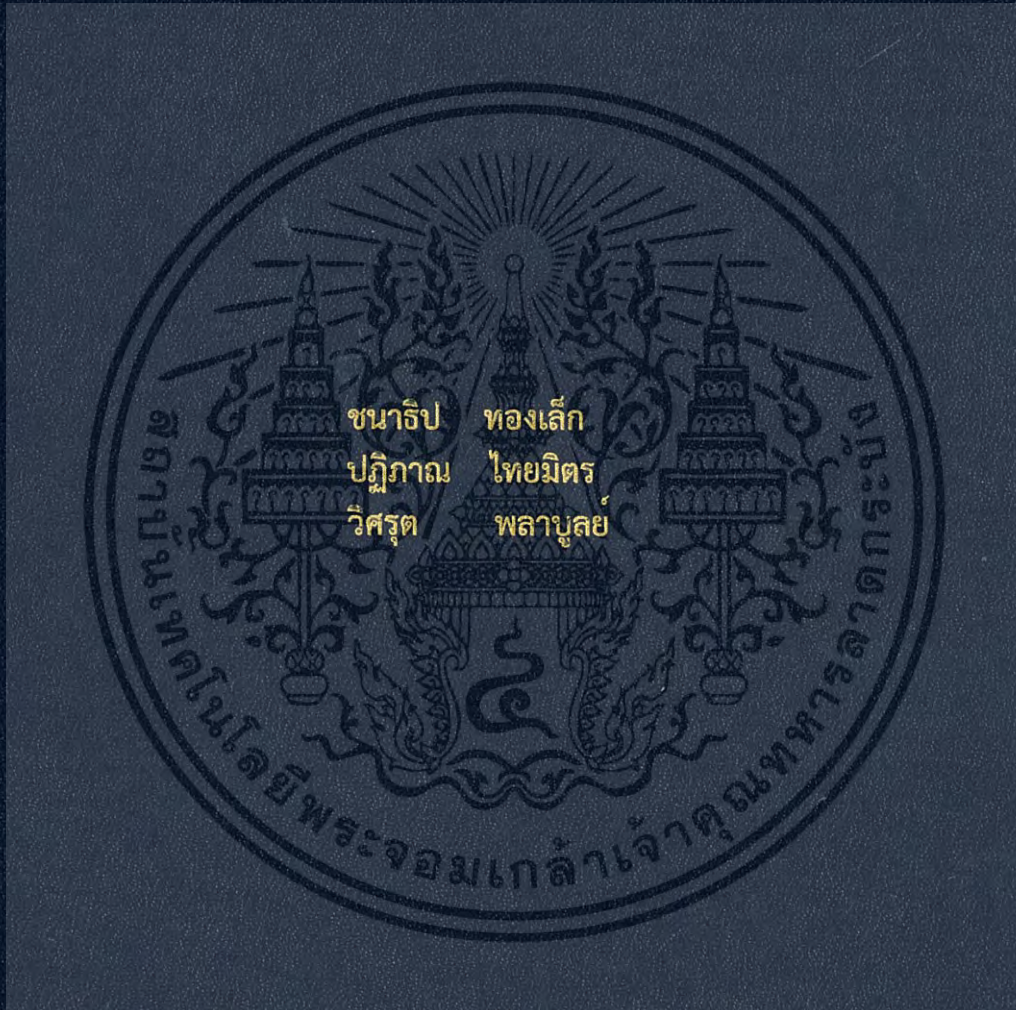


การศึกษาการวัดความหนืดของไหลโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก
A STUDY OF LIQUID VISCOSITY MEASUREMENT USING
PIEZOELECTRIC



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

การศึกษาการวัดความหนืดของไหลโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก
A STUDY OF LIQUID VISCOSITY MEASUREMENT USING
PIEZOELECTRIC



บ.๐๐๒๖๖๐๓๘

TB00220

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF LIQUID VISCOSITY MEASUREMENT USING
PIEZOELECTRIC



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FUFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาการวัดความหนืดของไหลโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก

A STUDY OF LIQUID VISCOSITY MEASUREMENT USING PIEZOELECTRIC

ผู้จัดทำ

นายชนาธิป ทองเล็ก 57010243

นายปฏิภาณ ไทยมิตร 57010715

นายวิศรุต พลาบุญย์ 57011191




.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดอน อิศรากร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาการวัดความหนืดของไหลโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก

โดย

นายชนาธิป	ทองเล็ก	57010243
นายปฏิภาณ	ไทยมิตร	57010715
นายวิศรุต	พลาบุลย์	57011191

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดอน อิศรากร

ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ปริศณานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ การศึกษาการวัดความหนืดของเหลวโดยใช้เพียโซอิเล็กทริก จุดมุ่งหมายของโครงการนี้คือ เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกกับไมโครคอนโทรลเลอร์ วัดปริมาณความหนืดของของเหลว โดยอาศัยปรากฏการณ์การเพียโซอิเล็กทริกแบบย้อนกลับและการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ที่มีต่อความหนืดแล้วทำการทดลองเพื่อทดสอบความเป็นไปได้ของเทคนิคนี้ ทำการทดลองโดยประยุกต์ใช้วงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สั่นพ้องและออกแบบเซนเซอร์วัดความหนืด โดยทดลองกับน้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ต่อเข้ากับวงจรกำเนิดสัญญาณความถี่สั่นพ้องนั้น มีการเปลี่ยนแปลงความถี่จริงเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสัมผัสกับของเหลวที่มีความหนืดที่แตกต่างกัน โดยยิ่งความหนืดของน้ำเชื่อมมีความหนืดมากขึ้นความถี่สั่นพ้องบนวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะลดลง จึงสรุปได้ว่าการทดลองนี้เป็นแนวทางในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบในการวัดความหนืดของของเหลว เพื่อใช้ประโยชน์ในภาคอุตสาหกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF LIQUID VISCOSITY MEASUREMENT USING PIEZOELECTRIC

By

Mr. Chanathip Thonglek 57010243

Mr. Patiphan Thaimit 57010715

Mr. Visarut Plaboon 57011191

Advisor

Asst. Prof. Dr. Don Isarakorn

Academic Year 2017

ABSTRACT

This thesis presents the study of the viscosity measurement of liquid using the piezoelectric reverse effect. The viscosity measuring strategy is based on the shifted resonant frequency. The pierce oscillator circuit with piezoelectric probe is designed and realized. In the experiment, the measuring probe is putted into the syrup with various viscosity. As the results, the viscosity of liquid is inverse proportional to the resonant frequency of piezoelectric probe.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความกรุณาอย่างสูงของผู้มีพระคุณหลายท่านที่กรุณาแก่คณะผู้จัดทำอย่างเอาใจใส่ยิ่งตลอดมา

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาบัตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดอน อิศรากร อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือ ชี้แนะแนวทางในการทำปริญญาบัตร คอยติดตามความคืบหน้า รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการทำการทดลองมาโดยตลอด คณะผู้จัดทำซาบซึ้งและขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณนายศุภวัฒน์ ชัยสวัสดิ์ ที่คอยให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ รวมถึงตอบข้อสงสัยต่างๆ ในทุกขั้นตอนของการทดลอง ตลอดจนตรวจสอบ แก้ไขปรับปรุงจุดบกพร่องต่างๆ ด้วยความเต็มใจและเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด ทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ในการทำการทดลอง คอยแนะแนวทางในการนำเสนอผลงาน และการทำเล่มปริญญาบัตร

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจอันสำคัญยิ่ง ที่ให้ความรัก ความห่วงใย การอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา อีกทั้งยังเป็นแรงใจที่ทำให้มีความตั้งใจอดทน เพียรพยายามที่จะก้าวต่อไป รวมตลอดทั้งบุคคลที่ให้ความช่วยเหลือต่างๆ แก่คณะผู้จัดทำ แม้มิได้เอ่ยนามในที่นี้ แต่ยังคงจำไว้ไม่ลืมเลือนตลอดไป

คณะผู้จัดทำ

นายชนาธิป ทองเล็ก

นายปฏิภาณ ไทยมิตร

นายวิศรุต พลาบุลย์

สารบัญ

	หน้า
หน้าบทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญานิพนธ์	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการการศึกษา	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความหนืด	3
2.2 ชนิดและลักษณะการไหลของของไหล	4
2.2.1 ของไหลแบบนิวโตเนียน	4
2.2.2 ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน	5
2.3 ปรากฎการณ์เพียโซอิเล็กทริก	8
2.4 การสั่นพ้อง	9
บทที่ 3 การทดลองการวัดความหนืดด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	11
3.1 การเลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก	11
3.2 เทคนิคการสร้างความถี่สั่นพ้องสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก	13
3.3 วิธีการทดลองการวัดความหนืด	16
3.4 วิธีค้นหาขีดจำกัดการตรวจวัด	19

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	21
4.1 ผลการเปรียบเทียบความถี่สัญญาณ	21
4.1.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ 18 มิลลิเมตร	21
4.1.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz	23
4.1.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz	24
4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความถี่สัญญาณจากวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์	26
4.3 การทดลองหาขีดจำกัดการตรวจหา	28
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	30
5.1 สรุปผลการทดลอง	30
5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้	30
5.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการนี้	30
5.4 แนวทางในการพัฒนา	31
เอกสารอ้างอิง	32
ภาคผนวก	

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เครื่องวัดความหนืดของเหลวแบบหมุน พร้อมถังรักษาอุณหภูมิรุ่น RV-2	1
2.1 ของไหลที่อยู่ระหว่างแผ่นเรียบสองแผ่น	3
2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน	4
2.3 กราฟความหนืดในของไหลแบบนิวโตเนียนต่างชนิดกัน	5
2.4 กราฟความหนืดของไหลแบบซูโดพลาสติก	5
2.5 กราฟความหนืดของไหลแบบไดเลแทนต์	6
2.6 กราฟความหนืดของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก	6
2.7 กราฟความหนืดของไหลแบบทิโชทรอปิก	7
2.8 กราฟความหนืดของไหลแบบรีโอเพคซิก	7
2.9 โครงสร้างผลึกควอทซ์	8
2.10 แผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริกเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือน	9
2.11 ลำโพงแบบเพียโซที่ใช้ในสมาร์ทโฟน	9
2.12 โหมดการสั่นต่างๆ ของวัสดุรูปแผ่นดิสก์	10
2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอิมพีแดนซ์	10
3.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบสำหรับวัดความหนืด	11
3.2 เครื่อง Impedance Analyzer รุ่น Bode 100 ยี่ห้อ Omicron	12
3.3 หน้าต่างโปรแกรม Bode Analyzer Suite ใช้ควบคู่กับเครื่อง Bode 100	12
3.4 วงจร Pierce Oscillator	13
3.5 หลักการทำงานของวงจร Pierce Oscillator	13
3.6 ไอซี Not-gate HEF 4069-UBP	14
3.7 วงจร Pierce Oscillator เพิ่ม Not-Gate	14
3.8 ทดลองวงจร Pierce Oscillator	15
3.9 สัญญาณเอาต์พุต U1 ในวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์	15
3.10 สัญญาณเอาต์พุต U2 ในวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์	16
3.11 น้ำเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง	16
3.12 ความหนืดของน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	17
3.13 ความหนืดของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส	18
3.14 การควบคุมระยะยะจวมของเซนเซอร์เพียโซ	19

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.15 วงจรเร็กกูเลเตอร์ LM317T	19
3.16 Agilent 34411A 6 1/2 Digit Enhanced Digital Multimeter	20
4.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ขนาด 18 มิลลิเมตร	21
4.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ขนาด 18 มิลลิเมตร หลังเคลือบกันน้ำ	22
4.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ขนาด 18 มิลลิเมตร ที่เคลือบกันน้ำขณะจุ่มลงในน้ำ	22
4.4 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz	23
4.5 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz ที่เคลือบกันน้ำขณะจุ่มในน้ำ	24
4.6 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz	24
4.7 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz ที่เคลือบกันน้ำขณะจุ่มในน้ำ	25
4.8 เซนเซอร์เพียโซหมายเลข 1 และ 2	26
4.9 กราฟค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไปตามความหนืดของเพียโซหมายเลข 1	27
4.10 กราฟค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไปตามความหนืดของเพียโซหมายเลข 2	27
4.11 กราฟ Resonant Frequency Fluctuations	29

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ความหนืดของน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส	17
4.1 ความถี่สั่นพ้องของเซนเซอร์ก่อนจุ่มและหลังจุ่มลงในของเหลวที่ความหนืดต่างๆ	26
4.2 ตารางบันทึกผลความถี่เริ่มต้นและความถี่ขณะจุ่มลงในน้ำกลั่น	28
4.3 ผลการคำนวณหาขีดจำกัดการตรวจวัด	29



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญปริญญานิพนธ์

การวัดค่าความหนืดของของเหลวมีความสำคัญในวงการอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็น การแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเลียม อุตสาหกรรมเคมี และอื่นๆ เครื่องวัดความหนืดจึงมีความหลากหลายและถูกออกแบบให้เหมาะกับของเหลวประเภทต่างๆ ที่มีลักษณะของความหนืดที่แตกต่างกัน ตั้งแต่แบบกลไกที่ผู้ใช้ต้องทำตามขั้นตอนวิธีในการทดสอบความหนืด ซึ่งทำให้ใช้เวลานาน และยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอันเป็นผลมาจากผู้ใช้งาน จนถึงเครื่องวัดความหนืดประเภทดิจิทัลที่ทำงานโดยอัตโนมัติ เพียงแค่ผู้ใช้เติมของเหลวตัวอย่างที่ต้องการทดสอบลงในตัวเครื่อง แต่ในเครื่องวัดทุกแบบนี้ไม่อาจปฏิเสธได้ว่าอุณหภูมิของของเหลวนั้น มีผลต่อค่าความหนืดหากกระบวนการในการวัดค่าความหนืดใช้เวลานาน ต้องมีระบบรักษาอุณหภูมิของเหลวตัวอย่างให้คงที่เพื่อให้ได้ความแม่นยำสูงสุด ซึ่งมักจะเป็นระบบรักษาอุณหภูมิโดยใช้ของเหลวอุณหภูมิคงที่ไหลผ่านรอบส่วนบรรจุสารตัวอย่าง จากรูปที่ 1.1 กรอบสีแดงคือถังของเหลวรักษาอุณหภูมิ ส่วนในกรอบสีเขียวคือเครื่องวัดความหนืดแบบหมุน



รูปที่ 1.1 เครื่องวัดความหนืดของเหลวแบบหมุน พร้อมทั้งรักษาอุณหภูมิรุ่น RV-2

จากองค์ประกอบที่กล่าวมาข้างต้น เครื่องวัดความหนืดที่มีขายในท้องตลาดจึงมีราคาสูงและยังพกพาไม่ได้ จึงมีความสนใจในการศึกษาแนวคิดการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในการวัดความหนืดของเหลว เนื่องจากมีความเป็นไปได้จากการใช้ความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นต่อความหนืดของของเหลว แล้วในการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเป็นเซนเซอร์สำหรับวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเหน็ดของของเหลวยังสามารถพัฒนาให้มีขนาดเล็ก มีส่วนประกอบที่เรียบง่าย และหากใช้วิธีที่เหมาะสมจะสามารถวัดค่าความเหน็ดของของเหลวได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และต่อเนื่อง รวมถึงสามารถแก้ไขปัญหาด้าน ขนาด น้ำหนัก และส่วนประกอบจำนวนมากของเครื่องวัดความเหน็ดได้ จึงมีความสนใจในการศึกษาการวัดความเหน็ดของเหลว โดยใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกและปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก รวมถึงการนำความรู้ที่ศึกษานี้มาสร้างเป็นชิ้นงานต้นแบบที่สามารถวัดความเหน็ดได้จริง

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. ศึกษาและสืบค้นหลักการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก
2. ศึกษาและสืบค้น ลักษณะและพฤติกรรมความเหน็ดของของเหลวชนิดต่างๆ
3. ประยุกต์วงจรไฟฟ้าและการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ในการสร้างความถี่สั่นพ้องแก่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้มีความซับซ้อนน้อย มีขนาดเล็ก และต้นทุนต่ำ
4. ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องกับความเหน็ดของเหลว
5. สร้างต้นแบบชิ้นงานที่สามารถวัดความเหน็ดได้จริง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาค้นคว้าผลตอบสนองของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกต่อของเหลว การประยุกต์ใช้วงจรไฟฟ้าสร้างความถี่สั่นพ้องวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อใช้ในการวัดค่าความเหน็ดของเหลว และในการศึกษานี้จะเน้นการใช้ระบบที่มีความซับซ้อนน้อยและต้นทุนต่ำ มีการประมวลผลและแสดงผลที่เหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาเกี่ยวกับความเหน็ดของของเหลวชนิดต่างๆ
2. ศึกษาการใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อเลือกใช้งานตามความเหมาะสม
3. ศึกษาวงจรไฟฟ้า เพื่อสร้างและวัดค่าความถี่สั่นพ้อง
4. เขียนโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อรับและแปลงค่าสัญญาณเอาต์พุตจากเพียโซอิเล็กทริกเป็นความเหน็ดของของเหลว รวมถึงแสดงผลผ่านหน้าจอดีวีดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

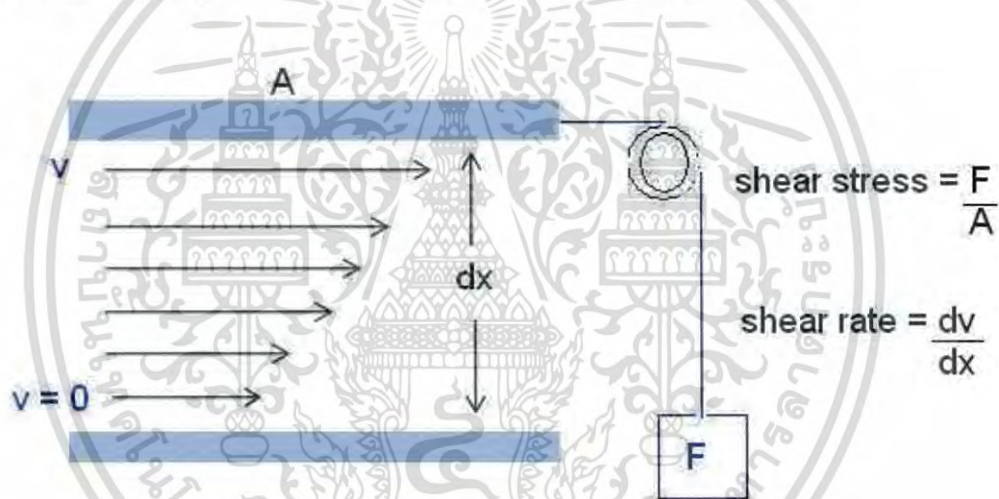
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความหนืด

ความหนืด (Viscosity) คือ ลักษณะของความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหล เมื่อมีแรงกระทำของไหลนั้น ดังนั้นของไหลที่มีความหนืดสูงจะมีค่าความต้านทานต่อการไหลสูง และของไหลที่มีความหนืดต่ำจะมีความต้านทานต่อการไหลต่ำ[1-2]

จากนิยามความหนืดข้างต้นนั้นการวัดความหนืด จึงทำได้โดยการวัดแรงต้านทานการไหล ภายในของไหล พิจารณาจากรูปที่ 2.1 ของไหลจะอยู่ระหว่างแผ่นเรียบสองแผ่นโดยมีแรงกระทำ(F) กับแผ่นเรียบด้านใดด้านหนึ่ง ในขณะที่อีกแผ่นจะหยุดนิ่งอยู่กับที่ จะทำให้เกิดแรงต้านเกิดขึ้นระหว่างของไหลกับแผ่นเรียบที่ถูกแรงกระทำเรียกแรงนี้ว่า “แรงเฉือน (Shear Force)”



รูปที่ 2.1 ของไหลที่อยู่ระหว่างแผ่นเรียบสองแผ่น[21]

ซึ่งผลของแรงจะเกิด “แรงเค้นเฉือน (Shear Stress)” คือ แรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) ที่ทำให้แผ่นเรียบเคลื่อนที่ เมื่อกำหนดให้แผ่นเรียบเคลื่อนที่มีพื้นที่ A ตารางเซนติเมตร และเมื่อแบ่งชั้นของไหลดังกล่าวแล้วจะทำให้ของไหลที่ติดกับแผ่นเคลื่อนที่มีความเร็วสูงสุดในขณะความเร็วของไหลในชั้นถัดมาจะลดลงจนของไหลที่ติดกับแผ่นหยุดนิ่งนั้นจะไม่มีความเร็ว และในรูปที่ 2.1 นี้อัตราส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างความแตกต่างความเร็วของไหลที่ติดกับแผ่นเคลื่อนที่กับแผ่นที่หยุดนิ่ง (dv) กับระยะห่างของแผ่นเรียบทั้งสอง (dx) นี้ จะเรียกว่า “อัตราเฉือน (Shear Rate)” และอัตราเฉือนแปรผันตรงกับแรงเฉือนคือ เมื่อให้ของไหลมีความหนืดสูงแรงเฉือนก็ต้องสูงขึ้น เพื่อให้อัตราเฉือนเท่าเดิมได้ซึ่งมีความคล้ายกับกฎข้อที่สองของนิวตัน ($F = ma$) จะได้ตั้งสมการที่ (2.1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F/A = \eta \left(dv/dx \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ η คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (Coefficient of Viscosity) หรือ “ความหนืด” ดังนั้นจึงสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\eta = F'/S \quad (2.2)$$

เมื่อ F' คือ แรงต่อหน่วยพื้นที่ (F/A) มีหน่วยเป็น Pascal (Pa)

S คือ อัตราเฉือน มีหน่วยเป็น Sec^{-1}

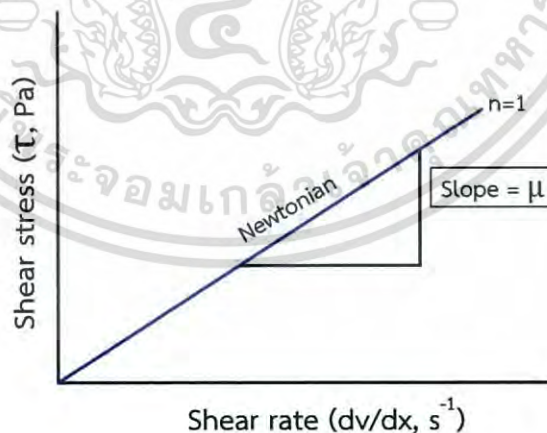
ดังนั้นแล้วหน่วยของความหนืด คือ Pascal . Sec หรือเรียกอีกอย่างว่า Poise

2.2 ชนิดและลักษณะการไหลของของไหล

จากหัวข้อที่ 2.1 ความหนืดจะเปลี่ยนไปตามลักษณะการไหลของของไหลโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก[3-7] ดังนี้

2.2.1 ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian Fluid)

เป็นลักษณะการไหลที่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตันคือ ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งของไหลมีค่าความหนืดคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราเฉือน มีกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือนมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 2.2

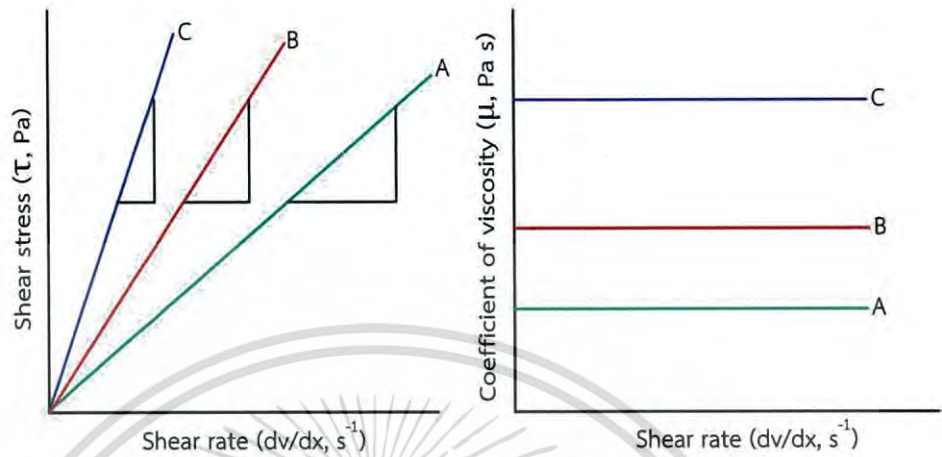


รูปที่ 2.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับอัตราเฉือน

ซึ่งค่าความชันของเส้นกราฟจากรูปที่ 2.2 นั้นคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดในรูปที่ 2.3 จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือนกับความเค้นเฉือนในของไหลที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์ความหนืดในของไหลต่างกันด้วย ของไหลแบบนิวโตเนียนนี้จะเป็นสารเนื้อเดียว ไม่มีอนุภาคแขวนลอย เช่น น้ำ น้ำมัน น้ำเชื่อม น้ำเกลือ เป็นต้น



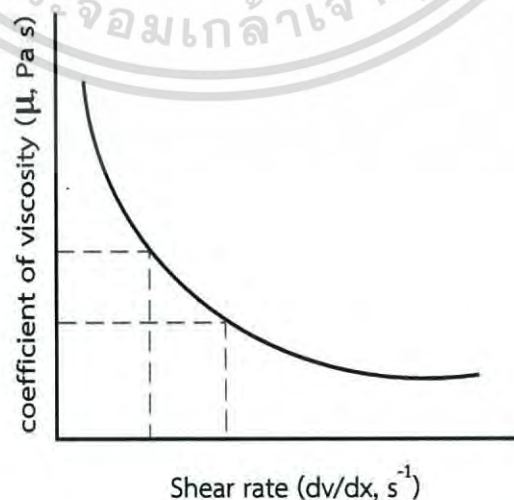
รูปที่ 2.3 กราฟความหนืดในของไหลแบบนิวโตเนียนต่างชนิดกัน

2.2.2 ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian Fluid)

เป็นลักษณะการไหลที่ไม่เป็นไปตามการสันนิษฐานของนิวตัน คือ ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งของไหลจะมีค่าความหนืดไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับอัตราเฉือน ซึ่งของไหลแบบนอนนิวโตเนียนแบ่งออกเป็น 5 แบบดังนี้

2.2.2.1 ของไหลแบบซูโดพลาสติก (Pseudoplastic Fluid)

เป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ซึ่งมีสมบัติสำคัญ คือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนจะทำให้ความหนืดของไหลลดลง พฤติกรรมแบบนี้แสดงสมบัติเป็น “Shear Thinning” ดังรูปที่ 2.4 ของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบซูโดพลาสติก เช่น เจลใส่ผม หมึกปากกาลูกกลิ้ง สี เป็นต้น

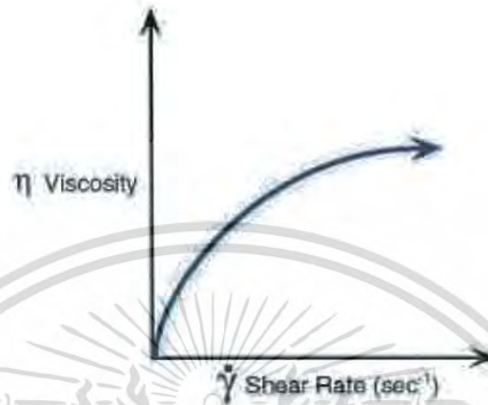


รูปที่ 2.4 กราฟความหนืดของไหลแบบซูโดพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในพ็อกเก็ตคอมพิวเตอร์นี้ ไม่อนุญาตให้นำไปประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 ของไหลแบบไดเลแทนต์ (Dilatant Fluid)

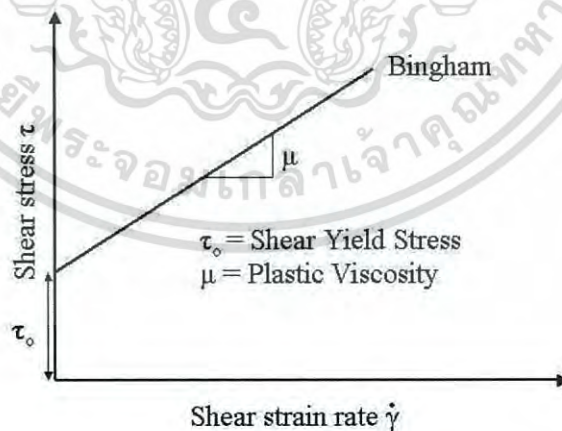
เป็นของไหลนอนนิวโตเนียน ซึ่งมีสมบัติสำคัญคือ เมื่อเพิ่มอัตราเฉือนจะทำให้ความหนืดของไหลเพิ่มขึ้น พฤติกรรมแสดงสมบัติเป็น “Shear Thickening” ดังรูปที่ 2.5 ของเหลวที่มีพฤติกรรมการไหลแบบไดเลแทนต์นี้ เช่น น้ำแป้ง น้ำไซซ้อ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 กราฟความหนืดของไหลแบบไดเลแทนต์

2.2.2.3 ของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก (Bingham Plastic Fluid)

ของไหลประเภทนี้จะเกิดลักษณะการไหลแบบนิวโตเนียนได้ เมื่อมีแรงกระทำสูงพอ ซึ่งแรงดังกล่าวต้องมากกว่าแรงเค้นเฉือนที่จุดๆ หนึ่ง ดังในรูปที่ 2.6 ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ได้แก่ ยาสีฟัน มายองเนส น้ำยาทาเล็บ โยเกิร์ต เป็นต้น

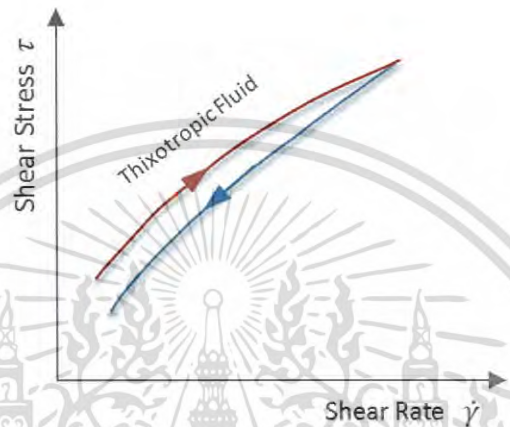


รูปที่ 2.6 กราฟความหนืดของไหลแบบบิงแฮมพลาสติก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.4 ของไหลแบบทีโซทรอปิก (Thixotropic Fluid)

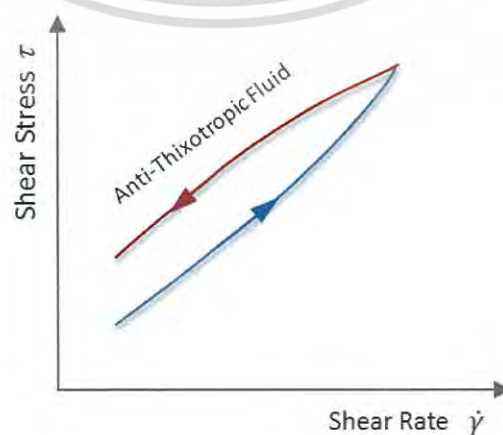
คือ ของไหลที่มีค่าความหนืดลดลงตามระยะเวลา การทดสอบของไหลประเภทนี้ ต้องทำแบบวนรอบ โดยการเพิ่มอัตราเฉือนขึ้นตามลำดับจนถึงจุดหนึ่ง แล้วจึงลดอัตราเฉือนลงตามลำดับ ซึ่งเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ความเค้นเฉือนก็จะเพิ่มขึ้น เหมือนพฤติกรรมที่พบในของเหลวแบบซูโดพลาสติก แต่เมื่อลดอัตราเฉือนลง ความเค้นเฉือนจะลดลงจากเดิมในช่วงที่เพิ่มความเค้นเฉือนก่อนหน้า ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 กราฟความหนืดของไหลแบบทีโซทรอปิก

2.2.2.5 ของไหลแบบรีโอเพคซิก (Rheopectic Fluids)

คือ ของไหลที่มีค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามระยะเวลา การทดสอบของไหลประเภทนี้ ต้องทดสอบแบบวนรอบ โดยการเพิ่มอัตราเฉือนขึ้นตามลำดับ จนถึงจุดหนึ่งจึงลดอัตราเฉือนลงตามลำดับ ซึ่งเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ความเค้นเฉือนจะเพิ่มขึ้น เหมือนพฤติกรรมที่พบในของเหลวแบบไดเลแทนต์ แต่เมื่อลดอัตราเฉือนลง ความเค้นเฉือนจะเพิ่มจากเดิมในช่วงที่เพิ่มความเค้นเฉือนก่อนหน้า ดังในรูปที่ 2.8

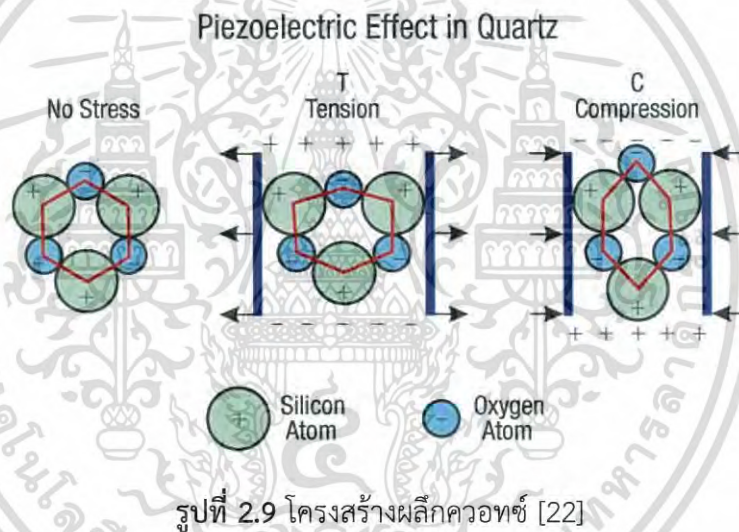


รูปที่ 2.8 กราฟความหนืดของไหลแบบรีโอเพคซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกคือ ปรากฏการณ์ของวัสดุในบางชนิดนั้นมีโครงสร้างโมเลกุลแบบมีขั้ว โดยที่อะตอมในโครงสร้างของโมเลกุลไม่สมมาตรกันทำให้เกิดอิเล็กทริกไดโพล เมื่อใส่แรงกดเข้าไปยังวัสดุทำให้โครงสร้างผลึกผิดรูป ซึ่งจะเกิดความต่างศักย์ที่ผิวสองข้างของวัสดุ และเมื่อใส่แรงดึงจะทำให้เกิดความต่างศักย์ในทิศทางตรงข้ามกับการใส่แรงกด ดังรูปที่ 2.9 ที่แสดงให้เห็นพฤติกรรมของผลึกควอทซ์ มีอะตอมของออกซิเจนเป็นประจุลบ และอะตอมของซิลิคอนที่เป็นประจุบวก เมื่อมีแรงกดมากระทำทำให้โครงสร้างผลึกเสียรูป เกิดความเค้นในเนื้อวัสดุทำให้ประจุของผลึกไม่สมมาตร และเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นระหว่างผิวทั้งสองด้านของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เรียกว่า ปรากฏการณ์เพียโซ อิเล็กทริกแบบตรง วัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ แร่ควอตซ์ แร่ทัวร์มาลีน ส่วนวัสดุสังเคราะห์ ได้แก่ เลดเซอร์โคเนียมไททาเนต (PZT) เลดไททาเนตเซอร์โคเนต และแบเรียมไททาเนต[8]



ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายทั้งแบบทางตรง (Direct Effect) และแบบย้อนกลับ (Reverse Effect) การประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในปรากฏการณ์แบบตรง เช่น อุปกรณ์เก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือนบนพื้นที่เรียกว่า แผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Tile) ดังรูปที่ 2.10 ที่แสดงโครงสร้างภายในของแผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการเก็บเกี่ยวพลังงาน โดยแผ่นพื้นนี้จะถูกติดตั้งในบริเวณที่มีผู้คนสัญจรผ่านอย่างหนาแน่นเพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวพลังงานได้มากขึ้น



รูปที่ 2.10 แผ่นพื้นเพียโซอิเล็กทริกเก็บเกี่ยวพลังงานจากแรงสั่นสะเทือน

และในการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกปรากฏการณ์แบบย้อนกลับ เช่น ลำโพงแบบเพียโซอิเล็กทริกดังรูปที่ 2.11 ทำงานโดยการป้อนไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแล้วเกิดการบิดงอและสั่นสะเทือนเป็นคลื่นเสียง เนื่องจากสามารถลดขนาดให้เล็กลงได้ และใช้กำลังขับต่ำจึงนิยมนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น สมาร์ทโฟน

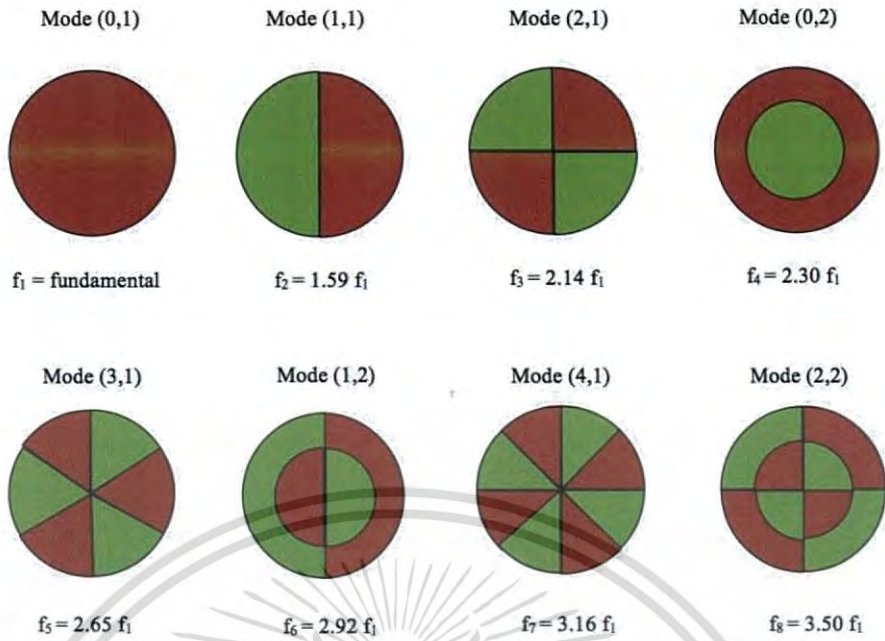


รูปที่ 2.11 ลำโพงแบบเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในสมาร์ทโฟน

2.4 การสั่นพ้อง

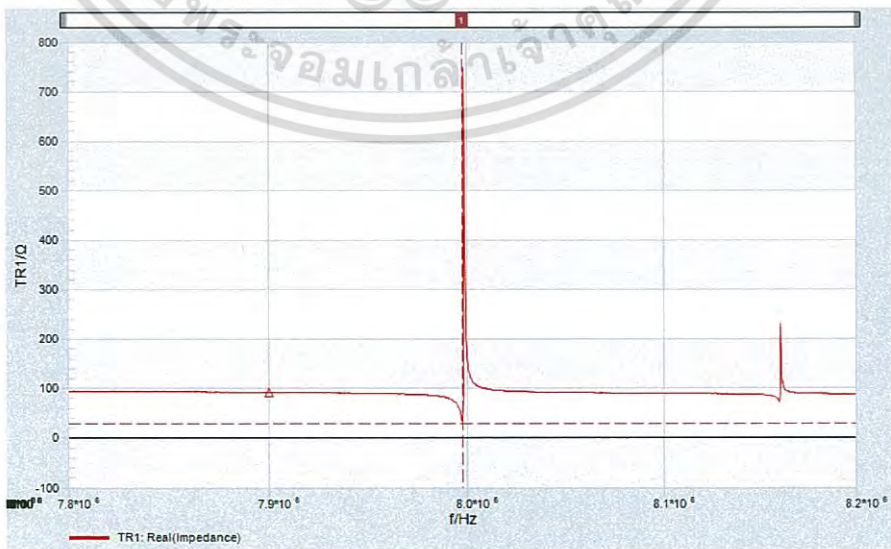
การสั่นพ้องของวัสดุเกิดจากการที่วัสดุได้รับแรงกระทำจากภายนอกเป็นจังหวะที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัสดุ หรือกระทบกับคลื่นที่มีความถี่เท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัสดุ ทำให้วัสดุเกิดการสั่นสะเทือนอย่างรุนแรงแล้วมีแอมพลิจูดสูงอย่างต่อเนื่อง ความถี่ธรรมชาติที่ทำให้เกิดการสั่นพ้องของวัสดุนี้จะถูกเรียกว่าความถี่สั่นพ้อง ซึ่งหากว่าวัสดุนั้นถูกสั่นอย่างต่อเนื่องที่ความถี่สั่นพ้องเป็นเวลานานจะทำให้เกิดการแตกหักของวัสดุได้ ในวัสดุหนึ่งชนิดอาจจะมีค่าความถี่ธรรมชาติเพียงค่าเดียวหรือหลายค่าก็ได้ โดยความถี่สั่นพ้องต่างๆ จะถูกเรียกว่าโหมด แล้วในแต่ละโหมดจะมีลักษณะการสั่นและการบิดเบี้ยวของวัสดุที่แตกต่างกัน[9] ดังรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 โหมดการสั่นต่างๆ ของวัสดุรูปแผ่นดิสก์ [23]

การวัดค่าความถี่สั่นพ้องวัสดุเพียโซอิเล็กทริกนั้นสามารถใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย แม่นยำ หลักการทำงานของเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์คือ ตัวเครื่องจะส่งสัญญาณไซน์ผ่านตัวต้านทานกำหนดค่าไว้ซึ่งต่อแบบอนุกรมกับวัสดุที่นำมาวัดค่าอิมพีแดนซ์ จากนั้นเครื่องจะทำการวัดแอมพลิจูดและเฟสที่ขาทั้งสองของวัสดุแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน ผู้ใช้เครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ต้องตั้งค่านความถี่ที่ต้องการใช้วัดอิมพีแดนซ์ เมื่อเริ่มการวัดเครื่องจะทำการเพิ่มความถี่ขึ้นอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว ค่าที่อ่านได้จากเครื่องจะถูกแสดงออกมาเป็นกราฟแมกนิจูดต่อความถี่ โดยความถี่ที่มีอิมพีแดนซ์ต่ำสุดหมายถึงความถี่สั่นพ้องของวัสดุนั้นๆ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอิมพีแดนซ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานภายในเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่โดยไม่ขอขออนุญาต การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ขออนุญาต หรือการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลองการวัดความหนืดด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ในบทนี้จะกล่าวถึงการเลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการวัดความหนืด การเลือกเทคนิคการสร้างความถี่สั่นพ้อง การทดลองวัดความหนืดด้วยเพียโซอิเล็กทริก และวิธีหาขีดจำกัดการตรวจวัดของเซนเซอร์เพียโซ

3.1 การเลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ในการเลือกใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับการวัดความหนืด เพื่อได้ผลลัพธ์จากการคำนวณสุดท้ายมีความถูกต้องไม่ผิดเพี้ยนจากการจุ่มของเหลว วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่นำมาทดสอบเพื่อวัดความหนืดประกอบไปด้วย Piezo Buzzer และ Quartz Crystal ดังรูปที่ 3.1



(ก) Piezo Buzzer

(ข) Quartz Crystal 5 MHz

(ค) Quartz Crystal 1.8 MHz

รูปที่ 3.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบสำหรับวัดความหนืด

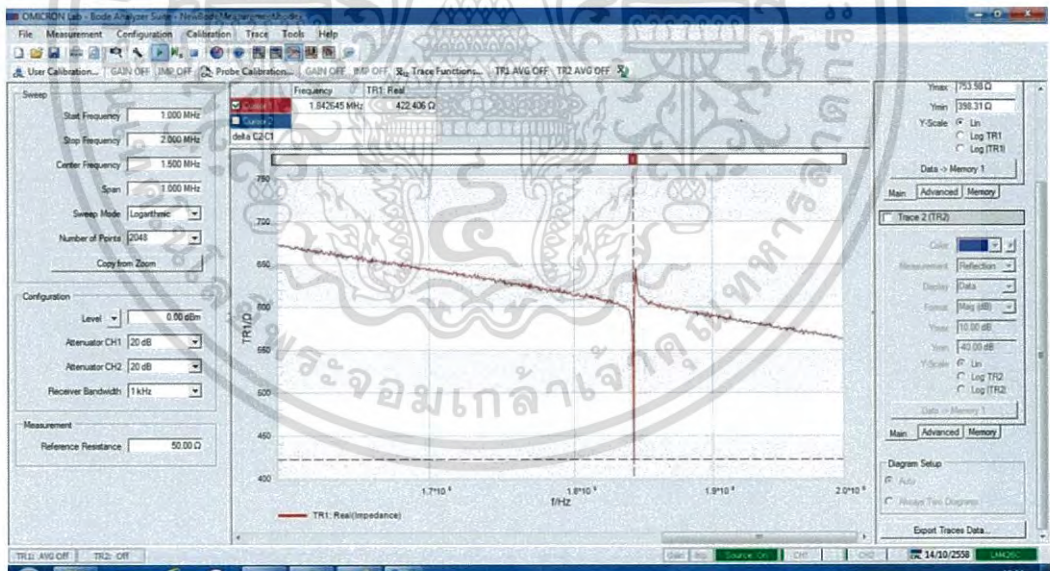
- รูปที่ 3.1(ก) Piezo Buzzer ชนิด PZT เส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และมี Substrate แผ่นทองเหลือง มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 18 มิลลิเมตรหนา 0.3 มิลลิเมตร
- รูปที่ 3.1(ข) Quartz Crystal 5 MHz ชนิด Quartz ลักษณะแผ่นวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร
- รูปที่ 3.1(ค) Quartz Crystal 1.8 MHz ชนิด Quartz มีลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาดกว้างและยาว 8 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 เครื่อง Impedance Analyzer รุ่น Bode 100 ยี่ห้อ Omicron

ลำดับถัดมาคือ การวัดค่าความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้เครื่อง Impedance Analyzer โดยเลือกใช้เครื่อง Bode 100 ของ Omicron ในรูปที่ 3.2 และศึกษาวิธีใช้งาน[10] โดยเครื่องจะวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและแสดงข้อมูลในรูปกราฟอิมพีแดนซ์ต่อความถี่บนโปรแกรม Bode Analyzer Suite ดังรูปที่ 3.3 และเปรียบเทียบคุณสมบัติการวัดความหนืดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิด ทำการทดสอบโดยการจุ่มเพียโซลงใต้น้ำกลั่น และทำการวิเคราะห์จากกราฟความถี่สั่นพ้อง ก่อนจุ่มและหลังจุ่มของเหลว

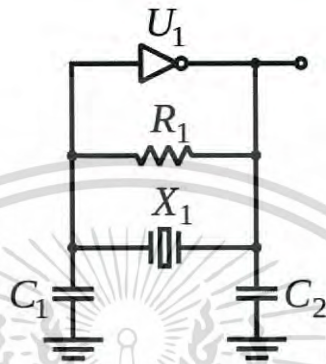


รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม Bode Analyzer Suite ใช้ควบคู่กับเครื่อง Bode 100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

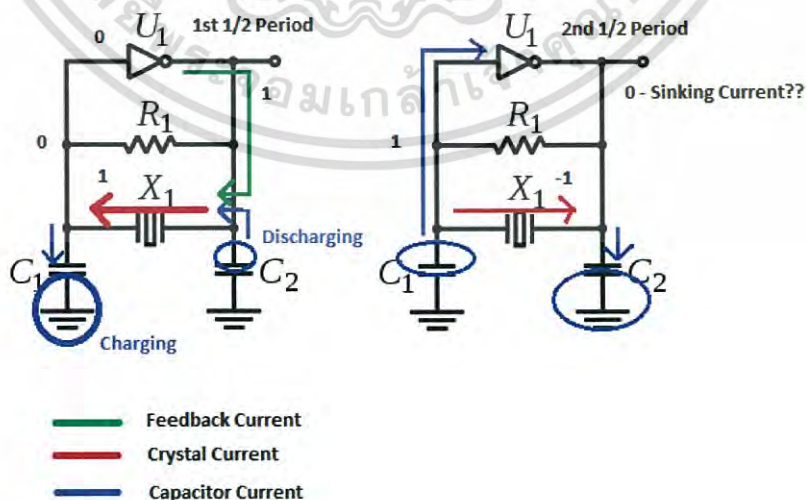
3.2. เทคนิคการสร้างความถี่สั่นพ้องสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ในหัวข้อนี้จากที่ได้ศึกษาเทคนิคการสร้างความถี่สั่นพ้องสำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมาแล้วนั้น จึงได้เลือกวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ซึ่งเป็นวงจรสำหรับสร้างความถี่สั่นพ้องของเพียโซ เพราะใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อย ตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ต้นทุนต่ำ ภายในวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ประกอบด้วย Logic Gate ตัวเดียวซึ่งเป็น Not-gate แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจร Pierce Oscillator

หลักการทำงานของวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ เป็นการกลับลอจิกไปมาโดยกระแสไหลผ่านเพียโซที่มีพฤติกรรมคล้ายตัวเก็บประจุตัวหนึ่ง เข้าไปเก็บในตัวเก็บประจุอีกด้านหนึ่ง และความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้นของวงจรนี้จะกำหนดโดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ที่เกิดความถี่สั่นพ้องด้วยตัวเพียโซเอง และทำให้วงจรนี้สร้างความถี่ได้ ณ เวลานั้น[11-13] แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 หลักการทำงานของวงจร Pierce Oscillator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.5 จะสังเกตได้ว่า ขนาดของตัวเก็บประจุนี้จะมีผลกับแอมพลิจูดของสัญญาณ โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

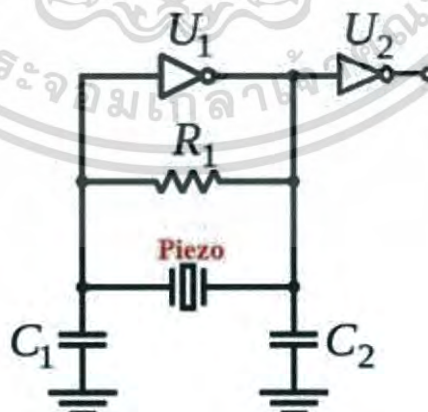
$$C_L = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (3.1)$$

C_L คือ ค่าความเก็บประจุของเพียโซ และให้ C_1, C_2 มีค่าเท่ากัน

เนื่องจากว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทรอนิกส์บางชนิดต้องใช้พลังงานในการขับมาก ซึ่งส่งผลต่อความถี่สั่นพ้องของเพียโซ เช่น เพียโซบัสเซอร์ ดังนั้นการเลือกไอซีให้เหมาะสมกับเพียโซที่ใช้ในการทดลองจึงเป็นส่วนสำคัญ เช่น HEF4069UBP ดังรูปที่ 3.6 เป็นไอซี Not-gate ที่เหมาะสมกับเพียโซบัสเซอร์[14] จึงนำมาใช้กับเพียโซบัสเซอร์ในงานวิจัยนี้



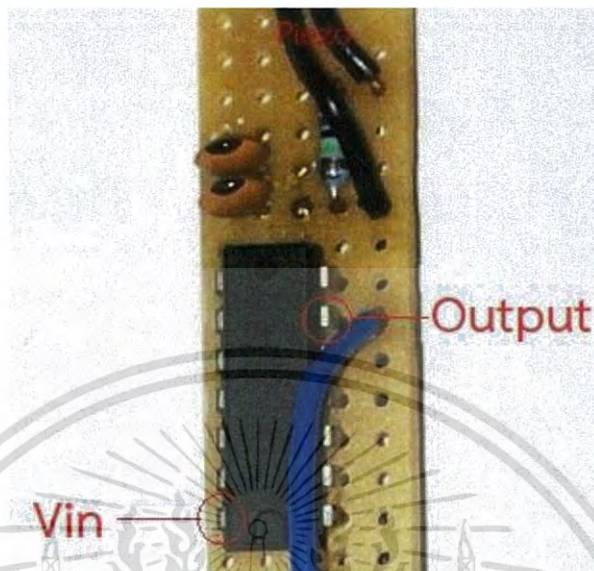
รูปที่ 3.6 ไอซี Not-gate HEF 4069 UBP



รูปที่ 3.7 วงจร Pierce Oscillator เพิ่ม Not-gate

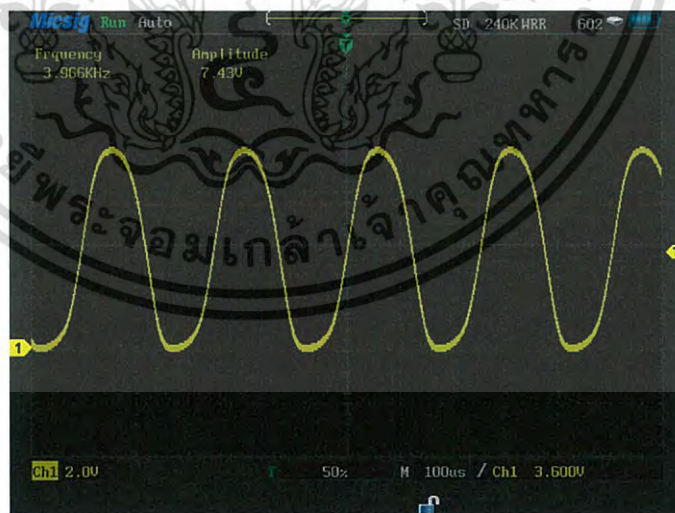
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.7 ในการทดลองนี้ได้กำหนดให้ $C_1, C_2 = 47 \text{ nF}$ และ $R_1 = 5 \text{ M}\Omega$ ก็จะได้ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นภาพของวงจรเพียซอซิลเลเตอร์ที่ใช้งานจริง



รูปที่ 3.8 ทดลองวงจร Pierce Oscillator

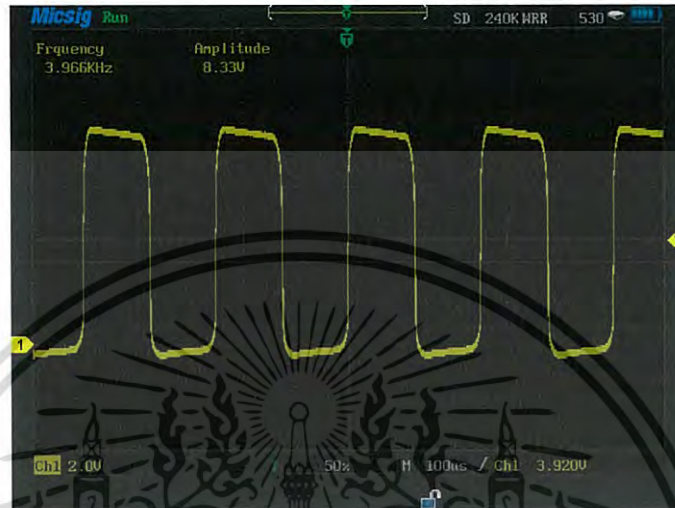
เมื่อทำการวัดสัญญาณเอาต์พุตของ U1 โดยใช้ Oscilloscope จากรูปที่ 3.7 จะได้สัญญาณรูปไซน์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 สัญญาณเอาต์พุต U1 ในวงจรเพียซอซิลเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเพื่อให้ไมโครคอนโทรลเลอร์นับความถี่ได้อย่างแม่นยำ จึงต้องแปลงสัญญาณไซน์ให้เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ซึ่งวิธีแปลงสัญญาณมีหลากหลายวิธี จึงได้เลือกใช้ลอจิกเกตที่มีเหลืออยู่ในไอซี HEF4069UBP มารับสัญญาณเอาต์พุตของ U1 ดังนั้นเมื่อวัดสัญญาณเอาต์พุต Not-gate ของ U2 จะได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 สัญญาณเอาต์พุต U2 ในวงจรเพียซออสซิลเลเตอร์

3.3. วิธีการทดลองการวัดความหนืด

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองที่ทำการวัดค่าความต่างของความถี่สั่นพ้องของเพียโซ ระหว่างก่อนจุ่มและหลังจุ่มลงในของเหลวทดสอบที่มีความหนืดต่างกัน ด้วยอุปกรณ์ต้นแบบซึ่งใช้การหาความถี่สั่นพ้องด้วยวงจรเพียซออสซิลเลเตอร์ โดยการใช้ น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน ความหนืดของน้ำเชื่อมจะแตกต่างกันตามความเข้มข้นนั้น

เริ่มการทดลองโดยเตรียมน้ำเชื่อม 8 ระดับแต่ละระดับมีความเข้มข้นของปริมาณน้ำตาลในหน่วยกรัมต่อน้ำ 100 มิลลิลิตร หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า บริกซ์ (%Brix) ที่ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70 ดังรูปที่ 3.11 และความเข้มข้นต่อความหนืด[15-16] จะเป็นดังตารางที่ 3.1



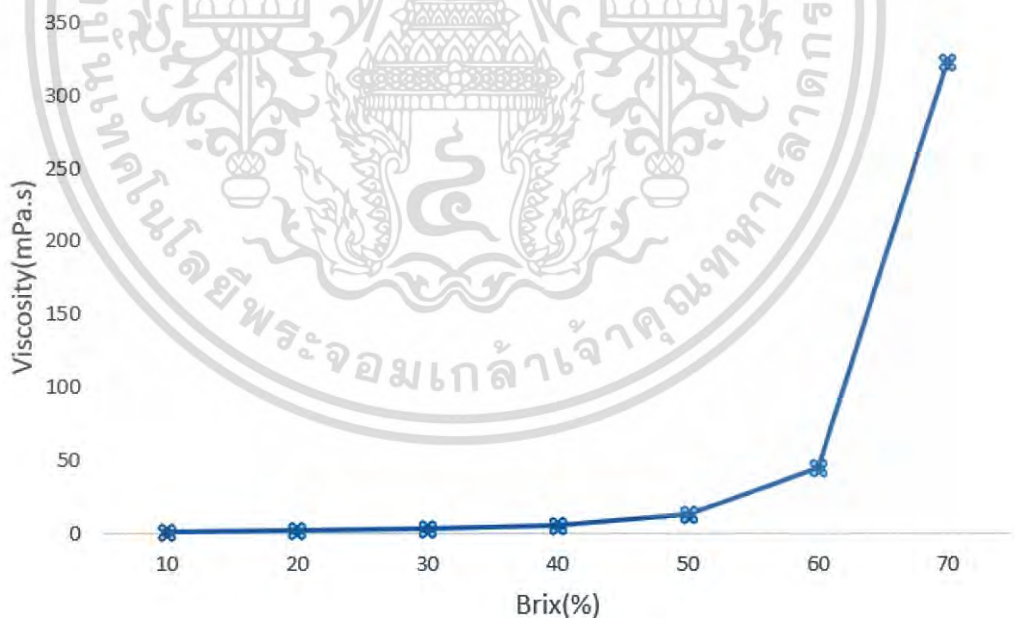
รูปที่ 3.11 น้ำเชื่อมที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ความหนืดของน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

%Brix	Viscosity (mPa.s)
0	0.890
10	1.167
20	1.711
30	2.784
40	5.270
50	12.599
60	44.415
70	321.239

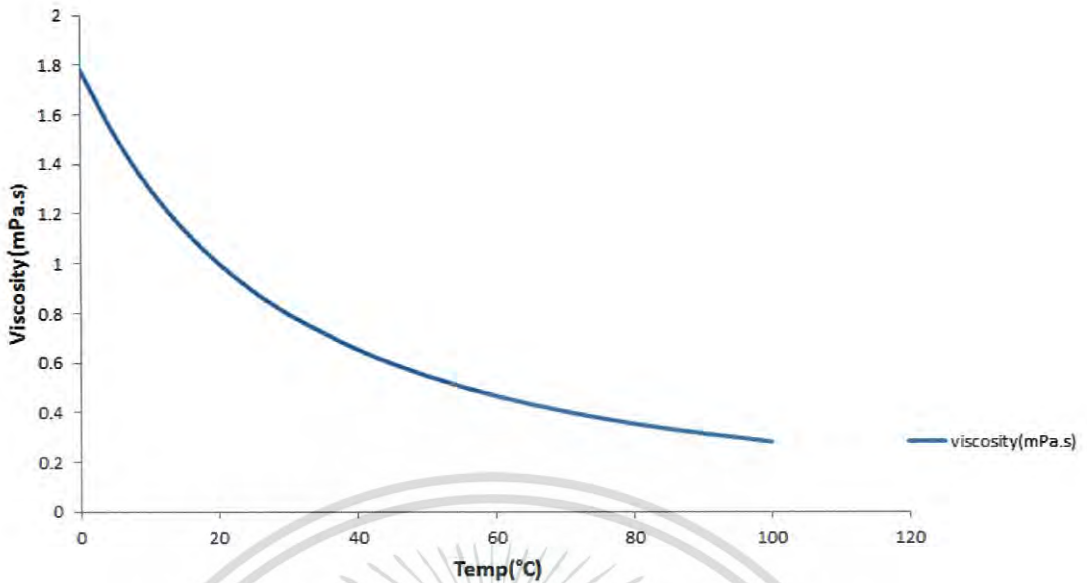
จากตารางที่ 3.1 นี้จึงสามารถแสดงเป็นกราฟความเข้มข้นต่อความหนืดได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ความหนืดของน้ำเชื่อมที่ความเข้มข้นแตกต่างกันในอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

ในขณะที่อุณหภูมิของเหลวก็สามารถส่งผลกับความหนืดของของเหลวนั้นได้ด้วยอย่างเช่น ความหนืดของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่างๆ [17] ดังรูปที่ 3.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



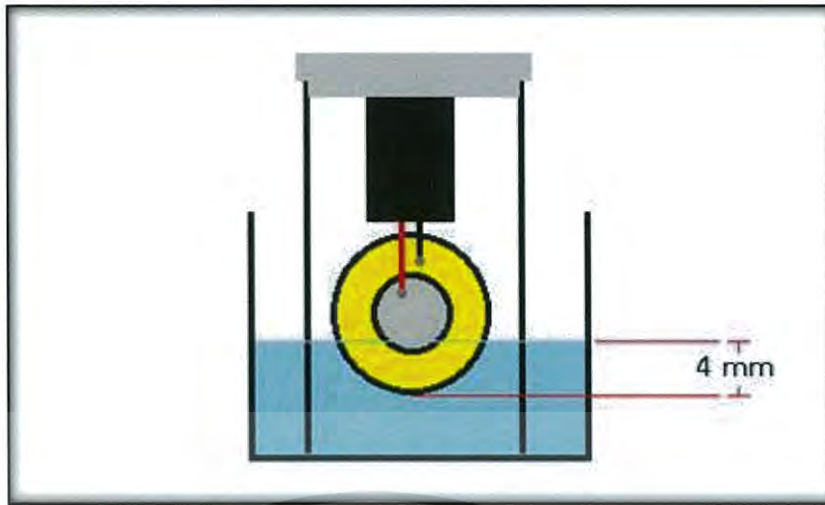
รูปที่ 3.13 ความหนืดของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส

จากการศึกษาพบว่าระยะจุ่มของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีผลต่อความถี่สั่นพ้อง เนื่องจากระดับของเหลวที่ต่างกันจะมีแรงดันของของเหลวที่กระทำต่อแผ่นเพียโซแตกต่างกันด้วย [18-19] จึงจำเป็นต้องกำหนดระยะจุ่มเซนเซอร์เพียโซดังรูปที่ 3.14 ขั้นตอนถัดมาได้ทำการจุ่มเซนเซอร์เพียโซ 2 ตัวที่ออกแบบสำหรับการจุ่มลงในน้ำเชื่อม เพื่อหาค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนแปลงไป และเปรียบเทียบค่าความถี่สั่นพ้องของเซนเซอร์เพียโซระหว่างก่อนจุ่มลงในของเหลว (f_1) หลังจุ่มลงในของเหลว (f_2) รวมถึงการจุ่มลงในของเหลวที่มีค่าความหนืดต่างกันแล้วบันทึกผล

โดยในการทดลองนี้มีปัจจัยที่ต้องควบคุมต่างๆ ดังนี้

1. กำหนดอุณหภูมิของน้ำเชื่อมขณะทำการทดสอบให้มีอุณหภูมิเท่ากับที่ 25°C
2. กำหนดระยะจุ่มของเซนเซอร์ลงในของเหลวที่ 4 มิลลิเมตร
3. แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับเซนเซอร์เพียโซ กำหนดแรงดันไว้ที่ 8 โวลต์
4. น้ำเชื่อมที่ใช้ทดสอบคือ น้ำเชื่อมที่มีบริกซ์ ที่ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 70

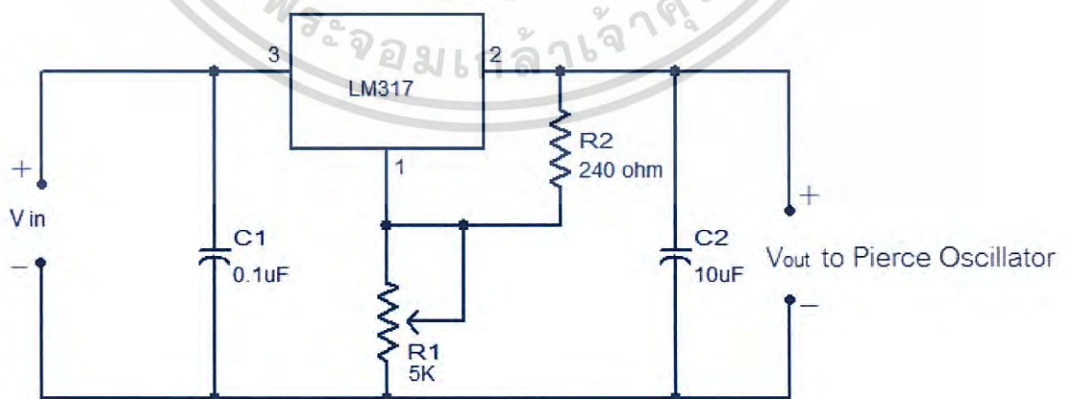
ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 การควบคุมระยะจมน้ำของเซนเซอร์เพียโซ

3.4 การหาขีดจำกัดการตรวจวัด

จากการควบคุมปัจจัยในหัวข้อที่ 3.3 พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้วัสดุเพียโซอิเล็กทรอนิกส์นั้นมีผลกับความถี่ จึงได้กำหนดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงไว้ 8 โวลต์ และเนื่องจากว่าแรงดันไฟฟ้ามีผลต่อความถี่สั่นพ้องของเพียโซขณะจุ่มวัดความหนืด ดังนั้นจึงต้องควบคุมแรงดันให้คงที่มากที่สุด โดยได้เลือก Linear Regulator ที่มีความเที่ยงตรงสูงคือ ไอซี LM317T มาเป็นตัวควบคุมแรงดันสำหรับการทดลองนี้ โดย LM317 นี้สามารถกำหนดแรงดันขาออกได้จากวงจรดังรูปที่ 3.15 และในการทดลองได้ใช้เครื่อง Agilent 34411A ดังรูปที่ 3.16 เป็นตัวอ้างอิงในการนับความถี่ ผลการคำนวณจะแสดงในบทถัดไป



Typical adjustable regulator using LM317

รูปที่ 3.15 วงจรเร็กกูเลเตอร์ LM317T

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 Agilent 34411A 6 1/2 Digit Enhanced Digital Multimeter[24]

จากการศึกษาในการหา Limit of Detection มีสมการที่เกี่ยวข้อง[20] ดังนี้

สมการ Viscosity Sensitivity

$$\frac{\Delta\mu}{\Delta f} = R^{-1} \quad (3.2)$$

$\Delta\mu$ = ผลต่างความหนืด (mPa.s)

Δf = ผลต่างความถี่สั่นพ้อง (Hz)

R = ผลตอบสนองของความหนืด (Hz/mPa.s)

สมการ Limit of Detection

$$\delta\mu = \delta f R^{-1} \quad (3.3)$$

$\delta\mu$ = Limit of Detection (mPa.s)

δf = Fluctuations Level of The Resonant Frequency (Hz)

ผลจากการคำนวณที่ได้ตามสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) จะแสดงในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

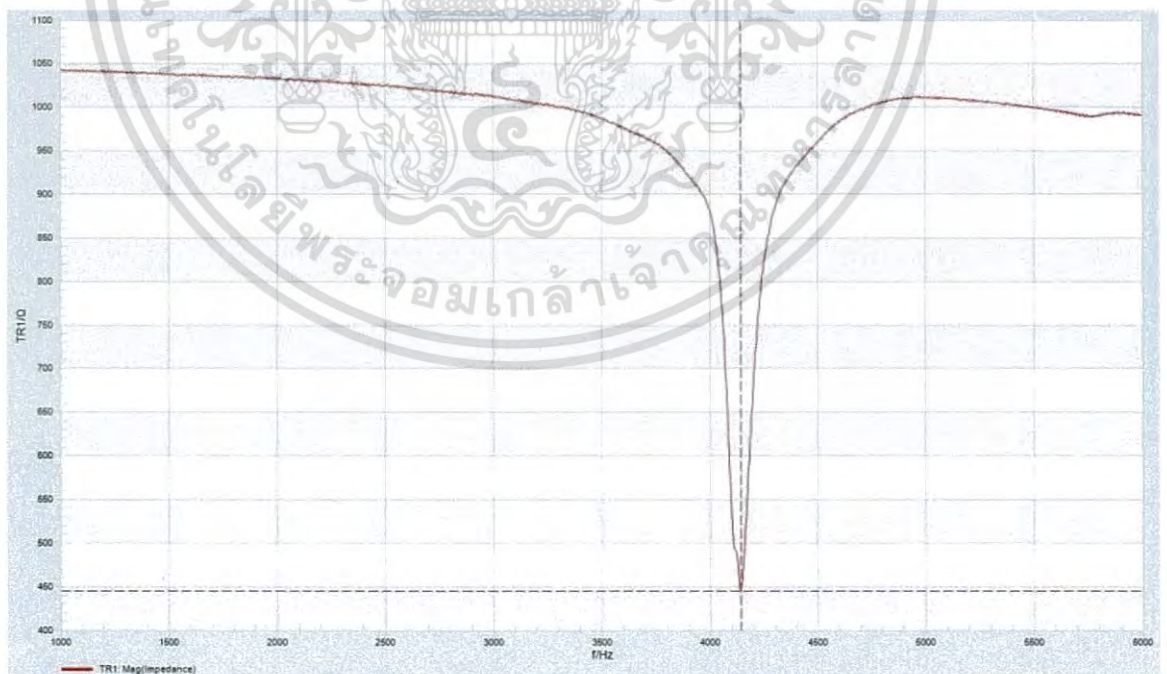
ในขั้นแรกเป็นการนำเสนอผลตอบสนองของเพียโซแต่ละชนิด ในสภาวะใช้งานด้วยกราฟจากเครื่องวิเคราะห์อิมพีแดนซ์ เพื่อใช้ในการพิจารณาเพียโซที่เหมาะสมจะนำมาใช้เป็นเซนเซอร์วัดความหนืด รวมถึงนำเสนอผลการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องของเพียโซแต่ละชิ้นด้วยวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเพียโซแต่ละชิ้นพิจารณาเลือกจากผลการทดลองในขั้นแรก รวมถึงผลการทดลองหาขีดจำกัดการตรวจหา

4.1 ผลการเปรียบเทียบความถี่สั่นพ้อง

ในขั้นตอนนี้เปรียบเทียบผลตอบสนองความถี่สั่นพ้องของเพียโซ จากการนำเพียโซแต่ละชนิดจุ่มของเหลว เพื่อเปรียบเทียบและเลือกเพียโซที่เหมาะสมที่สุดมาใช้ในการสร้างหัววัดความถี่

4.1.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ 18 มิลลิเมตร

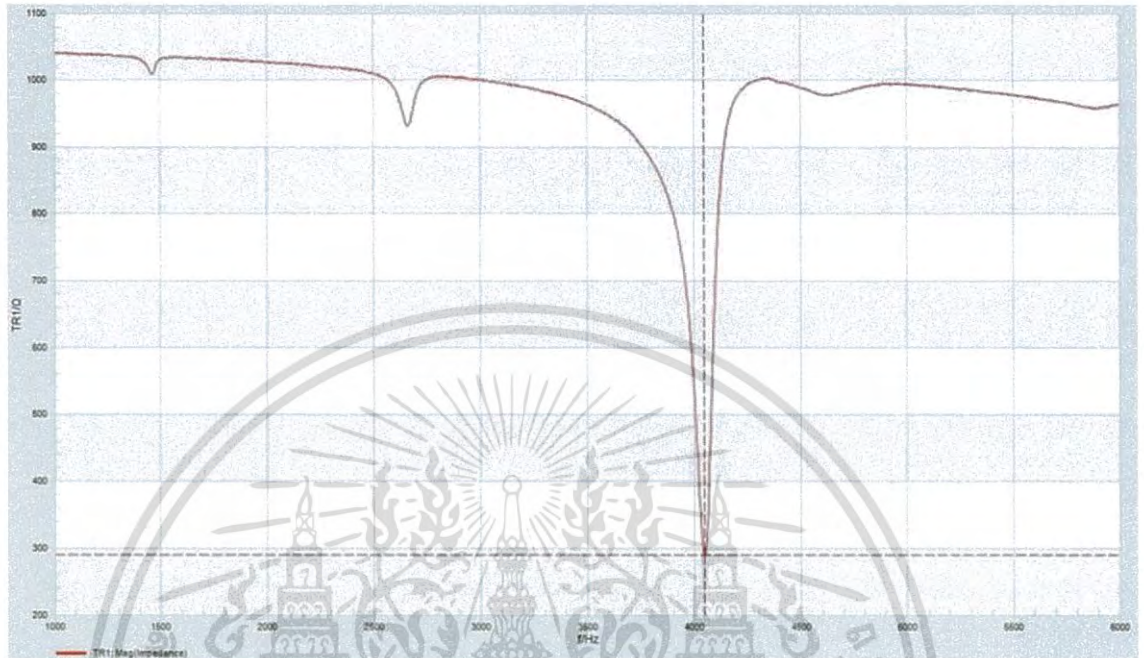
จากรูปที่ 4.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ 18 มิลลิเมตร ก่อนทำการเคลือบกันน้ำ แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 6 kHz มีความถี่สั่นพ้อง 1 ความถี่ เป็นความถี่ขนาดใหญ่อยู่ที่ประมาณ 4.14 kHz



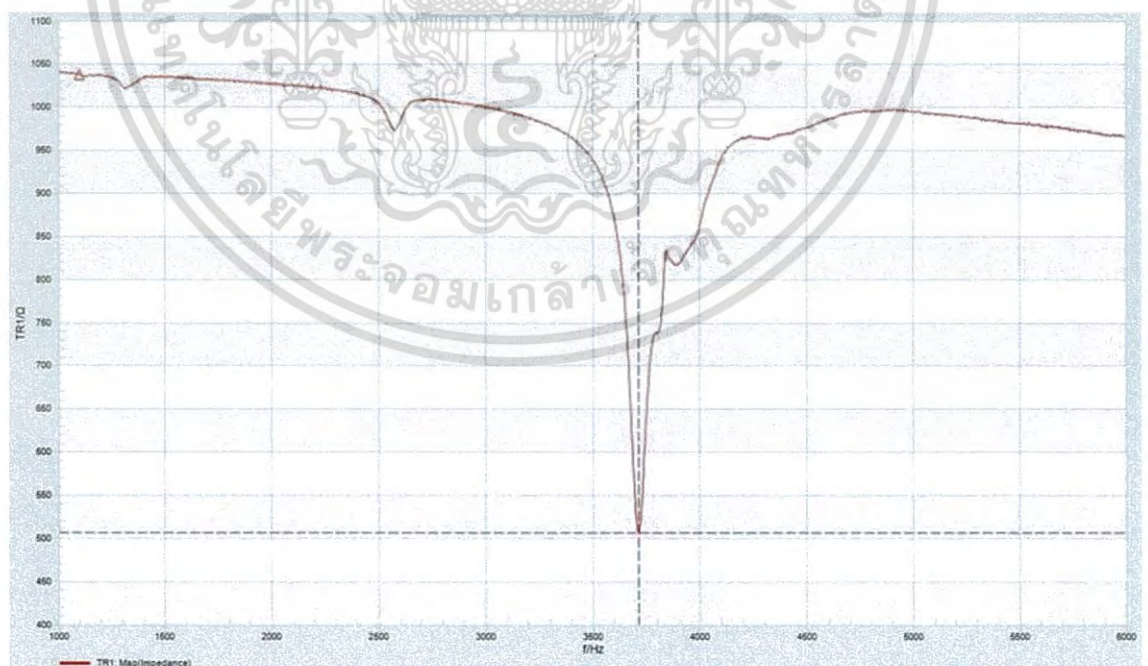
รูปที่ 4.1 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ ขนาด 18 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ 18 มิลลิเมตร หลังทำการเคลือบกันน้ำ แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 6kHz มีความถี่สั้นพ้อง 1 ความถี่ขนาดใหญ่ และ 3 ความถี่ขนาดเล็ก โดยความถี่สั้นพ้องหลักอยู่ที่ประมาณ 4.04 kHz



รูปที่ 4.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ขนาด 18 มิลลิเมตร หลังเคลือบกันน้ำ



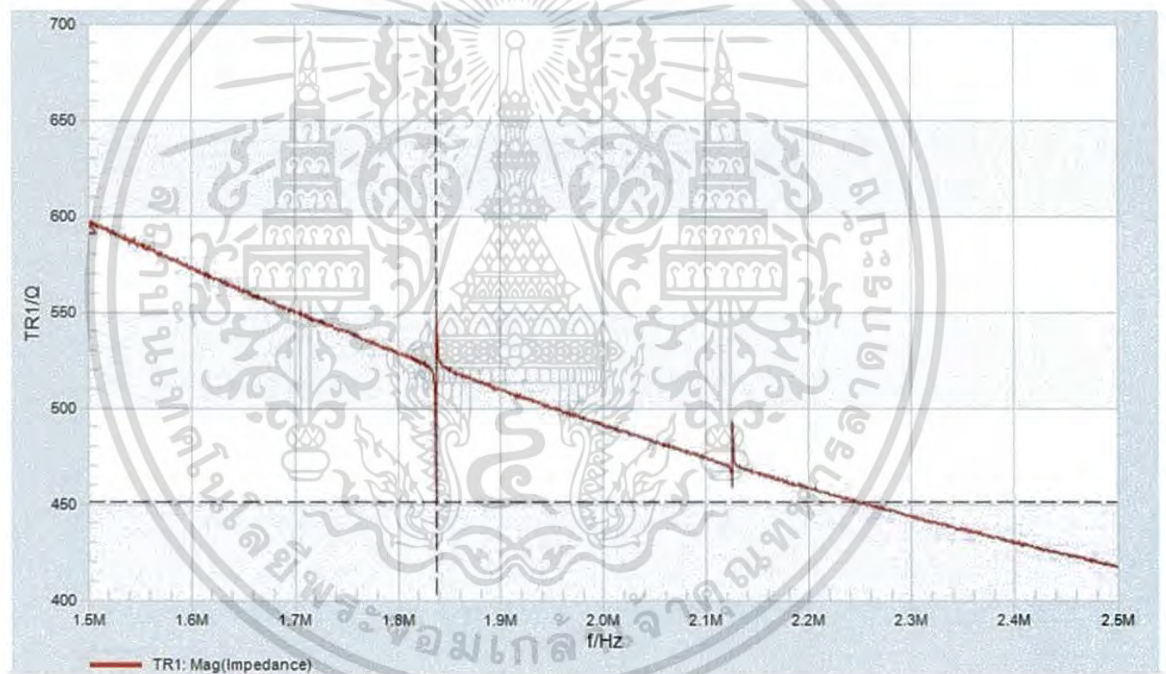
รูปที่ 4.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ขนาด 18 มิลลิเมตร ที่เคลือบกันน้ำขณะจุ่มลงในน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซบัสเซอร์ 18 มิลลิเมตร ที่ทำการเคลือบกันน้ำแล้ว ขณะทดสอบใช้งานโดยจุ่มลงในน้ำกลั่น แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 1 kHz ถึง 6 kHz มีความถี่สั่นพ้อง 1 ความถี่ขนาดใหญ่ และ 3 ความถี่ขนาดเล็ก โดยความถี่สั่นพ้องหลักอยู่ที่ประมาณ 3.71 kHz เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความความหนืดของของเหลว โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้อง และเหมาะที่จะวัดความถี่สั่นพ้องด้วยวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ เนื่องจากทั้งก่อนเคลือบกันน้ำ หลังเคลือบกันน้ำ และขณะทำการทดสอบโดยจุ่มลงในน้ำกลั่น เพียโซชนิดนี้มีความถี่สั่นพ้องขนาดใหญ่ที่ชัดเจนเพียงความถี่เดียว

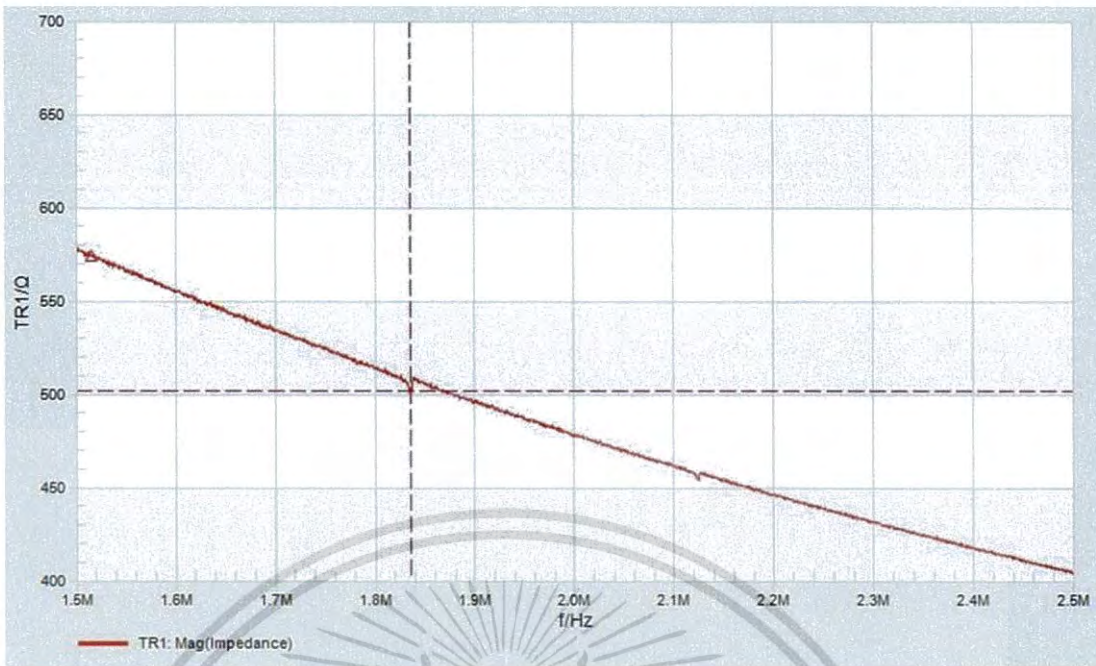
4.1.2 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz

จากรูปที่ 4.4 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz ก่อนเคลือบกันน้ำ แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 1.5 MHz ถึง 2.5 MHz มีความถี่สั่นพ้อง 1 ความถี่ขนาดใหญ่ และ 1 ความถี่ขนาดเล็ก โดยความถี่สั่นพ้องหลักอยู่ที่ประมาณ 1.83 MHz



รูปที่ 4.4 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz

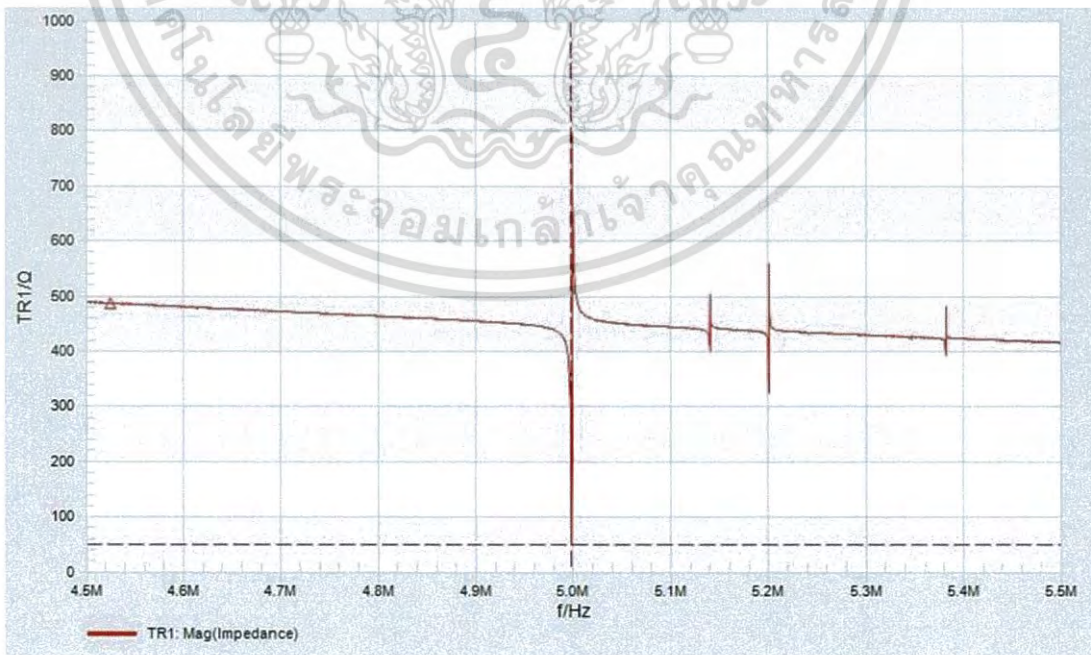
จากรูปที่ 4.5 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซแบบควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz หลังทำการเคลือบกันน้ำแล้วขณะทดสอบใช้งานโดยจุ่มลงในน้ำกลั่น แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 1.5 MHz ถึง 2.5 MHz ไม่มีความถี่สั่นพ้องที่ชัดเจน เพียโซชนิดนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความความหนืดของของเหลว โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้อง เนื่องจากวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ไม่สามารถสร้างควมถี่สั่นพ้องให้กับเพียโซในกรณีที่ไม่มีควมถี่สั่นพ้องที่ชัดเจนได้



รูปที่ 4.5 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 1.8 MHz ที่เคลื่อนกับน้ำขณะจุ่มในน้ำ

4.1.3 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz

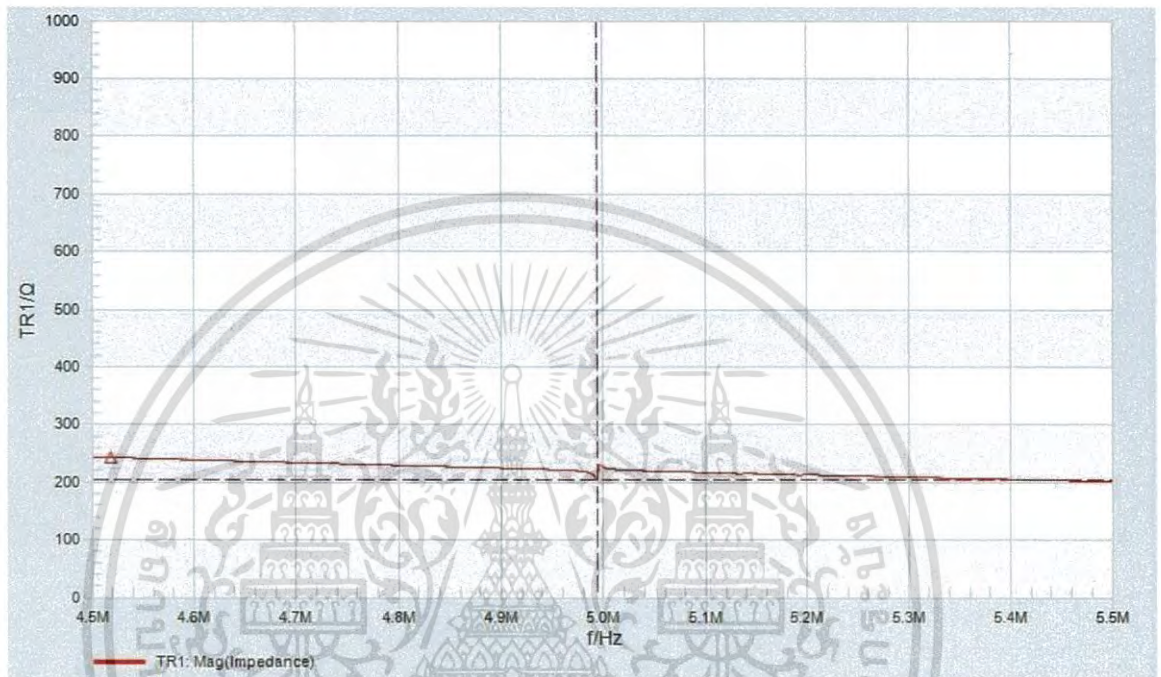
จากรูปที่ 4.6 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz ก่อนทำการเคลื่อนกับน้ำ แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 4.5 MHz ถึง 5.5 MHz มีความถี่สั้นพ้อง 1 ความถี่ขนาดใหญ่ และ 3 ความถี่ขนาดเล็ก โดยความถี่สั้นพ้องหลักอยู่ที่ประมาณ 4.99 MHz



รูปที่ 4.6 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซแบบควอทซ์คริสตัล 5 MHz เคลือบกันน้ำแล้วขณะทดสอบใช้งานโดยจุ่มลงในน้ำกลั่น แสดงให้เห็นว่าระหว่างความถี่ 4.5 MHz ถึง 5.5 MHz ไม่มีความถี่สั่นพ้องที่ชัดเจน เพียโซชนิดนี้จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้เป็นเซนเซอร์วัดความหนืดของของเหลว โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้อง เนื่องจากวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์ ไม่สามารถสร้างความถี่สั่นพ้องให้กับเพียโซที่ไม่มีความถี่สั่นพ้องที่ชัดเจนได้



รูปที่ 4.7 กราฟอิมพีแดนซ์ของเพียโซควอทซ์คริสตัล 5 MHz ที่เคลือบกันน้ำขณะจุ่มในน้ำ

4.2 ผลการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องจากวงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์

จากผลตอบสนองในรูปของกราฟอิมพีแดนซ์ จึงได้เลือกเพียโซที่จะนำมาประยุกต์เป็น เซนเซอร์วัดความหนืดคือ เพียโซบัซเซอร์ ขนาด 18 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชิ้น เป็นเซนเซอร์เพียโซ หมายเลข 1 และ 2 ดังรูปที่ 4.8 เพื่อนำมาทำการทดสอบวัดความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยวงจร เพียโซออสซิลเลเตอร์ เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและสรุปผล โดยผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ 4.1



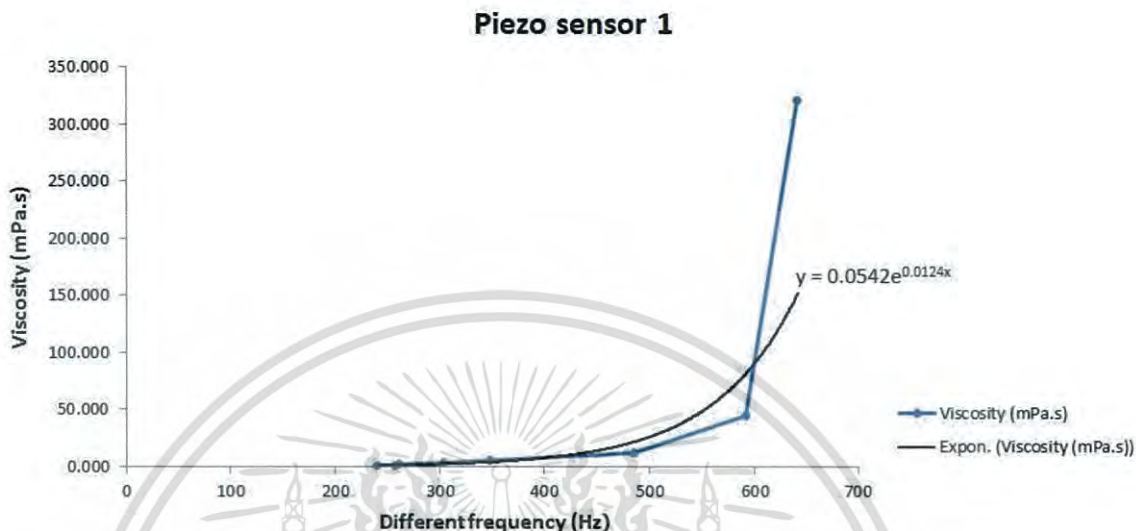
รูปที่ 4.8 เซนเซอร์เพียโซหมายเลข 1 และ 2

ตารางที่ 4.1 ความถี่สั่นพ้องของเซนเซอร์ก่อนจุ่มและหลังจุ่มลงในของเหลวที่ความหนืดต่างๆ

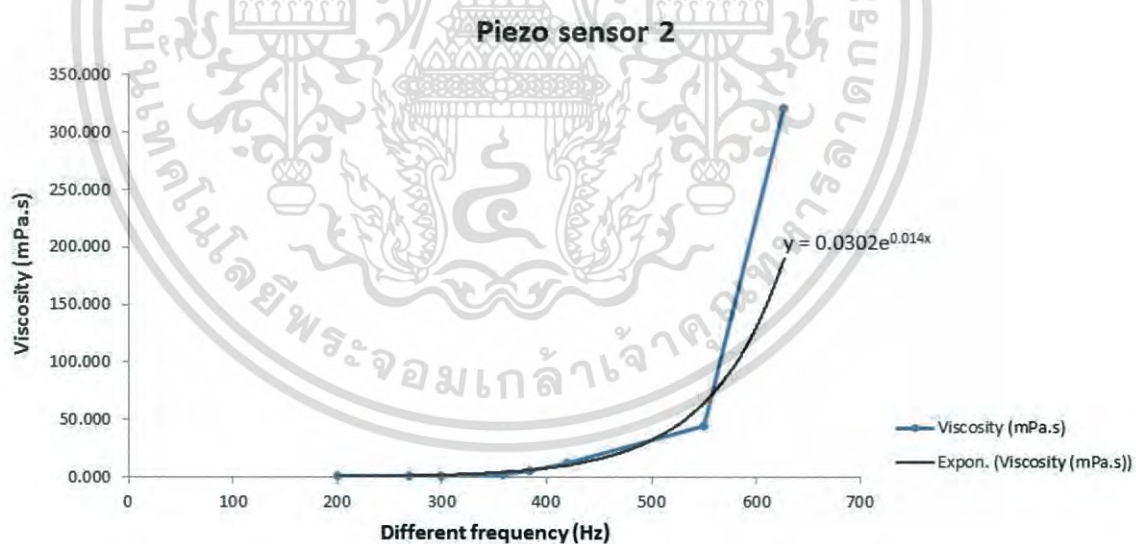
Syrup		Piezo 1			Piezo 2		
Brix	Viscosity (mPa.s)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	Δf (Hz)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	Δf (Hz)
0	0.890	3869	3629	240	4167	3967	200
10	1.167	3869	3612	257	4167	3898	269
20	1.711	3869	3608	261	4167	3867	300
30	2.784	3869	3565	304	4167	3809	358
40	5.270	3869	3521	348	4167	3783	384
50	12.599	3869	3384	485	4167	3747	420
60	44.415	3869	3278	591	4167	3618	549
70	321.239	3869	3227	642	4167	3540	627

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองที่ได้สามารถนำค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไป (Δf) ที่แต่ละความหนืดของน้ำเชื่อมมาแสดงกราฟ และคำนวณออกมาเป็นสมการประมาณการค่าความหนืดจากความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไปได้ดังรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 กราฟค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไปตามความหนืดของเพียโซหมายเลข 1



รูปที่ 4.10 กราฟค่าความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนไปตามความหนืดของเพียโซหมายเลข 2

สมการประมาณการค่าความหนืดจากความถี่สั่นพ้อง ที่เปลี่ยนไปสามารถทำได้จากการสอบเทียบเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สั่นพ้อง ที่เปลี่ยนไปกับความหนืดของเพียโซแต่ละตัว โดยต้องทำการสอบเทียบทุกครั้ง เนื่องจากคุณสมบัติของเพียโซแต่ละตัวไม่เท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการประมาณการความหนืดของเซนเซอร์เพียโซหมายเลข 1

$$\text{Viscosity} = 0.0542e^{0.0124x} \quad (4.1)$$

สมการประมาณการความหนืดของเพียโซเซ็นเซอร์หมายเลข 2

$$\text{Viscosity} = 0.0302e^{0.0140x} \quad (4.2)$$

4.3 การทดลองหาขีดจำกัดการตรวจหา

ในการทดลองนี้ได้หาขีดจำกัดการตรวจวัด Limit of Detection (LOD) ของอุปกรณ์ต้นแบบ เทียบระหว่างอากาศกับน้ำกลั่น มีปัจจัยที่ต้องควบคุมคือ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และระยะจุ่มของหัวเซนเซอร์ 4 มิลลิเมตร โดยได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

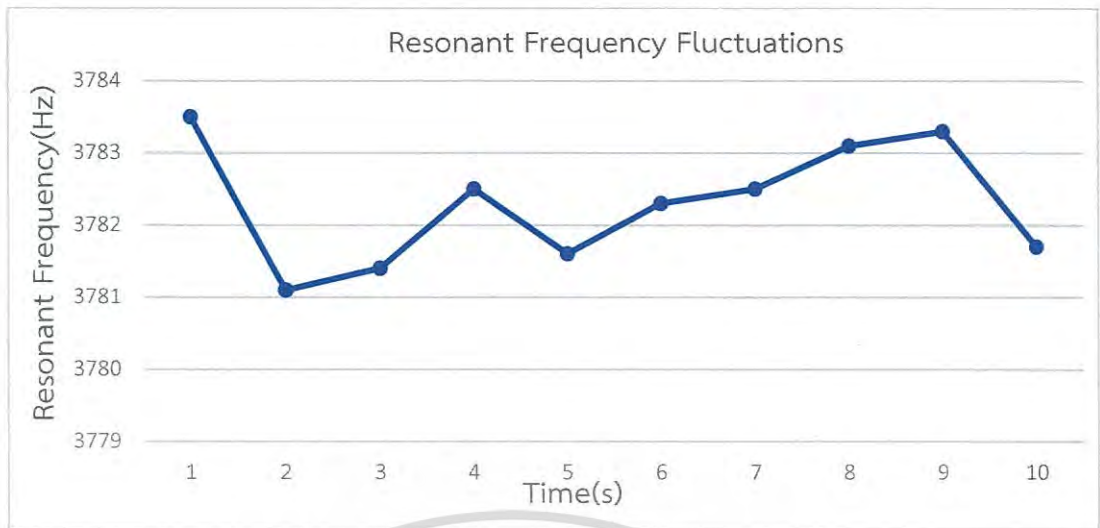
ข้อมูลที่ได้จากการวัดความถี่เฉลี่ยของเพียโซขณะจุ่มน้ำกลั่นเป็นเวลา 10 วินาที จำนวน 10 ครั้ง มีค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลความถี่เริ่มต้นและความถี่ขณะจุ่มลงในน้ำกลั่น

ความถี่เริ่มต้น (Hz)	ความถี่ขณะจุ่มน้ำกลั่น (Hz)	Δf (Hz)
3959.7	3783.5	176.2
3959.9	3781.1	178.8
3960.4	3781.4	179
3960.7	3782.5	178.2
3960.8	3781.6	179.2
3960.6	3782.3	178.3
3960.7	3782.5	178.2
3960.6	3783.1	177.5
3960.5	3783.3	177.2
3960.1	3781.7	178.4

จากข้อมูลตารางที่ 4.2 สามารถนำมาเขียนกราฟ Resonance Frequency Fluctuations ได้ดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟ Resonant Frequency Fluctuations

ผลที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (3.2) และสมการที่ (3.3) แสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณหาขีดจำกัดการตรวจวัด

ความหนืดของอากาศ (mPa.s)	1.8492×10^{-2}
ความหนืดของน้ำ (mPa.s)	0.89
ความถี่เฉลี่ยเริ่มต้น (Hz)	3960.4
ความถี่เฉลี่ยขณะจุ่มน้ำ (Hz)	3782.3
ผลต่างความถี่ (Hz)	178.1
Fluctuations Level (Hz)	2.2
ผลตอบสนองของความหนืด	204.357
Limit of Detection (mPa.s)	0.010765

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองเป็นไปตามสมมติฐานที่ว่า เมื่อเซนเซอร์เพียโซที่เป็นวัสดุแข็งถูกจุ่มลงในของเหลวที่มีความหนืดแล้ว ความถี่สั่นพ้องของเพียโซจะแปรผกผันกับค่าความหนืด จึงเป็นไปได้ที่จะใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทรอนิกส์นี้มาสร้างเป็นเซนเซอร์วัดความหนืด โดยที่เซนเซอร์นั้นต้องทำการเคลือบสารกันน้ำเสียก่อน เพื่อป้องกันการลัดวงจรก่อนนำเพียโซไปวัดความหนืดของของเหลว วงจรเพียโซออสซิลเลเตอร์สามารถสร้างความถี่สั่นพ้องจากเพียโซได้ และไม่โครคอนโทรลเลอร์สามารถเก็บข้อมูลค่าความถี่สั่นพ้อง คำนวณผลลัพธ์แล้วแสดงผลออกมาได้ การคำนวณความหนืดจากความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถทำได้จากการสอบเทียบ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความถี่สั่นพ้องที่เปลี่ยนแปลงกับความหนืดของเพียโซแต่ละตัว โดยต้องทำการสอบเทียบทุกครั้งเนื่องจากคุณสมบัติของเพียโซแต่ละตัวไม่เท่ากัน

5.2 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการนี้

การทำโครงการนี้แสดงให้เห็นว่า การวัดความหนืดของของเหลวด้วยเซนเซอร์เพียโซ โดยใช้ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทรอนิกส์แบบย้อนกลับร่วมกับการเปลี่ยนแปลงความถี่สั่นพ้องนั้นเป็นไปได้ สามารถพัฒนาต่อยอดเป็นเครื่องวัดความหนืดอิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา ที่สามารถวัดค่าความหนืดได้อย่างรวดเร็ว

5.3 ปัญหาที่พบในการทำโครงการนี้

1. เซนเซอร์จะไม่ทำงานหรือให้ค่าความถี่สั่นพ้องที่ไม่คงที่และมีความคลาดเคลื่อนสูง หากหัววัดที่ใช้ติดตั้งเซนเซอร์เพียโซไม่มั่นคง จึงต้องออกแบบหัววัดที่สามารถติดตั้งเซนเซอร์เพียโซได้อย่างมั่นคงเพื่อทำการวัดความถี่สั่นพ้อง

2. เมื่อจะทำการเปลี่ยนไปวัดความถี่สั่นพ้องของเซนเซอร์ในของเหลวหรือสารละลายอื่น ต้องทำความสะอาดหัววัดและเซนเซอร์ด้วยน้ำกลั่นทุกครั้ง เพื่อไม่ให้มีสารเจือปนที่ส่งผลให้การวัดความถี่สั่นพ้องผิดพลาด จึงต้องออกแบบหัววัดให้สามารถแยกชิ้นส่วนเพื่อทำความสะอาด และประกอบคืนได้ง่าย

5.4 แนวทางในการพัฒนา

ในการปรับปรุงพัฒนาโครงการนี้การออกแบบให้เซนเซอร์สามารถจุ่มลงในของเหลวได้ทั้งตัว เนื่องจากการที่ต้องจุ่มเซนเซอร์ลงในของเหลวให้ส่วนที่จุ่มมีระยะจุ่มเท่ากันทุกครั้งนั้นยุ่งยาก และเพื่อให้เซนเซอร์สามารถทำงานได้ดีมากขึ้น ควรออกแบบเซนเซอร์ให้ติดตั้งอยู่บนหัววัดอย่างมั่นคงยิ่งขึ้น และสามารถวัดค่าความหนืดของของเหลวได้ขณะที่ของเหลวนั้นมีการไหล รวมถึงพัฒนาโปรแกรมให้สามารถนำปัจจัยอื่นๆ มาช่วยในการคำนวณค่าความหนืดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรมได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “ความหนืดคุณลักษณะเฉพาะของของไหล” [Online]. Available :
http://www.dss.go.th/images/st-article/pep_9_2549_viscosity.pdf
- [2] “Viscosity.” [Online]. Available :
<https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity>
- [3] “Viscosity of Newtonian and non-Newtonian Fluids.” [Online]. Available :
<http://www.rheosense.com/applications/viscosity/newtonian-non-newtonian>
- [4] “WHAT ARE NEWTONIAN AND NON-NEWTONIAN FLUIDS?” [Online]. Available :
<https://blog.craneengineering.net/what-are-newtonian-and-non-newtonian-fluids>
- [5] “Basics of viscometry” [Online]. Available :
<https://wiki.anton-paar.com/en/basic-of-viscometry/>
- [6] “Non-Newtonian fluid” [Online]. Available :
https://en.wikipedia.org/wiki/Non-Newtonian_fluid
- [7] “Non-Newtonian fluids” [Online]. Available :
<https://www.sciencelearn.org.nz/resources/1502-non-newtonian-fluids>
- [8] Subhawati Jayasvasti, “Chapter II : Piezoelectric Elements and Resonant Frequency” A Comparative Study of Resonant Frequency Measurement Techniques for Piezoelectric Elements, 2017, pp. 5.
- [9] Subhawati Jayasvasti, “Chapter II : Piezoelectric Elements and Resonant Frequency” A Comparative Study of Resonant Frequency Measurement Techniques for Piezoelectric Elements, 2017, pp. 6 – 7.
- [10] “Bode User Manual.” [Online]. Available :
https://www.omicron-lab.com/fileadmin/assets/Bode_100/Manuals/Bode-100-User-Manual-ENU10060503.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [11] H. Bahadar; R. Parshad, “Modified Pierce oscillator circuit” Proceedings of the IEEE, February 1978, pp. 258-259.
- [12] J. R. Pierce, “Discussion on “Reflex Oscillators” (J. R. Pierce)” Proceedings of the IRE, July 1945, pp.483 – 485.
- [13] Pierce, George W, “Piezoelectric crystal resonators and crystal oscillators applied to the precision calibration of wavemeters”, Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, October 1923, pp.81 – 106.
- [14] Subhawati Jayasvasti, “Piezoelectric Elements and Resonant Frequency” A Comparative Study of Resonant Frequency Measurement Techniques for Piezoelectric Elements, 2017, pp. 34-37.
- [15] E. E. A. Rouillard; M. F. S. Koenig, “The viscosity of molasses and massecuite” Proceedings of the South African sugar technologist’s association, June 1980, pp 89-92.
- [16] “The Sugar Engineers” [Online]. Available :
<http://www.sugartech.co.za/viscosity/index.php>
- [17] L. Korson; W. Drost-Hansen; F. J. Millero, “Viscosity of Water at Various Temperatures”, Contribution No. 980 from the Institute of Marine Sciences, University of Miami, Miami, Florida 88149, April 1968, pp. 34-39.
- [18] K. Suresh; G. Uma; B.V.M.P. Santhosh Kumar; U. Varun Kumar; M. Umapathy, “Piezoelectric based resonant mass sensor using phase measurement” Measurement 44, October 2010, pp. 320 - 325.
- [19] U. Vaishali; A. Sudhir, “Effect of Temperature and Pressure Variations on the Resonant Frequency of Piezoelectric Material”, Measurement and Control Vol 49, November 2016, pp. 286 - 292.

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [20] Don Isarakorn, “**Limit of Detection**”, Epitaxial Piezoelectric MEMS on Silicon Thesis n 4939, 2011, pp. 79-95
- [21] “**Viscosity / ความหนืด**” [Online]. Available :
<http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0546/viscosity-ความหนืด>
- [22] “**Piezoelectricity.**” [Online]. Available :
<http://dev.nsta.org/ewwebs/2014102/news/default.html>
- [23] “**Modal frequencies of a vibrating circular membrane.**” [Online]. Available :
<https://www.physicsforums.com/threads/modal-frequencies-of-a-vibrating-circular-membrane-drum.915378/>
- [24] “**Agilent 34411A 6 1/2 Digit Enhanced Digital Multimeter.**” [Online]. Available : <https://www.tequipment.net/Agilent34411A.asp>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้