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ในการทดสอบแมกนีโตสตรีกที่ฟทรานสดีวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดีวเซอร์เพิ่มจากของเดิม

ความถี่	Duty cycle	ตำแหน่งที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
9 kHz	0.0450%	1	384.0	372.0	380.0	378.7
9 kHz	0.0450%	2	488.0	488.0	492.0	489.3
9 kHz	0.0450%	3	488.0	488.0	488.0	488.0
9 kHz	0.0450%	4	428.0	436.0	436.0	433.3
9 kHz	0.0450%	5	456.0	460.0	460.0	458.7
9 kHz	0.0475%	1	372.0	372.0	380.0	374.7
9 kHz	0.0475%	2	512.0	512.0	508.0	510.7
9 kHz	0.0475%	3	496.0	484.0	496.0	492.0
9 kHz	0.0475%	4	452.0	464.0	468.0	461.3
9 kHz	0.0475%	5	468.0	464.0	468.0	466.7
9 kHz	0.0500%	1	376.0	360.0	372.0	369.3
9 kHz	0.0500%	2	500.0	468.0	464.0	477.3
9 kHz	0.0500%	3	488.0	496.0	492.0	492.0
9 kHz	0.0500%	4	448.0	496.0	460.0	468.0
9 kHz	0.0500%	5	448.0	448.0	464.0	453.3
10 kHz	0.0450%	1	396.0	396.0	400.0	397.3

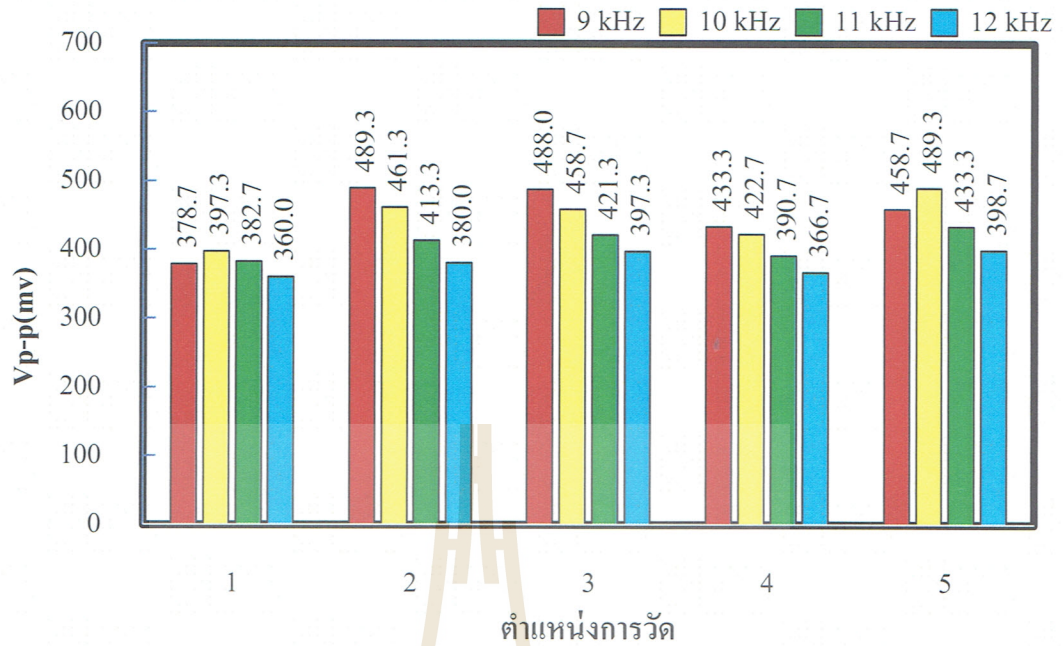
ตารางที่ 4.1 การวัดค่าแอมพลิจูด (Vp-p) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ในการทดสอบแมกนีโตสตรีกที่ฟิทรานสดีวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดีวเซอร์เพิ่มจากของเดิม (ต่อ)

ความถี่	Duty cycle	ตำแหน่งที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
10 kHz	0.0450%	2	464.0	456.0	464.0	461.3
10 kHz	0.0450%	3	456.0	464.0	456.0	458.7
10 kHz	0.0450%	4	428.0	420.0	420.0	422.7
10 kHz	0.0450%	5	480.0	488.0	500.0	489.3
10 kHz	0.0475%	1	408.0	416.0	412.0	412.0
10 kHz	0.0475%	2	496.0	500.0	496.0	497.3
10 kHz	0.0475%	3	492.0	496.0	480.0	489.3
10 kHz	0.0475%	4	436.0	436.0	436.0	436.0
10 kHz	0.0475%	5	508.0	516.0	512.0	512.0
10 kHz	0.0500%	1	388.0	388.0	388.0	388.0
10 kHz	0.0500%	2	500.0	508.0	508.0	505.3
10 kHz	0.0500%	3	496.0	504.0	496.0	498.7
10 kHz	0.0500%	4	428.0	456.0	444.0	442.7
10 kHz	0.0500%	5	496.0	516.0	512.0	508.0
11 kHz	0.0450%	1	384.0	384.0	380.0	382.7
11 kHz	0.0450%	2	412.0	412.0	416.0	413.3
11 kHz	0.0450%	3	420.0	420.0	424.0	421.3
11 kHz	0.0450%	4	408.0	384.0	380.0	390.7
11 kHz	0.0450%	5	440.0	432.0	428.0	433.3
11 kHz	0.0475%	1	412.0	408.0	416.0	412.0
11 kHz	0.0475%	2	460.0	460.0	464.0	461.3
11 kHz	0.0475%	3	456.0	452.0	464.0	457.3
11 kHz	0.0475%	4	412.0	420.0	424.0	418.7
11 kHz	0.0475%	5	460.0	488.0	488.0	478.7
11 kHz	0.0500%	1	416.0	424.0	416.0	418.7
11 kHz	0.0500%	2	500.0	496.0	496.0	497.3

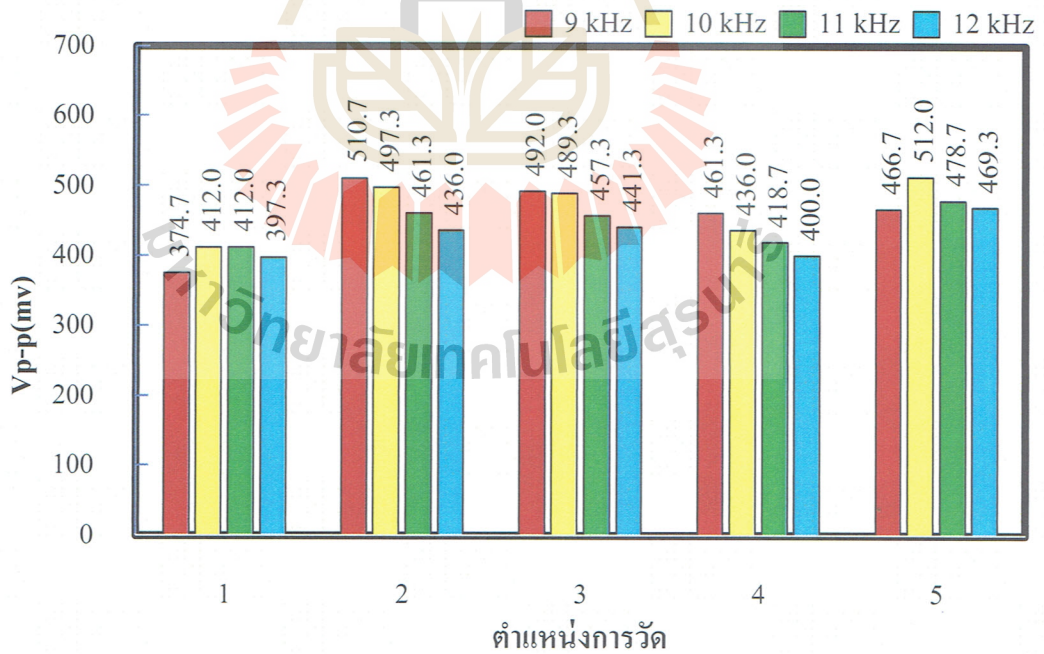
ตารางที่ 4.1 การวัดค่าค่าแอมพลิจูด (Vp-p) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ในการทดสอบแมกนีโตสตรีกที่ฟทรานสดิวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่มจากของเดิม (ต่อ)

ความถี่	Duty cycle	ตำแหน่งที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
11 kHz	0.0500%	3	492.0	488.0	484.0	488.0
11 kHz	0.0500%	4	436.0	432.0	440.0	436.0
11 kHz	0.0500%	5	512.0	508.0	524.0	514.7
12 kHz	0.0450%	1	364.0	364.0	352.0	360.0
12 kHz	0.0450%	2	380.0	380.0	380.0	380.0
12 kHz	0.0450%	3	400.0	396.0	396.0	397.3
12 kHz	0.0450%	4	364.0	376.0	360.0	366.7
12 kHz	0.0450%	5	396.0	400.0	400.0	398.7
12 kHz	0.0475%	1	396.0	396.0	400.0	397.3
12 kHz	0.0475%	2	436.0	436.0	436.0	436.0
12 kHz	0.0475%	3	444.0	436.0	444.0	441.3
12 kHz	0.0475%	4	400.0	400.0	400.0	400.0
12 kHz	0.0475%	5	472.0	468.0	468.0	469.3
12 kHz	0.0500%	1	424.0	424.0	432.0	426.7
12 kHz	0.0500%	2	476.0	480.0	484.0	480.0
12 kHz	0.0500%	3	472.0	480.0	480.0	477.3
12 kHz	0.0500%	4	428.0	432.0	440.0	433.3
12 kHz	0.0500%	5	508.0	512.0	524.0	514.7

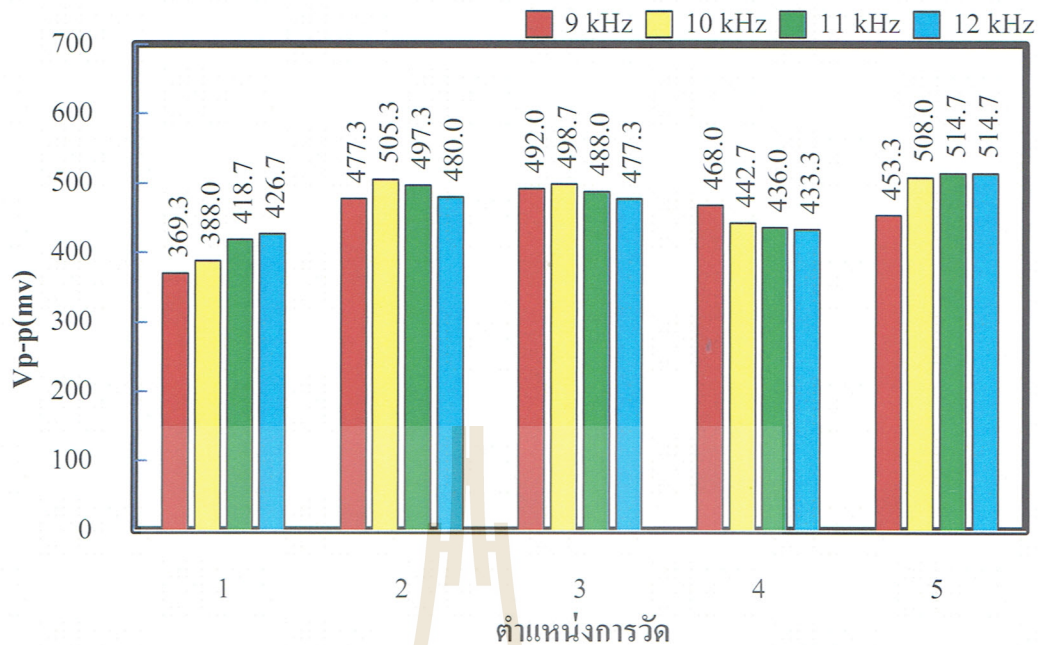
จากตารางการทดลองนำมาเขียนเป็นแผนภูมิแท่ง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า Duty cycle เป็น 0.0450%, 0.0475% และ 0.0500% ดังนี้



รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบค่า Vp-p ที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง duty cycle 0.0450%



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบค่า Vp-p ที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง duty cycle 0.0475%



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า Vp-p ที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง duty cycle 0.0500%

จากการรูปที่ 4.1 รูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 นำมาเปรียบเทียบกันพบว่าค่าที่มีค่า Duty cycle ที่ 0.0500% และความถี่ที่ใช้เท่ากับ 10 kHz ทำให้มีค่า Vp-p หรือค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สุดจากรูปที่ 4.3 โดยในการทดลองการจุ่มของ Hydrophone วัดค่าสัญญาณนั้นไม่ได้สูงหมดทั้ง 5 ตำแหน่ง ซึ่งการกำหนดให้ค่าแอมพลิจูดสูงนี้มาจากตำแหน่งของการวัดค่าแอมพลิจูดที่มีค่าเกิน 500 mv อยู่ที่ตำแหน่งที่ 2 และตำแหน่งที่ 5 แต่ตำแหน่งอื่นๆ ยังมีตำแหน่งที่ 3 ที่มีค่าแอมพลิจูดอยู่ที่ 498.7 mv ก็มีค่าสูงแต่ไม่ต่างจากค่าอื่นมาก แต่ในบางตำแหน่งของความถี่ 10 kHz ก็ได้ต่ำกว่าค่าอื่นอยู่บ้างแต่ก็แตกต่างกันให้เห็น ในส่วนของรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 ค่าของแอมพลิจูดที่ที่ได้ความถี่ตั้งแต่ 9 kHz – 12 kHz ก็จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของค่า Duty cycle โดยค่า Duty cycle เพียง 0.0450% ก็จะมีค่าแอมพลิจูดน้อยกว่าค่าที่มี Duty cycle 0.0475% เนื่องมาจากมีการกำหนดให้อ่อนในการทำงานของเครื่องไว้เท่านี้

4.2.2 การหาค่าแอมพลิจูดเมื่อใช้สัญญาณมอดูเลตในการขับแมกนีโตสตริกที่ฟทรานสดิวเซอร์แบบที่มีการต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์เพิ่มจากของเดิม

จากตารางที่ 4.2 ในการทดลองในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปิดการทำงานของทรานสดิวเซอร์เพียง 2 ตัวในการทดลอง โดยใช้สัญญาณ PWM มามอดูเลตกันของ 2 ความถี่ เพื่อ

เปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนว่าช่วงการทำงานที่ความถี่ 8 kHz – 12 kHz จะสามารถ
 สั่นได้ดีที่ความถี่ และค่า Duty cycle เท่าไร พร้อมทั้งนำค่าตารางไปทำเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อให้ง่าย
 ต่อการเปรียบเทียบในครั้งนี้

ตารางที่ 4.2 การวัดค่าแอมพลิจูด (Vp-p) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของ
 ความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน

ความถี่	Duty cycle	ตำแหน่ง ที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
8 kHz	35%	1	890.0	830.0	860.0	860.0
8 kHz	35%	2	1110.0	1130.0	1090.0	1110.0
8 kHz	35%	3	880.0	880.0	900.0	886.7
8 kHz	35%	4	840.0	900.0	920.0	886.7
8 kHz	35%	5	960.0	1000.0	990.0	983.3
8 kHz	40%	1	1010.0	960.0	960.0	976.7
8 kHz	40%	2	1540.0	1560.0	1580.0	1560.0
8 kHz	40%	3	1250.0	1210.0	1250.0	1236.7
8 kHz	40%	4	1000.0	980.0	1050.0	1010.0
8 kHz	40%	5	1250.0	1170.0	1250.0	1223.3
8 kHz	45%	1	1170.0	1190.0	1210.0	1190.0
8 kHz	45%	2	1970.0	1930.0	2000.0	1966.7
8 kHz	45%	3	1380.0	1430.0	1360.0	1390.0
8 kHz	45%	4	1030.0	1030.0	1020.0	1026.7
8 kHz	45%	5	1500.0	1490.0	1510.0	1500.0
9 kHz	35%	1	500.0	490.0	570.0	520.0
9 kHz	35%	2	760.0	760.0	770.0	763.3
9 kHz	35%	3	650.0	680.0	690.0	673.3
9 kHz	35%	4	840.0	840.0	840.0	840.0
9 kHz	35%	5	800.0	810.0	820.0	810.0
9 kHz	40%	1	580.0	590.0	590.0	586.7
9 kHz	40%	2	790.0	780.0	770.0	780.0

ตารางที่ 4.2 การวัดค่าแอมพลิจูด (V_{p-p}) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่ F1	Duty cycle D1	ตำแหน่ง ที่วัด	V_{p-p} (mv)			
			1	2	3	V_{p-p} เฉลี่ย
9 kHz	40%	3	860.0	880.0	880.0	873.3
9 kHz	40%	4	930.0	940.0	960.0	943.3
9 kHz	40%	5	900.0	930.0	960.0	930.0
9 kHz	45%	1	700.0	700.0	710.0	703.3
9 kHz	45%	2	840.0	920.0	910.0	890.0
9 kHz	45%	3	1090.0	1060.0	1070.0	1073.3
9 kHz	45%	4	1120.0	1130.0	1120.0	1123.3
9 kHz	45%	5	1040.0	1050.0	1050.0	1046.7
10 kHz	35%	1	700.0	680.0	680.0	686.7
10 kHz	35%	2	1010.0	1070.0	1090.0	1056.7
10 kHz	35%	3	1120.0	1130.0	1120.0	1123.3
10 kHz	35%	4	1350.0	1370.0	1350.0	1356.7
10 kHz	35%	5	1330.0	1340.0	1330.0	1333.3
10 kHz	40%	1	890.0	920.0	960.0	923.3
10 kHz	40%	2	1450.0	1430.0	1490.0	1456.7
10 kHz	40%	3	1480.0	1510.0	1530.0	1506.7
10 kHz	40%	4	1950.0	2010.0	1970.0	1976.7
10 kHz	40%	5	1810.0	1830.0	1750.0	1796.7
10 kHz	45%	1	1310.0	1310.0	1290.0	1303.3
10 kHz	45%	2	1990.0	1950.0	1970.0	1970.0
10 kHz	45%	3	2070.0	1990.0	2010.0	2023.3
10 kHz	45%	4	2850.0	2830.0	2850.0	2843.3
10 kHz	45%	5	2410.0	2450.0	2430.0	2430.0
11 kHz	35%	1	1190.0	1170.0	1180.0	1180.0
11 kHz	35%	2	1330.0	1410.0	1430.0	1390.0
11 kHz	35%	3	1010.0	1050.0	1070.0	1043.3

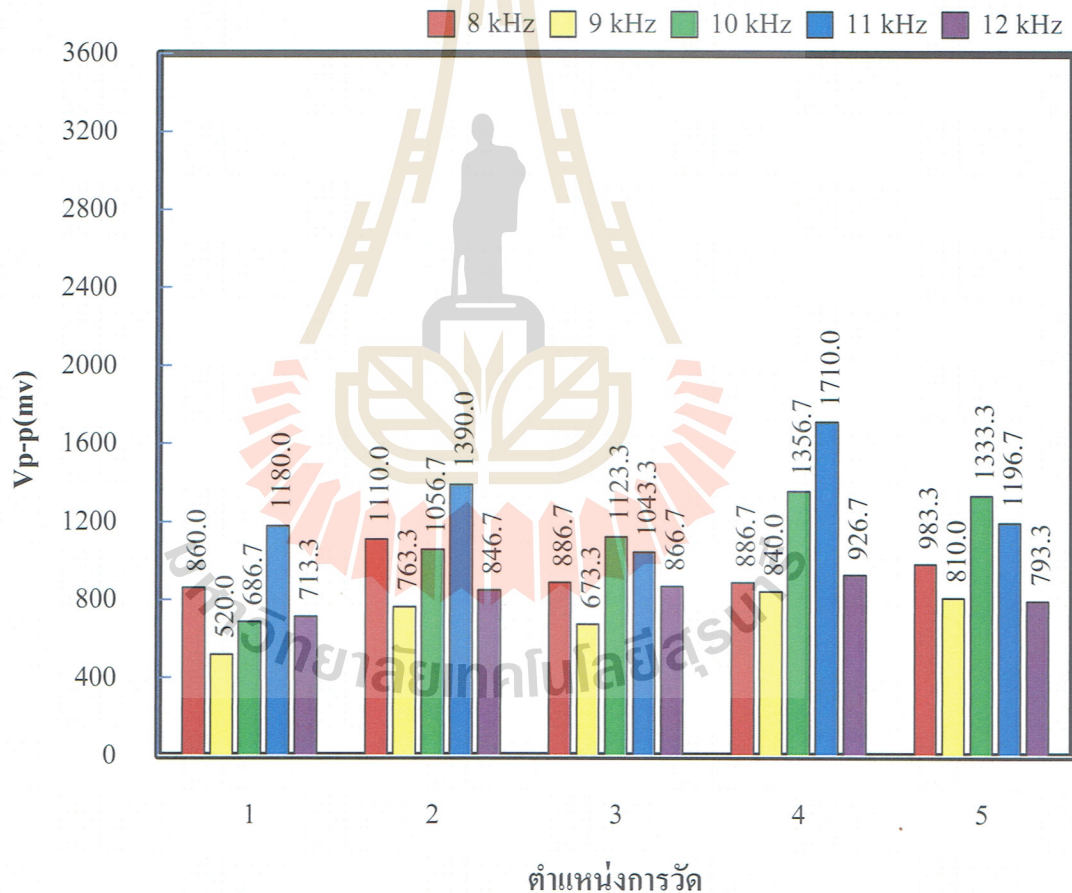
ตารางที่ 4.2 การวัดค่าแอมพลิจูด (V_{p-p}) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่ F1	Duty cycle D1	ตำแหน่ง ที่วัด	V_{p-p} (mv)			
			1	2	3	V_{p-p} เฉลี่ย
11 kHz	35%	4	1710.0	1670.0	1750.0	1710.0
11 kHz	35%	5	1190.0	1210.0	1190.0	1196.7
11 kHz	40%	1	1570.0	1530.0	1490.0	1530.0
11 kHz	40%	2	1810.0	1870.0	1870.0	1850.0
11 kHz	40%	3	1510.0	1530.0	1530.0	1523.3
11 kHz	40%	4	2110.0	2070.0	2130.0	2103.3
11 kHz	40%	5	1630.0	1650.0	1630.0	1636.7
11 kHz	45%	1	2110.0	2130.0	2150.0	2130.0
11 kHz	45%	2	2890.0	2630.0	2630.0	2716.7
11 kHz	45%	3	2210.0	2270.0	2250.0	2243.3
11 kHz	45%	4	2890.0	2870.0	2877.0	2879.0
11 kHz	45%	5	2150.0	2130.0	2210.0	2163.3
12 kHz	35%	1	720.0	700.0	720.0	713.3
12 kHz	35%	2	840.0	860.0	840.0	846.7
12 kHz	35%	3	860.0	860.0	880.0	866.7
12 kHz	35%	4	920.0	920.0	940.0	926.7
12 kHz	35%	5	800.0	800.0	780.0	793.3
12 kHz	40%	1	1070.0	1030.0	1050.0	1050.0
12 kHz	40%	2	1050.0	1150.0	1110.0	1103.3
12 kHz	40%	3	1370.0	1350.0	1330.0	1350.0
12 kHz	40%	4	1210.0	1170.0	1170.0	1183.3
12 kHz	40%	5	1150.0	1130.0	1150.0	1143.3
12 kHz	45%	1	1310.0	1300.0	1310.0	1306.7
12 kHz	45%	2	1380.0	1380.0	1390.0	1383.3
12 kHz	45%	3	1450.0	1470.0	1460.0	1460.0
12 kHz	45%	4	1300.0	1340.0	1330.0	1323.3

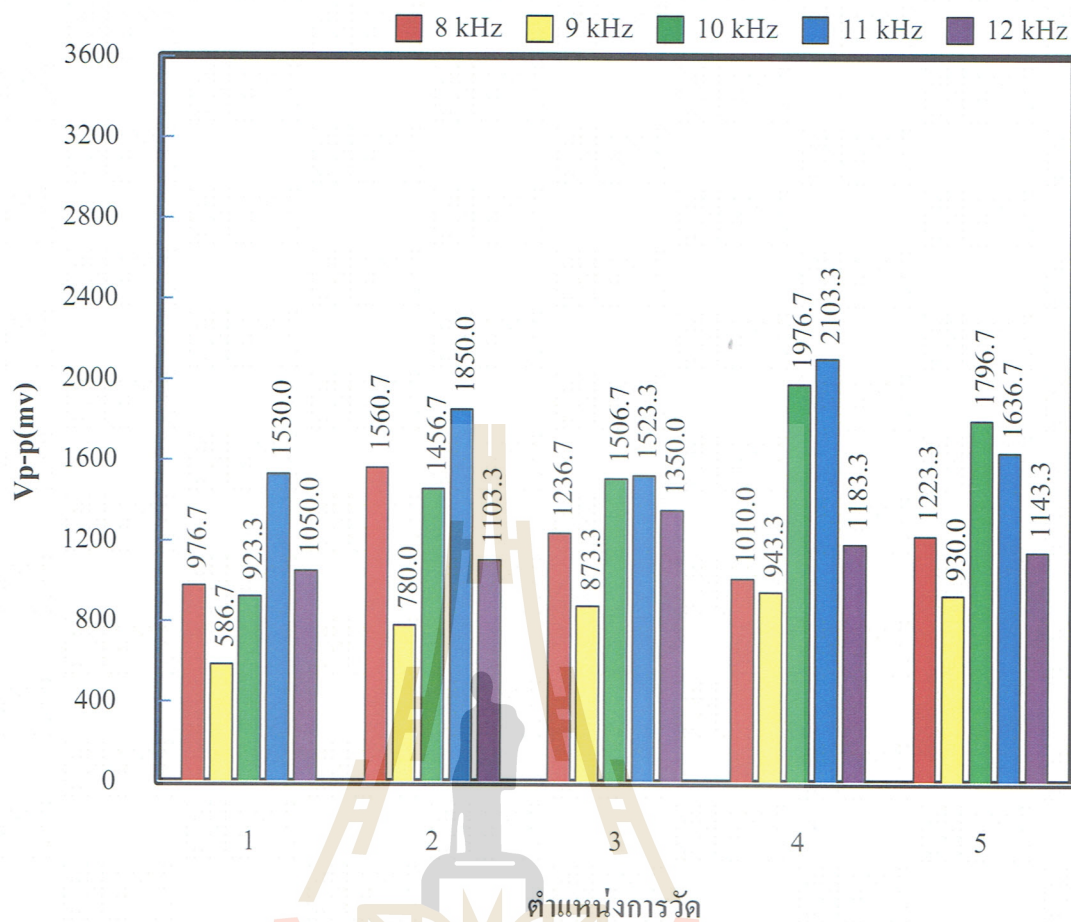
ตารางที่ 4.2 การวัดค่าแอมพลิจูด (V_{p-p}) ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มาמודูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่	Duty cycle	ตำแหน่งที่วัด	V_{p-p} (mv)			
			1	2	3	V_{p-p} เฉลี่ย
F1	D1	5	1460.0	1470.0	1470.0	1470.0

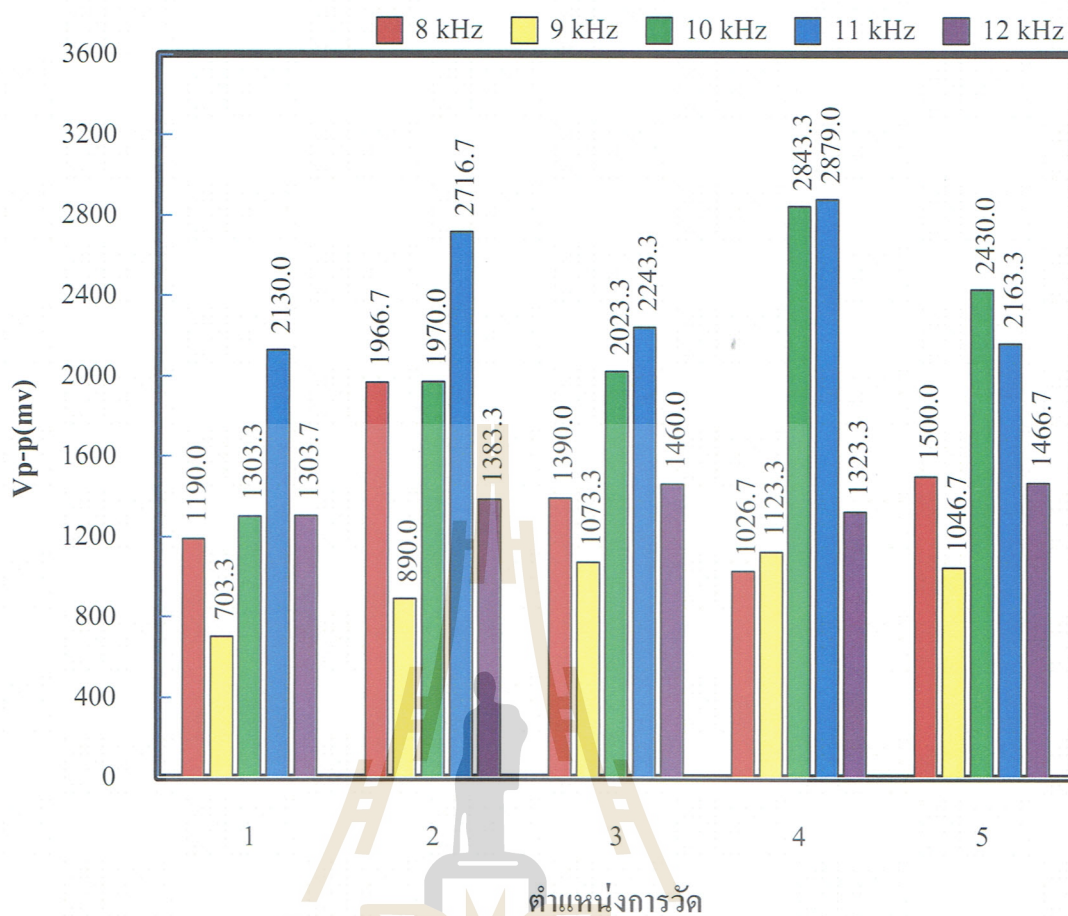
จากตารางการทดลองนำมาเขียนเป็นแผนภูมิแท่ง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า Duty cycle เป็น 35%, 40% และ 45% ดังนี้



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 35% ของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม



รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 40% ของแมกนีโตสตรีกที่ฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม



รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 45% ของแมกนีโตสตริกที่ฟิทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม

จากตารางที่ 4.2 การทดลองโดยใช้แมกนีโตสตริกที่ฟิทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่มโดยมีวงจรขับทรานสดิวเซอร์เพื่อทำการสั้นสะท้อน พบว่าความถี่และ Duty cycle ที่ใช้มีผลต่อการสั้นสะท้อน ซึ่งในการทดลองจะใช้ช่วงความถี่ที่ 8 kHz – 12 kHz ที่แตกต่างกันเพื่อดูความแรงในการสั้นของแต่ละความถี่ที่ใช้ พบว่าที่ความถี่ที่ 11 kHz ทั้ง 5 ตำแหน่งของการวัดสัญญาณจะมีค่าแอมพลิจูดสูงสุด (Vp-p) ซึ่งความถี่ที่ทำให้แอมพลิจูดสูงสุดนี้เรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ ในส่วนที่ไม่ใช่ความถี่เรโซแนนซ์ก็จะมีค่าแอมพลิจูดต่ำลงมา ต่อมาจะเป็นในส่วนของ Duty cycle จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่า Duty cycle ที่ใช้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลต่อความแรงที่ได้ทำให้มีค่าแอมพลิจูดสูงขึ้น ดังนั้น Duty cycle 45% ทำให้ค่าแอมพลิจูดมีค่าสูงสุดของทุกๆความถี่ ซึ่งการ

ทดลองนี้จะสามารถกำหนดค่า Duty cycle ได้สูงสุดที่ 45% ถ้าเพิ่มมากกว่าที่กล่าวมาจะส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์

จากรูปที่ 4.4 – 4.6 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกัน ในช่วง Duty cycle 35%, 40% และ 45% ตามลำดับจากรูป จะแสดงให้เห็นแอมพลิจูดที่ได้เมื่อเทียบกับความถี่ที่แตกต่างกัน จะเห็นได้ว่าที่ความถี่ 11 kHz มีค่าแอมพลิจูดของแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดสัญญาณมีค่าสูงสุด

4.2.3 การหาค่าแอมพลิจูดเมื่อใช้สัญญาณมอดูเลตในการขับแมกนีโตสตรีกที่ฟทรานสดิวเซอร์แบบแบบที่ยังไม่ได้ต่อความยาวของทรานสดิวเซอร์ต่อเพิ่ม

จากตารางที่ 4.3 ในการทดลองในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปิดการทำงานของทรานสดิวเซอร์เพียง 2 ตัวในการทดลอง โดยใช้สัญญาณ PWM มามอดูเลตกันของ 2 ความถี่ เพื่อเปรียบเทียบแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนว่าช่วงการทำงานที่ความถี่ 8 kHz – 16 kHz จะสามารถสั่นได้ดีที่ความถี่ และค่า Duty cycle เท่าไร พร้อมทั้งนำค่าตารางไปทำเป็นแผนภูมิแท่งเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบในครั้งนี้

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน

ความถี่	duty cycle	ตำแหน่งที่วัด	Vp-p (mv)			Vp-p เฉลี่ย
			1	2	3	
F1	D1					
8 kHz	35%	1	543.0	547.0	543.0	544.3
8 kHz	35%	2	543.0	547.0	551.0	547.0
8 kHz	35%	3	454.0	450.0	450.0	451.3
8 kHz	35%	4	494.0	478.0	498.0	490.0
8 kHz	35%	5	474.0	470.0	478.0	474.0
8 kHz	40%	1	630.0	620.0	630.0	626.7
8 kHz	40%	2	744.0	730.0	750.0	741.3
8 kHz	40%	3	631.0	639.0	611.0	627.0
8 kHz	40%	4	490.0	478.0	474.0	480.7
8 kHz	40%	5	507.0	490.0	499.0	498.7
8 kHz	45%	1	720.0	740.0	750.0	736.7

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่ F1	duty cycle D1	ตำแหน่ง ที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
8 kHz	45%	2	1060.0	1060.0	1010.0	1043.3
8 kHz	45%	3	780.0	770.0	790.0	780.0
8 kHz	45%	4	640.0	590.0	560.0	596.7
8 kHz	45%	5	650.0	660.0	650.0	653.3
9 kHz	35%	1	770.0	770.0	730.0	756.7
9 kHz	35%	2	540.0	490.0	500.0	510.0
9 kHz	35%	3	660.0	630.0	620.0	636.7
9 kHz	35%	4	520.0	510.0	510.0	513.3
9 kHz	35%	5	790.0	810.0	770.0	790.0
9 kHz	40%	1	880.0	880.0	870.0	876.7
9 kHz	40%	2	610.0	630.0	630.0	623.3
9 kHz	40%	3	760.0	720.0	700.0	726.7
9 kHz	40%	4	660.0	610.0	620.0	630.0
9 kHz	40%	5	1060.0	1050.0	1040.0	1050.0
9 kHz	45%	1	1060.0	1060.0	1050.0	1056.7
9 kHz	45%	2	770.0	730.0	740.0	746.7
9 kHz	45%	3	970.0	970.0	900.0	946.7
9 kHz	45%	4	790.0	790.0	760.0	780.0
9 kHz	45%	5	1210.0	1190.0	1220.0	1206.7
10 kHz	35%	1	590.0	590.0	570.0	583.3
10 kHz	35%	2	530.0	530.0	550.0	536.7
10 kHz	35%	3	600.0	590.0	610.0	600.0
10 kHz	35%	4	550.0	550.0	550.0	550.0
10 kHz	35%	5	680.0	740.0	730.0	716.7
10 kHz	40%	1	670.0	640.0	690.0	666.7
10 kHz	40%	2	690.0	710.0	700.0	700.0

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่	duty cycle	ตำแหน่ง ที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
10 kHz	40%	3	830.0	810.0	800.0	813.3
10 kHz	40%	4	710.0	710.0	720.0	713.3
10 kHz	40%	5	900.0	920.0	920.0	913.3
10 kHz	45%	1	870.0	840.0	840.0	850.0
10 kHz	45%	2	910.0	890.0	870.0	890.0
10 kHz	45%	3	1090.0	1060.0	1040.0	1063.3
10 kHz	45%	4	970.0	990.0	980.0	980.0
10 kHz	45%	5	1210.0	1160.0	1150.0	1173.3
11 kHz	35%	1	560.0	570.0	570.0	566.7
11 kHz	35%	2	460.0	470.0	470.0	466.7
11 kHz	35%	3	560.0	530.0	520.0	536.7
11 kHz	35%	4	520.0	530.0	50.0	366.7
11 kHz	35%	5	690.0	670.0	690.0	683.3
11 kHz	40%	1	870.0	870.0	860.0	866.7
11 kHz	40%	2	640.0	650.0	630.0	640.0
11 kHz	40%	3	760.0	770.0	760.0	763.3
11 kHz	40%	4	750.0	730.0	740.0	740.0
11 kHz	40%	5	770.0	800.0	800.0	790.0
11 kHz	45%	1	1150.0	1130.0	1130.0	1136.7
11 kHz	45%	2	1040.0	1040.0	1060.0	1046.7
11 kHz	45%	3	1180.0	1170.0	1140.0	1163.3
11 kHz	45%	4	1070.0	1090.0	1050.0	1070.0
11 kHz	45%	5	1330.0	1300.0	1280.0	1303.3
12 kHz	35%	1	730.0	720.0	720.0	723.3
12 kHz	35%	2	680.0	670.0	670.0	673.3
12 kHz	35%	3	820.0	790.0	800.0	803.3

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่	duty cycle	ตำแหน่ง ที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
12 kHz	35%	4	610.0	600.0	620.0	610.0
12 kHz	35%	5	610.0	580.0	610.0	600.0
12 kHz	40%	1	1120.0	1140.0	1130.0	1130.0
12 kHz	40%	2	900.0	840.0	850.0	863.3
12 kHz	40%	3	1270.0	1210.0	1160.0	1213.3
12 kHz	40%	4	820.0	830.0	840.0	830.0
12 kHz	40%	5	880.0	890.0	900.0	890.0
12 kHz	45%	1	1510.0	1520.0	1510.0	1513.3
12 kHz	45%	2	1100.0	1060.0	1070.0	1076.7
12 kHz	45%	3	1470.0	1450.0	1410.0	1443.3
12 kHz	45%	4	1170.0	1090.0	1130.0	1130.0
12 kHz	45%	5	1100.0	1130.0	1090.0	1106.7
13 kHz	35%	1	2430.0	2470.0	2410.0	2436.7
13 kHz	35%	2	2000.0	1990.0	1950.0	1980.0
13 kHz	35%	3	2910.0	3040.0	3020.0	2990.0
13 kHz	35%	4	1930.0	1970.0	1970.0	1956.7
13 kHz	35%	5	2550.0	2610.0	2570.0	2576.7
13 kHz	40%	1	3120.0	3200.0	3100.0	3140.0
13 kHz	40%	2	2410.0	2470.0	2430.0	2436.7
13 kHz	40%	3	3500.0	3460.0	3320.0	3426.7
13 kHz	40%	4	2030.0	2070.0	2030.0	2043.3
13 kHz	40%	5	3320.0	3280.0	3320.0	3306.7
13 kHz	45%	1	3680.0	3660.0	3620.0	3653.3
13 kHz	45%	2	3020.0	3120.0	3080.0	3073.3
13 kHz	45%	3	3780.0	3780.0	3780.0	3780.0
13 kHz	45%	4	2430.0	2400.0	2430.0	2420.0

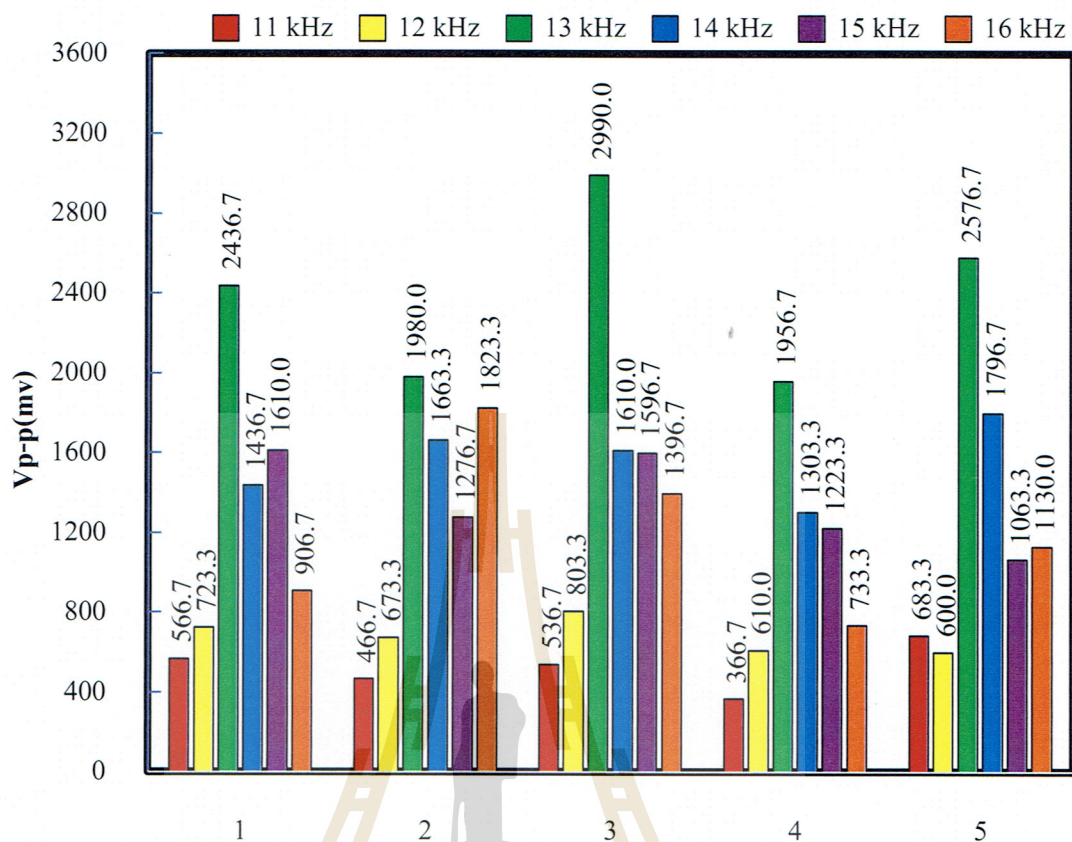
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่ F1	duty cycle D1	ตำแหน่ง ที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
13 kHz	45%	5	5190.0	5150.0	5150.0	5163.3
14 kHz	35%	1	1450.0	1410.0	1450.0	1436.7
14 kHz	35%	2	1650.0	1690.0	1650.0	1663.3
14 kHz	35%	3	1610.0	1650.0	1570.0	1610.0
14 kHz	35%	4	1330.0	1250.0	1330.0	1303.3
14 kHz	35%	5	1890.0	1690.0	1810.0	1796.7
14 kHz	40%	1	1970.0	1930.0	1930.0	1943.3
14 kHz	40%	2	2210.0	2250.0	2210.0	2223.3
14 kHz	40%	3	2000.0	1970.0	2010.0	1993.3
14 kHz	40%	4	1690.0	1610.0	1650.0	1650.0
14 kHz	40%	5	2400.0	2410.0	2450.0	2420.0
14 kHz	45%	1	2850.0	2770.0	2770.0	2796.7
14 kHz	45%	2	2850.0	2930.0	2810.0	2863.3
14 kHz	45%	3	2800.0	2770.0	2730.0	2766.7
14 kHz	45%	4	2100.0	2170.0	2210.0	2160.0
14 kHz	45%	5	3180.0	3300.0	3220.0	3233.3
15 kHz	35%	1	1610.0	1610.0	1610.0	1610.0
15 kHz	35%	2	1290.0	1250.0	1290.0	1276.7
15 kHz	35%	3	1530.0	1610.0	1650.0	1596.7
15 kHz	35%	4	1250.0	1210.0	1210.0	1223.3
15 kHz	35%	5	1050.0	1050.0	1090.0	1063.3
15 kHz	40%	1	1810.0	1990.0	1810.0	1870.0
15 kHz	40%	2	1770.0	1650.0	1650.0	1690.0
15 kHz	40%	3	2170.0	2050.0	2010.0	2076.7
15 kHz	40%	4	1570.0	1650.0	1570.0	1596.7
15 kHz	40%	5	1530.0	1610.0	1410.0	1516.7

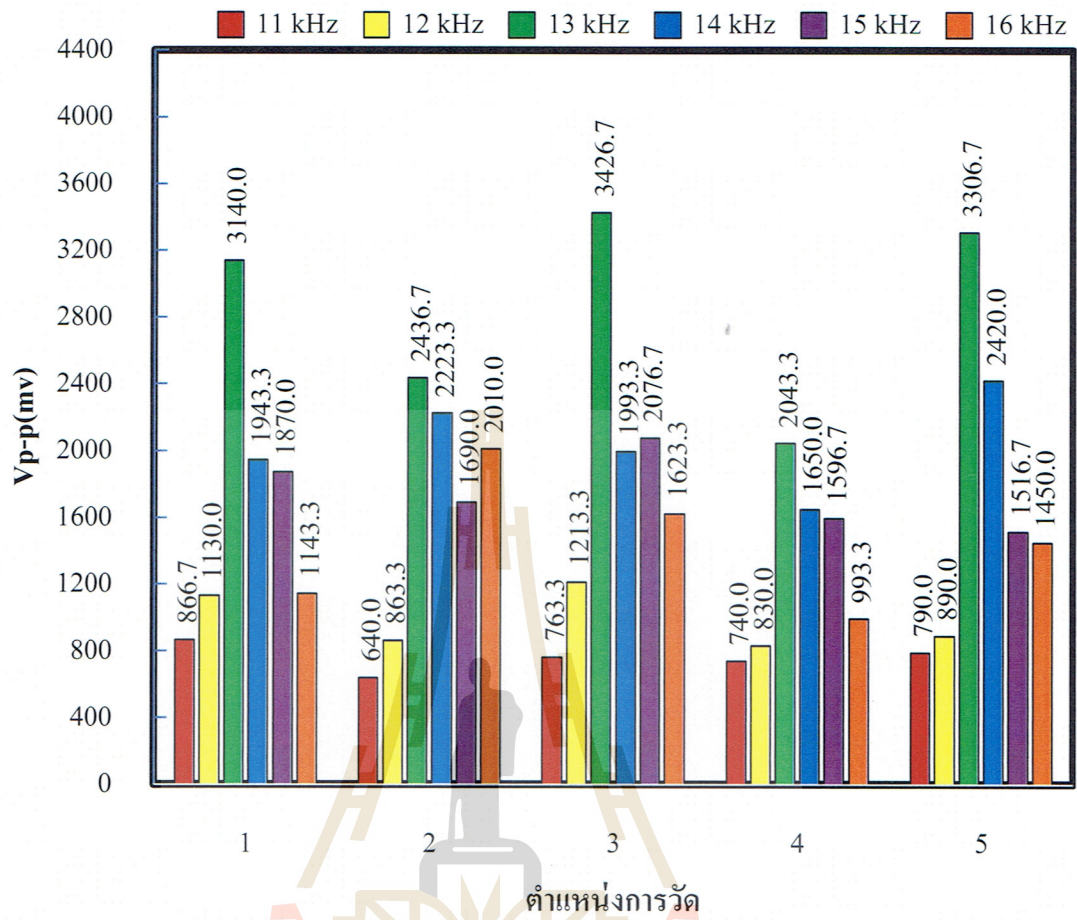
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงดัน Vp-p ที่ได้ในแต่ละช่วงความถี่ โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับสัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน (ต่อ)

ความถี่ F1	duty cycle D1	ตำแหน่ง ที่วัด	Vp-p (mv)			
			1	2	3	Vp-p เฉลี่ย
15 kHz	45%	1	2230.0	2290.0	2290.0	2270.0
15 kHz	45%	2	1880.0	1890.0	1970.0	1913.3
15 kHz	45%	3	2130.0	2170.0	2130.0	2143.3
15 kHz	45%	4	1770.0	1810.0	1770.0	1783.3
15 kHz	45%	5	1450.0	1450.0	1490.0	1463.3
16 kHz	35%	1	920.0	920.0	880.0	906.7
16 kHz	35%	2	1850.0	1770.0	1850.0	1823.3
16 kHz	35%	3	1410.0	1450.0	1330.0	1396.7
16 kHz	35%	4	760.0	720.0	720.0	733.3
16 kHz	35%	5	1130.0	1130.0	1130.0	1130.0
16 kHz	40%	1	1130.0	1170.0	1130.0	1143.3
16 kHz	40%	2	2050.0	2010.0	1970.0	2010.0
16 kHz	40%	3	1610.0	1650.0	1610.0	1623.3
16 kHz	40%	4	1010.0	1010.0	960.0	993.3
16 kHz	40%	5	1450.0	1410.0	1490.0	1450.0
16 kHz	45%	1	1210.0	1210.0	1210.0	1210.0
16 kHz	45%	2	2000.0	2090.0	2050.0	2046.7
16 kHz	45%	3	1650.0	1690.0	1610.0	1650.0
16 kHz	45%	4	1130.0	1170.0	1130.0	1143.3
16 kHz	45%	5	1610.0	1570.0	1610.0	1596.7

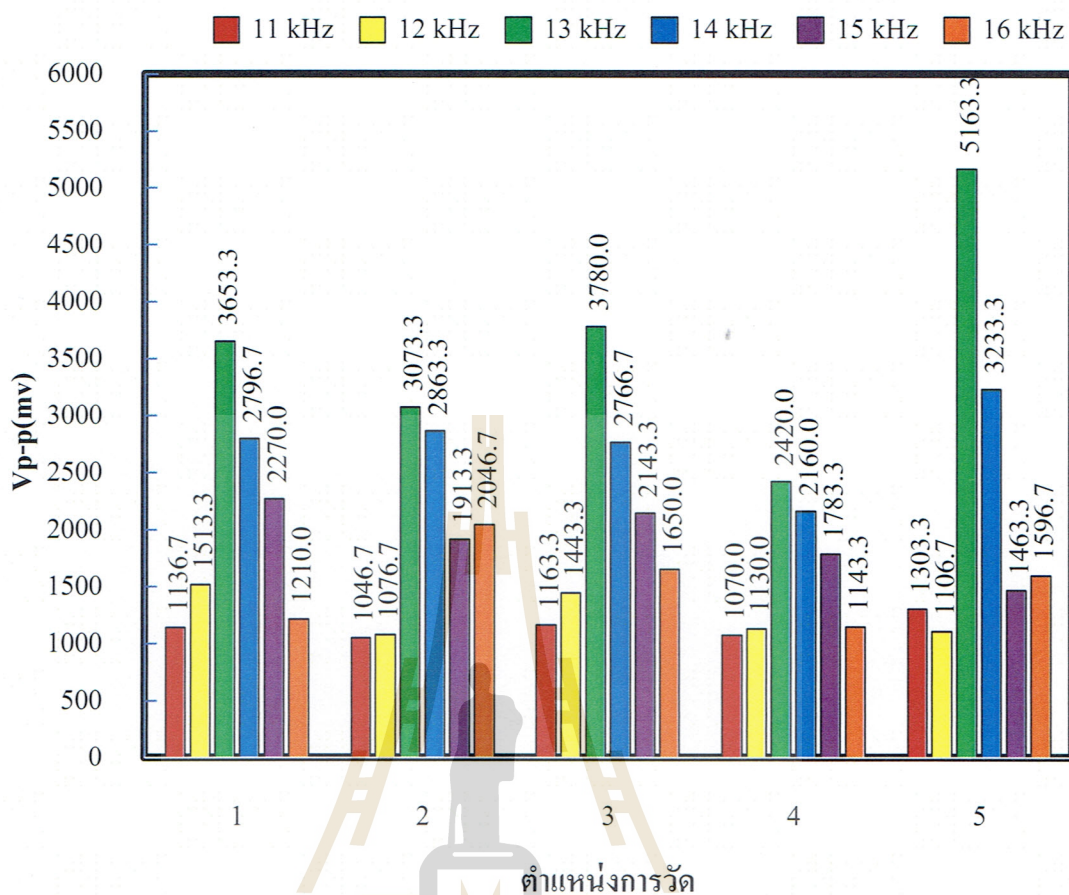
จากตารางการทดลองนำมาเขียนเป็นแผนภูมิแท่ง เพื่อทำการเปรียบเทียบค่า Duty cycle เป็น 35%, 40% และ 45% ดังนี้



รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 35% ของแมกนีโตสตรัคทีฟพลาสมาเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 40% ของแมกนีโตสตรีกที่ฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 45% ของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม

จากตารางที่ 4.3 การทดสอบแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม ผู้วิจัยได้กำหนดความถี่ในช่วง 8 kHz – 16 kHz เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ที่ส่งผลให้แอมพลิจูดสูงขึ้น โดยพบว่าความถี่ที่ส่งผลให้ค่าแอมพลิจูดสูงสุดอยู่ที่ความถี่ 13 kHz ความถี่อื่นๆที่ใช้ นั้นจะมีค่าแอมพลิจูดน้อยลงตามลำดับ ซึ่งความถี่ที่น้อยและมากกว่า 13 kHz นั้นจะส่งผลทำให้การกระจายตัวของคลื่นที่อยู่ในน้ำได้ไม่ดี ส่วนค่า Duty cycle ที่ดีที่สุดที่ทำให้การทำงานของ การสั่นสะเทือนในครั้งนี้ได้ดีจะมีค่า Duty cycle ที่ 45% ยิ่งปรับค่า Duty cycle น้อยจะมีผลทำให้การสั่นนั้นเบาลง

จากรูปที่ 4.7 – 4.9 กราฟเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างกันในช่วง Duty cycle 35%, 40% และ 45% ตามลำดับจากรูป จะแสดงให้เห็นถึงความถี่ที่ 13 kHz มีค่าแอมพลิจูดที่สูงที่สุด ซึ่งทำให้แตกต่างจากค่าอื่นที่วัดได้เป็นอย่างมากในของแต่ละตำแหน่งที่ได้ทำการวัดค่า

4.2.4 การหาอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นที่ตัวทรานสดิวเซอร์

การหาอุณหภูมิของการทดลองผู้วิจัยได้ทำการเลือกข้อมูลมีค่าแอมพลิจูดสูงที่สุด โดยจะเลือกความถี่และค่า Duty cycle ในแต่ละตารางมาทำการหาความร้อนที่เกิดขึ้นที่ตัวทรานสดิวเซอร์ โดยตารางที่ 4.4 จะเป็นจะเป็นแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่มได้เลือกความถี่ 10 kHz และ Duty cycle 45% ตารางที่ 4.5 จะเป็นแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่มได้เลือกความถี่ 11 kHz และ Duty cycle 45% และในส่วน ของตารางที่ 4.6 จะเป็นแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่มได้เลือกความถี่ 13 kHz และ Duty cycle 45% มาทำการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นในครั้งนี้ เมื่อเวลาผ่านไป 150 นาที

ตารางที่ 4.4 บันทึกอุณหภูมิของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม โดยใช้สัญญาณ PWM

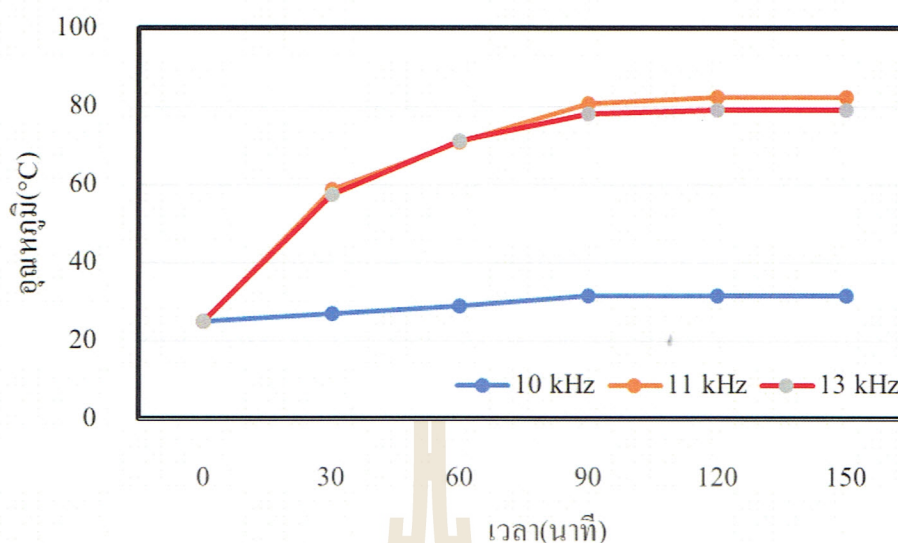
ความถี่	Duty cycle	การวัดอุณหภูมิของ Magnetostrictive Transducer (°C)					
		0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
F1	D1						
10 kHz	45%	25	27	29	31.6	31.5	31.6

ตารางที่ 4.5 บันทึกอุณหภูมิของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มาทดสอบด้วยกัน

ความถี่	Duty cycle	การวัดอุณหภูมิของ Magnetostrictive Transducer (°C)					
		0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
F1	D1						
11 kHz	45%	25	58.7	71.0	80.9	82.5	82.5

ตารางที่ 4.6 บันทึกอุณหภูมิของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มาทดสอบด้วยกัน

ความถี่	Duty cycle	การวัดอุณหภูมิของ Magnetostrictive Transducer (°C)					
		0 นาที	30 นาที	60 นาที	90 นาที	120 นาที	150 นาที
F1	F1						
13 kHz	45%	25	57.4	71.4	78.0	79.0	79.2



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบอุณหภูมิของแต่ละผลการทดลอง

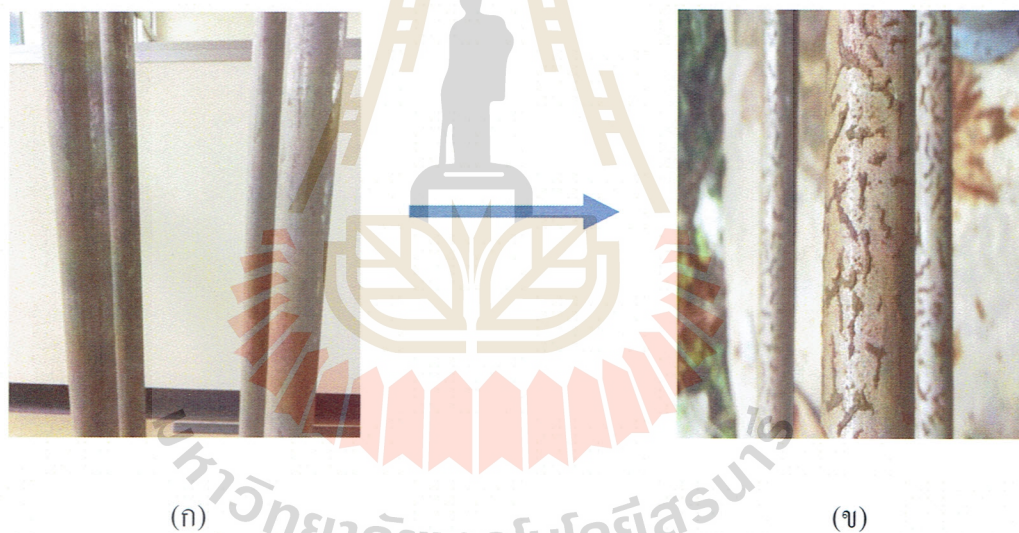
จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิการทดลองของทรานสดิวเซอร์ที่ได้ทำการเลือกมาในแต่ละการทดลอง นำมาบันทึกลงตารางที่ 4.4 - 4.6 โดยที่อุณหภูมิจากเริ่มต้นที่ 25 °C เท่ากันทุกการทดลอง พบว่าที่ความถี่ 11 kHz ของตารางที่ 4.5 และความถี่ 13 kHz ของตารางที่ 4.6 อุณหภูมิจะค่อยๆ สูงขึ้นจนเริ่มคงที่ที่ 120 นาที เป็นต้นไป ส่วนความถี่ 10 kHz ของตารางที่ 4.4 อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 °C จนถึงอุณหภูมิกงที่ 31.6 °C ที่ 90 นาที ซึ่งต่างจากสองตารางก่อนหน้านี้ ซึ่งทั้งตารางที่ 4.5 และ 4.6 จะมีอุณหภูมิกงที่ 120 นาที แต่ที่แตกต่างของสองตารางนี้คืออุณหภูมิกงที่ไม่เท่ากัน โดยตารางที่ 4.5 ความถี่ที่ใช้เท่ากับ 11 kHz จะมีอุณหภูมิกงที่ 82.5 °C ส่วนของตารางที่ 4.6 ความถี่ที่ใช้คือ 13 kHz จะมีอุณหภูมิกงที่อยู่ที่ 79.2 °C จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10 ดังนั้นการทำงานของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่มีการต่อความยาวเพิ่ม โดยใช้สัญญาณ PWM มีอุณหภูมิที่ต่ำที่สุดในการทดลองทั้ง 3 รูปแบบ

ในการทำงานขับทรานสดิวเซอร์ต้องการอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยๆ เพื่อลดการแตกหักของทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแบบแมกนีโตสตริกทีฟ แต่ในทางกลับกันอุณหภูมิกงที่น้อยในตารางที่ 4.4 นี้มีค่าแอมพลิจูดในการทดสอบมากจึงไม่เหมาะนำมาใช้งาน ผู้วิจัยจึงไม่ได้นำมาใช้ในการทำงานขับทรานสดิวเซอร์ ในการใช้งานผู้วิจัยได้เลือกแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่ม โดยใช้สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 1 กับ สัญญาณ PWM ของความถี่ที่ 2 มามอดูเลตกัน ของตารางที่ 4.5 เนื่องจากมีอุณหภูมิกงที่น้อยกว่าแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อ

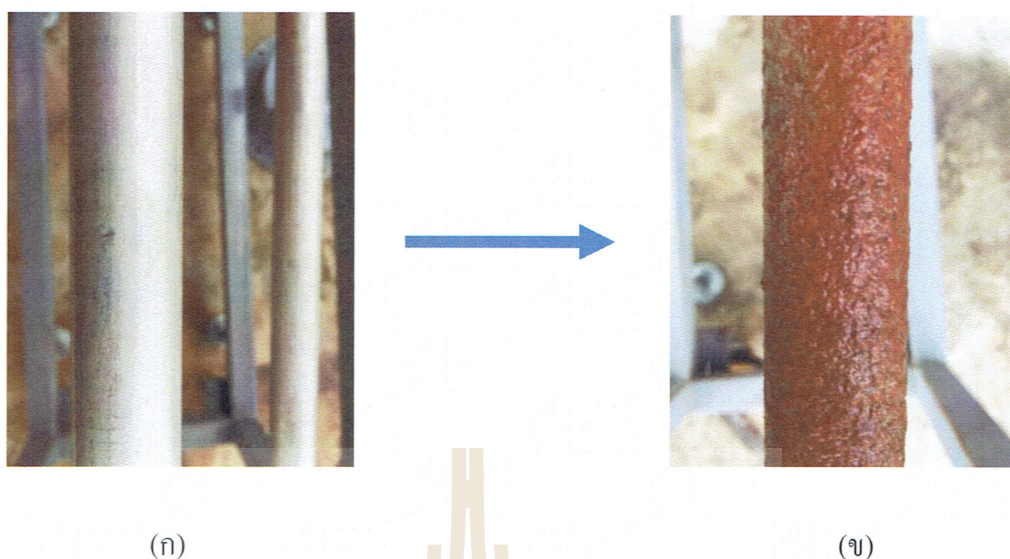
ความยาวเพิ่มอยู่ที่ประมาณ 3 – 4 °C แทน และยังมีค่าแอมพลิจูดที่สูงกว่าอีกด้วย จึงทำให้สามารถปกป้องพื้นผิวที่ตะกรันมาเกาะจับได้ดีขึ้นกว่าเดิม

4.2.5 การทดลองติดตั้งเครื่องในเบื้องต้น

ในการทดลองในครั้งนี้ ได้ทำการเลือกทรานสดิวเซอร์ที่ต่อความยาวเพิ่มมาทำการทดสอบ เนื่องจากมีการสั่นที่ต่ำสุดในการหาช่วงการทำงานที่เหมาะสม โดยได้เลือกความถี่ F1 เท่ากับ 13 kHz Duty cycle 1 เท่ากับ 45% และค่าของ F2 มีความถี่ที่ 14 Hz Duty cycle 2 เท่ากับ 2% และมีความร้อนที่เกิดขึ้นจากการทำงานอยู่ที่ 79.2 °C มาทำการทดลองในเบื้องต้นนี้ ในขั้นตอนแรกเราจะทำการเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ไปด้วยในการทดลอง ส่วนขั้นตอนที่สองเราจะทำการปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์แล้วปล่อยให้ น้ำไหลผ่านที่ท่อตลอดเวลาเป็นระยะเวลา 15 วัน ของทั้งสองขั้นตอนการทดลอง



รูปที่ 4.11 (ก) รูปท่อน้ำที่ทำความสะอาดก่อนไปติดตั้ง (ข) รูปท่อหลังจากเปิดเครื่องขับทรานสดิวเซอร์ไว้ทิ้งไว้ 15 วัน



รูปที่ 4.12 (ก) รูปท่อน้ำที่ทำความสะอาดก่อนที่จะทดลองในรอบที่สอง (ข) รูปท่อหลังจากเปิดเครื่องบำบัดรานสตีวเซอร์ไว้ทิ้งไว้ 15 วัน

ในการทดลองในครั้งนี้พบว่าเมื่อมีการเปิดน้ำบาดาลให้ไหลตามท่อโดยที่มีการเปิดเครื่องบำบัดรานสตีวเซอร์ จะสังเกตเห็นว่าจะรูปที่ 4.12 แบบ (ก) คือท่อที่ไม่มีคราบอะไรมาเกาะติดที่พื้นผิวเลย เมื่อเปิดน้ำบาดาลไหลผ่านไป 15 วัน พบว่ามีคราบสิ่งสกปรกที่มาเกาะติดดังรูปที่ 4.12 แบบ (ข) ซึ่งจะเป็นเหมือนรูปตัวหนอนหรือก็คือมีการจับกันเป็นกลุ่มเล็กๆ ตรงบริเวณพื้นผิวของท่อเหล็ก ซึ่งสามารถเห็นพื้นผิวของเหล็กอยู่เพราะว่าไม่ได้มีอะไรมาจับกลุ่มที่พื้นผิว และในส่วนที่สองที่ได้ทำการทดลองในแบบไม่ได้มีการเปิดเครื่องบำบัดรานสตีวเซอร์แต่จะมีการเปิดน้ำให้ไหลเหมือนขั้นตอนแรก โดยรูปที่ 4.13 แบบ (ก) จะทำการล้างทำความสะอาดเพื่อให้ไม่มีอะไรมาติดเป็นคราบที่พื้นผิวท่อ จากนั้นก็ทำการประกอบแล้วทดลองทิ้งไว้ 15 วัน เมื่อครบ 15 วัน ก็ได้ทำการเปิดเครื่องออกจะเห็นได้ดังรูปที่ 4.13 แบบ (ข) พบว่ามีคราบสิ่งสกปรกมาเกาะเต็มพื้นผิวของท่อเหล็ก ซึ่งจะแตกต่างจากการทดลองในแบบแรก ดังนั้นสรุปได้ว่าการใช้เครื่องบำบัดรานสตีวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทิฟสามารถป้องกันคราบสิ่งสกปรกที่มาเกาะติดที่พื้นผิวของท่อเหล็กได้ แต่ไม่สามารถกับป้องกันสิ่งสกปรกได้ทั้งหมดในการทดลองในครั้งนี้

บทที่ 5

สรุป

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมมีการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวนมาก ส่วนใหญ่มักมีตะกรันมีเกาะติดเป็นฉนวนกั้นความร้อน จึงมีการใช้สารเคมีเพื่อทำการล้างและเคลือบสารเคมีป้องกันตะกรันเป็นอย่างมากในการล้างคราบตะกรันที่มาเกาะติดที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำให้เกิดผลเสียต่อส่งเวดล้อมรวมทั้งเสียเวลาในการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยน วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบเครื่องป้องกันตะกรันในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ที่เป็นแบบแมกนีโตสตริกทิฟ นักวิจัยได้ทำการวิเคราะห์หลักการทำงานพบว่าตัวทรานสดิวเซอร์แบบนี้จะทำงานได้เนื่องจากมีพลังงานไฟฟ้าจ่ายเข้าไปแล้วแปลงไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็กให้เกิดการทำงานเชิงกลอีกทีหรือเปลี่ยนจากพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล เพื่อมาทำการสั่นสะเทือนที่ท่อแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อป้องกันตะกรันมาเกาะติดหรือทำให้เกาะติดน้อยลงจากเดิม ซึ่งในช่วงแรกได้ทำการศึกษาออกแบบระบบควบคุมการทำงาน โดยใช้บอร์ด STM32F4DISCOVERY ในการรันโปรแกรม ซึ่งในการทำงานยังสามารถกำหนดความถี่ที่ใช้ตั้งแต่ 8 kHz - 24 kHz เพื่อควบคุมการเปิดปิดการทำงานของ IGBT ผ่าน ไปยังหม้อแปลงสเต็ปอัพเพื่อเพิ่มแรงดันให้สูงขึ้นไม่เกิน 1200 v ซึ่งการทำแบบนี้จะทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนที่ตัวทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทิฟที่สูงขึ้น ในการทดลองผลผู้วิจัยได้หาผลที่ดีที่สุดที่ทำให้ทรานสดิวเซอร์เกิดการสั่นสะเทือนไปยังท่อที่เชื่อมอยู่ภายในได้ดีที่สุด โดยแบ่งการทดลองออกเป็นการทำงานอยู่ 3 แบบ ซึ่งในแต่ละแบบจะแตกต่างกันทั้งสัญญาณที่ป้อนเข้าขนาดของความยาวที่นำมาต่อเข้ากับตัวเครื่อง ซึ่งในการทดลองในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเลือกที่ความถี่ F1 เท่ากับ 13 kHz Duty cycle(D1) เท่ากับ 45% ความถี่ F2 เท่ากับ 14 Hz Duty cycle(D2) เท่ากับ 2 % ในการทดลองนี้ได้ใช้ทรานสดิวเซอร์ที่ไม่ได้ต่อความยาวเพิ่มในการทดลองเพื่อส่งผลให้เกิดค่าแอมพลิจูดสูง(Vp-p) โดยตำแหน่งที่ใช้ Hydrophone เป็นตัววัดสัญญาณที่มีค่าสูงอยู่ที่ตำแหน่งที่ 5 มีค่าแอมพลิจูดสูงถึง 5163.3 mv เนื่องมาจากความถี่ที่ป้อนเข้าไปตรงกับความถี่ของทรานสดิวเซอร์หรือเรียกว่าความถี่เรโซแนนซ์ และยังมีทดลองลดความร้อนที่เกิดจากการทำงานของทรานสดิวเซอร์ ในการทดลองนี้สามารถทำให้อุณหภูมิของทรานสดิวเซอร์นี้ไม่เกิน 80 °C เพื่อลดความเสียหายจากการแตกหักของทรานสดิวเซอร์ได้อีกด้วย ซึ่งในการทดลองนี้สามารถออกแบบวงจรขับทรานสดิวเซอร์แบบแมกนีโตสตริกทิฟได้ และยังสามารถควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี

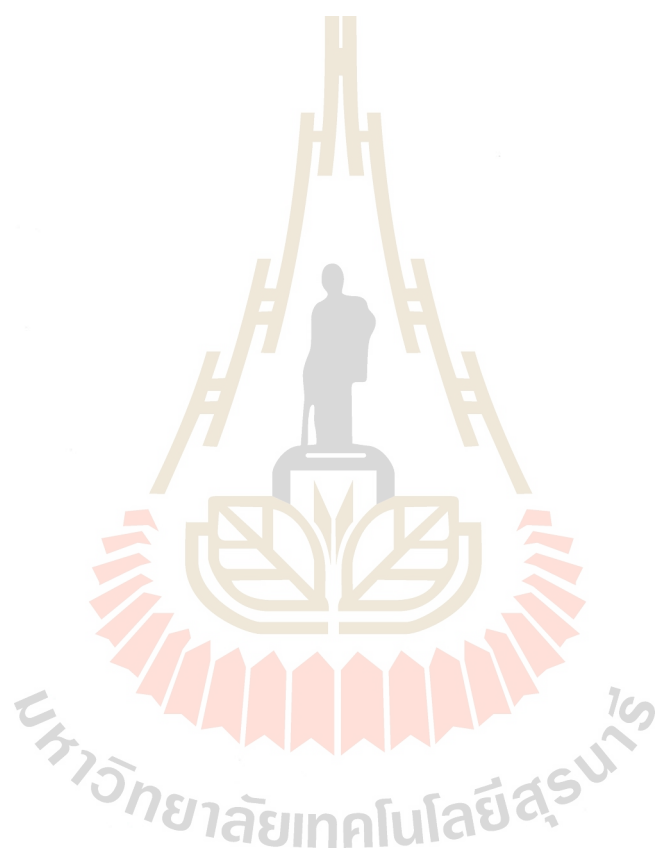
แนวทางในอนาคตต้องมีพัฒนางจรขับเคลื่อนสควเซอร์ทรานสควเซอร์ให้มีความเสถียร ด้านการใช้งาน ความแข็งแรง การเพิ่มการสั่นให้มีขนาดเพิ่มขึ้น และให้นำใช้ยิ่งขึ้นเพื่อมาทดแทน การใช้สารเคมีที่นำมาเคลือบท่อเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการล้างแต่ละครั้ง และยังสามารถให้เครื่องทำงานเพิ่มขึ้นจากเดิมไม่กี่เดือนล้างก็เป็นปีค่อยล้างต่อ 1 ครั้ง ซึ่งปัจจุบันการใช้ทรานสควเซอร์แบบนี้ยังไม่เป็นที่นิยมมากเนื่องจากยังไม่เห็นผลให้เห็นมากนัก ผู้พัฒนาต่อควรปรับปรุงการทดลองให้มีผลของการป้องกันที่มาเกาะเป็นฉนวนกันความร้อนเป็นข้อมูลอ้างอิง เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือเพิ่มขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการทดลองเก็บผลให้เกิดความหลากหลายในการทดลอง

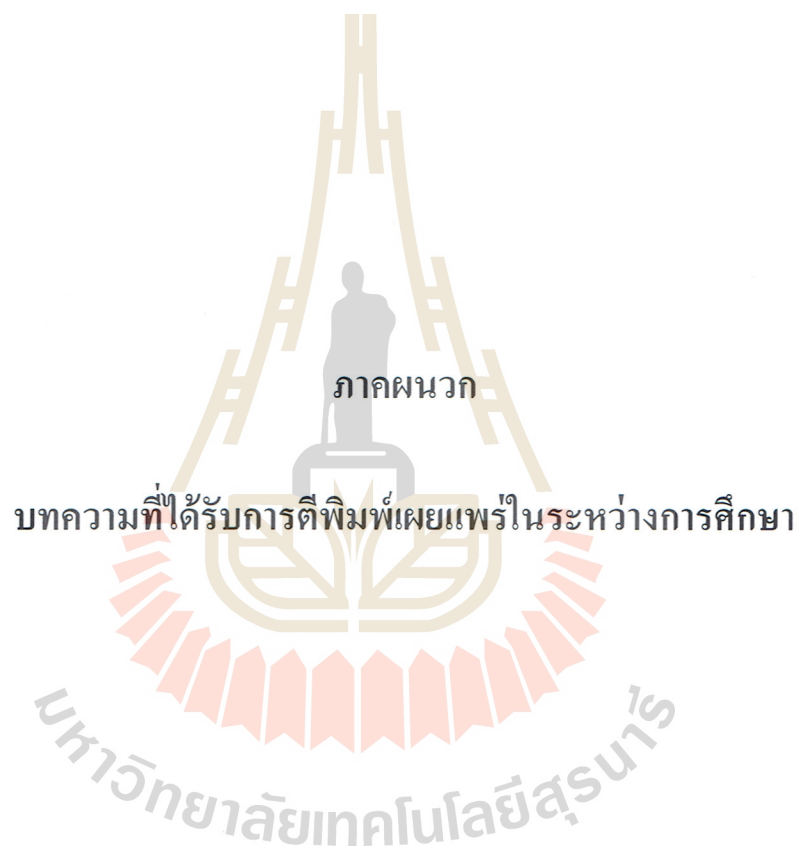


เอกสารอ้างอิง

- Hou, D., Z. Wang, G. Li, H. Fan, J. Wang and H. Huang (2015). "Ultrasonic assisted direct contact membrane distillation hybrid process for membrane scaling mitigation." *Desalination* 375: 33-39.
- Legay, M., Y. Allibert, N. Gondrexon, P. Boldo and S. Le Person (2013). "Experimental investigations of fouling reduction in an ultrasonically-assisted heat exchanger." *Experimental Thermal and Fluid Science* 46(Supplement C): 111-119.
- Shi, X., H. Xu and L. Yang (2017). "Removal of formation damage induced by drilling and completion fluids with combination of ultrasonic and chemical technology." *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 37: 471-478.
- Taheri-Shakib, J., H. Naderi, Y. Salimidelshad, E. Kazemzadeh and A. Shekarifard (2018). "Application of ultrasonic as a novel technology for removal of inorganic scales (KCl) in hydrocarbon reservoirs: An experimental approach." *Ultrasonics Sonochemistry* 40: 249-259.
- Takasaki, M., Y. Maruyama and T. Mizuno (2007). Resonance Frequency Tracing System for Langevin Type Ultrasonic Transducers. 2007 International Conference on Mechatronics and Automation.
- Xu, D., J. Deng, L. Weijun, C. Li and L. Bai (2015). Ultrasonic batch processing of ultra heavy oil for viscosity reduction on the industrial scale. 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS).
- Xu, J., H. Li and B. You (2009). Design of ultrasonic scaler based on embedded microcontroller. 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments.
- Yan, M., P. Zheng, X. Gao, J. Lin and Y. Li (2010). Temperature field computation of giant magnetostrictive transducers. 2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering.
- Yutaka, M., T. Masaya, K. Tomonori and M. Takeshi (2007). Application of ultrasonic dental scaler for diagnosis. 2007 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics.

Zhang, J. and Y. Li (2017). "Ultrasonic vibrations and coal permeability: Laboratory experimental investigations and numerical simulations." *International Journal of Mining Science and Technology* 27(2): 221-228.





ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา

Nuttakorn Pukseesang, Samran Santalunai, Thanaset Thosdeekoraphat, Chanchai Thongsopa. (2018). **Experiment and optimization of magnetostrictive for long time operation to find amplitude of vibration and thermal limit.** The 5th International Conference on Industrial Engineering and Applications 26-28 April, 2018.

Nuttakorn Pukseesang, Thanaset Thosdeekoraphat, Samran Santalunai, Worawut Boonpeang, Chanchai Thongsopa. (2017). **Analysis and improvement of the suitable power to magnetostrictive for reduce overheat generated by the operation of the transducer in a long time.** 11th South east asean technical university consortium symposium 13-14 march, 2017.

ณัฐฐากร พุกสีแสง, วรวุฒิ บุญเป็ง, ศุภวัฒน์ กชประดิษฐ์, ดร. ธนเสฏฐ์ ทศดิกรพัฒน์, รศ.ดร. ชชาญชัย ทองโสภณ. การหาช่วงการทำงานที่เหมาะสมของแมกนีโตสตริกทีฟทรานสดิวเซอร์สำหรับการลดคราบตะกอนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ECTI-CARD 2016 ครั้งที่ 8. 27 – 29 กรกฎาคม 2559.

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐฐากร พุกสีแสง เกิดเมื่อวันที่ 11 มิถุนายน พ.ศ. 2535 ภูมิลำเนาเดิมอยู่บ้านเลขที่ 13/1 หมู่ 2 ตำบลโปร่งตาลอง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา 30130 จบระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา ปีการศึกษา 2554 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2558 และเมื่อ พ.ศ. 2558 ในปีเดียวกันได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการทุน OROG



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี