

547.93

547.93

5-3

การออกแบบและสร้างชุดทดลอง เพื่อศึกษาสมบัติกายภาพบางประการ ของน้ำมันหล่อลื่น
โดยวิธีอัลตราโซนิก ช่วงอุณหภูมิ 20°C ถึง 70°C

27 เม.ย. 2541

ปริญญานิพนธ์
ของ
สาริต บุญยรัตกลิน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์

มีนาคม 2541

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2016

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบ ได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิตวิชาเอกฟิสิกส์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

..... 1๙8 ๖๖-๘๐ ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)

..... ๒๗ ๙๖-๙๗ กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา คิลปัสกุลสุข)

คณะกรรมการสอบ

..... 1๙2 ๖๖-๖๘ ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)

..... ๒๗ ๙๖-๙๗ กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา คิลปัสกุลสุข)

..... ๒๗ ๙๖-๙๗ กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ชุมพล พัฒนสุวรรณ)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... 1๙๖-๒๐๐๐ คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.เสริมศักดิ์ วิศาลาภรณ์)

วันที่ 12 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2541

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสดา วีระสัย และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์บัญชา ศิลปสกุลสุข ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขตลอดระยะทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ชุมพล พัฒนสุวรรณ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณ คุณวิชุดา สุบรรณ ที่ให้ความช่วยเหลือในการตรวจรูปแบบการเขียนวิทยานิพนธ์ และ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท เอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตรทุกท่าน และ คุณสุภาพร จินตโกศลวิทย์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัย

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ มารดา และพี่ๆ ที่เป็นผู้ส่งเสริมและเป็นที่กำลังใจในการศึกษาของผู้วิจัย

สาธิต บุญยรัตกลิน

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
จุดมุ่งหมายของงานวิจัย	2
ขอบเขตของงานวิจัย	3
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
คลื่นตามยาว และสมบัติกายภาพของของเหลว	4
การดูดกลืนพลังงานและสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น	10
วิธีการตรวจวัดทางอัลตราโซนิก	12
ความรู้เกี่ยวกับน้ำมันหล่อลื่น	17
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	19
3 วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	22
วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	22
การออกแบบ และสร้างชุดทดลอง	27
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	30
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล	36
5 สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะ	110
สรุปผลการวิจัย	110
ข้อเสนอแนะ	112
บรรณานุกรม.....	114
ประวัติย่อของผู้วิจัย	115

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐานอุตสาหกรรมน้ำมันหล่อลื่น.....	2
2 สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของคลื่นตามยาวเมื่อตกกระทบผิวรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์.....	10
3 แสดงคุณสมบัติของทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	24
4 คุณสมบัติของออสซิลโลสโคปที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
5 แสดงรายการน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
6 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหน้าปัดจ่ายกระแสไฟฟ้า.....	28
7 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า.....	29
8 กำหนดค่าความยาวคลื่นพละภูมิเนียม	33
9 ความเร็วคลื่นและระยะระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ ที่อุณหภูมิ 27 °C	36
10 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิต่างๆ	38
11 แสดงระดับการขยายตัวตามความสูงของน้ำมันหล่อลื่น 3 ชนิด	40
12 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE30 , SAE40 , SAE50	41
13 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 26 °C	42
14 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 32 °C	43
15 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 36 °C	44
16 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 40 °C	45
17 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 45 °C	46
18 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 49 °C	47
19 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 54 °C	48
20 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 58 °C	49
21 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลา ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 65 °C	50
22 แสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30	51

[illegible]

[illegible]

59	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35 °C	88
60	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40 °C	89
61	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44 °C	90
62	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49 °C	91
63	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54 °C	92
64	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59 °C	93
65	แสดงระยะระหว่างทรานส์ติวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64 °C	94
66	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับค่าอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50	95
67	แสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ	96
68	แสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ	98
69	แสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ	100
70	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50	102
71	สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50	104
72	อิมพีแดนซ์จำเพาะในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50	106
73	บัลค์มอดุลัสในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50	108

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงลักษณะการอัดตัวของเนื้อสารเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน	2
2 แสดงลักษณะตัวกลางที่คลื่นตามยาวเคลื่อนที่ในแท่งวัตถุ	4
3 แสดงการสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นที่ผิวรอยต่อของ 2 ตัวกลาง	9
4 แสดงรูปสัญญาณกระตุ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า	12
5 แสดงรูปผลึกควอตซ์ และแกนผลึกศาสตร์ X , Y และ Z	13
6 แสดงรูปทรานส์ดิวเซอร์ชนิด X-cut quartz	14
7 แสดงแผนภาพการตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลว	15
8 แสดงอัมพลิจูดของสัญญาณคลื่นกับระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์	16
9 แสดงความเร็วคลื่นในของเหลวภายใต้ความดันสูงที่เป็นฟังก์ชันกับความดัน (ก) แสดงความเร็วคลื่นในของเหลวภายใต้ความดันสูงที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ (ข)	19
10 แสดงผลการทดลองตามแบบจำลองของ ฮาร์เกอร์ และ เทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และ โฮเลย์ (A&H) ใน 1 % ของสารแขวนลอย	20
11 แสดงผลการทดลองตามแบบจำลองของ ฮาร์เกอร์ และ เทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และ โฮเลย์ (A&H) ใน 5.6 % ของสารแขวนลอย	21
12 แสดงต้นกำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิก	22
13 สัญญาณไฟฟ้าจากต้นกำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิก ที่เข้าสู่ ทรานส์ดิวเซอร์	23
14 สัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกจากทรานส์ดิวเซอร์ เมื่อถูกกระตุ้น 1 ครั้ง	23
15 แสดงรูปและขนาดของทรานส์ดิวเซอร์	24
16 แสดงภาพออสซิลโลสโคป TEKTRONIX 2232	25
17 แสดงภาพเครื่องพิมพ์ภาพ Tektronix HC100	26
18 แสดงภาพอ่างสเทนเลส	27
19 อ่างควบคุมอุณหภูมิของของเหลวที่สร้างเสร็จแล้ว	28
20 แสดงรายละเอียดของตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า	29
21 แสดงรายละเอียดกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์	30
22 แสดงรายละเอียดกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว	30
23 แสดงการวางกล่องทรานส์ดิวเซอร์บนรางโลหะ	31
24 แสดงขวดแก้วรูปชมพู่สำหรับการหาความหนาแน่น	32
25 แสดงลักษณะคลิพอะลูมิเนียม	33
26 กราฟระหว่างความเร็วกับระยะระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ ที่อุณหภูมิ 27 °C	37
27 กราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับระยะระหว่างทรานส์ดิวเซอร์	37
28 กราฟความเร็วคลื่นในน้ำกลั่นจากผลการทดลอง และผลของ Lovett J. R.	39
29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE30 , SAE40 และ SAE50 ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ	41

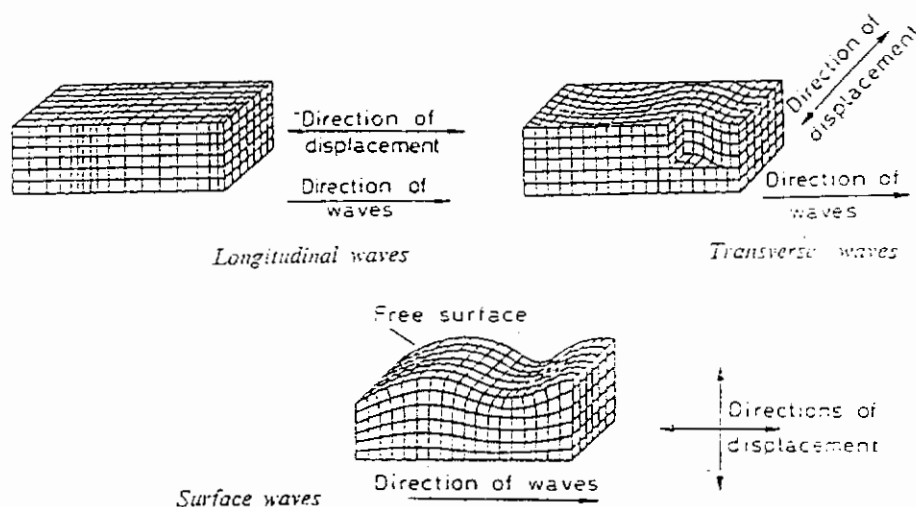
[illegible]

66	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น กับอุณหภูมิของ SAE 30	78
67	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 27°C	79
68	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 36°C	80
69	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 39°C	81
70	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 46°C	82
71	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 53°C	83
72	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 59°C	84
73	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 40 ที่อุณหภูมิ 65°C	85
74	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น กับอุณหภูมิของ SAE 40	86
75	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 30°C	87
76	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35°C	88
77	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40°C	89
78	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44°C	90
79	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49°C	91
80	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54°C	92
81	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59°C	93
82	กราฟระหว่างความสูงสัญญาณกับระยะทรานส์ดิวเซอร์ ของ SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64°C	94
83	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น กับอุณหภูมิของ SAE 50	95
84	กราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30	97
85	กราฟค่าบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30	97
86	กราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40	99
87	กราฟค่าบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40	99
88	กราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50	101
89	กราฟค่าบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50	101
90	กราฟค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ,SAE40 ,SAE 50	103
91	กราฟค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50	105
92	กราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE40 และ SAE 50	107
93	กราฟค่าบัลค์มอดุลัสในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE40 และ SAE 50	109

บทที่ 1

บทนำ

สวณศาสตร์ (Acoustics) เป็นปรากฏการณ์ในระดับอะตอมที่เกิดจากการส่งและรับพลังงานระหว่างอะตอมข้างเคียงที่อยู่ในรูปของการสั่น (Vibration) ภายในเนื้อสาร โดยอาศัยความยืดหยุ่นในโครงแบบ (Configuration) ของอะตอมหรือโมเลกุลเป็นเหตุให้เกิดการบีบอัด (Compress) ของเนื้อสาร หรือเกิดการเพิ่มขึ้นของความดันภายใน ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเก็บพลังงานไว้ในรูปของพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของโครงแบบนี้ อีกนัยหนึ่งก็คือเป็นการเก็บพลังงานของคลื่นไว้ในสารที่จุดหนึ่งนั่นเอง และจะคายพลังงานออกจากโครงแบบได้โดยการขยายตัวกลับเข้าสู่สภาวะสมดุลเดิมอีกครั้งหนึ่ง (Frey et al. 1982 : 1) แสดงได้ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 แสดงลักษณะการอัดตัวของเนื้อสารเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่าน (Filipczynski et al. 1966 : 15)

การรับและการส่งพลังงานของตัวกลางเป็นสาเหตุให้เกิดการเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งกำเนิดไปสู่ตำแหน่งอื่นได้ ซึ่งก็คือการเคลื่อนที่ของคลื่นนั่นเอง การจำแนกชนิดของคลื่นแบ่งตามค่าความถี่เสียง โดยความถี่ที่มนุษย์สามารถรับรู้ได้อยู่ในช่วง 20 - 20,000 Hz เรียกว่าคลื่นเสียง (Audible) สำหรับความถี่สูงกว่า 20,000 Hz เรียกว่าอัลตราโซนิก (Ultrasonic) และเรียกคลื่นเสียงที่ค่าความถี่ต่ำกว่า 20 Hz นี้ว่า อินฟราโซนิก (Infrasonic)

ในปัจจุบันมีการนำคลื่นอัลตราโซนิกไปใช้ประโยชน์ในหลายด้านด้วยกัน เช่น การตรวจร่างกายทางการแพทย์ การตรวจสอบภายในวัสดุโดยไม่ทำลาย และการศึกษาสมบัติกายภาพของสารเป็นต้น ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาสมบัติกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Lubricating oil) ที่มีความหนืดต่างกัน 3 ขนาด คือ SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50 มีสมบัติตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรยานยนต์ (Society of automotive engineers ; SAE) ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงสมบัติของน้ำมันหล่อลื่นตามมาตรฐานอุตสาหกรรมน้ำมันหล่อลื่น

เบอร์ (SAE)	ความหนืด (cSt) ที่ 100 °C	
	ต่ำสุด	สูงสุด
5W	3.8	-
10W	4.1	-
20W	5.6	-
25W	9.3	-
20	5.6	9.3
30	9.3	12.5
40	12.5	16.3
50	16.3	21.9

ที่มา: แผนกวินเคราะห์คุณภาพน้ำมันหล่อลื่น. กองควบคุมคุณภาพ. การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย. (2535).

"ความรู้เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์หล่อลื่นและเบรก"

สำหรับสมบัติกายภาพที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก , อิมพีแดนซ์จำเพาะ (Specific acoustic impedance) , บัลค์มอดุลัส (Bulk modulus) และสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น (Attenuation coefficient) โดยทำการศึกษาหาความสัมพันธ์ของสมบัติดังกล่าวเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นในช่วง 20°C - 70°C ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบ และสร้างชุดทดลองทางอัลตราโซนิกเพื่อศึกษาสมบัติกายภาพของของเหลว ที่สามารถปรับระดับอุณหภูมิได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการใช้ศึกษาสมบัติของของเหลวชนิดอื่นต่อไป

จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดการทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อหาสมบัติกายภาพของของเหลวในช่วงอุณหภูมิ 20°C - 70°C
2. เพื่อหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก อิมพีแดนซ์จำเพาะ บัลค์มอดุลัส และสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ
3. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบสมบัติกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ชนิดธรรมดา ที่มีความหนืด 3 ขนาด คือ SAE30 , SAE40 และ SAE50

ขอบเขตของงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างชุดการทดลอง เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวของเหลว ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วง $20^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$
2. ศึกษาสมบัติกายภาพของของเหลว 4 อย่างคือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก อิมพีแดนซ์จำเพาะ บัลค์มอดุลัส และสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น
3. ของเหลวตัวอย่างประกอบด้วย น้ำกลั่น และน้ำมันหล่อลื่นสำหรับเครื่องยนต์ โดยเลือกค่าความหนืด 3 ขนาดคือ SAE30 , SAE40 และSAE50 อย่างละ 5 ลิตร
4. ใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิดลิกที่เป็นสารปิโซอิเล็กทริก (Piezo-electric) เพื่อกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกชนิดคลื่นตามยาวที่ค่าความถี่ 5.5 MHz
5. ใช้ออสซิลโลสโคป (Tektronix 2232) ชนิดความถี่ 100 MHz ที่มีระบบหน่วยความจำเพื่อวัดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก

ความสำคัญของการวิจัย

1. ทำให้ทราบว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ บัลค์มอดุลัส มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น มีความสัมพันธ์กับความหนืดของน้ำมันหล่อลื่น โดยทำการวิจัยกับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ชนิดธรรมดา ที่มีความหนืดต่างกัน 3 ขนาดคือ SAE30 , SAE40 และSAE50 และทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ $20^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$
2. สามารถเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าความเร็วคลื่นจากผลการทดลองที่ได้จากวิธีทางอัลตราโซนิกครั้งกับผลการทดลองโดยวิธีอื่นได้
3. สามารถนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นจากงานวิจัยไปใช้ศึกษาสมบัติของของเหลวชนิดอื่นได้ หรือสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์เพื่อประกอบการศึกษาในงานวิจัยทางอัลตราโซนิกในตัวของเหลวต่อไปได้
4. สามารถนำเทคนิคและวิธีการตรวจวัดทางอัลตราโซนิก จากงานวิจัยครั้งนี้ไปใช้ในการศึกษาฟิสิกส์ของอัลตราโซนิก ที่เกี่ยวข้องต่อไปได้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ทฤษฎีในงานวิจัย
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีในงานวิจัย

คลื่นกล (Mechanical wave) เกิดจากการส่งผ่านพลังงาน โดยการสั่นของโมเลกุลในตัวกลางจากโมเลกุลหนึ่งไปยังโมเลกุลที่อยู่ข้างเคียง โดยมีทิศของการสั่นอยู่ในแนวเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

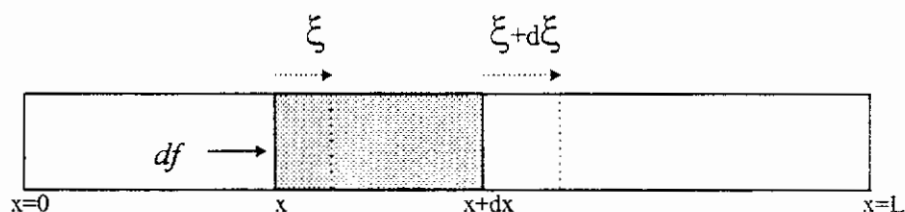
ในการศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว จะพิจารณาคลิ้นที่เคลื่อนที่ในแท่ง (Bar) วัตถุขนาดของความเร็วคลื่นและค่าการลดลงของคลื่น (Attenuation) เป็นสมบัติกายภาพของตัวกลางที่สามารถตรวจวัดได้โดยวิธีทางอัลตราโซนิก (Ultrasonic method) และสามารถใช้ศึกษาหาสมบัติอื่นของตัวกลางได้ เช่น ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ บัลค์มอดุลัส และค่าความหนืดของตัวกลางของเหลว เป็นต้น

คลื่นตามยาว (Longitudinal Wave) (Frey et al. 1982 : 57-60)

การเคลื่อนที่ของคลื่นที่สำคัญชนิดหนึ่งคือการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว เมื่อคลื่นตามยาวกระทบที่ปลายของแท่งวัตถุ อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ไปตามแท่งวัตถุขนานกับแกนของแท่งวัตถุ และจะถูกแรงยืดหยุ่นของเนื้อวัตถุดึงอนุภาคกลับสู่ตำแหน่งเดิมอีกครั้ง การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของอนุภาคนี้ทำให้โมเลกุลข้างเคียงมีการสั่นในลักษณะเช่นเดียวกัน การถ่ายทอดการสั่นของอนุภาคนี้ก็คือการเคลื่อนที่ของคลื่นนั่นเอง

พิจารณา ตัวกลางลักษณะเป็นแท่งวัตถุ ซึ่งมีความยาว L มีพื้นที่หน้าตัด S ถ้าออกแรง df กระทำทางด้านซ้ายของตำแหน่ง X ภายในแท่งวัตถุในแนวตามยาว ที่ตำแหน่ง X นี้อนุภาคในตัวกลางจะมีการกระจัด (Displacement) ตามยาวเท่ากับ ξ ดังภาพประกอบ 2 โดยที่

$$\xi = \xi(x, t) \quad (1)$$



ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะตัวกลางที่คลื่นตามยาวเคลื่อนที่ในแท่งวัตถุ

ให้พิกัด (Coordinate) ทางซ้ายสุดของแท่งวัตถุมีค่า $x=0$ และทางขวาสุด $x=L$ พิจารณาส่วน dx เล็กๆที่อยู่ระหว่าง x และ $x+dx$ เมื่อแท่งวัตถุได้รับแรงกระทำ อนุภาคที่ตำแหน่ง x เคลื่อนที่ได้การกระจัดทางขวาเป็นระยะ ξ ในทำนองเดียวกันอนุภาคที่ตำแหน่ง $x+dx$ จะมีการกระจัดทางขวาเป็นระยะ $\xi+d\xi$

เนื่องจาก dx มีขนาดเล็ก ดังนั้นการกระจัดที่ตำแหน่ง $x+dx$ สามารถแทนได้ด้วยสองเทอมแรกของการกระจายแบบเทเลอร์ (Taylor's expansion) ของ ξ รอบจุด x คือ

$$\xi + d\xi = \xi + \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) dx \quad (2)$$

เนื่องจากทางซ้ายสุดถูกแทนด้วยระยะ ξ และทางขวาแทนด้วยระยะ $\xi+d\xi$ ดังนั้นจากสมการ (2) ความยาวที่เพิ่มขึ้นแทนด้วยสมการ

$$(\xi + d\xi) - \xi = d\xi = \left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) dx \quad (3)$$

ความเครียดตามยาว (strain) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เพิ่มขึ้นกับความยาวเดิม หรือ

$$\text{ความเครียด} = \frac{\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right) dx}{dx} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (4)$$

สมการคลื่นตามยาว (Longitudinal wave equation)

เมื่อใดก็ตามที่วัตถุที่มีความยืดหยุ่นได้รับแรงกระทำ จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเนื้อวัตถุได้นั้น จะเรียกแรงนี้ว่าแรงเค้น

$$\text{แรงเค้น} \quad f = f(x, t)$$

โดยที่ f มีค่าเป็นบวกเมื่อเป็นแรงอัด (Compression) และ f มีค่าเป็นลบเมื่อเป็นแรงดึง (Tension) จากนิยามของ ความเค้น (Stress)

$$\text{ความเค้น} = \frac{f}{S} \quad (5)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) คือ

$$\frac{f}{S} = -Y \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (6)$$

โดยที่ Y = มอดุลัสของยัง

หรือ
$$f = -SY \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (7)$$

ถ้า f = แรงภายในที่ตำแหน่ง x ดังนั้น $f + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)dx =$ แรงภายในที่ตำแหน่ง $x+dx$
จะได้แรงสุทธิทางขวาคือ

$$df = f - (f + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)dx) = -\frac{\partial f}{\partial x} dx \quad (8)$$

หรือ
$$df = SY \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx \quad (9)$$

มวลของส่วน dx มีค่าเท่ากับ $\rho S dx$ โดยที่ $\rho =$ ความหนาแน่น ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวเขียนได้เป็น

$$(\rho S dx) \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = SY \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx \quad (10)$$

กำหนดให้ $c^2 = Y/\rho$ ดังนั้นเขียนสมการ (10) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad (11)$$

ซึ่งสมการ (11) คือสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวใน 1 มิติ (One-dimensional wave equation) โดยมีคำตอบทั่วไปของสมการนี้เป็น

$$\xi = \xi_1(ct - x) + \xi_2(ct + x)$$

และมีค่าความเร็วเฟส (Phase velocity) เป็น

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (12)$$

จากสมการ (12) ถ้าเราทราบความเร็วคลื่นตามยาวในแท่งวัตถุ จะสามารถหาค่ามอดุลัสของยังของวัตถุนั้นๆได้

ความเร็วคลื่นเสียงในของเหลว (Frey et al. 1982 : 104-107)

คลื่นที่เคลื่อนที่ในของเหลวจะเป็นคลื่นตามยาวเช่นเดียวกับคลื่นในแท่งวัตถุ นั่นคือโมเลกุลในของเหลวมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น มีผลทำให้โมเลกุลบริเวณที่อยู่ติดกับโมเลกุลที่มีการสั่นได้รับพลังงาน ทำให้เกิดการอัดและการขยายของโครงแบบ (Configuration) เกิดเป็นคลื่นตามยาวในของเหลว และความเร็วคลื่นในของเหลวอธิบายได้โดยสมการ (12) สำหรับในของเหลวใช้ค่าความยืดหยุ่น บัลค์มอดุลัส (Bulk modulus) แทนค่ามอดุลัสของยัง ดังนั้นจะได้ความเร็วคลื่นในของเหลวเป็น

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}} \quad (13)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} \beta &= \text{แอดิเยแบติก บัลค์มอดุลัส} \\ &= \rho_0 \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

ρ_0 = ความหนาแน่นที่ความดันสมดุล p_0 (Constant equilibrium density)

ρ = ความหนาแน่นที่ความดันใดๆ p (Instantaneous density)

p = ความดันขณะใดๆของจุดจุดหนึ่ง (Instantaneous pressure)

จากสมการ (13) และ (14) เขียนสมการความเร็วในรูป

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{\text{adiabatic}}} \quad (15)$$

จากสมการ (13) β และ ρ_0 เป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของเหลว ซึ่งไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่แน่นอนได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับตัวแปรทั้งสองในรูปสมการที่แน่นอนได้เช่นกัน แต่สามารถหาความเร็วคลื่นในของเหลวได้โดยการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในรูปสมการเชิงตัวเลข (Numerical formula) ตัวอย่างเช่นจากการทดลองหาความเร็วคลื่นในน้ำกลั่น ได้ค่าความเร็วมีความสัมพันธ์กับความดันและอุณหภูมิดังนี้

$$c(p, t) = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2) \left(\frac{P_G}{100} \right) \quad (16)$$

โดย P_G = ความดันเกจ ในหน่วย บาร์

$t = \frac{T}{100}$, T = อุณหภูมิเป็นองศาเซลเซียส

เมื่อมีแรงกระทำในตัวกลางทำให้อนุภาคในตัวกลางมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความดันภายในของเหลว นั่น ค่าอัตราส่วนระหว่างความดันในตัวกลางกับ ความเร็วของอนุภาคในตัวกลาง เรียกว่า ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ หรือค่าความต้านทานการเคลื่อนที่ของคลื่น เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Z = \frac{p}{u} \quad (17)$$

โดยที่ Z = อิมพีแดนซ์จำเพาะ
 p = ความดัน
 u = ความเร็วของอนุภาค

สำหรับคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ในของเหลวมีสมการกระจัดของอนุภาคเป็น

$$\xi = A \sin(kx - \omega t)$$

และมีสมการความดัน กับความเร็วของอนุภาคเป็น

$$p = -k\rho c^2 A \cos(kx - \omega t)$$

และ

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} = -\omega A \cos(kx - \omega t)$$

แทนค่าความดันและความเร็วอนุภาคในสมการ (17) จะได้ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะเป็น

$$Z = \pm \rho_0 c \quad (18)$$

เครื่องหมายบวกในสมการ (18) ขึ้นกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นว่าเคลื่อนที่ไปทางทิศใด และผลคูณของ $\rho_0 c$ เป็นค่าที่มีความสำคัญในการบอกถึงสมบัติของตัวกลางได้ดีกว่าค่า ρ_0 หรือ c เพียงค่าใดค่าหนึ่ง และเรียก $\rho_0 c$ ว่าค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ ของตัวกลาง

การสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิก (Reflection of Ultrasonic Wave)

เมื่อคลื่นตกกระทบบนระหว่างผิวรอยต่อของตัวกลาง 2 ตัวกลาง คลื่นจะมีการหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 และสะท้อนกลับสู่ตัวกลางเดิมได้ ดังนั้นพลังงานบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศที่ตกกระทบบ และบางส่วนจะเคลื่อนที่เข้าสู่อีกตัวกลางหนึ่ง สำหรับคลื่นระนาบเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ตกกระทบบตั้งฉากกับผิวรอยต่อของ 2 ตัวกลาง ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Coefficient of reflection : α_r) และค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน (Coefficient of transmission : α_t) เป็น (Fillipczynski et al. 1966 : 4-7)

$$\alpha_r = \frac{I_r}{I_i} = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2 \quad (19)$$

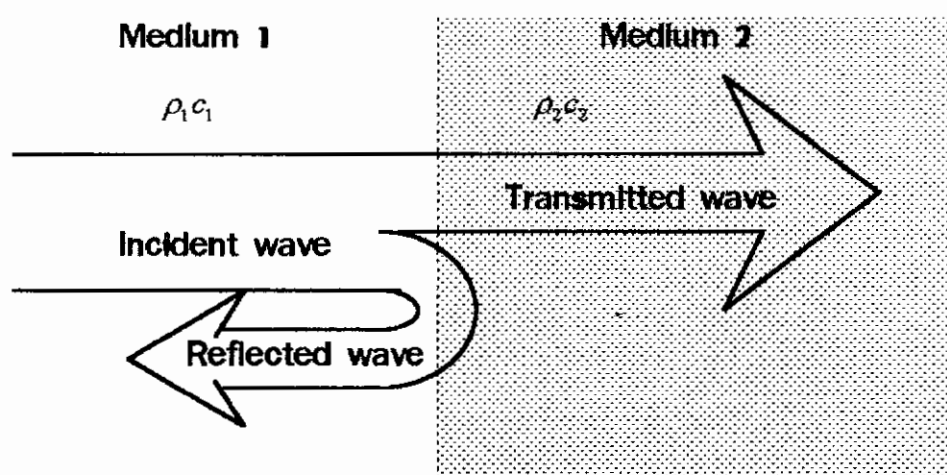
$$\alpha_t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4 \rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2} \quad (20)$$

โดยที่ I_i = ความเข้มของคลื่นตกกระทบ (Intensity of incident wave)

I_r = ความเข้มของคลื่นสะท้อน (Intensity of reflected wave)

I_t = ความเข้มของคลื่นส่งผ่าน (Intensity of transmitted wave)

เลข 1 และ 2 ที่ห้อยท้าย ρ และ c แสดงตัวกลางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3 แสดงการสะท้อน และการส่งผ่านของคลื่นที่มีรอยต่อของ 2 ตัวกลาง

ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนระหว่างตัวกลางสองชนิด ซึ่งได้จากการคำนวณในสมการ (19) แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนของคลื่นตามยาวเมื่อตกกระทบผิวรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลาง
แสดงค่าเป็นเปอร์เซ็นต์

Medium	Characteristic Impedance $\rho c \times 10^{-6}$ $\text{g cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	Al	Brass	Cu	Pb	Hg	Fe	Glass	Oil	Water	Air
Aluminium , Al	1.7	0	14	18	3	1	21	2	74	72	100
Brass	3.6	14	0	0.2	5	10	1	23	87	86	100
Copper , Cu	4.1	18	0.2	0	7	13	0.3	19	88	87	100
Lead , Pb	2.7	3	5	7	0	1	9	9	80	79	100
Mercury , Hg	1.9	1	10	13	1	0	16	4	76	75	100
Steel , Fe	4.6	21	1	0.3	9	16	0	31	89	88	100
Glass	1.8	2	23	19	9	4	31	0	67	65	100
Oil	0.13	74	87	88	80	76	89	67	0	0	100
Water	0.14	72	86	87	79	75	88	65	0	0	100
Air	0.000041	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0

การดูดกลืนพลังงานและการลดลงของคลื่น (Absorption and Attenuation of Wave)

การวัดทางอัลตราโซนิกทำให้เราสามารถหาค่าสมบัติต่างๆของตัวกลางได้ โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางนั้นๆ ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นกับลักษณะของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน และปัจจัยเชิงเรขาคณิต (Geometrical factor) เช่น การกางออกของลำคลื่น (Divergence of the beam) ซึ่งสามารถกำจัดปัจจัยนี้ได้โดยเลือกศึกษาเฉพาะในบริเวณที่ไม่มีผลของการกระจายของคลื่นเกิดขึ้น (Near field) (Filipczynski et al. 1966 : 64-65)

การลดลงของความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกเกิดจากโครงสร้างทางกายภาพของตัวกลาง โดยแบ่งออกเป็น การกระเจิง (Scattering) และการดูดกลืนพลังงานของตัวกลาง (Absorption) คือ

การกระเจิง เป็นการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไปจากทิศทางเดิม อันเนื่องมาจากการสะท้อนในตัวกลางที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เช่น ฟองอากาศในของแข็ง สารแขวนลอยในของเหลว เป็นต้น

การดูดกลืน เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้วถูกตัวกลางเปลี่ยนพลังงานคลื่นบางส่วน ไปเป็นพลังงานรูปอื่นไว้ภายในเนื้อตัวกลาง เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เป็นต้น (Truell, Elbaum & Chick. 1969 : 53-65)

ถ้าปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปของคลื่นที่เกิดจากการเลี้ยวเบน (Diffraction) การกระจายออกของคลื่น รวมถึงการกระเจิง มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปโดยตัวกลาง อัตราการลดลงของแอมพลิจูด (Amplitude) ในสัญญาณคลื่นที่ตรวจวัดได้ จะเรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นความดัน (Attenuation coefficient of stress wave : α) ในตัวกลางชนิดนั้น ซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลาง และค่าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้ศึกษา

พิจารณาคลื่นระนาบที่เกิดจากทรานส์มิชเชอร์ เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะมีอัมพลิจูดของสัญญาณลดลง และมีความสัมพันธ์กับระยะทางดังสมการ

$$\sigma(x) = \sigma_0 e^{-\alpha x} \quad (21)$$

โดยที่ $\sigma(x)$ = อัมพลิจูดของสัญญาณที่ตำแหน่ง x
 σ_0 = อัมพลิจูดของสัญญาณที่ตำแหน่งเริ่มต้น $x=0$
 α = สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น (Attenuation coefficient)
 x = ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

จากสมการจากรูปใหม่ได้เป็น

$$\ln \sigma(x) = \ln \sigma_0 - \alpha x \quad (22)$$

ถ้าพิจารณาสองตำแหน่งที่แตกต่างกัน x_1 และ x_2 โดยที่ $x_1 < x_2$ ดังนั้นสามารถหาสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นได้จากสองจุดนี้ คือ

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left(\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} \right) \quad (23)$$

ค่าลอการิทึมในอัตราส่วนของอัมพลิจูด เช่น $\sigma(x_1)$ และ $\sigma(x_2)$ มีค่าในหน่วย เดซิเบล และ เนเปอร์ (Nepers) ดังนี้

$$20 \log \left(\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} \right) \text{ db}$$

และ

$$\ln \left(\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} \right) \text{ nepers}$$

ดังนั้น

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left(\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} \right) \text{ nepers / unit length} \quad (23.1)$$

และ

$$\alpha = \frac{20}{(x_2 - x_1)} \log \left(\frac{\sigma(x_1)}{\sigma(x_2)} \right) \text{ db / unit length} \quad (24)$$

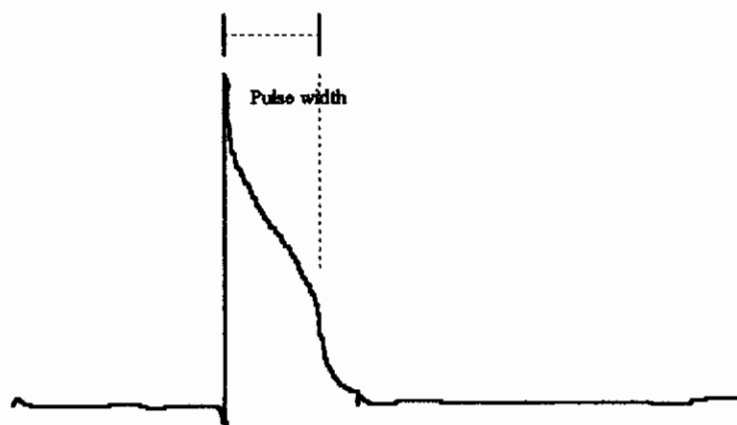
โดยมีความสัมพันธ์ในหน่วยทั้งสองดังนี้

$$\alpha (\text{db / unit length}) = 8.686 \alpha (\text{nepers / unit length}) \quad (25)$$

วิธีการตรวจวัดทางอัลตราโซนิก (Ultrasonic Measurement)

การตรวจวัดความเร็วคลื่น และค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก ที่ให้ความถูกต้องสูง นิยมใช้การศึกษาสัญญาณคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป โดยมีขั้นตอนการตรวจวัดที่สำคัญอยู่ 5 ขั้นตอน ดังนี้

1. กำเนิดสัญญาณกระตุ้น โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Pulse generator) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้าที่มีความกว้างสัญญาณ (Pulse width) น้อยๆ เพื่อไปกระตุ้นทรานส์มิชเชอร์ ให้สร้างคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่สูง ดังภาพประกอบ 4



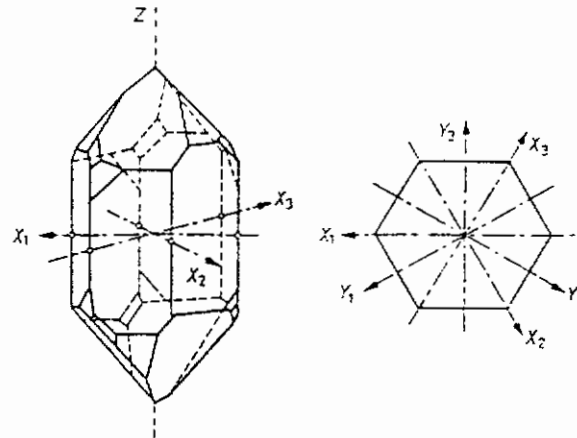
ภาพประกอบ 4 แสดงรูปสัญญาณกระตุ้นจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า

2. การสร้างคลื่นอัลตราโซนิก จะใช้สัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ไปกระตุ้นทรานส์มิชเชอร์ตัวส่ง (Transmitter) ให้สร้างคลื่นอัลตราโซนิกออกสู่ตัวกลางต่อไป

หลักการทำงานของทรานส์มิชเชอร์คือ การแปลงรูปพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่งนั่นเอง ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลของการสั่น หรือในทางกลับกันก็ตาม ทรานส์มิชเชอร์ที่นิยมใช้โดยทั่วไปมีสองแบบคือ แบบการสั่นของควอตซ์ (Quartz oscillator) และการสั่นของเซรามิก (Ceramic oscillator) สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ทรานส์มิชเชอร์แบบควอตซ์เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก

ทรานส์มิชเชอร์แบบควอตซ์ ใช้ผลึกควอตซ์ที่มีสมบัติแบบไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) โดยเมื่อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าผลึกเกิดขึ้น จะทำให้เกิดความเค้นทางกล (Mechanical stress) ขึ้นภายในโครงสร้างของผลึกและจะคืนกลับสู่โครงสร้างเดิมเมื่อความต่างศักย์ที่คร่อมผลึกหมดไป ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางไฟฟ้าเช่นศักย์ไฟฟ้าและประจุไฟฟ้า กับปริมาณทางกลเช่น ความเค้นและความเครียด มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (Filipczynski et al. 1966 : 28-31)

สำหรับความเค้นทางกลที่เกิดขึ้นในผลึกจะขึ้นกับสมมาตรของโครงสร้างผลึก ซึ่งมีด้วยกัน 3 แบบ โดยแบ่งตามแกนผลึกศาสตร์ (Crystallographic axis) ของโครงสร้างแบบ hexagonal ดังแสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 แสดงรูปผลึกควอทซ์ และแกนผลึกศาสตร์ X , Y และ Z

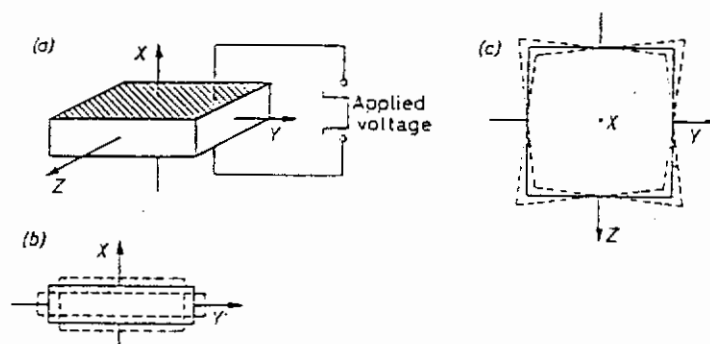
X-axis เป็นแกนที่ลากผ่านมุมของรูปหกเหลี่ยม เรียกแกนนี้ว่า แกนไฟฟ้า (Electric axis)

Y-axis เป็นเส้นที่ลากตั้งฉากกับผนังของรูปหกเหลี่ยมเรียกแกนนี้ว่า แกนทางกล(Mechanical axis)

Z-axis เป็นเส้นที่ลากตั้งฉากกับแกน X และแกน Y เรียกแกนนี้ว่า แกนแสง (Optic axis)

โดยทั่วไปทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ทางอัลตราโซนิกจะมีลักษณะเป็นแผ่นบาง (Plate or disc) โดยการสั่นจะขึ้นอยู่กับการตัดแผ่นผลึกเป็นสำคัญ ในการตัดผลึกก็จะเลือกพิจารณาตามแกนผลึกศาสตร์เพื่อให้ได้ชนิดของคลื่นอัลตราโซนิกตามที่ต้องการ ซึ่งแบ่งประเภททรานส์ดิวเซอร์ตามการตัดผลึกออกเป็น 3 แบบคือ X-cut quartz , Y-cut quartz และ Z-cut quartz สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ผลึกประเภท X-cut quartz เพื่อสร้างคลื่นอัลตราโซนิกชนิดคลื่นตามยาว

ผลึก X-cut quartz คือผลึกที่ถูกตัดให้ผิวหน้าของแผ่นผลึกตั้งฉากกับแกน X-axis การนำผลึกนี้ไปใช้งานผิวทั้งสองด้านของผลึกจะถูกเคลือบด้วยสารโลหะ (Metallic substance) ที่มีศักย์ไฟฟ้าคร่อมอยู่ แผ่นผลึกจะเกิดการขยายในทิศทางของศักย์ไฟฟ้าในแนวแกน X และเมื่อความต่างศักย์มีค่าน้อยลงก็จะเกิดการหดตัวในแนวแกน X ในขณะเดียวกันจะทำให้เกิดการขยายตัวแนวแกน Y ด้วย แต่จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน Z นั่นคือจะทำให้เกิดความเครียดตามยาวออกสู่ผิวหน้าของแผ่นผลึกเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงรูปทรานส์ควอตซ์ชนิด X-cut quartz (a) การกระตุ้นด้วยสัญญาณไฟฟ้า (b) เกิดความเครียดในแนวแกน X และแกน Y (c) เกิดความเครียดเฉือนในระนาบ Y-Z

3. การเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลาง เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของทรานส์ควอตซ์ก็จะเข้าสู่ตัวกลางที่อาจจะเป็นของแข็งหรือของเหลวก็ตาม ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นจะขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลาง ชนิดของคลื่น และตลอดจนค่าความถี่ของคลื่นและอุณหภูมิของตัวกลางด้วย

ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เราสามารถศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวกลางได้โดยง่าย โดยทำการกำจัดหรือควบคุมปัจจัยต่างๆในการทดลอง เช่นทำการทดลองที่ค่าอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง การใช้ทรานส์ควอตซ์ที่ทราบค่าความถี่แน่นอน เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาศักยภาพทางอัลตราโซนิกต้องอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้นแล้ว ซึ่งต้องอาศัยทรานส์ควอตซ์อีกตัวหนึ่งในการแปลงสัญญาณคลื่นนั้น

4. การตรวจรับคลื่นอัลตราโซนิก จะใช้ทรานส์ควอตซ์อีกตัวหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมือนกันทำหน้าที่รับ (Receiver) คลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ผ่านมาจากตัวกลาง โดยจะเปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นให้อยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้า และจะส่งสัญญาณนั้นไปสู่ออสซิลโลสโคปต่อไป

5. การวิเคราะห์สัญญาณ อาศัยคุณสมบัติของออสซิลโลสโคปที่สามารถวัดหาค่าเวลา และความสูงของสัญญาณที่สัมพันธ์กับอัมพลิจูดของคลื่นอัลตราโซนิกได้

การตรวจวัดความเร็วคลื่น (Velocity Measurement)

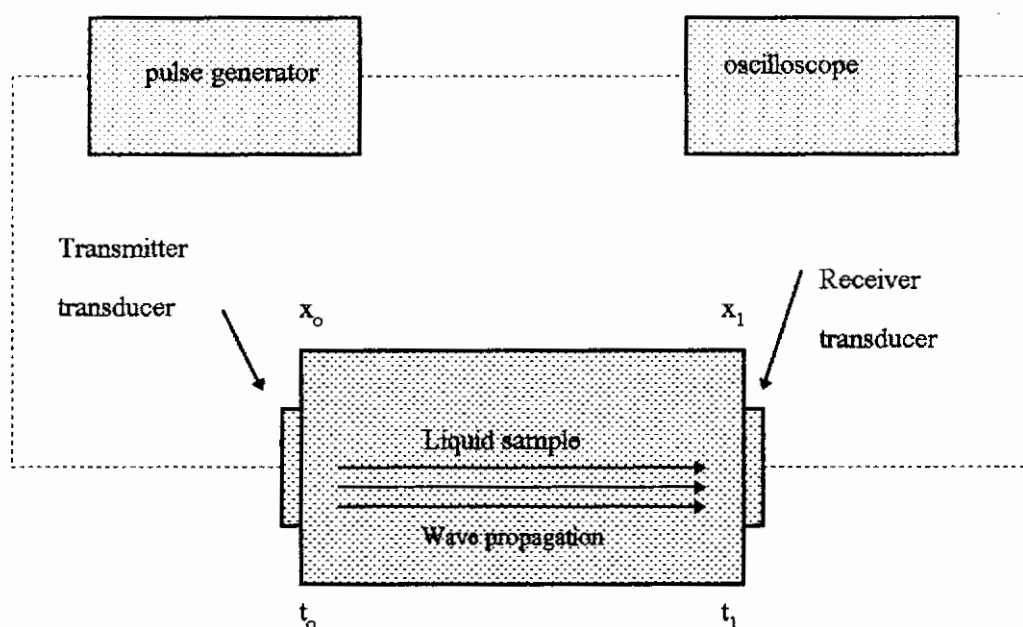
การวัดความเร็วคลื่นในงานวิจัยนี้ ใช้วิธีการวัดความเร็วแบบธรรมดา คือการวัดระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลาง และการวัดเวลาที่ใช้เดินทางในช่วงระยะทางดังกล่าว ซึ่งจะได้ค่าความเร็วของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ในตัวกลางนั้นดังสมการ (26) และแสดงภาพการตรวจวัดดังภาพประกอบ 7

$$c = \frac{x}{t} \quad (26)$$

โดยที่ c = ความเร็วคลื่นในของเหลว

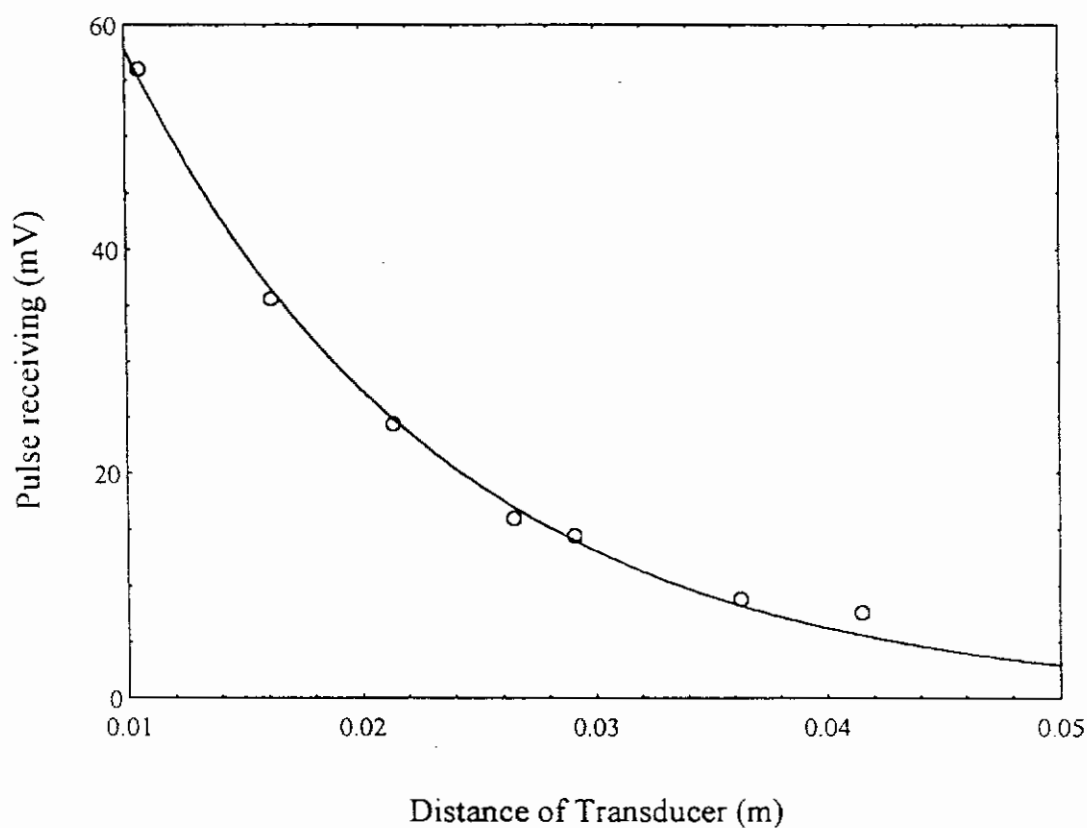
x = ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ในของเหลว $= x_1 - x_0$

t = เวลาที่คลื่นใช้เดินทางเป็นระยะทาง $x = t_1 - t_0$



ภาพประกอบ 7 แสดงแผนภาพการตรวจวัดคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลว

การทดลองเพื่อวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น (α) มีวิธีการวัดสัญญาณคล้ายกับการตรวจวัดความเร็วคลื่น แต่ต่างกันตรงที่การวัดสัมประสิทธิ์การลดลงจะวัดความสูงของแอมพลิจูดสัญญาณคลื่นที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป กับค่าระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการวัดค่าทั้งสองที่ระยะห่าง 7 ค่าด้วยกัน สามารถแสดงตัวอย่างผลการตรวจวัดแอมพลิจูดได้ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นกับระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์

จากผลที่ได้เทียบได้กับสมการ (21) ที่แสดงค่าแอมพลิจูดคลื่นอัลตราโซนิกที่ระยะห่างต่าง ๆ กัน เมื่อทำการจัดรูปสมการ (21) ใหม่จะได้เป็น

$$x\alpha = \ln\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right) \quad (27)$$

หรือ

$$x\alpha \log e = \log\left(\frac{\sigma_0}{\sigma}\right) \quad (28)$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปเลขฐานสิบจะได้

$$\sigma(x) = \sigma_0 10^{-\alpha \log e} \quad (29)$$

โดยที่ $\log e = 0.4343$

การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น (α) จากกราฟจะใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square fit) ของข้อมูลทั้งหมดให้อยู่ในรูปสมการเลขฐานสิบ ที่มีสมการทั่วไปเป็น

$$\sigma(x) = a 10^{bx} \quad (30)$$

โดย a, b เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลข และเมื่อเทียบกับสมการ (29) แล้วค่าพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าดังนี้

$$a = \sigma_0 \quad (31)$$

$$b = -\alpha \log e \quad (32)$$

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นสามารถหาได้จากพารามิเตอร์ b ดังนี้

$$\alpha = \frac{-b}{0.4343} \quad (33)$$

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลหาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดในรูปแบบของสมการที่ (30) ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณจะให้ค่าพารามิเตอร์ a, b ออกมา

การหล่อลื่น (Lubrication) (ธนรัตน์ ทราญเพชร. 2535 : 1-30)

การหล่อลื่น คือการลดแรงเสียดทานระหว่างผิววัตถุที่สัมผัสกัน โดยมีฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นคั่นระหว่างผิวสัมผัส การหล่อลื่นแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. **การหล่อลื่นแบบสมบูรณ์ (Full film lubrication)** คือการที่มีฟิล์มของน้ำมันหล่อลื่นแทรกอยู่เต็มระหว่างผิวสัมผัส การหล่อลื่นแบบนี้ทำให้น้ำมันหล่อลื่นสามารถรับภาระที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีของผิววัตถุซึ่งเกิดจากความดันที่เกิดจากน้ำมันหล่อลื่นเอง (Hydrostatic) และแรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนไหวยของน้ำมันหล่อลื่น (Hydrodynamic) ซึ่งการหล่อลื่นแบบนี้ส่วนมากจะใช้ในการหล่อลื่นแบบวิ่ง ซึ่งมีแรงเฉือนอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นความหนืด (Viscosity) จึงถูกกำหนดขึ้นมาจากแรงเฉือนเหล่านี้

2. **การหล่อลื่นแบบไม่สมบูรณ์หรือมีขอบเขต (Boundary lubrication)** เกิดเมื่อผิวสัมผัสบางจุดมีการรับน้ำหนักหรือเสียดทานอย่างมาก การหล่อลื่นแบบนี้มักจะเกิดขึ้นในขณะที่ยานยนต์ใหม่ ๆ หรือเครื่องยนต์เก่าที่มีผิวสัมผัสขรุขระ จึงทำให้เกิดการหล่อลื่นเพียงบางจุด เพราะฉะนั้นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้จึงต้องมีคุณสมบัติในการป้องกันการสึกหรอของโลหะ เช่น

2.1 สารพวกโพลาร์โมเลกุล (Polar molecule) ซึ่งมีสมบัติเกาะติดผิวโลหะได้ดีทำให้เกิดเป็นฟิล์มบาง ๆ ซึ่งยากต่อการที่แรงเฉือนจะทำให้ฟิล์มขาดหรือหลุดจากผิวสัมผัส

2.2 สารพวกกรดไขมัน (Fatty acid) สารจำพวกนี้จะทำปฏิกิริยากับโลหะเกิดเป็นสบู่โลหะ (Metalic soap) เคลือบผิวสัมผัส อย่างไรก็ตาม ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 200°C ฟิล์มหล่อลื่นมักจะละลายหรือหลุดไป ดังนั้นจึงใช้สารหล่อลื่น ลามेलลาร์ (Lamellar) เช่น กราไฟต์ , โมลิบดีนัมไดซัลไฟด์ หรือสารพวกปรับแรงกดดันสูง (Extreme pressure) ที่มีส่วนประกอบของกำมะถัน , ฟอสฟอรัสและคลอรีน

3. การหล่อลื่นแบบผสม (Mixed lubrication) เกิดขึ้นเมื่อมีการหล่อลื่นแบบที่ 1 และ 2 รวมกัน พบได้เสมอในระบบเกียร์ของรถยนต์และการหล่อลื่นลูกปืน

น้ำมันหล่อลื่น (Lubricating Oil)

น้ำมันหล่อลื่น เป็นผลิตภัณฑ์หล่อลื่นชนิดหนึ่ง โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ

$$\text{น้ำมันหล่อลื่น} = \text{น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน} + \text{สารเพิ่มคุณภาพทางเคมี} + \text{สี}$$

(Base Oil) (Additive) (Dye)

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐาน โดยทั่วไปในการผลิตจะใช้น้ำมันดิบประเภท Paraffinic Base กับ Naphthenic Base เป็นวัตถุดิบในการผลิต เมื่อนำน้ำมันดิบมากลั่นในหอกลั่นบรรยากาศ เพื่อแยกเอาน้ำมันเชื้อเพลิงต่าง ๆ ออกไปแล้ว ส่วนที่เหลือจะนำเข้ากลั่นต่อในหอกลั่นสุญญากาศ (Vacuum Tower) เพื่อให้ส่วนที่เป็นน้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานระเหยกลั่นตัวแยกออกไป หลังจากนั้นจะนำมากำจัดสิ่งที่ไม่ต้องการออก

น้ำมันหล่อลื่นพื้นฐานมีอยู่มากมายหลายชนิด ขึ้นอยู่กับคุณภาพและกระบวนการกลั่น เช่น

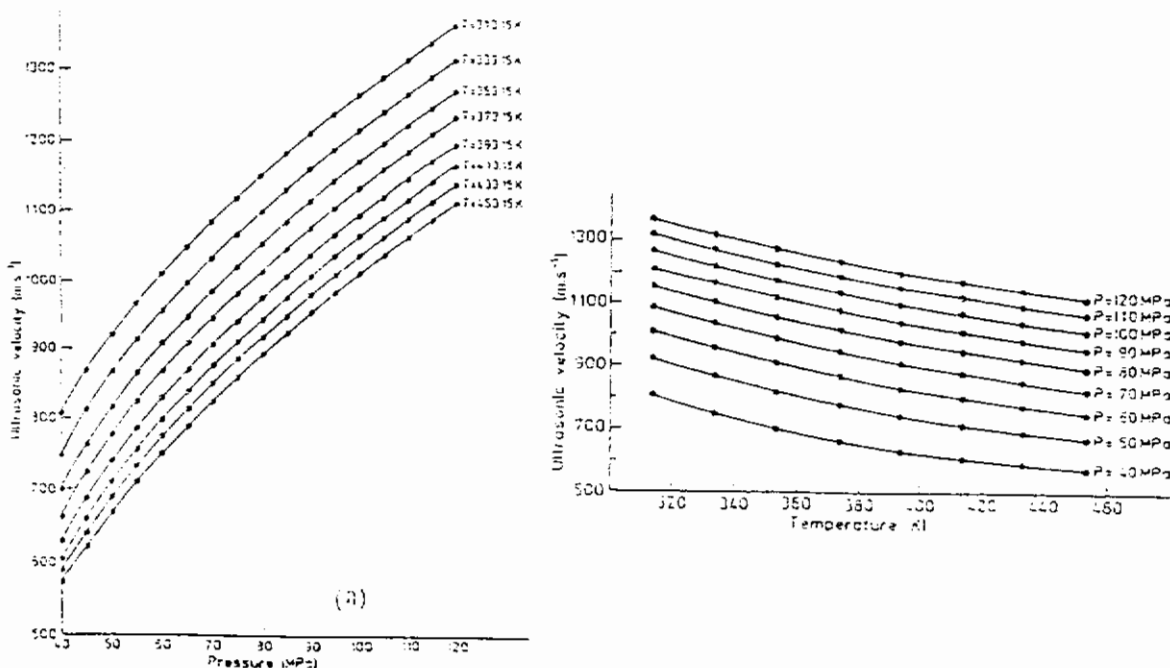
1. LCT BASE OIL (Low Cold Test Base) ผลิตจากน้ำมันดิบประเภท Naphthenic มีจุดไหลเหว้า และจุดวาบไฟสูง
2. EXTRACTED LCT BASE OIL ผลิตจากน้ำมันดิบประเภท Naphthenic โดยผ่านกระบวนการขจัดด้วยตัวทำละลาย เพื่อขจัดสารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว ทำให้มีดัชนีความหนืดสูงขึ้น และรวมตัวกับออกซิเจนได้ยาก เหมาะสำหรับน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซล
3. SNO BASE OIL (Paraffin and Solvent Neutral Oil) ผลิตจากน้ำมันดิบประเภท Paraffinic โดยผ่านกระบวนการขจัดด้วยตัวทำละลาย จะได้น้ำมันที่ให้ค่าดัชนีความหนืดสูง มีอัตราการระเหยต่ำ นำไปทำเป็นน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์เบนซิน, ดีเซล และไฮดรอลิก
4. BSO BASE OIL (Bright Stock Oil) เป็นน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้หล่อลื่นในงานอุตสาหกรรม มีความหนืดมากกว่า SNO

เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุรวุฒิ กิจสัมพันธ์ (2535 : 1-30) ได้ทำการวัดสมบัติทางกลของวัสดุตัวอย่าง เช่น โมดูลัสของยัง (Young's modulus) , โมดูลัสเฉือน (Shear modulus) และ อัตราส่วนของพัวซอง (Poisson's ratio) ด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก สมบัติทางกลดังกล่าวจะสัมพันธ์โดยตรงกับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ทั้งคลื่นชนิดตามยาวและคลื่นชนิดตามขวางที่เคลื่อนที่ในวัสดุทดสอบ ในการวิจัยได้ใช้ทรานส์ดิวเซอร์กำเนิดคลื่นตามยาวความถี่ 3.5 MHz และคลื่นตามขวางความถี่ 2.25 MHz ได้แสดงให้เห็นว่าการตรวจวัดสมบัติทางกลของวัสดุสามารถกระทำได้โดยรวดเร็ว ด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

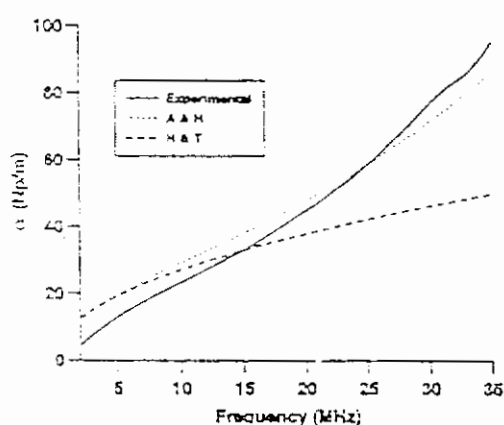
เซกอล (Sehgal. 1995 : 155-161) ได้ศึกษาสมบัติเชิงโมเลกุล (Molecular property) ในของเหลวบริสุทธิ์ โดยศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกเมื่อความดันภายในของเหลวมีการเปลี่ยนแปลง ผลการศึกษาพบว่าค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันและความหนาแน่นในของเหลวบริสุทธิ์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับสมบัติเชิงโมเลกุล เช่น ความดันภายใน พลังงานเสรีของการยืดหยุ่น (Free energy) และค่าคงที่ผลของแวนเดอร์วาลส์ (Effective Vander Waals' constant) โดยทดลองกับน้ำ แอลกอฮอล์ และ สารฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon)

ดาร์ริดอน และคณะ (Daridon et al. 1996 : 447-449) ได้ศึกษาน้ำมันปิโตรเลียมเหลวที่ใช้ในระบบของเหลวความดันสูง ด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก เพื่อหาส่วนผสมและสมการสถานะสำหรับของเหลวความดันสูง (Hyperbaric fluid) โดยทำการทดลองหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก กับแบบจำลองทางเทอร์โมไดนามิกภายใต้สภาพการควบคุมอุณหภูมิ ระหว่าง 40°C - 180°C ข้อมูลที่ได้สามารถแสดงการเปรียบเทียบสมการสถานะต่างๆ ได้ดังภาพประกอบ 9(ก) และภาพประกอบ 9(ข)

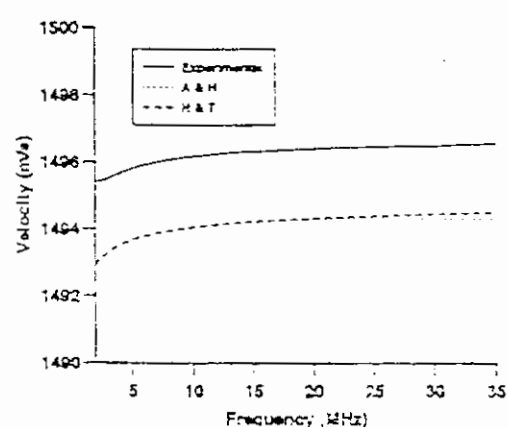


ภาพประกอบ 9 (ก) แสดงความเร็วคลื่นในของเหลวความดันสูงที่เป็นฟังก์ชันกับความดันสำหรับค่าอุณหภูมิคงที่ต่างๆกัน (ข) แสดงความเร็วคลื่นในของเหลวความดันสูงที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ สำหรับค่าความดันคงที่ต่างๆกัน

ออสติน และคณะ (Austin et al. 1996 : 369-374) ได้ศึกษาสมบัติของสารแขวนลอยประเภทโลหะ ด้วยทฤษฎีและแบบจำลองของอัลลิกรา (Alligra) และ โฮเลย์ (Howley) ที่มีลักษณะของอนุภาคแขวนลอยแบบทรงกลม และทำการศึกษาการละลายหรือการจับตัวของดินขาวที่ละลายในตัวทำละลายด้วยทฤษฎีของ ฮาร์เกอร์ (Harker) และ เทมเปิล (Temple) ทั้งนี้ ออสตินทำการวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น และค่าความเร็วคลื่นในช่วงความถี่ 2-50 MHz เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี ซึ่งแสดงผลดังภาพประกอบ 10 และภาพประกอบ 11

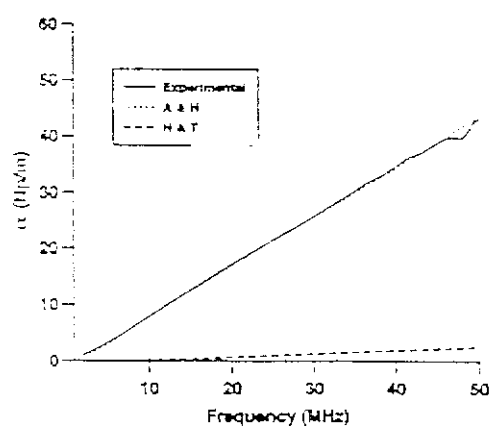


(a)

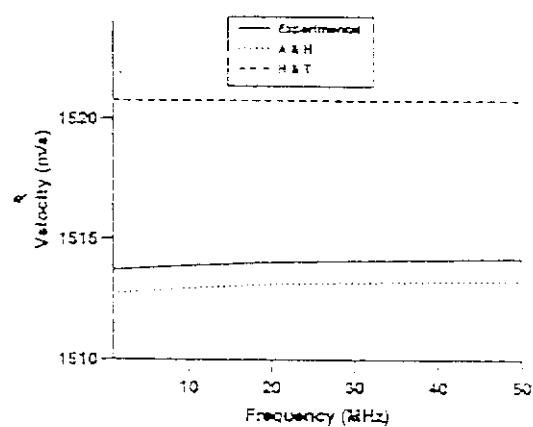


(b)

ภาพประกอบ 10 1% ของอนุภาคแขวนลอยของโลหะเส้นผ่านศูนย์กลาง $4 \mu\text{m}$ ในน้ำอุณหภูมิ 25°C ใช้แบบจำลองของ ฮาร์เกอร์ และ เทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และ โฮเลย์ (A&H)



(a)



(b)

ภาพประกอบ 11 5.6% ของอนุภาคแขวนลอยของ Polystyrene เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 nm ในน้ำอุณหภูมิ 25°C ใช้แบบ จำลองของ ฮาร์เกอร์ และ เทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และ โฮเลย์ (A&H)

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
2. ขั้นตอนการออกแบบ และสร้างชุดทดลอง
3. วิธีดำเนินการทดลอง

วัสดุ อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

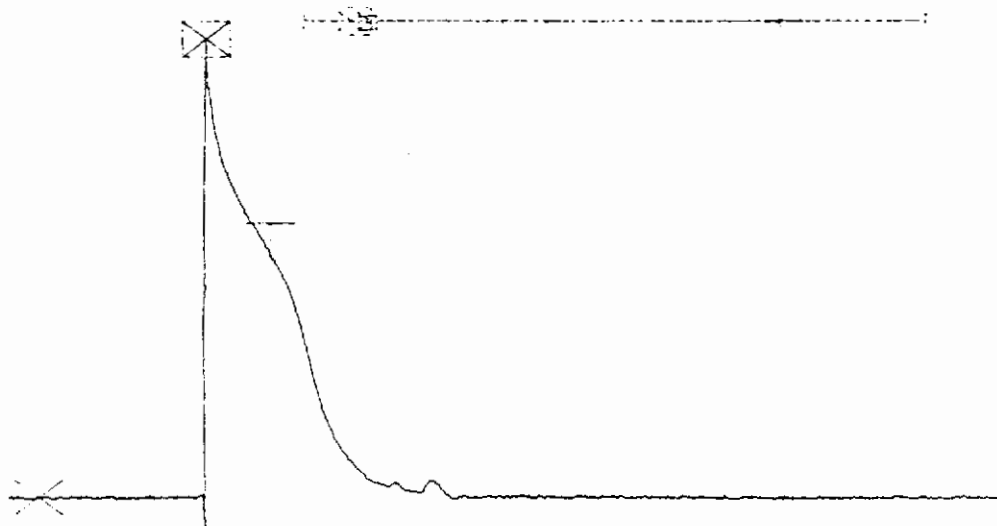
1. ต้นกำเนิดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Pulse Generator)

เป็นเครื่องสร้างสัญญาณไฟฟ้า เพื่อส่งไปยังทรานส์ดิวเซอร์ โดยจะกระตุ้นขั้วไฟฟ้าที่ประกบทั้งสองข้างของผลึกปิโซอิเล็กทริก ทำให้ผลึกสั่นด้วยความถี่พื้นฐาน f ซึ่งจะก่อให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกที่มีความถี่ค่าคงที่กลุ่มหนึ่ง ออกจากทรานส์ดิวเซอร์ เข้าสู่สารตัวอย่างต่อไปได้

สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดสัญญาณรุ่น SPIKE 1000 PR โดยสามารถปรับค่าความถี่สัญญาณการกระตุ้นได้ในช่วง 1 -10 KHz



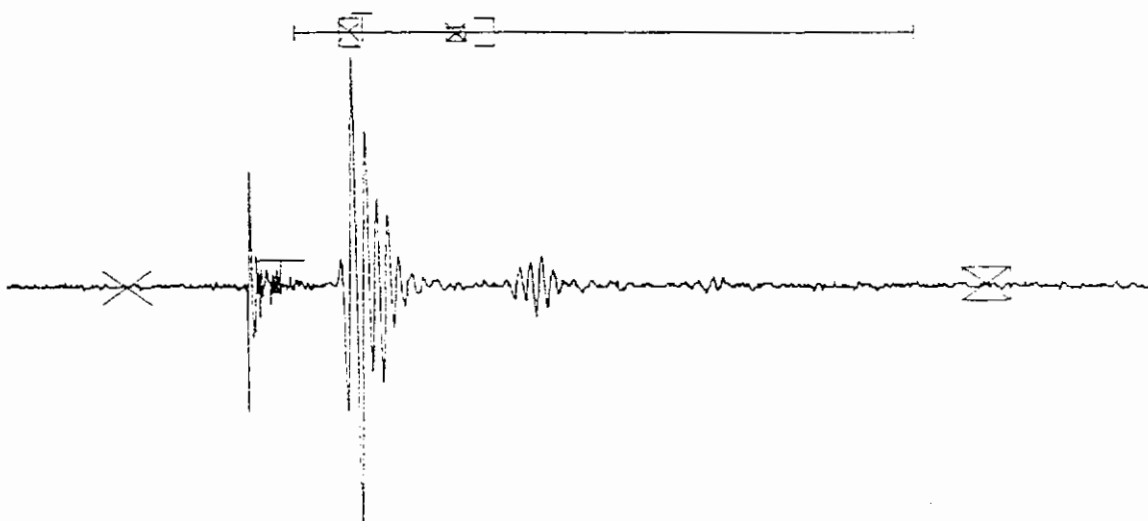
ภาพประกอบ 12 แสดงต้นกำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 13 แสดงรูปสัญญาณไฟฟ้าจากตัวกำเนิดสัญญาณอัลตราโซนิก ก่อนเข้าสู่ทรานส์ดีวเซอร์ตัวส่ง

$$\Delta U_1 = 0.8\%$$

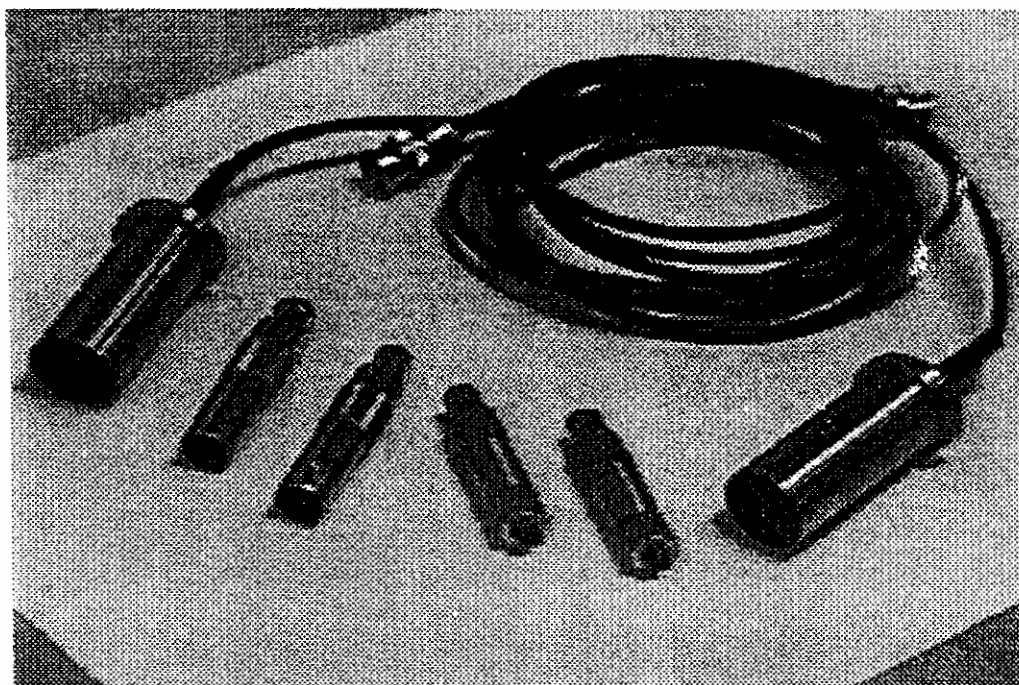
$$\overline{\Delta T} = 14.22 \mu s$$



ภาพประกอบ 14 แสดงรูปสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกจากทรานส์ดีวเซอร์ตัวรับ เมื่อถูกกระตุ้น 1 ครั้ง

2. ทรานสดิวเซอร์ (Transducer)

เป็นต้นกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก ในวิจัยนี้เป็นทรานสดิวเซอร์ที่สร้างคลื่นตามยาว มีค่าความถี่ 5.5 MHz จำนวน 2 ตัว โดยตัวที่หนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวสร้างคลื่นอัลตราโซนิก ส่วนอีกตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับคลื่น เพื่อแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าเข้าสู่ออสซิลโลสโคปต่อไป



ภาพประกอบ 15 แสดงรูปและขนาดของทรานสดิวเซอร์

ตาราง 3 แสดงคุณสมบัติของทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

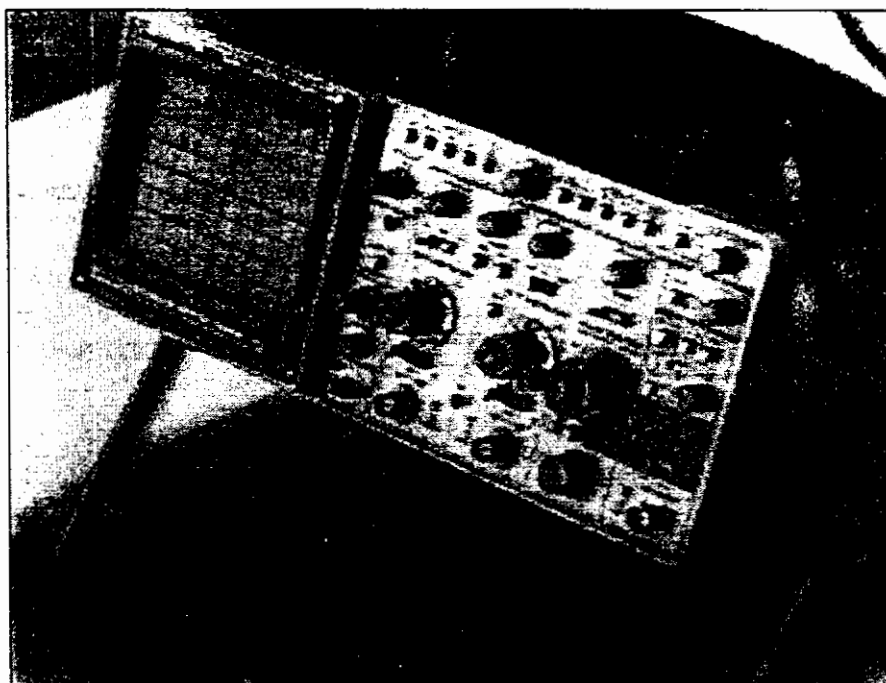
คุณสมบัติ	รายละเอียด
Frequency	5.5 MHz (Transmitter) , 5.0 MHz (Receiver)
Amplifier	Low output impedance enabling long cables to be used without loss of signal
Power supply	1.5 volt 2,800 hr.
Length	54 mm.
Diameters	20 mm.
Weight	50 g.
Case material	stainless steel
Operating temperature	0°c to 70 °c
Cable length	up to 100 m.

3. แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Power Supply)

ทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าแก่หลอดความร้อน(Heater) เครื่องควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ (Digital temperature control) และ มอเตอร์ที่ใช้กวานของเหลวตัวอย่าง โดยใช้กำลังไฟฟ้าสูงสุด 1,500 วัตต์

4. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดสัญญาณไฟฟ้าจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ และแสดงสัญญาณภาพคลื่นอัลตราโซนิกที่ตรวจวัดได้ พร้อมกับสามารถบันทึกสัญญาณภาพ และส่งสัญญาณภาพไปสู่เครื่องพิมพ์ภาพ (Plotter) ได้



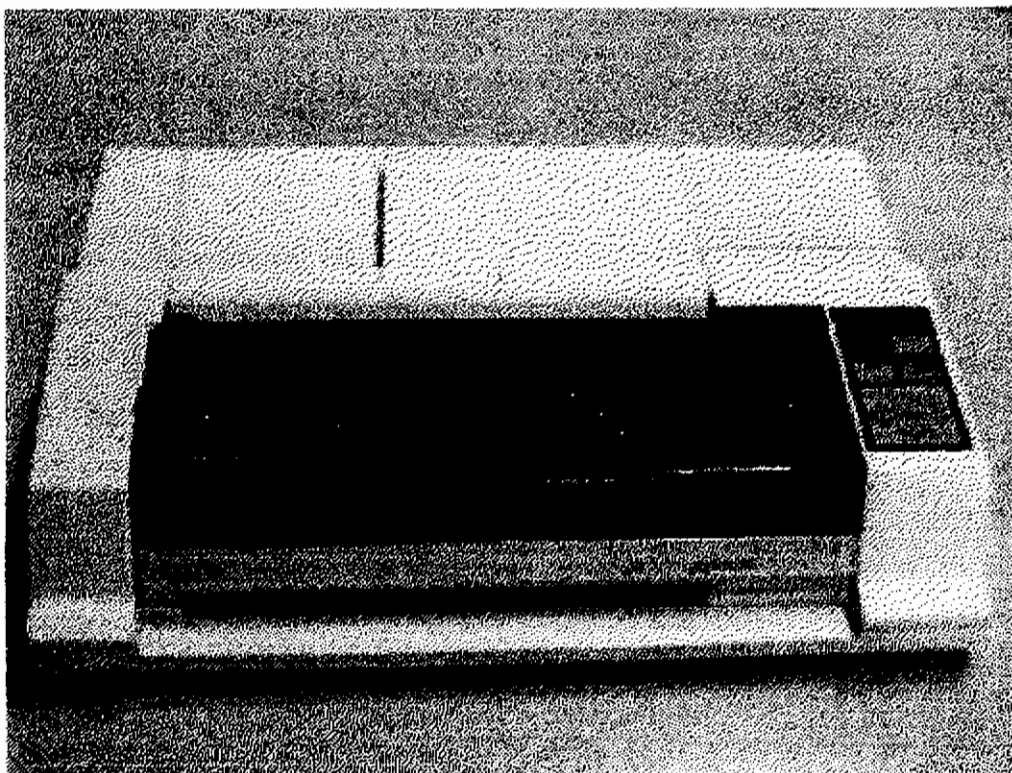
ภาพประกอบ 16 แสดงภาพออสซิลโลสโคป TEKTRONIX 2232

ตาราง 4 แสดงคุณสมบัติของออสซิลโลสโคป Tektronix 2232 (Tek Operators Manual. 1988 : 1-5)

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Oscilloscope	Tektronix2232nonstorage and digital storage
Analog bandwidth	100 MHz
Vertical range	2 mV per division to 5 V per division
Horizontal range	0.5 second to 50 nsecond per division
Trigger system	20 MHz
Digital storage	100 megasamples per second , maximum stored record length per waveform , 4096 bytes for single channel
Output	RS232 interface port

5. เครื่องพิมพ์ภาพ (Plotter)

ทำหน้าที่พิมพ์รูปสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิกที่มาจากออสซิลโลสโคป เพื่อนำภาพสัญญาณที่ได้ไปหาค่าเวลาและความสูงของสัญญาณ สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องพิมพ์ภาพของบริษัท Tektronix รุ่น HC100



ภาพประกอบ 17 แสดงภาพเครื่องพิมพ์ภาพ Tektronix HC100

6. ภาชนะบรรจุของเหลวตัวอย่าง

เป็นภาชนะใส่ของเหลวที่ต้องการศึกษาคุณสมบัติกายภาพ โดยมีขนาด กว้าง 28 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร ลึก 10 เซนติเมตร โดยภายในภาชนะมีการติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้

- 6.1 อุปกรณ์สร้างความร้อน (Heater) ชนิดลดความร้อน
- 6.2 เทอร์มोकัปเปิล (Thermocouple)
- 6.3 มอเตอร์กวนของเหลว
- 6.4 เทอร์โมมิเตอร์
- 6.5 ขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตรจำนวน 3 ใบ

7. ของเหลวตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ใช้ของเหลวตัวอย่าง 2 ชนิดคือ น้ำกลั่น (Distilled water) และ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ (Lubricating oil) โดยนำผลการทดลองในน้ำกลั่นมาปรับเทียบเครื่องมือตรวจวัดก่อนการทดลองจริงกับน้ำมันหล่อลื่นชนิดธรรมดาที่ใช้กับเครื่องยนต์ทั่วไป ที่มีความหนืดต่างกัน 3 ขนาด แสดงรายละเอียดดังตาราง 5

ตาราง 5 แสดงรายละเอียดน้ำมันหล่อลื่นที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของน้ำมันหล่อลื่น	จำนวนที่ใช้ (ลิตร)
SAE30	5
SEA40	5
SEA50	5

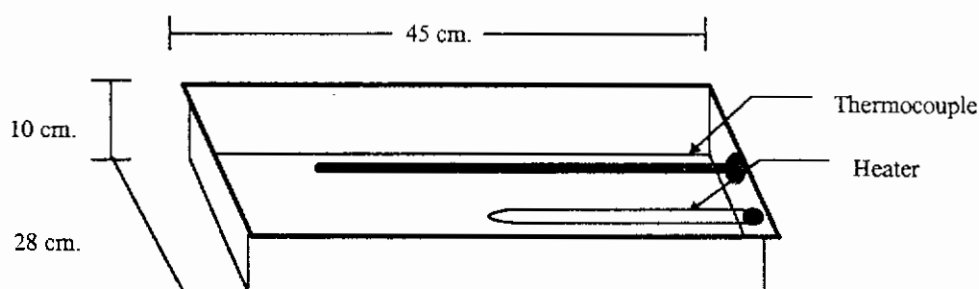
ขั้นตอนการออกแบบ และสร้างชุดทดลอง

1. ขั้นตอนการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อหาสมบัติกายภาพของของเหลว

1.1 การสร้างอ่างควบคุมอุณหภูมิของของเหลว

มีขั้นตอนการสร้างดังนี้

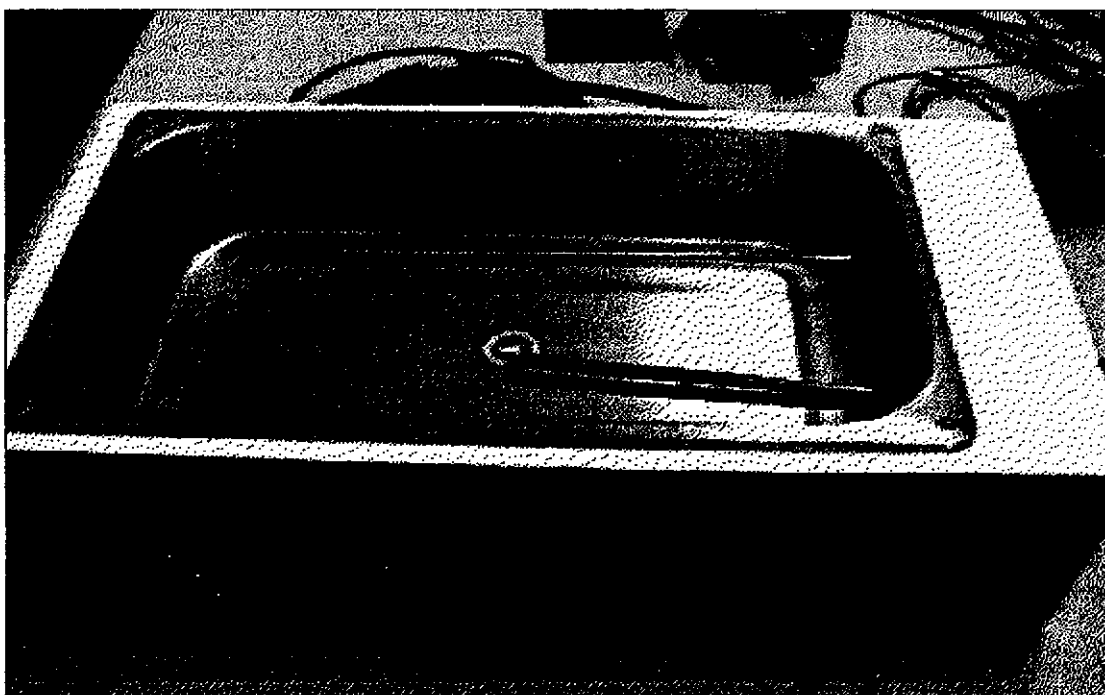
1.1.1 นำอ่างสแตนเลสขนาดกว้าง 28 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร ลึก 10 เซนติเมตร มาทำการเจาะช่องด้านข้างในแนวกว้างของอ่าง 2 ช่อง โดยแต่ละช่องมีรัศมี 0.75 เซนติเมตร ห่างกัน 15 เซนติเมตร เพื่อเป็นที่สอดเทอร์มอคัปเปิล และลวดความร้อน โดยเจาะต่ำจากขอบบนของอ่าง 6 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 แสดงภาพอ่างสแตนเลส

1.1.2 จัดเตรียมกล่องไม้ขนาดกว้าง 30 เซนติเมตร ยาว 54 เซนติเมตร และสูง 15 เซนติเมตร เพื่อบรรจุอ่างสแตนเลส ภายในกล่องไม้บุด้วยยิปซัม และฉนวนใยแก้วเพื่อกันความร้อน ด้านข้างกล่องติดตั้งตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ เพื่อปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ของเครื่องกวนของเหลว

1.1.3 ประกอบลวดความร้อนและเทอร์มอคัปเปิลเข้ากับอ่างสแตนเลส แล้วบรรจุลงในกล่องไม้ เชื่อมสายไฟของเทอร์มอคัปเปิลและลวดความร้อนเข้ากับอุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งอยู่ในตู้แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า



ภาพประกอบ 19 อย่างควบคุมอุณหภูมิของของเหลวที่สร้างเสร็จแล้ว

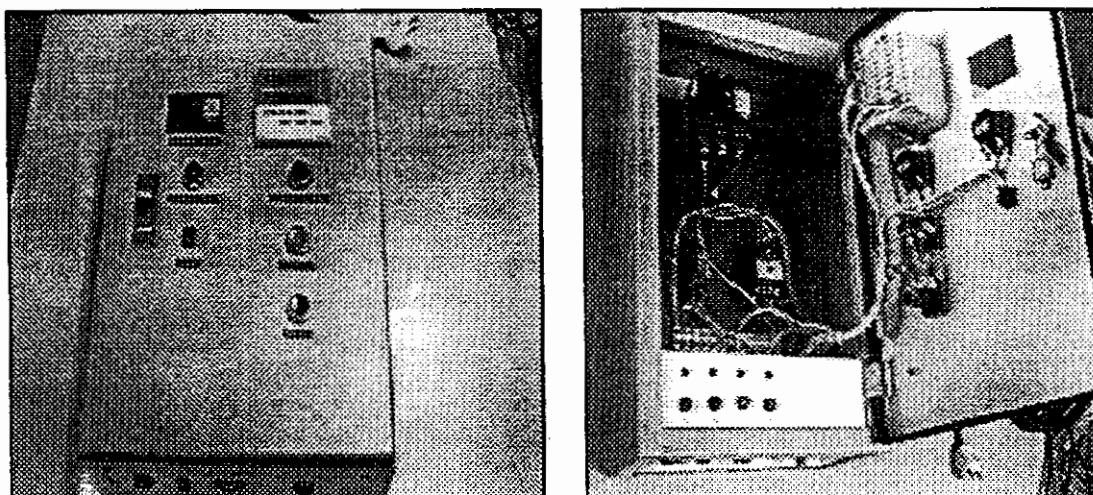
1.2 การสร้างตู้แหล่งจ่ายไฟฟ้าและชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ

ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติและแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า บรรจุอยู่ในตู้เหล็กขนาดกว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร โดยมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1.2.1 นำตู้เหล็กขนาดข้างต้นมาเจาะหน้าปัดของฝาตู้ เพื่อติดตั้งสวิตช์ และอุปกรณ์ควบคุม อุณหภูมิตั้งรายละเอียดตาราง 6 ต่อไปนี้

ตาราง 6 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ติดตั้งบนหน้าปัดตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์	คุณสมบัติ
Digital temperature control unit	Shinha 130-R/E
Main power switch	240 Volt , 15 Ampere , 2.5 kWatt
Start switch button	250 Volt , 6 Ampere
Stop switch button	250 Volt , 6 Ampere
Motor switch	220 Volt , 6 Ampere
Power on (Pilot lamp)	220 Volt , 0.2 Ampere



ภาพประกอบ 20 แสดงรูปหน้าปัดของตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า และอุปกรณ์ภายในตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า

1.2.2 ติดตั้งอุปกรณ์จ่ายพลังงานไฟฟ้า และอุปกรณ์ควบคุมกระแสไว้ภายในตู้หลัก โดยมีรายละเอียดแสดงได้ดังตาราง 7

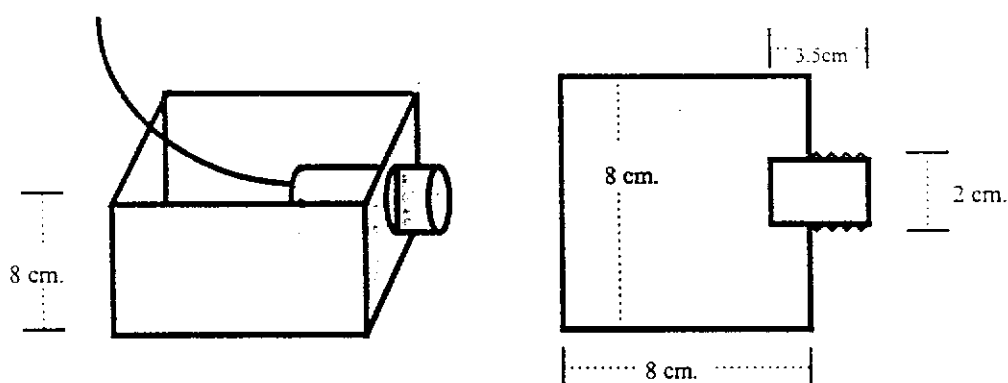
ตาราง 7 แสดงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในตู้จ่ายกระแสไฟฟ้า

อุปกรณ์	คุณสมบัติ
Breaker	Hitachi S-30SZ , 240AC , 15 Ampere 2.5 KWatt
Relay	MOROL LY2 , 12 Ampere
Magnetic Switch	Hitachi H10C 02H93 , 12 Ampere

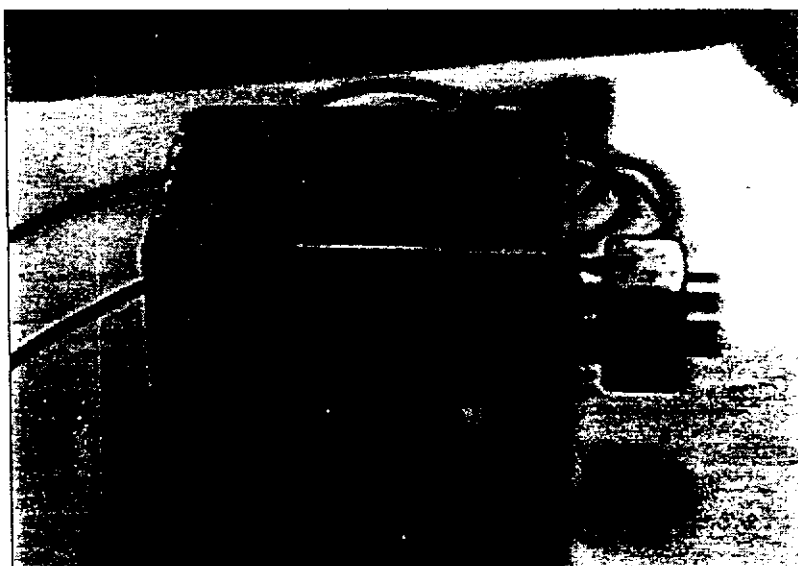
1.2.3 ทำการต่อเชื่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในตู้เข้ากับอุปกรณ์บนแผงหน้าปัดที่ใช้ควบคุมการทำงานของแหล่งจ่าย และอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิรวมถึงการต่อเชื่อมไปยังอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งประกอบด้วยหลอดความร้อน เทอร์มอคัปเปิล และมอเตอร์กวนของเหลว

1.3 การสร้างกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกรัศมี 10 มิลลิเมตร ยาว 54 มิลลิเมตร ด้านหน้าของหัววัดมีการเคลือบผิวให้ปิดสนิท แต่ด้านหลังจะเป็นช่องออกของสายสัญญาณที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร ซึ่งของเหลวสามารถซึมเข้าสู่ด้านในของทรานส์ดิวเซอร์ได้ ดังนั้นในการศึกษาสมบัติของของเหลวจึงจำเป็นต้องป้องกันมิให้ของเหลวไหลเข้าสู่ภายในทรานส์ดิวเซอร์ได้ นั่นคือต้องทำให้ด้านหัววัดจมอยู่ภายในของเหลวตัวอย่าง และด้านหลังอยู่ในกล่องที่ป้องกันของเหลวจากภายนอกได้ จึงทำการออกแบบกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์เพื่อศึกษาสมบัติกายภาพดังแสดงในภาพประกอบ 21



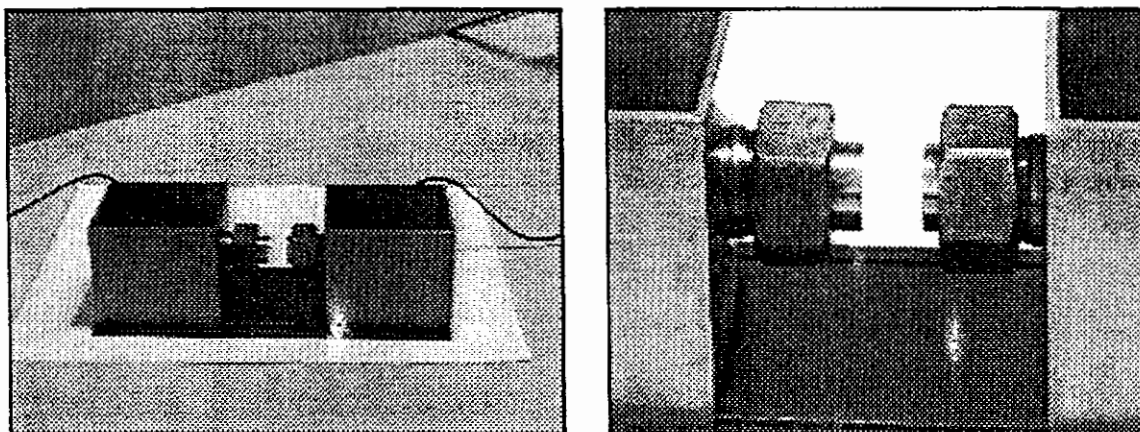
ภาพประกอบ 21 แสดงรายละเอียดกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์



ภาพประกอบ 22 แสดงรูปกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์ที่สร้างเสร็จแล้ว

ในการศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง 20°C ถึง 70°C ของเหลวอาจรั่วซึมเข้าสู่ภายในกล่องได้ จึงมีการป้องกันโดยใช้แหวนยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 เซนติเมตร รองรับระหว่างช่องใส่หัววัดกับแป้นรองฝาเกลียวปิด และทำการปิดฝาเกลียวให้แน่นที่สุดเพื่อป้องกันการรั่วซึมเมื่อทดลองที่อุณหภูมิสูง

การวิเคราะห์ทางอัลตราโซนิกในงานวิจัยนี้ใช้ทรานส์ดิวเซอร์ 2 ตัวโดยทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณตัวหนึ่ง และรับสัญญาณคลื่นอีกตัวหนึ่ง จึงต้องสร้างกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์ 2 ชุด เพื่อศึกษาสมบัติกายภาพของของเหลวตัวอย่างที่ระยะห่างต่างๆ กันในแนวเส้นตรงตามแนวการเคลื่อนที่ของคลื่น โดยใช้การเลื่อนกล่องทรานส์ดิวเซอร์ไปบนรางขนานที่ทำจากแผ่นโลหะ ถ้ากำหนด $d = d_2 - d_1$ เป็นระยะห่างระหว่างหัววัดทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสอง และ $t = t_2 - t_1$ เป็นเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในระยะทาง d



ภาพประกอบ 23 แสดงการวางกล่องทรานส์ดิวเซอร์บนรางโลหะ

1.4 ขั้นตอนการปรับเทียบอุปกรณ์

ก่อนการทดลองกับของเหลวตัวอย่างจำเป็นต้องทดสอบการทำงานของอุปกรณ์ทั้งระบบ รวมถึงวิธีการทดลองทุกขั้นตอนในช่วงอุณหภูมิ 20°C ถึง 70°C โดยทดสอบการทดลองกับน้ำกลั่นที่ทราบสมบัติกายภาพจากผลการทดลองวิธีอื่น ได้แก่ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก(c) ความหนาแน่น (ρ) และค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นต่อค่ากำลังสองของความถี่คลื่น (αf^2) ผลการทดลองที่ได้จากน้ำกลั่นต้องนำมาทำการปรับเทียบอุปกรณ์ และหาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดทดลองต่อไป

วิธีดำเนินการทดลอง

วิธีการทดลอง สมบัติกายภาพของน้ำมันหล่อลื่นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (c) อิมพีแดนซ์จำเพาะ (Z) บัลค์มอดุลัส (β) และสัมประสิทธิ์การลดลงของพลังงาน (α) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนการหาความหนาแน่น ขั้นตอนการวัดความเร็วคลื่น และขั้นตอนการวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น ซึ่งต้องทำการทดลองที่ค่าอุณหภูมิต่างๆกัน 10 ค่าในช่วง 20°C ถึง 70°C ตามรายละเอียดต่อไปนี้

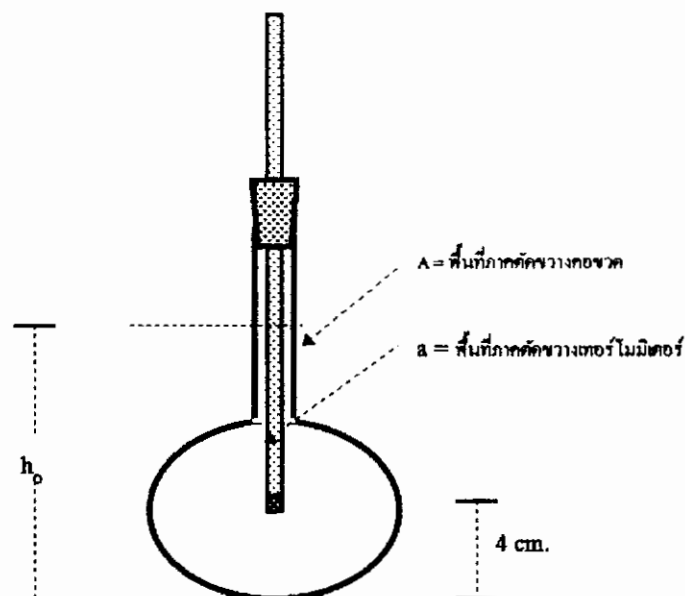
1 ขั้นตอนการหาความหนาแน่น

การหาความหนาแน่นน้ำมันชนิด SAE30 SAE40 และSAE50 อาศัยหลักการที่ว่าเมื่อของเหลวได้รับความร้อนจากภายนอกจะเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นลดลง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.1 นำขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีสเกลบอกระดับความสูงของคอขวดไปชั่งน้ำหนักบนตาชั่งดิจิตอลความละเอียดสูง แล้วทำการวัดพื้นที่ภาคตัดของคอขวด พร้อมกับเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0°C ถึง 100°C และวัดพื้นที่ภาคตัดของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ด้วย

1.2 ตวงน้ำมันหล่อลื่น SAE30 ลงในขวดชมพู่จนมีปริมาตร 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วนำไปชั่งน้ำหนักสุทธิของน้ำมันหล่อลื่นปริมาตรดังกล่าว

1.3 ปิดจุกยางที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ให้สนิท โดยให้กระเปาะปรอทอยู่ที่ระดับความสูงจากก้นขวดชมพู่ 4 เซนติเมตร



ภาพประกอบ 24 แสดงขวดแก้วรูปชมพู่สำหรับการหาความหนาแน่น

1.4 วางขวดแก้วลงที่มีน้ำมันในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่มีน้ำบรรจุอยู่เต็ม พร้อมกับบันทึกระดับความสูงของน้ำมันหล่อลื่นในขวด และค่าอุณหภูมิขณะเริ่มต้น

1.5 เปิดแหล่งจ่ายไฟฟ้าและเดินเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำในอ่าง ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น จนทำให้อุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นในขวดมีค่า 70°C และเมื่ออุณหภูมิสูงถึงค่าที่ต้องการ ให้ทำการหยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่หลอดความร้อนทันที เพื่อทำการบันทึกค่าระดับความสูงของน้ำมันหล่อลื่นในขณะที่ยปล่อยให้ของเหลวเย็นตัวลง

1.6 บันทึกระดับความสูงของน้ำมันหล่อลื่น กับอุณหภูมิขณะนั้นๆ เมื่ออุณหภูมิลดลงถึงค่า 65, 60, 55, 50, 45, 40, 35 และ 30 องศาเซลเซียสตามลำดับ

1.7 คำนวณหาค่าความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ ในข้อ 1.6 ดังนี้

จาก
$$\rho_T = \frac{m}{V_T} \quad (34)$$

เมื่อ m = มวลของน้ำมันหล่อลื่น
 V_T = ปริมาตรน้ำมันหล่อลื่นที่อุณหภูมิ T

จากการทดลองจะได้ค่า V_T ที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าเป็น

$$V_T = V_o + [A - a][h_T - h_o] \quad (35)$$

เมื่อ $V_o = 500$ ลูกบาศก์เซนติเมตร

h_o = ระดับความสูงเริ่มต้นของน้ำมันหล่อลื่น (ข้อ 1.4)

h_T = ระดับความสูงของน้ำมันหล่อลื่นที่ค่าอุณหภูมิ T

A = พื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดชมพู

a = พื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์

1.8 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.2 ถึงข้อ 1.7 อีก 2 ครั้ง

1.9 เปลี่ยนของเหลวตัวอย่างเป็นประเภท SAE40 และ SAE50 โดยทำการทดลองเช่นเดียวกันตั้งแต่ข้อ 1.2 ถึงข้อ 1.8

1.10 เขียนกราฟระหว่างความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่นทั้ง 3 ประเภทเพื่อนำไปใช้หาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสในขั้นตอนต่อไป

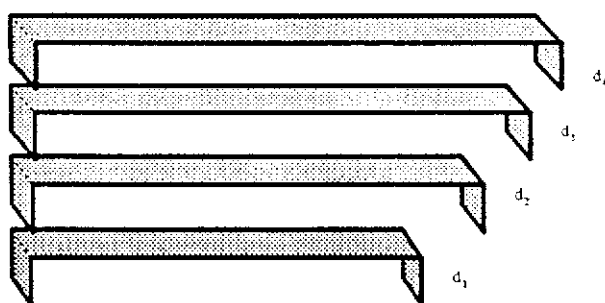
2. ขั้นตอนการวัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

การตรวจวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางของเหลวแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

2.1 เตรียมแผ่นโลหะอลูมิเนียมขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร มีความยาวหลายขนาดด้วยกันตั้งแต่ 10 เซนติเมตร จนถึง 16 เซนติเมตร รวมจำนวน 7 ชิ้น เพื่อใช้เป็นคลิปกำหนดระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งกับทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ โดยกำหนดชื่อแต่ละชิ้นตามความยาวคลิปลงนี้

ตาราง 8 กำหนดค่าความยาวคลิพออลูมิเนียม

ระยะ	ความยาว (เซนติเมตร)
d_1	7.59
d_2	8.15
d_3	8.67
d_4	9.18
d_5	9.44
d_6	10.16
d_7	10.68



ภาพประกอบ 25 แสดงลักษณะคลิพออลูมิเนียม

2.2 นำกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองวางบนรางโลหะ โดยให้หัวทรานส์ดิวเซอร์สัมผัสติดกัน แล้ววัดระยะห่างของขบกล่องทั้งสอง (d_0)

2.3 วางกล่องทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองลงบนราง และนำไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างหลอดความร้อน กับเทอร์มोकัปเปิล

2.4 เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE30 จำนวน 5 ลิตรลงในอ่าง

2.5 เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ (Pulse generator) เพื่อกระตุ้นทรานส์ดิวเซอร์ ให้สร้างคลื่นอัลตราโซนิก

2.6 เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อปรับความร้อนน้ำมันหล่อลื่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 70°C หลังจากนั้นให้หยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าของหลอดความร้อน เพื่อปล่อยให้ น้ำมันหล่อลื่นมีอุณหภูมิค่อยๆ ลดลงจนถึงค่า 65°C

2.7 ปรับระยะห่างของกล่องทรานส์ดิวเซอร์ โดยใช้ระยะห่างของคลิฟ d_i

2.8 บันทึกค่าเวลาของสัญญาณที่ตำแหน่งสูงสุด จากรูปสัญญาณสะท้อนกลับครั้งที่ 1

2.9 ทำการเปลี่ยนระยะห่างเป็น $d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7$ แล้วทำการวัดค่าเวลาของสัญญาณที่ตำแหน่งสูงสุด ทั้งนี้ต้องกระทำที่ค่าอุณหภูมิเดียวกันทั้ง 7 ระยะ

2.10 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2.8 ถึงข้อ 2.9 ทุกครั้งเมื่ออุณหภูมิน้ำมันลดลงจนถึงค่า 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 27 องศาเซลเซียสตามลำดับ

2.11 เขียนกราฟระหว่างระยะห่างของหัววัด กับเวลาที่วัดได้จากค่าอุณหภูมิ 65°C

2.12 หาค่าความชันของกราฟเส้นตรงที่ได้ ซึ่งมีความหมายตรงกับความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่อุณหภูมินั้น

2.13 ทำการเขียนกราฟตามข้อ 2.11 ถึงข้อ 2.12 โดยใช้ข้อมูลของค่าอุณหภูมิ 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 27 องศาเซลเซียส

2.14 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.5 ถึงข้อ 2.13 ใหม่อีก 2 ครั้ง

2.15 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.2 ถึงข้อ 2.14 โดยเปลี่ยนของเหลวตัวอย่างเป็นน้ำมันหล่อลื่น ความหนืด SAE40 และ SAE50 ตามลำดับ

3. ขั้นตอนการวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก

การวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางของเหลวแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

3.1 นำกล่องบรรจุทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองวางบนรางโลหะ โดยให้หัวทรานส์ดิวเซอร์สัมผัสติดกัน แล้ววัดระยะห่างของขบกล่องทั้งสอง (d_0)

3.2 วางกล่องทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสองลงบนราง และนำไปวางในอ่างควบคุมอุณหภูมิตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างหลอดความร้อน กับเทอร์มोकัปเปิล

3.3 เติมน้ำมันหล่อลื่น SAE30 จำนวน 5 ลิตรลงในอ่าง

3.4 เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณ เพื่อกระตุ้นทรานส์ดิวเซอร์ ให้สร้างคลื่นอัลตราโซนิก

3.5 เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เพื่อปรับความร้อนน้ำมันหล่อลื่นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึง 70°C หลังจากนั้นให้หยุดจ่ายกระแสไฟฟ้าของหลอดความร้อน ทั้งให้น้ำมันหล่อลื่นมีอุณหภูมิลดลงจนถึงค่า 65°C

3.6 ปรับระยะห่างของกล่องทรานส์ดิวเซอร์ โดยใช้ระยะห่างของคลิฟ d_i

3.7 บันทึกความสูงของสัญญาณที่ตำแหน่งสูงสุด จากรูปสัญญาณสะท้อนกลับครั้งที่ 1

3.8 ทำการเปลี่ยนระยะห่างเป็น d_2 , d_3 , d_4 , d_5 , d_6 , d_7 แล้วทำการบันทึกความสูงของสัญญาณที่ตำแหน่งสูงสุด ทั้งนี้ต้องกระทำที่ค่าอุณหภูมิเดียวกันทั้ง 7 ระยะ

3.9 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.8 ถึงข้อ 3.9 ทุกครั้งเมื่ออุณหภูมิน้ำมันลดลงจนถึงค่า 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 27 องศาเซลเซียสตามลำดับ

3.10 เขียนกราฟระหว่างความสูงของสัญญาณ (σ) กับระยะห่าง (x) ของหัววัดที่วัดได้จากค่าอุณหภูมิ 65°C

3.11 นำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่ากำลังสองน้อยที่สุด (Least square fit) ของกราฟในรูปเอกซ์โพเนนเชียล เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น สำหรับค่าอุณหภูมินั้น

$$\sigma(x) = a10^{bx}$$

จะให้ค่าพารามิเตอร์ a, b ออกมา

เช่น

$$a = 107.731$$

$$b = -9.94771$$

สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นสามารถหาได้จาก

$$\alpha = \frac{9.94771}{0.4343 \times 8.686} = 2.64 \quad \text{db / m}$$

3.12 ทำการเขียนกราฟตามข้อ 3.10 ถึงข้อ 3.11 โดยใช้ข้อมูลของค่าอุณหภูมิ 60, 55, 50, 45, 40, 35, 30, 27 องศาเซลเซียส

3.13 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.4 ถึงข้อ 3.12 ใหม่อีก 2 ครั้ง

3.14 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1 ถึงข้อ 3.13 โดยเปลี่ยนของเหลวตัวอย่างเป็นน้ำมันหล่อลื่นประเภท SAE40 และ SAE50 ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลวตัวอย่าง แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นตอนการวิเคราะห์หาความเร็วคลื่นในของเหลวตัวอย่าง ขั้นตอนการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ในของเหลวตัวอย่าง ขั้นตอนการหาความหนาแน่นของของเหลว และขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส สำหรับสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50 โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 20 °C ถึง 70 °C

ผลการเปรียบเทียบอุปกรณ์

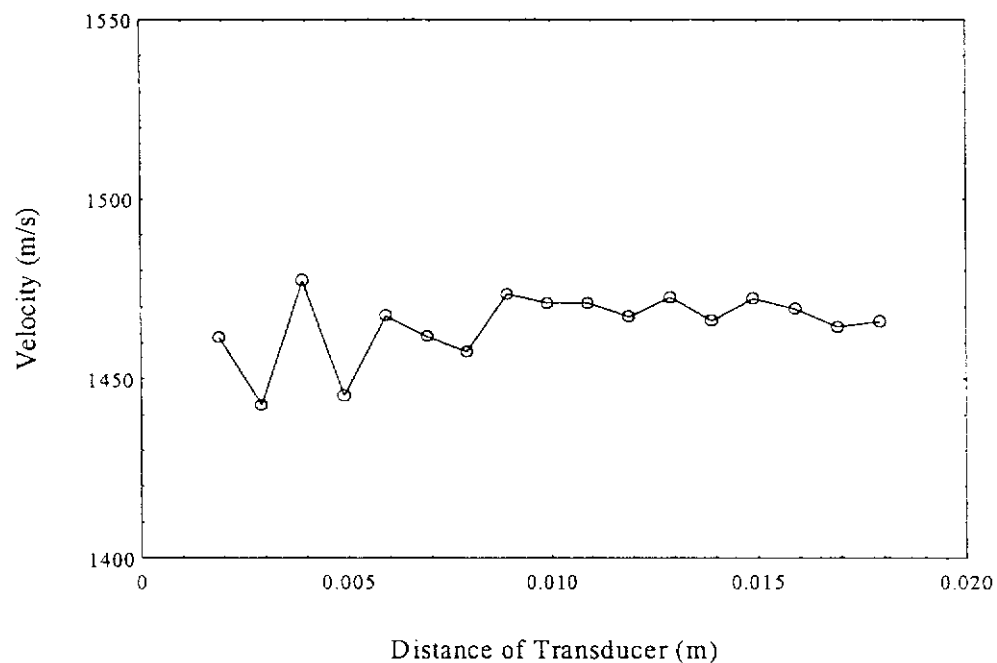
การปรับระยะทรานส์ดิวเซอร์

ผลการทดลองหาค่าแห่งการวางทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับคลื่นที่ใกล้ที่สุด ซึ่งให้ค่าความเร็วคลื่นที่ถูกต้อง โดยทำการศึกษาจากน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 จะได้ผลดังตาราง 9

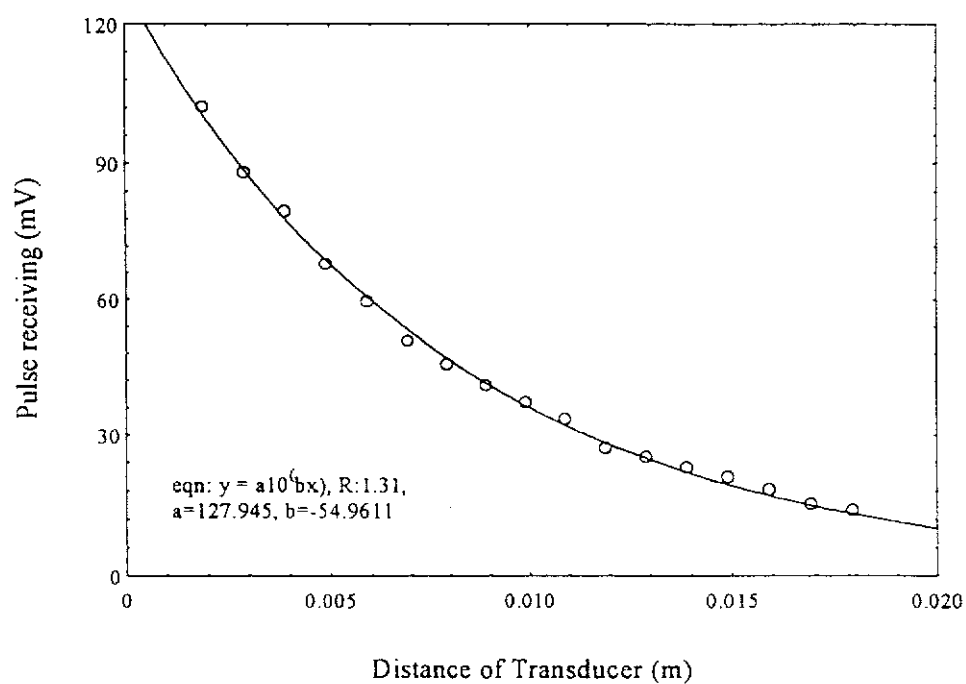
ตาราง 9 ความเร็วคลื่นและระยะระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ ที่อุณหภูมิ 27 °C

ระยะห่าง (mm.)	ความเร็ว (m/s)
1.9	1461
2.9	1443
3.9	1477
4.9	1445
5.9	1467
6.9	1462
7.9	1457
8.9	1474
9.9	1471
10.9	1471
11.9	1467
12.9	1473
13.9	1466
14.9	1472
15.9	1469
16.9	1465
17.9	1466

เมื่อนำผลการวัดค่าสมบัติกายภาพทั้งสองไปเขียนกราฟระหว่างความเร็วคลื่นกับระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์ และสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับระยะห่างเช่นเดียวกัน จะได้ผลดังภาพประกอบ 26 และภาพประกอบ 27



ภาพประกอบ 26 กราฟระหว่างความเร็วกับระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์ ที่อุณหภูมิ 27 °C



ภาพประกอบ 27 กราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์

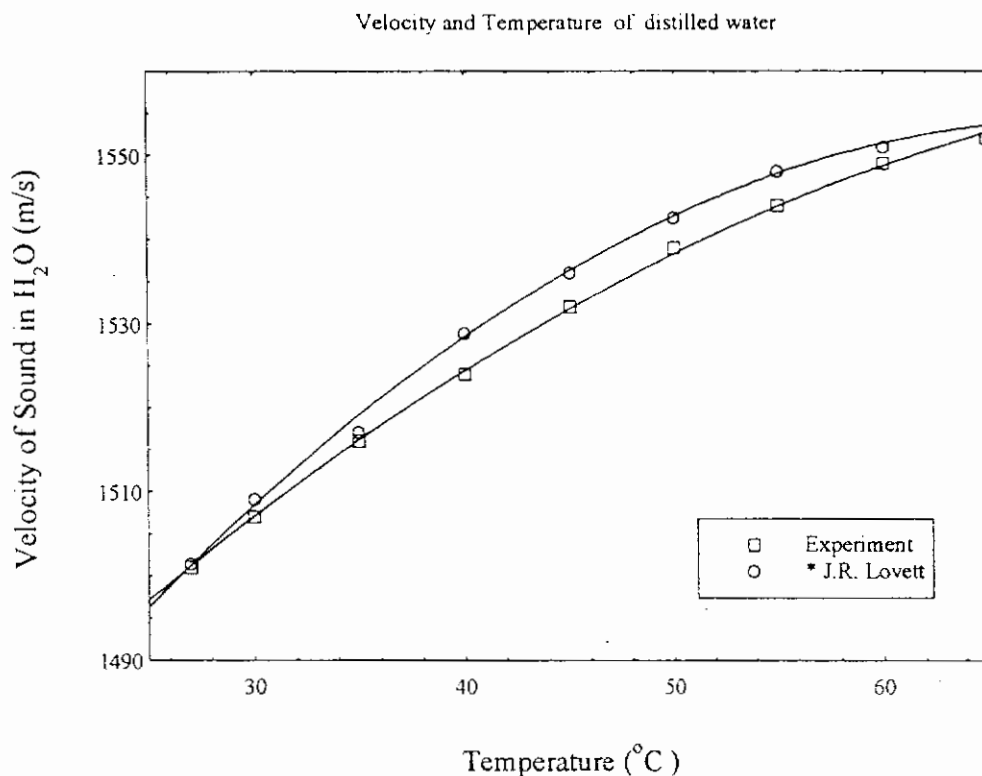
จากการวัดค่าความเร็วคลื่นที่ระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์ต่างๆกัน พบว่าค่าความเร็วคลื่นมีค่าไม่คงที่ในระยะใกล้ และจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ระยะห่างตั้งแต่ 10.2 มิลลิเมตรขึ้นไป ดังนั้นในงานวิจัยจึงทำการทดลองที่ระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์ตั้งแต่ค่านี้เป็นต้นไป

การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น

เป็นการวัดสมบัติทางกายภาพของน้ำกลั่นเพื่อการเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของน้ำกลั่น โดยมีการตรวจวัดความเร็วคลื่น ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิแสดงได้ดังตาราง 10

ตาราง 10 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็ว การทดลอง (m/s)	ความเร็ว มาตรฐาน (m/s)
27	1501	1497
30	1507	1505
35	1516	1517
40	1524	1527
45	1532	1536
50	1539	1543
55	1544	1548
60	1549	1553
65	1552	1556



ภาพประกอบ 28 กราฟความเร็วคลื่นในน้ำกลั่นจากผลการทดลอง และผลของ Lovett J. R.

ผลการทดสอบอุปกรณ์ทดลองกับการตรวจวัดค่าความเร็วคลื่นในน้ำกลั่นที่ทราบค่าสมบัติกายภาพมาตรฐาน พบว่าผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิสูงระหว่าง 45°C ถึง 55°C ค่าความเร็วคลื่นมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 0.25 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนการวัดความหนาแน่น

ทำการวัดความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50 ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ โดยปรับระดับอุณหภูมิเพื่อวัดในช่วง 20°C ถึง 70°C แสดงผลที่ได้ดังต่อไปนี้

พื้นที่ภาคตัดด้านในคอขวด	$A = 0.000278$	ตารางเมตร
พื้นที่ภาคตัดของแท่งเทอร์โมมิเตอร์	$a = 0.00003093$	ตารางเมตร
ปริมาตรเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 25°C	$V_0 = 500 \times 10^{-6}$	ลูกบาศก์เมตร

เมื่อกำหนด

m = มวลของน้ำมันหล่อลื่น
 h_0 = ระดับความสูงเริ่มต้นของน้ำมันหล่อลื่น
 h_T = ระดับความสูงของน้ำมันหล่อลื่นที่ค่าอุณหภูมิ T

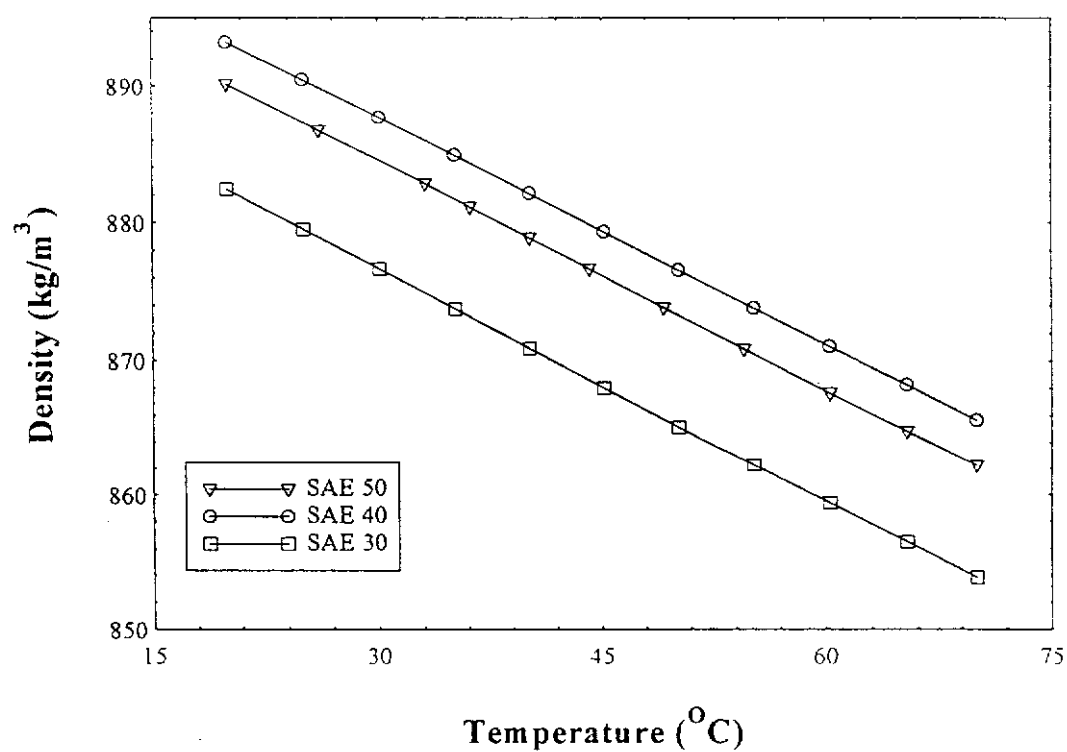
ตาราง 11 แสดงระดับการขยายตัวตามความสูงของน้ำมันหล่อลื่น

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	SAE 30 $m = 0.439382 \text{ kg.}$ $h_o = 0.017 \text{ m}$	SAE 40 $m = 0.445288 \text{ kg.}$ $h_o = 0.017 \text{ m}$	SAE 50 $m = 0.443425 \text{ kg.}$ $h_o = 0.017 \text{ m}$
	$h_T \text{ (cm.)}$	$h_T \text{ (cm.)}$	$h_T \text{ (cm.)}$
25	1.70	1.70	1.60
30	2.35	2.25	2.25
35	2.85	3.10	2.91
40	3.56	3.75	3.57
45	4.21	4.40	4.22
50	4.85	4.95	4.88
55	5.45	5.51	5.53
60	6.38	6.13	6.19
65	6.9	6.80	6.84

จากผลที่ได้สามารถคำนวณหาปริมาตรของน้ำมันหล่อลื่นที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ โดยใช้สมการ (35) คำนวณหาค่าความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่น โดยใช้สมการ (34) ได้ค่าความหนาแน่นดังตาราง 12

ตาราง 12 แสดงค่าความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE30 , SAE40 , SAE50

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	SAE 30	SAE 40	SAE 50
20	882.5	892.9	889.8
25	879.7	890.2	887.1
30	876.8	887.4	884.3
35	873.9	884.7	881.5
40	871.1	881.9	878.7
45	868.2	879.2	875.9
50	865.4	876.4	873.1
55	862.5	873.7	870.3
60	859.6	870.9	867.5
65	856.8	868.1	864.7
70	853.9	865.4	861.9



ภาพประกอบ 29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นชนิด SAE30 , SAE40 และ SAE50 ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

ขั้นตอนการหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

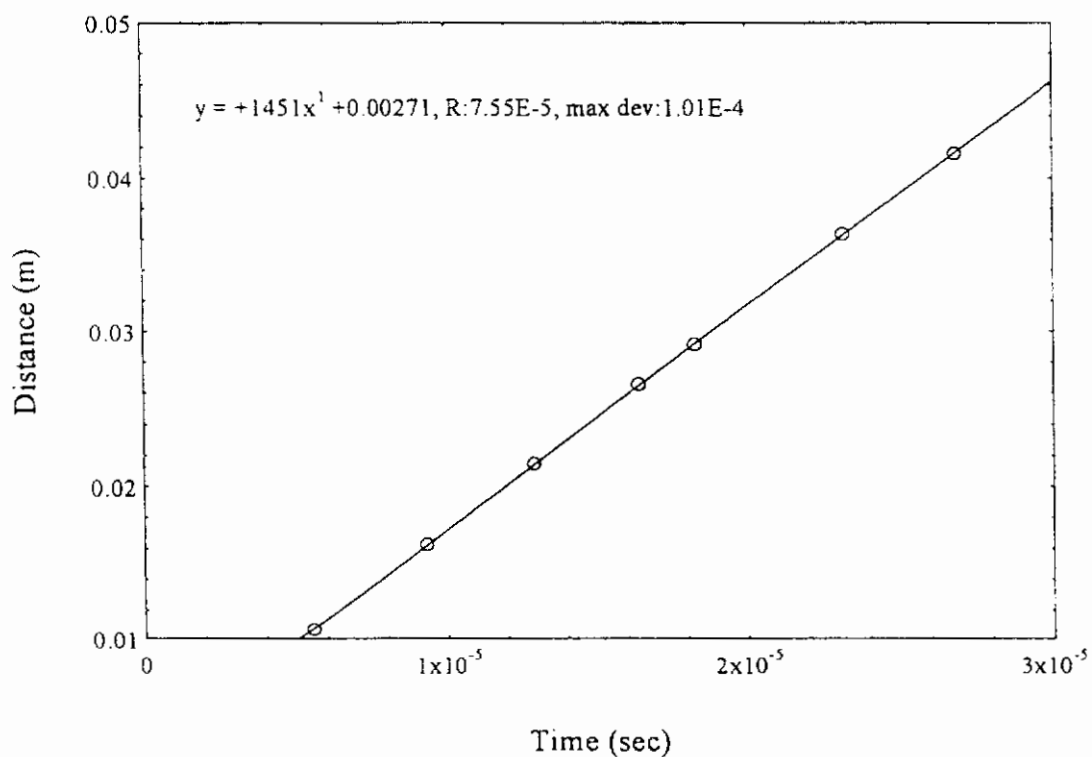
1. สารตัวอย่าง SAE 30

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C

1.1 ทดลองที่อุณหภูมิ 26°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 13 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 30

ตาราง 13 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 26°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.54	9.29	12.89	16.38	18.25	23.16	26.82



ภาพประกอบ 30 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 26°C

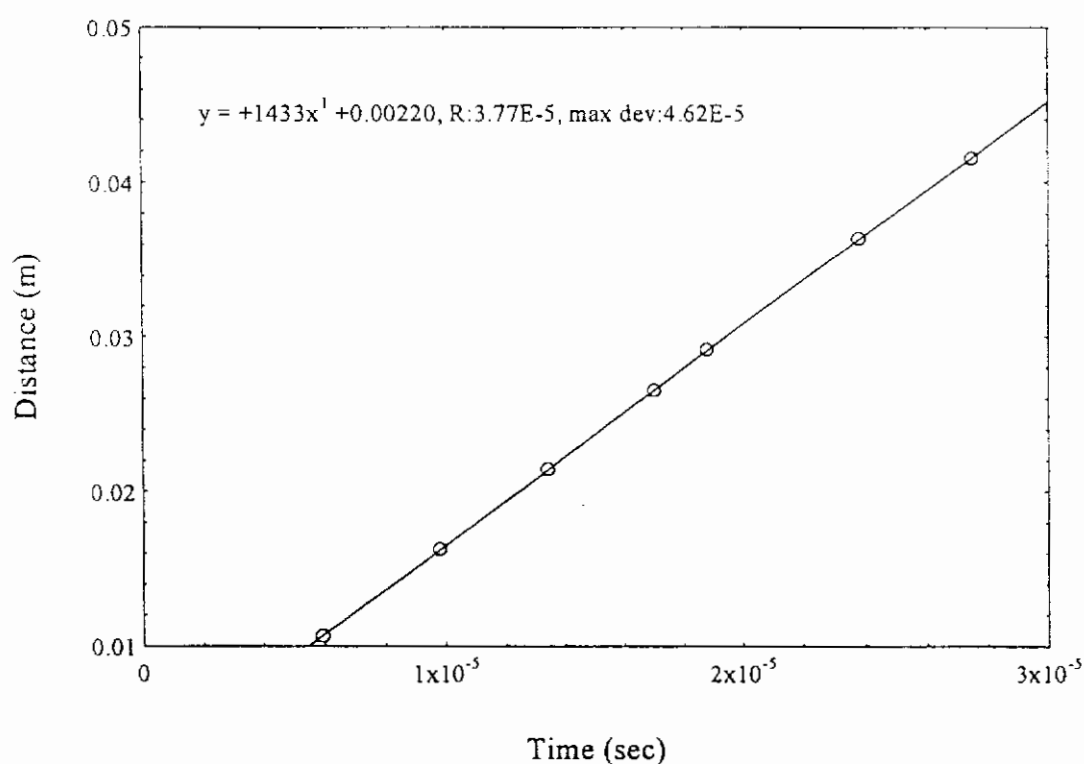
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 26°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพ จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{26} = 1451 \text{ เมตร/วินาที}$$

1.2 ทดลองที่อุณหภูมิ 32°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 14 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 31

ตาราง 14 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 32°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.93	9.79	13.41	17.01	18.79	23.82	27.49



ภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 32°C

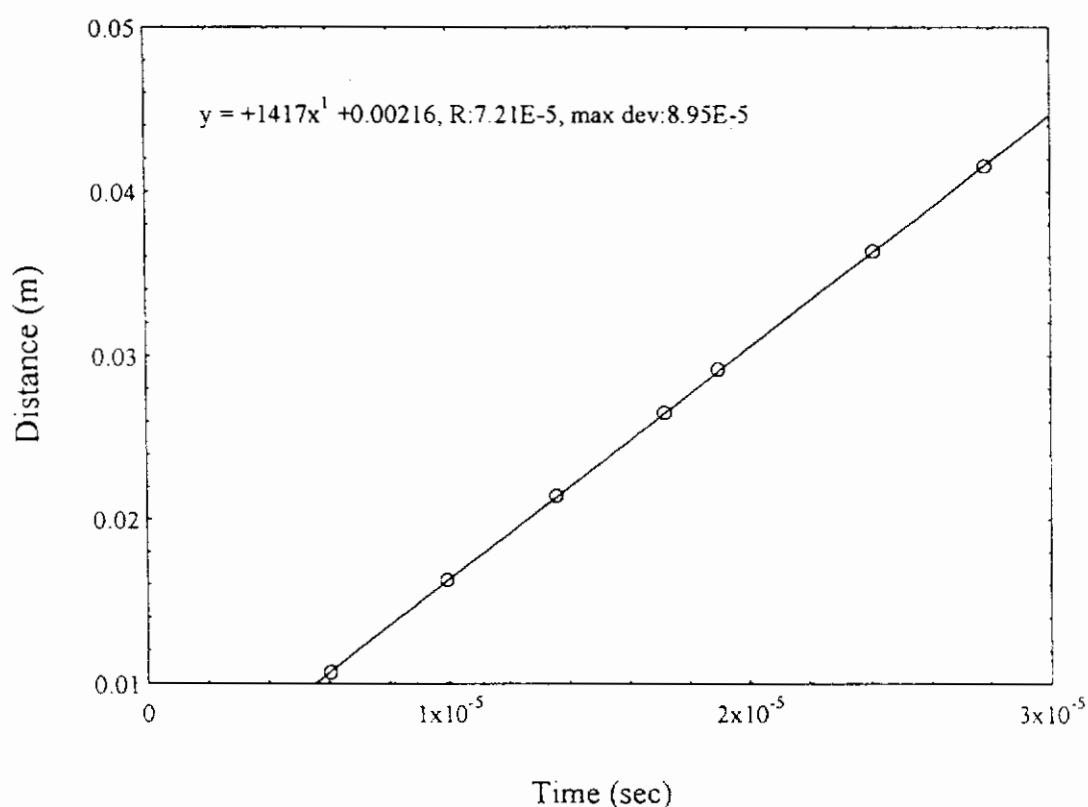
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 32°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 31 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{32} = 1433 \text{ เมตร/วินาที}$$

1.3 ทดลองที่อุณหภูมิ 36°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 15 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 32

ตาราง 15 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 36°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.05	9.94	13.57	17.19	18.99	24.12	27.86



ภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 36°C

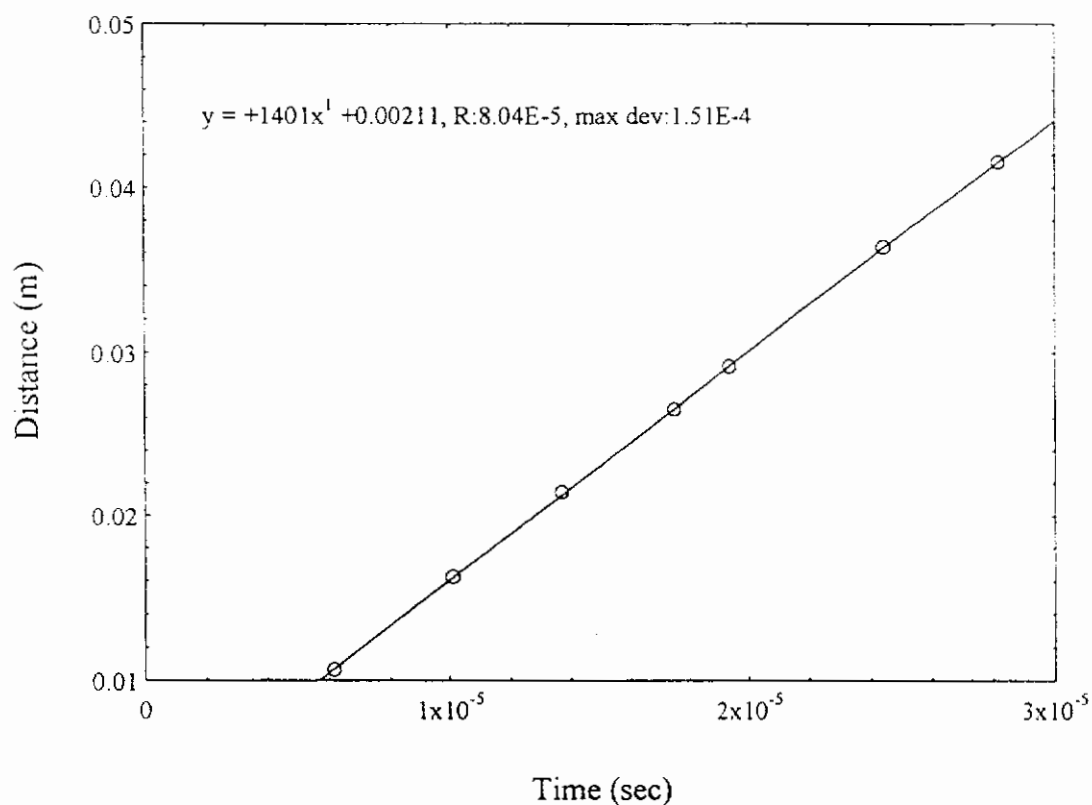
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 36°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 32 จะได้ว่า

ความเร็วคลื่น $C_{36} = 1417$ เมตร/วินาที

1.4 ทดลองที่อุณหภูมิ 40.5 °C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่า เวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 16 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 33

ตาราง 16 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 40.5 °C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.14	10.09	13.7	17.48	19.35	24.44	28.16



ภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 40.5 °C

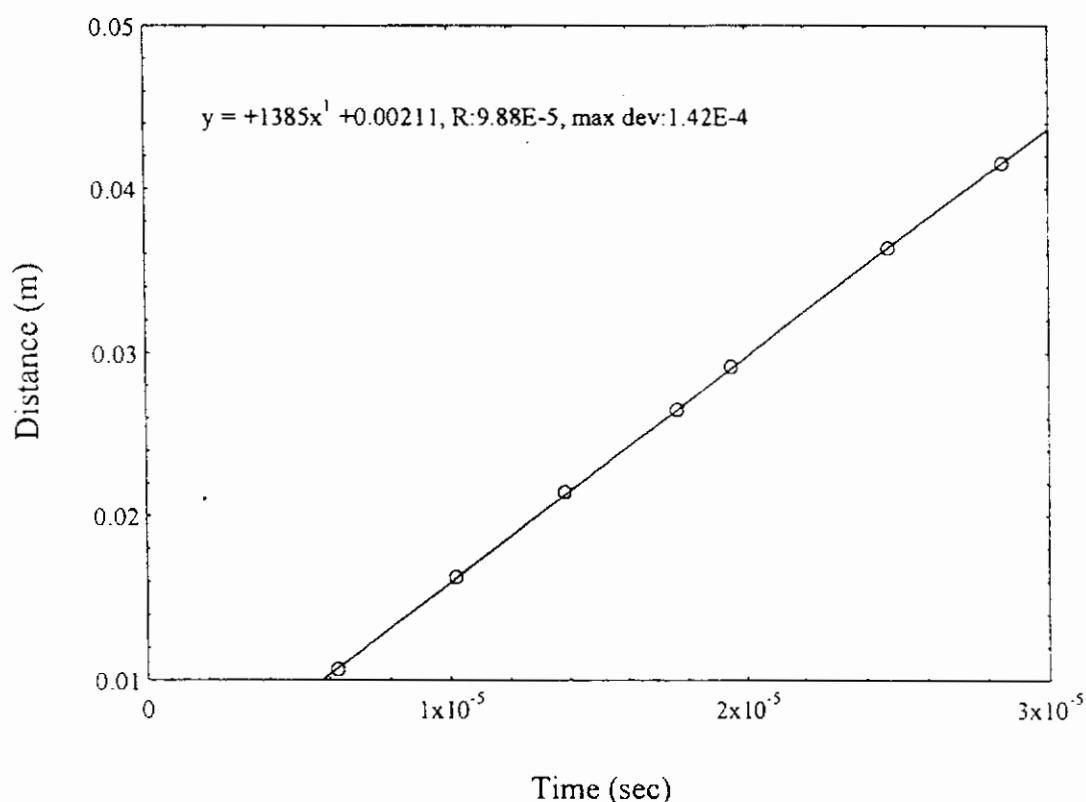
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 40.5 °C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 33 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{40} = 1401 \text{ เมตร/วินาที}$$

1.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 45 °C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่า เวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 17 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 34

ตาราง 17 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 45 °C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.26	10.19	13.86	17.65	19.47	24.76	28.51



ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 45 °C

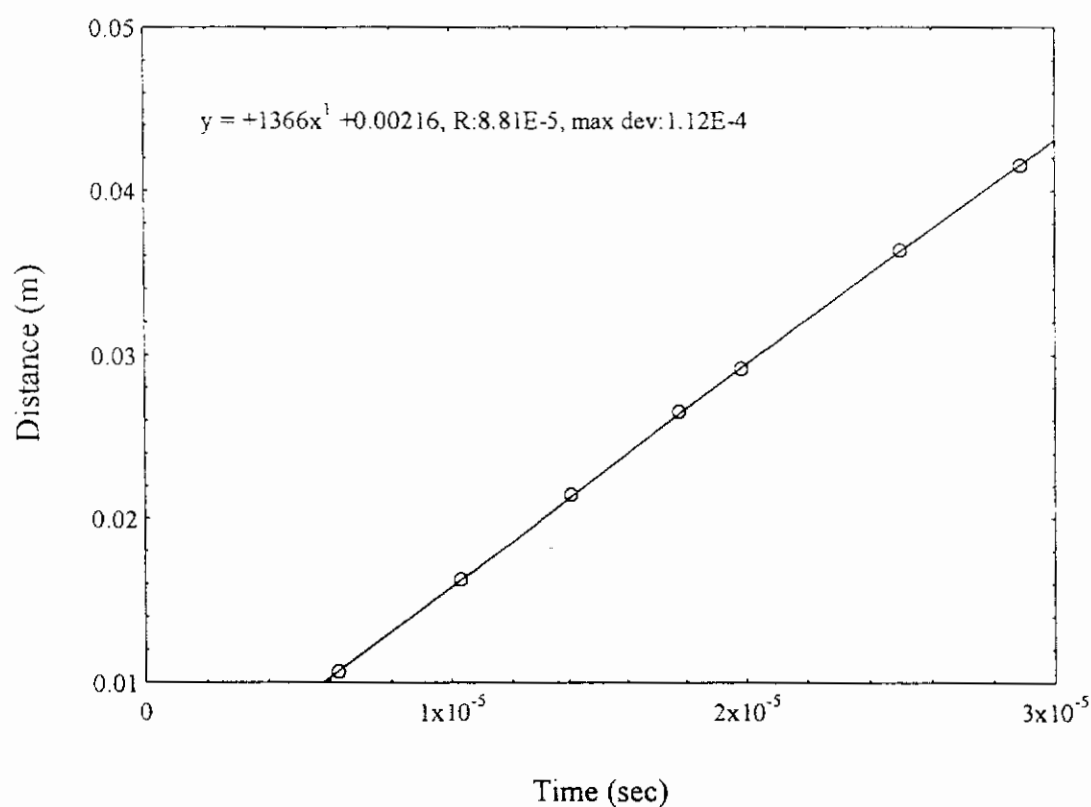
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 45 °C นี้ สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 34 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{45} = 1385 \text{ เมตร/วินาที}$$

1.6 ทดลองที่อุณหภูมิ 49°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 18 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 35

ตาราง 18 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 49°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.28	10.31	14.07	17.78	19.84	25.02	28.88



ภาพประกอบ 35 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 49°C

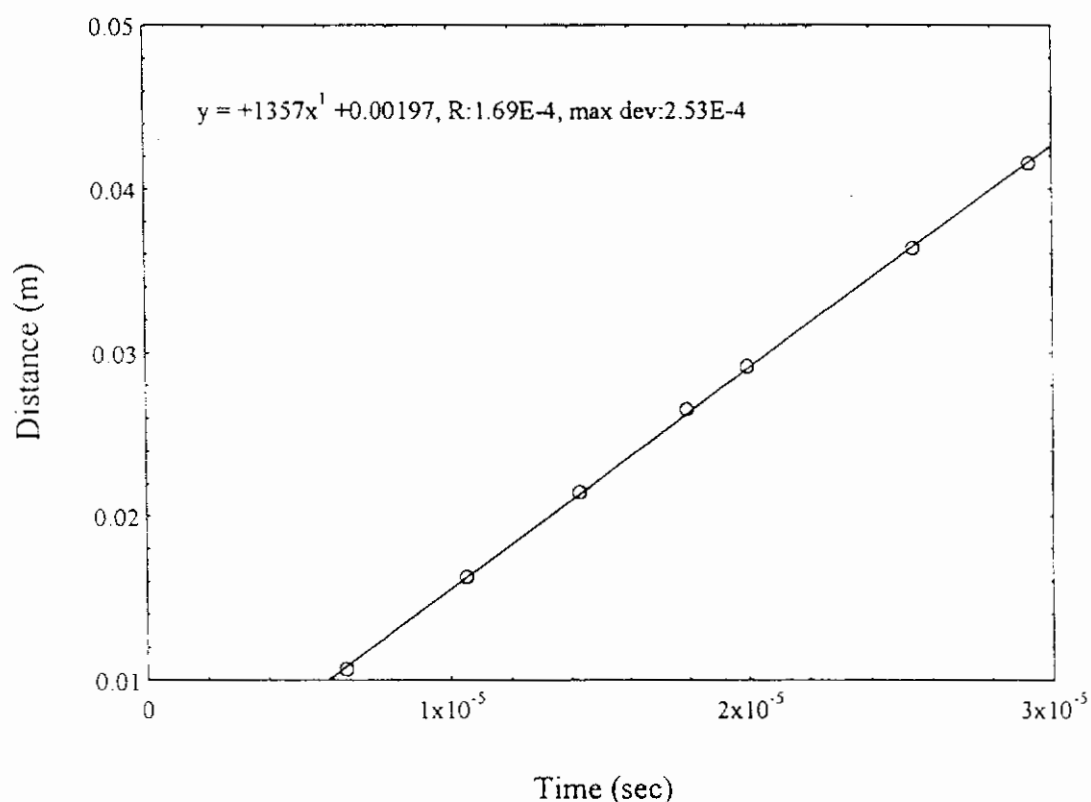
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 49°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 35 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{49} = 1366 \text{ เมตร/วินาที}$$

1.7 ทดลองที่อุณหภูมิ 54°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 19 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 36

ตาราง 19 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 54°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.54	10.53	14.3	17.93	19.96	25.43	29.25



ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 54°C

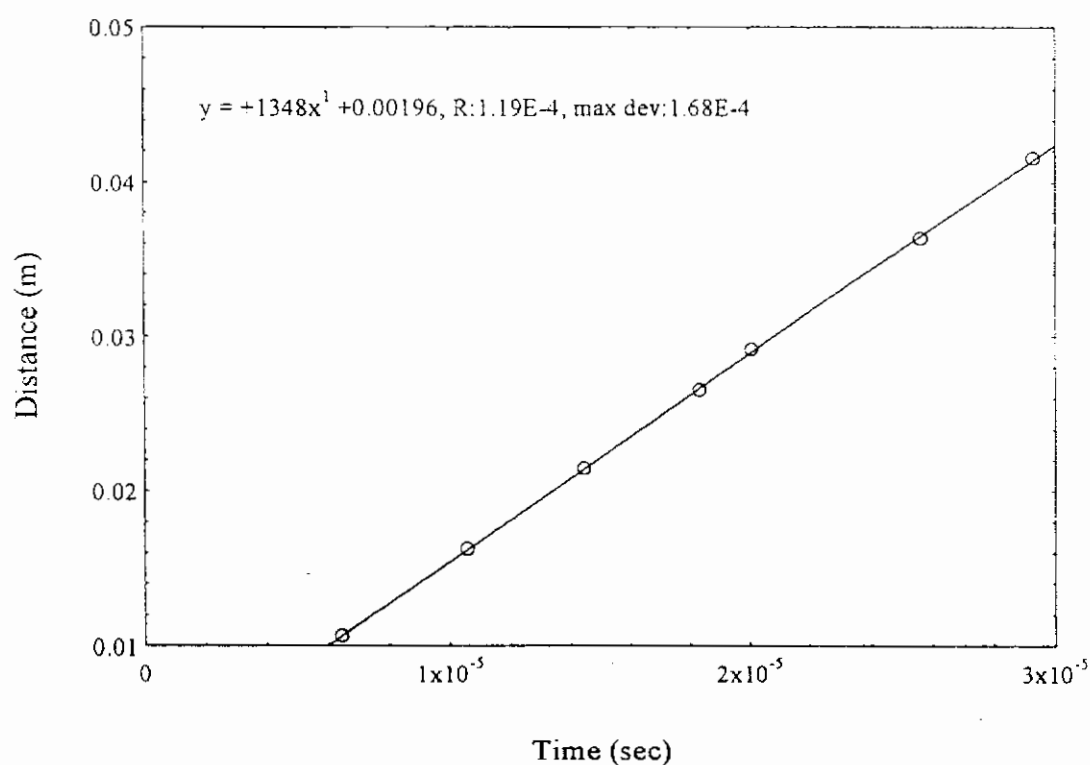
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 54°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 36 จะได้ว่า

ความเร็วคลื่น $C_{54} = 1357$ เมตร/วินาที

1.8 ทดลองที่อุณหภูมิ 58°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 20 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 37

ตาราง 20 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 58°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.45	10.58	14.44	18.32	20.07	25.63	29.28



ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 58°C

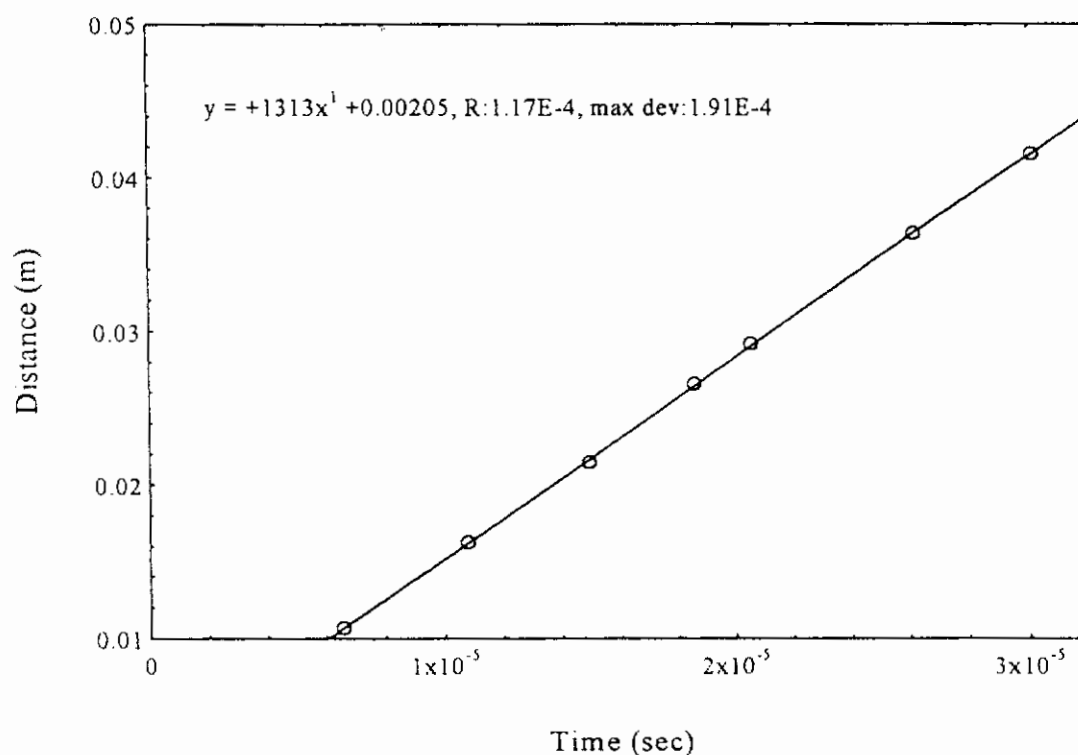
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 58°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 37 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{58} = 1348 \text{ เมตร/วินาที}$$

1.9 ทดลองที่อุณหภูมิ 65°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 21 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 38

ตาราง 21 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 65°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	6.56	10.78	14.92	18.57	20.55	26.15	30.11



ภาพประกอบ 38 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 65°C

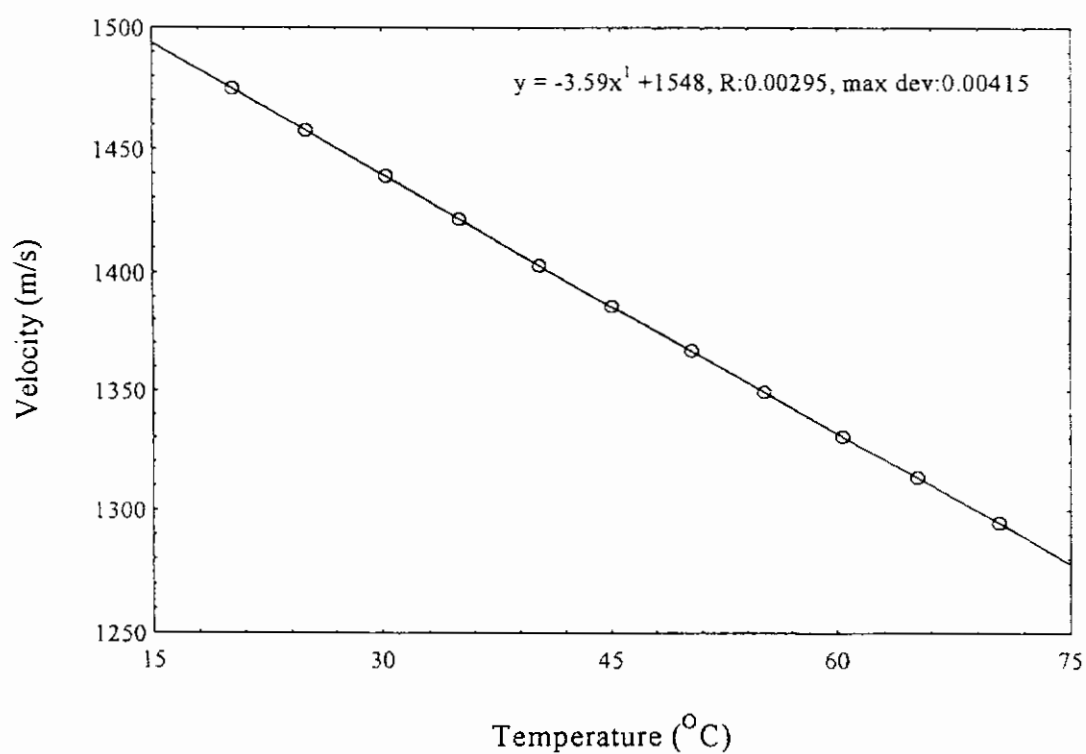
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 65°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 38 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{65} = 1313 \text{ เมตร/วินาที}$$

นำผลที่ได้จากการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลวตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังตาราง 22 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 39

ตาราง 22 แสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็ว (m/s)
20	1475
25	1458
30	1439
35	1422
40	1403
45	1386
50	1367
55	1350
60	1331
65	1313
70	1295



ภาพประกอบ 39 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30

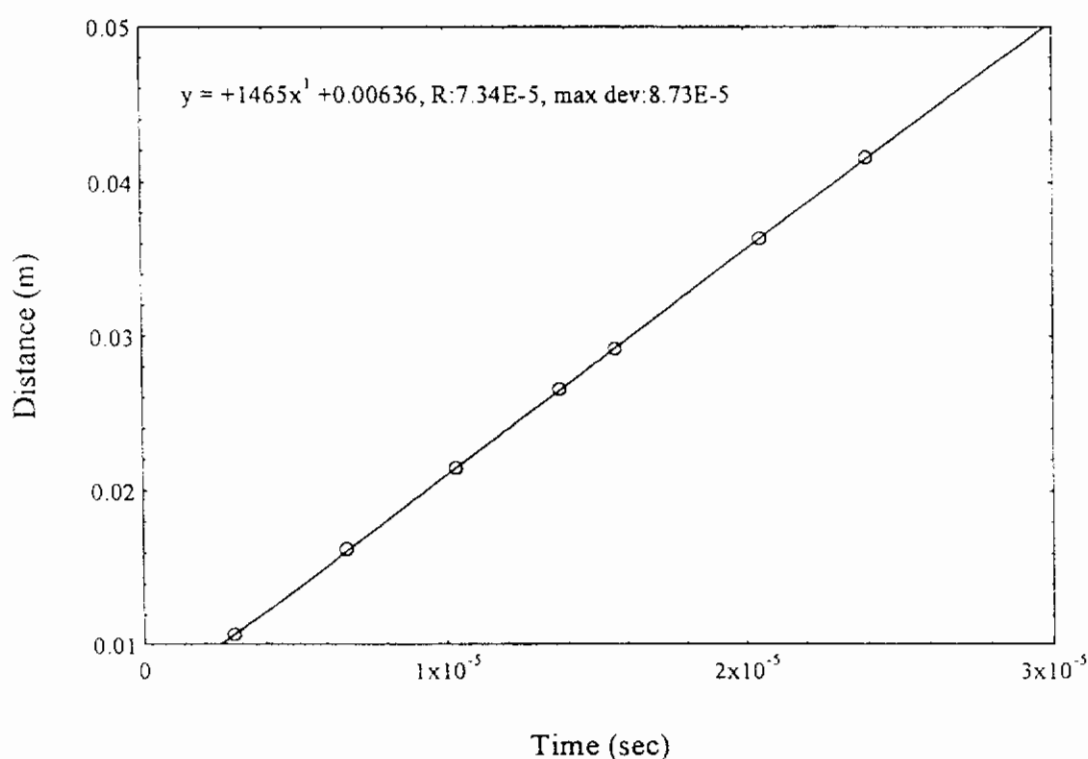
2 สารตัวอย่าง SAE 40

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C

2.1 ทดลองที่อุณหภูมิ 27°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 23 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 40

ตาราง 23 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 27°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	2.96	6.69	10.31	13.74	15.61	20.51	23.98



ภาพประกอบ 40 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 27°C

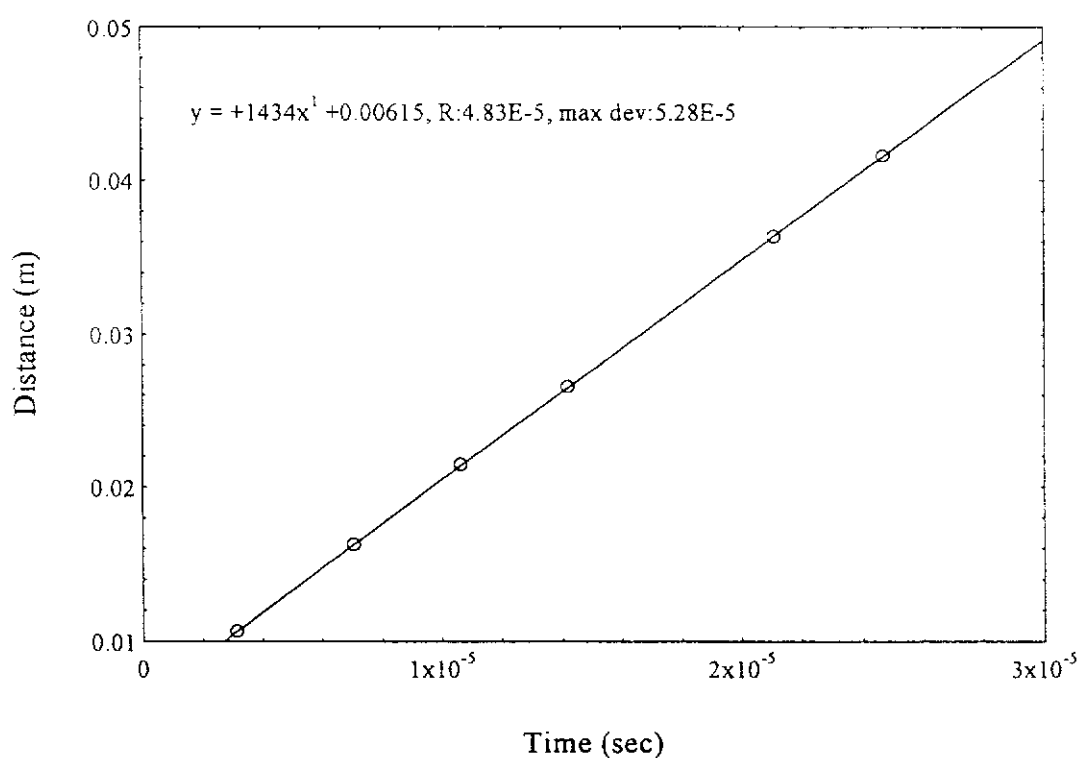
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 27°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 40 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{27} = 1465 \text{ เมตร/วินาที}$$

2.2 ทดลองที่อุณหภูมิ 36°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 24 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 41

ตาราง 24 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 36°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	3.14	7.07	10.63	14.19	21.09	24.67



ภาพประกอบ 41 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 36°C

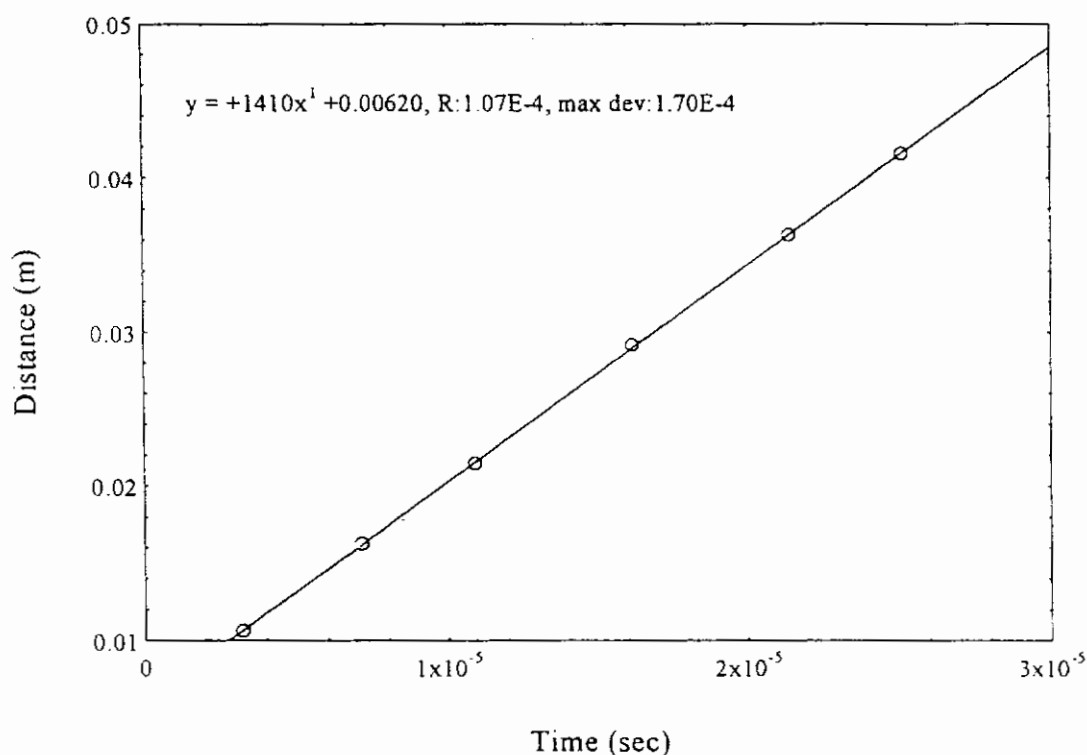
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 36°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 41 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{36} = 1434 \text{ เมตร/วินาที}$$

2.3 ทดลองที่อุณหภูมิ 39°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 25 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 42

ตาราง 25 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 39°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	3.19	7.1	10.88	16.16	21.39	25.13



ภาพประกอบ 42 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 39°C

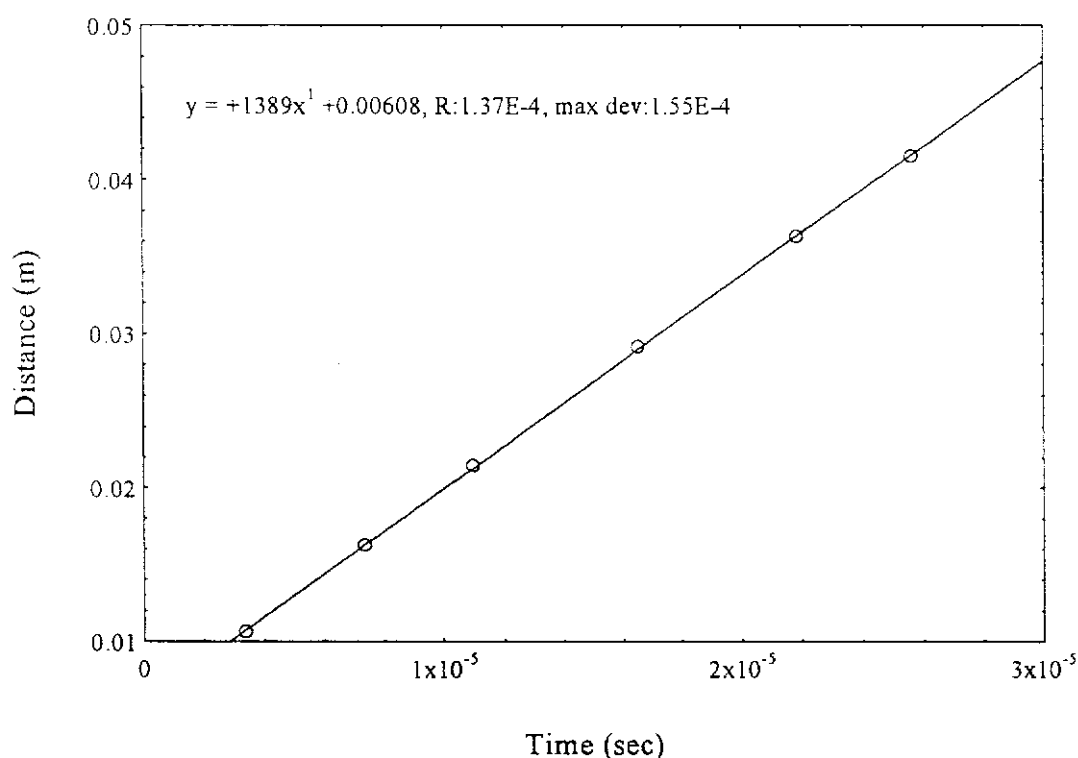
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 39°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 42 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{39} = 1410 \text{ เมตร/วินาที}$$

2.4 ทดลองที่อุณหภูมิ 46°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 26 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 43

ตาราง 26 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 46°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0292	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	3.38	7.35	10.96	16.5	21.83	25.61



ภาพประกอบ 43 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 46°C

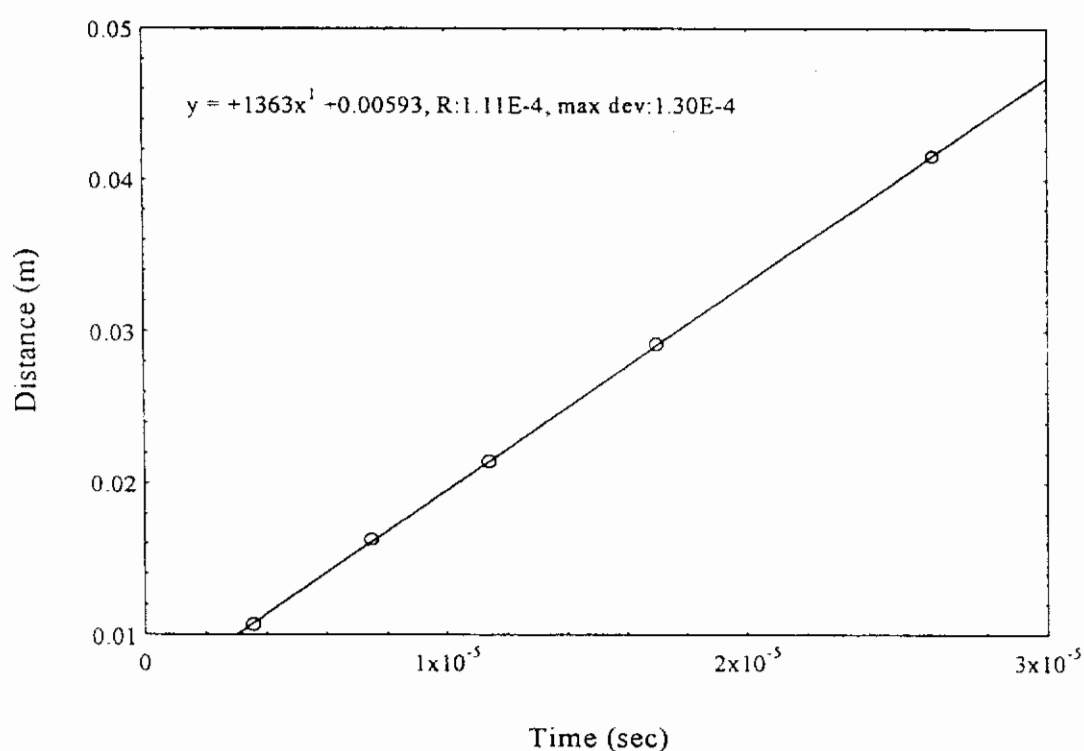
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 46°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 43 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{46} = 1389 \text{ เมตร/วินาที}$$

2.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 53°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 27 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 44

ตาราง 27 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 53°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0292	0.0416
เวลา (μSec)	3.55	7.48	11.41	17.0	26.18



ภาพประกอบ 44 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 53°C

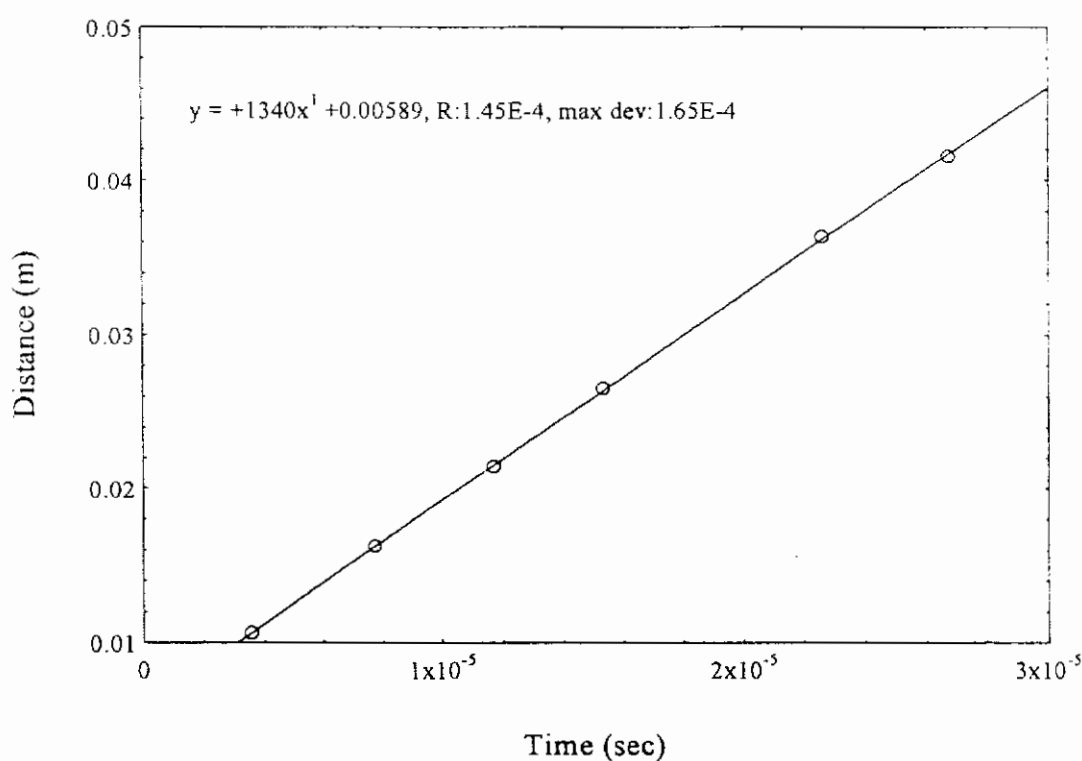
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 53°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 44 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{53} = 1363 \text{ เมตร/วินาที}$$

2.6 ทดลองที่อุณหภูมิ 59°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 28 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 45

ตาราง 28 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 59°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	3.57	7.75	11.69	15.31	22.62	26.74



ภาพประกอบ 45 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 59°C

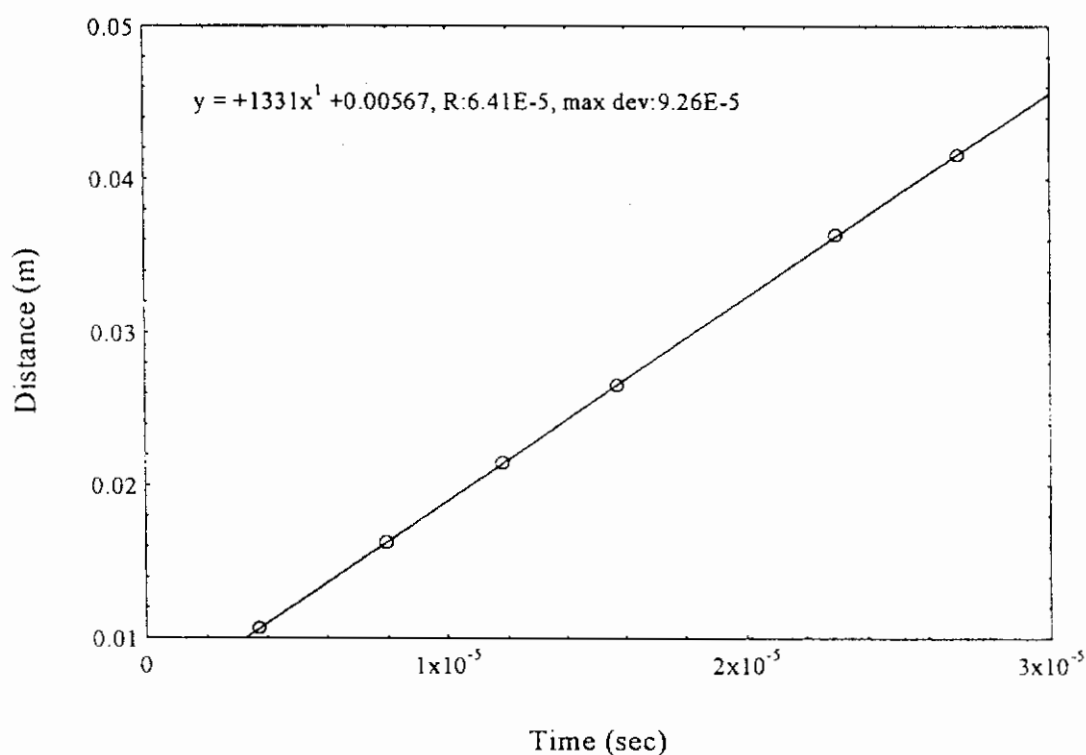
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 59°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 45 จะได้ว่า

ความเร็วคลื่น $C_{59} = 1340$ เมตร/วินาที

2.7 ทดลองที่อุณหภูมิ 65°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 29 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 46

ตาราง 29 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 65°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	3.73	7.96	11.84	15.74	22.98	26.99



ภาพประกอบ 46 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 65°C

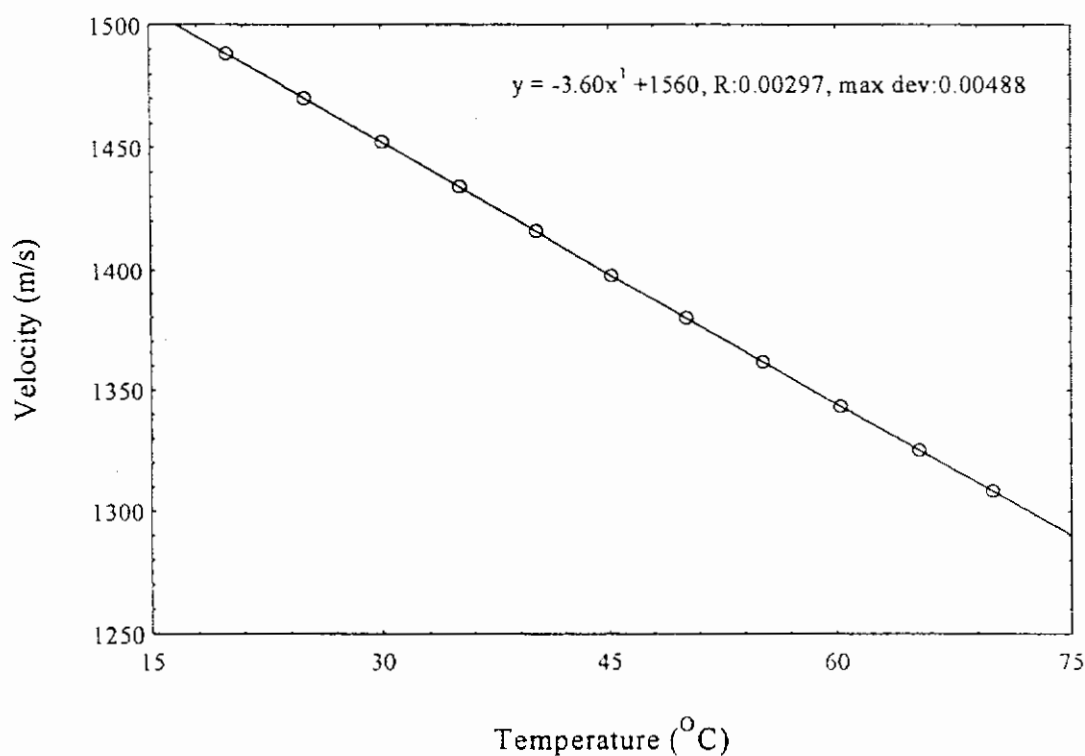
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 65°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 46 จะได้ว่า

ความเร็วคลื่น $C_{65} = 1331$ เมตร/วินาที

นำผลที่ได้จากการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลวตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังตาราง 30 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 47

ตาราง 30 แสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็ว (m/s)
20	1488
25	1470
30	1452
35	1434
40	1416
45	1398
50	1380
55	1362
60	1343
65	1325
70	1308



ภาพประกอบ 47 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

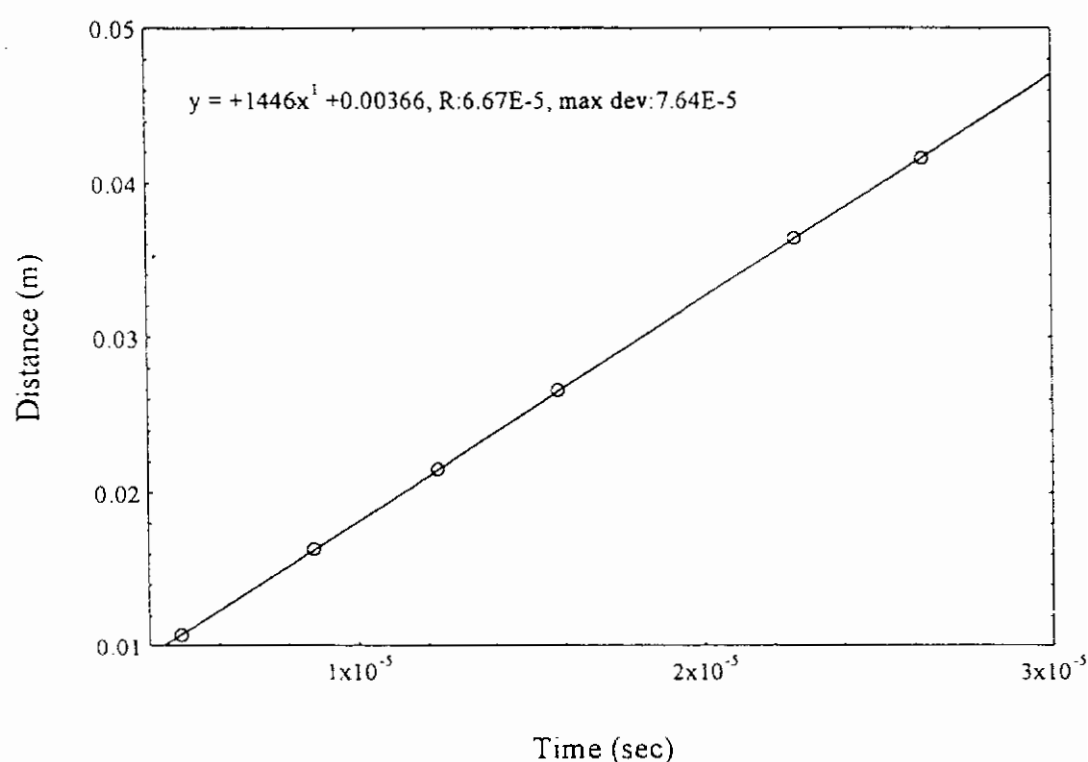
3. สารตัวอย่าง SAE 50

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C

3.1 ทดลองที่อุณหภูมิ 30°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 31 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 48

ตาราง 31 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 30°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	4.92	8.72	12.32	15.81	22.62	26.28



ภาพประกอบ 48 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 30°C

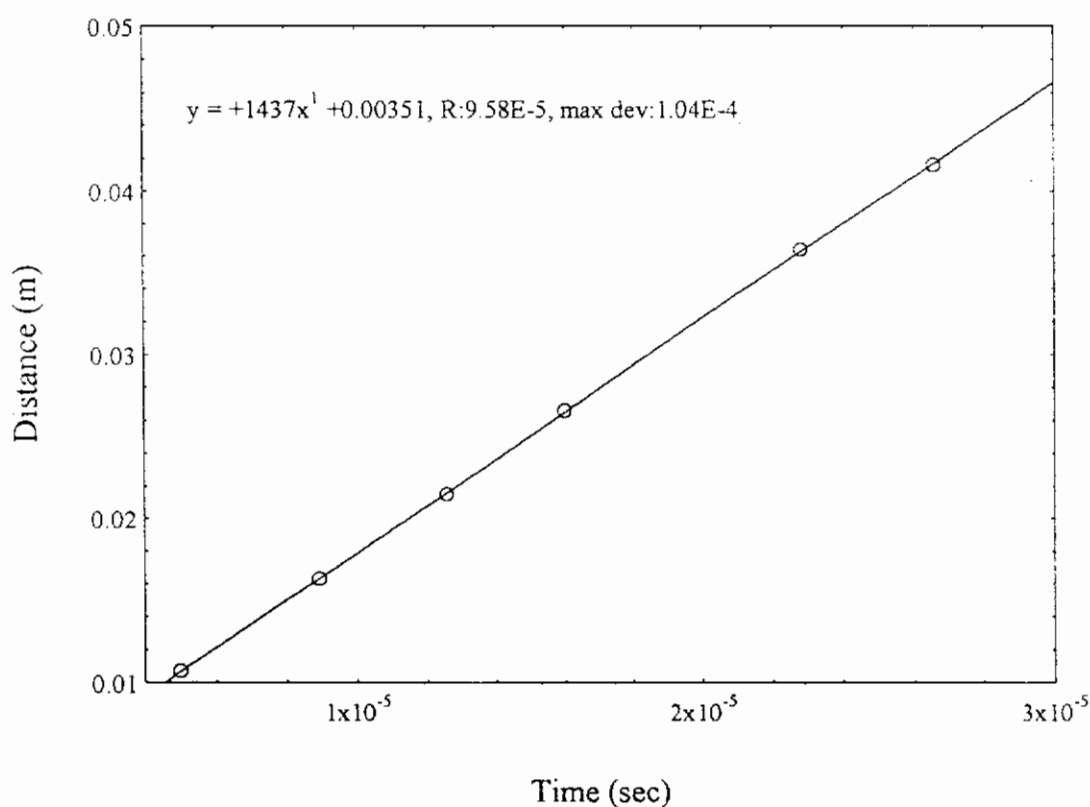
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 30°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 48 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{30} = 1446 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.2 ทดลองที่อุณหภูมิ 35°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 32 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 49

ตาราง 32 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	4.99	8.92	12.57	16.0	22.81	26.57



ภาพประกอบ 49 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35°C

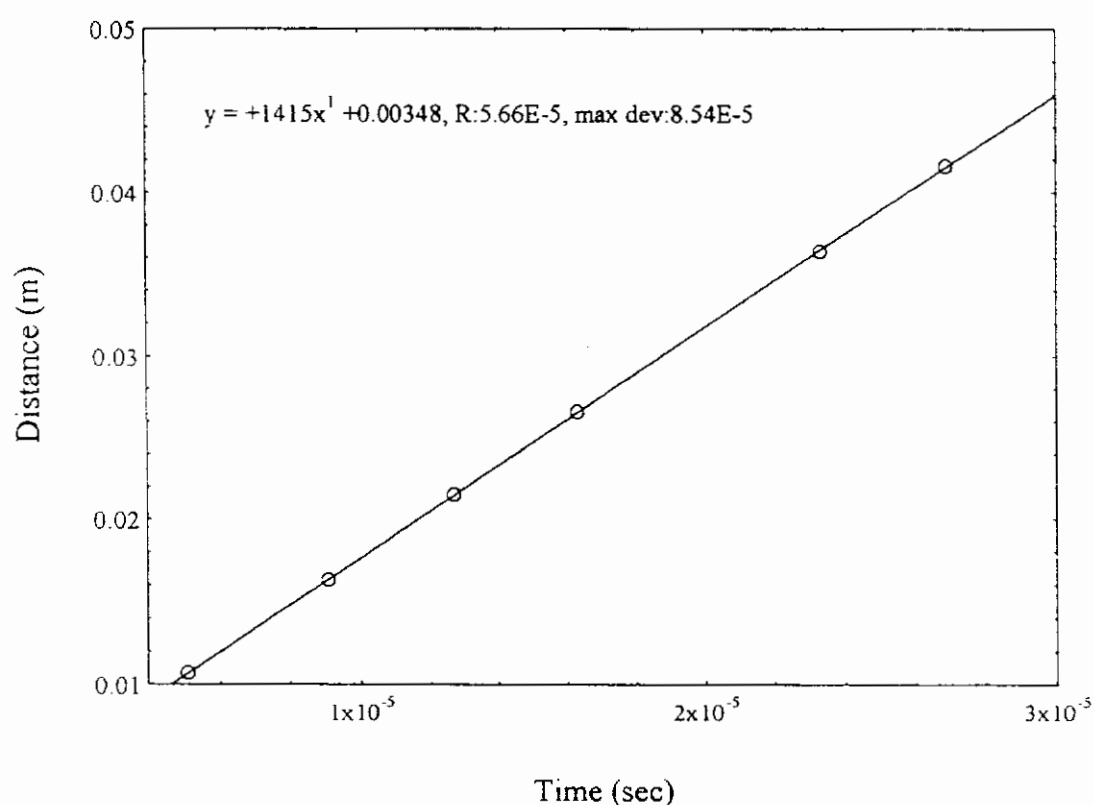
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 49 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{35} = 1437 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.3 ทดลองที่อุณหภูมิ 40°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 33 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 50

ตาราง 33 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.1	9.08	12.71	16.31	23.32	26.9



ภาพประกอบ 50 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40°C

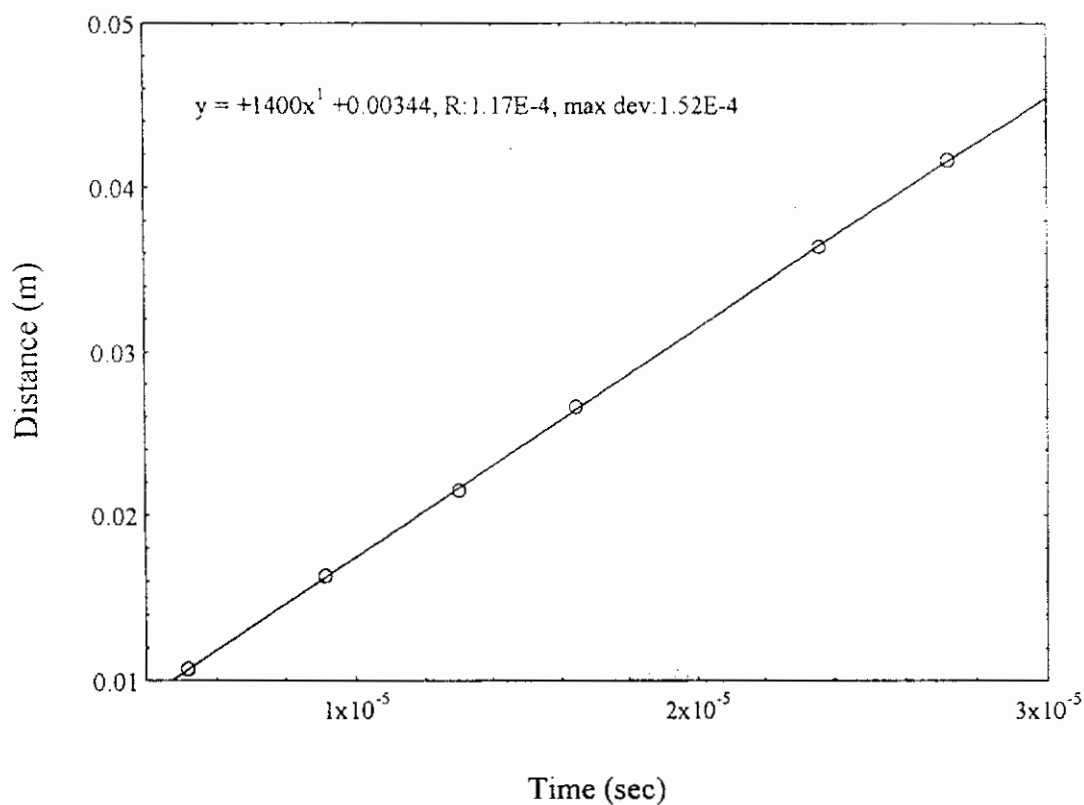
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 50 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{40} = 1415 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.4 ทดลองที่อุณหภูมิ 44°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 34 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 51

ตาราง 34 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.19	9.15	13.01	16.44	23.6	27.23



ภาพประกอบ 51 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่เปลี่ยนแปลงที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44°C

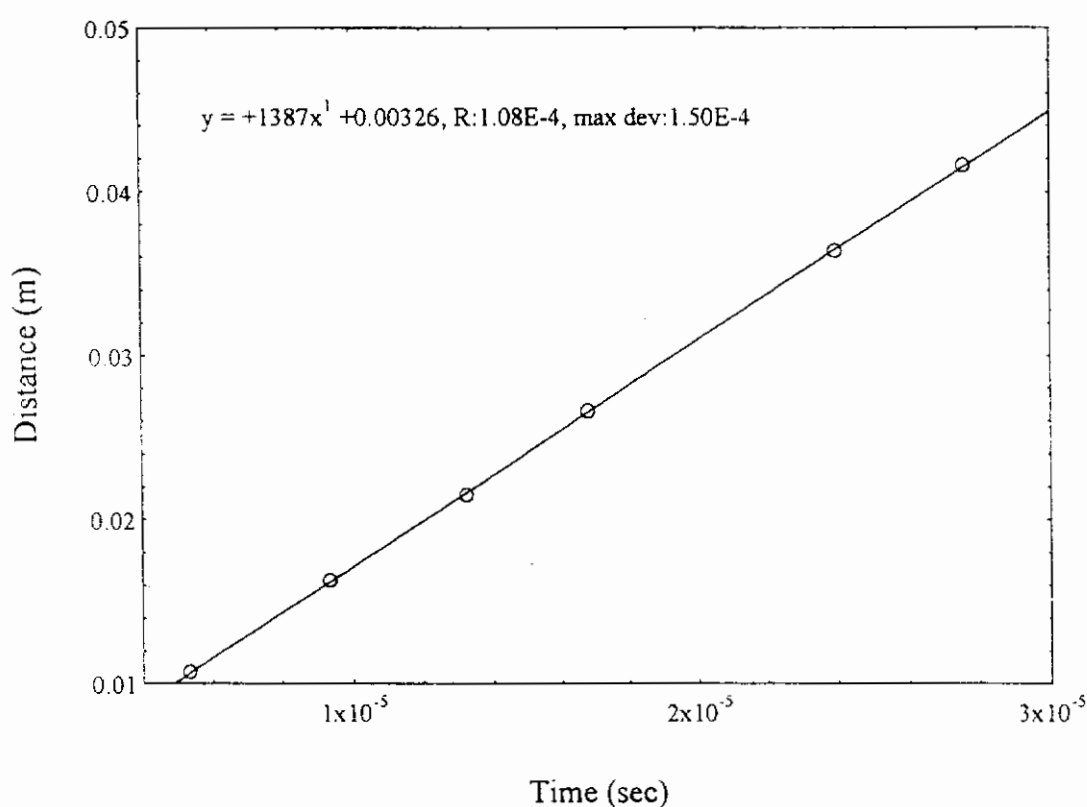
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 51 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{44} = 1400 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 49°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 35 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 52

ตาราง 35 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.34	9.35	13.26	16.8	23.96	27.58



ภาพประกอบ 52 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49°C

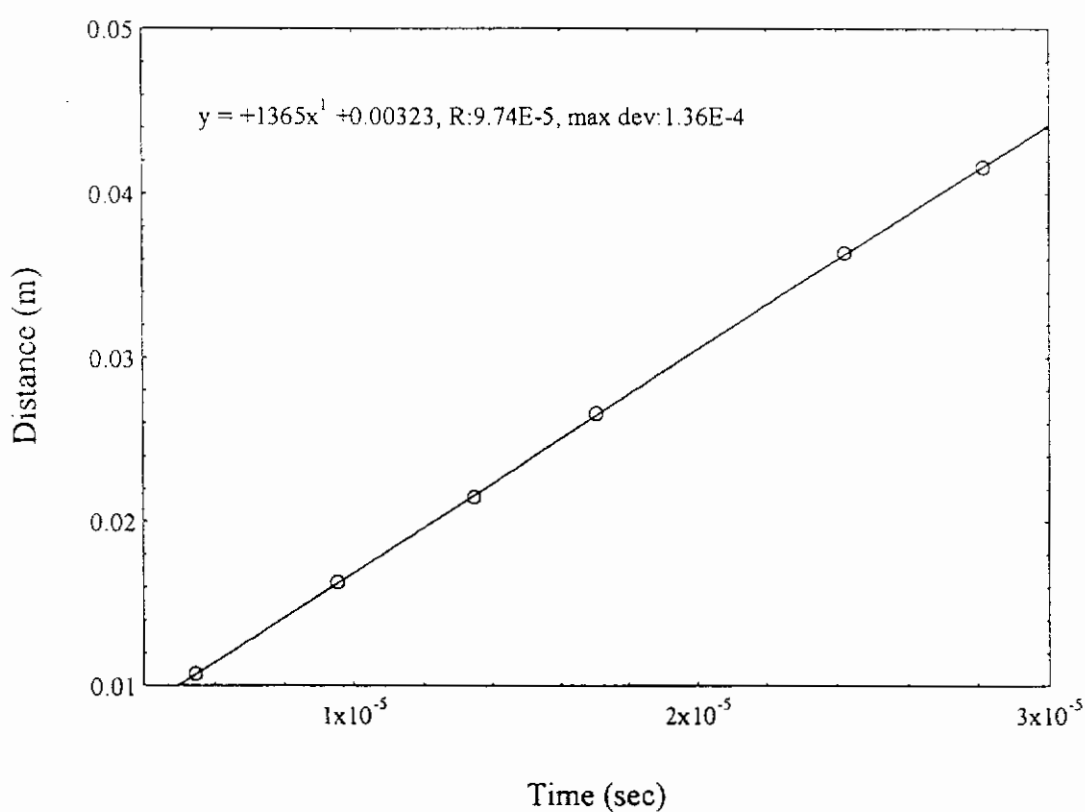
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 52 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{49} = 1387 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.6 ทดลองที่อุณหภูมิ 54°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 36 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 53

ตาราง 36 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.47	9.54	13.48	17.06	24.23	28.15



ภาพประกอบ 53 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่อนเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54°C

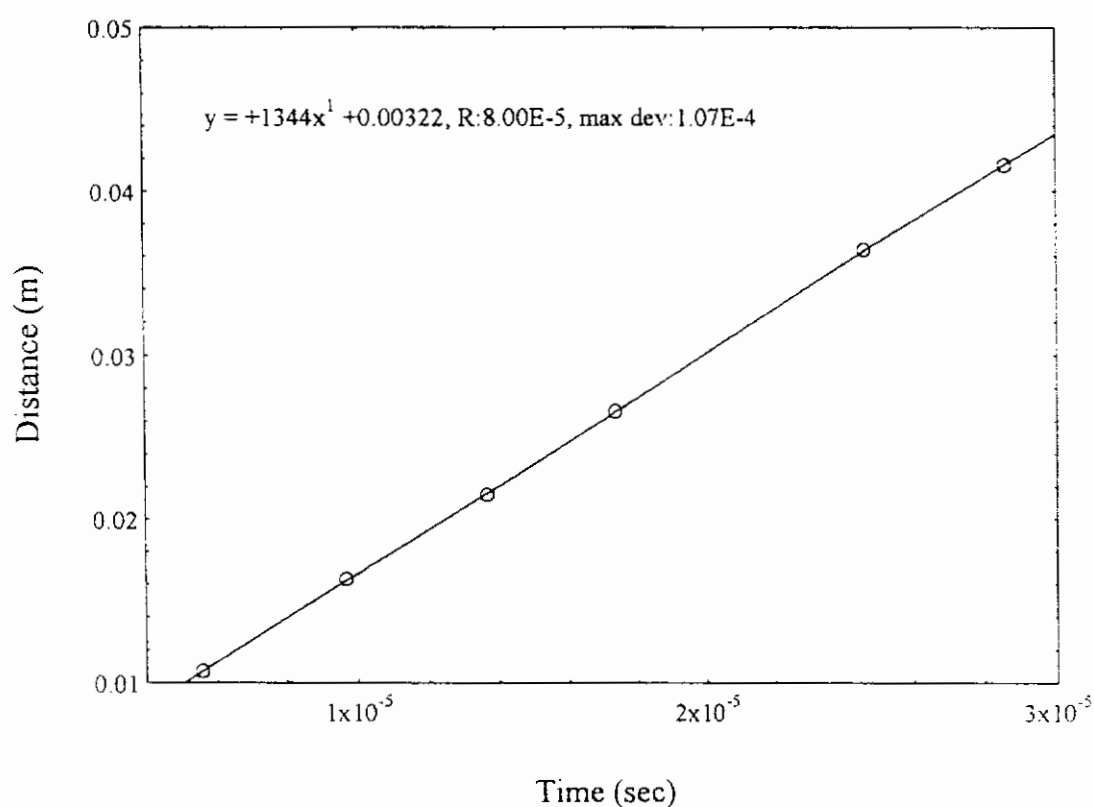
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิคในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 53 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{54} = 1365 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.7 ทดลองที่อุณหภูมิ 59°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 37 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 54

ตาราง 37 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.58	9.68	13.68	17.37	24.63	28.59



ภาพประกอบ 54 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59°C

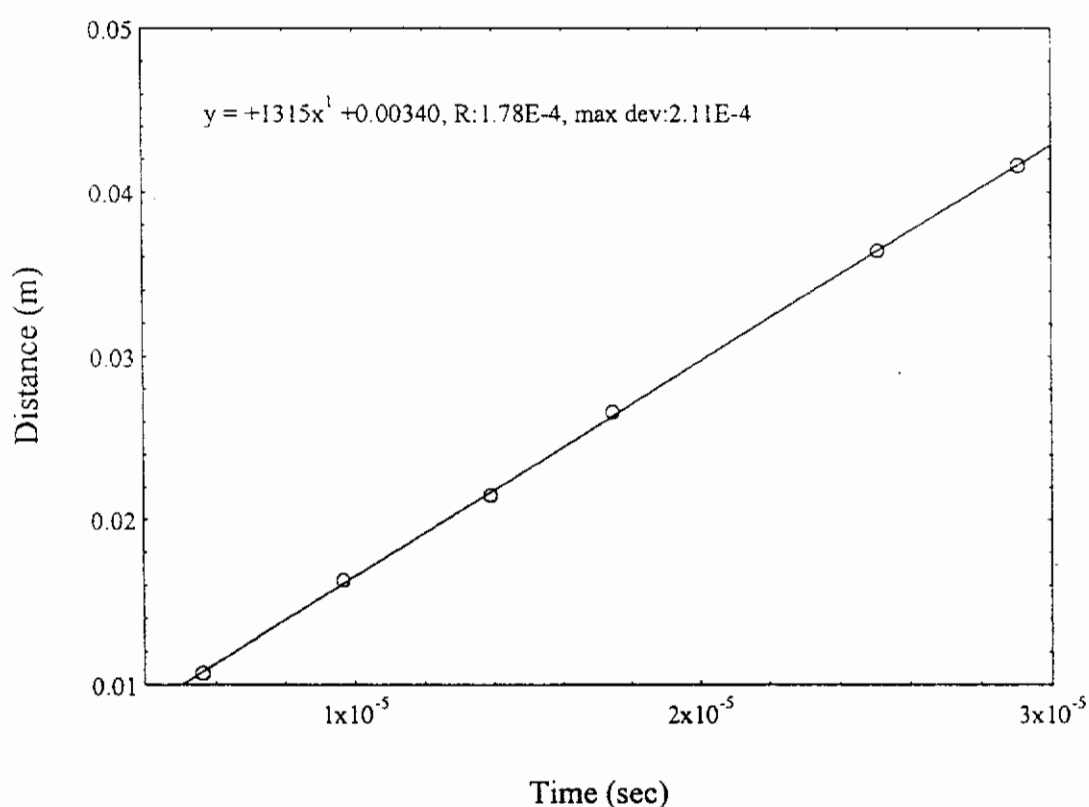
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 54 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{59} = 1344 \text{ เมตร/วินาที}$$

3.8 ทดลองที่อุณหภูมิ 64°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 38 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 55

ตาราง 38 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
เวลา (μSec)	5.64	9.68	13.91	17.48	25.11	29.08



ภาพประกอบ 55 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับค่าเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ สำหรับน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64°C

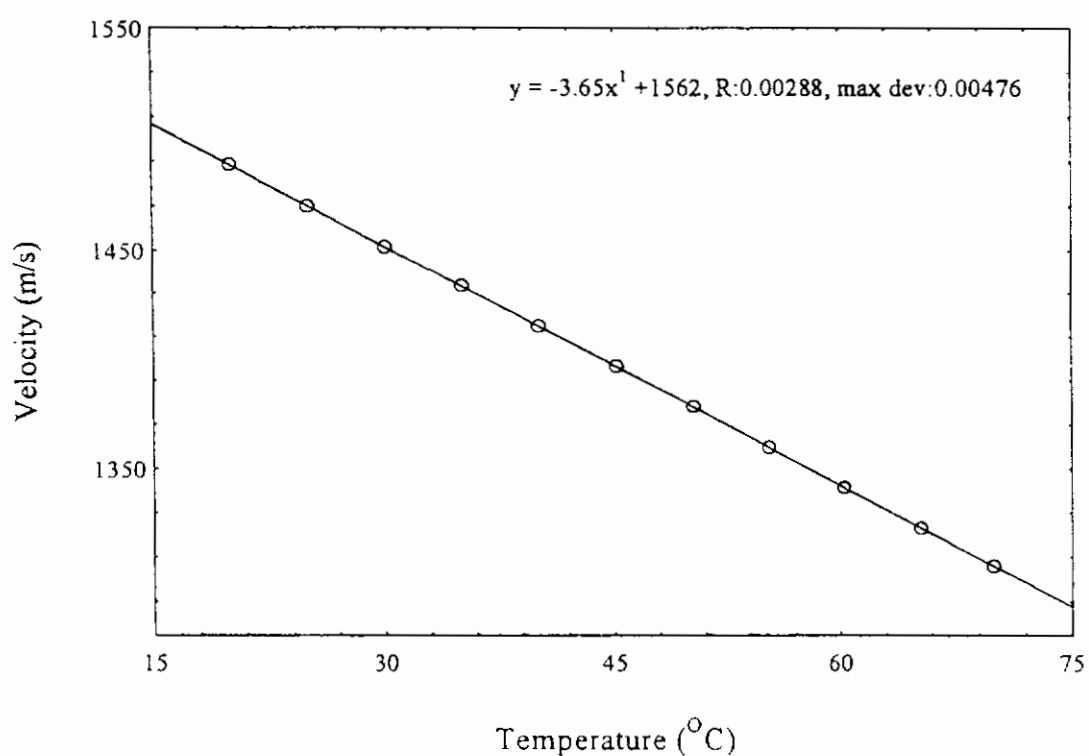
ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64°C นี้สามารถหาได้จากความชันของกราฟระหว่างระยะห่างกับเวลาดังในภาพประกอบ 55 จะได้ว่า

$$\text{ความเร็วคลื่น } C_{64} = 1315 \text{ เมตร/วินาที}$$

นำผลที่ได้จากการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลวตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังตาราง 39 และเขียนกราฟความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 56

ตาราง 39 แสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็ว (m/s)
20	1489
25	1470
30	1452
35	1433
40	1415
45	1397
50	1378
55	1360
60	1341
65	1323
70	1306



ภาพประกอบ 56 แสดงความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50

ขั้นตอนการหาสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก

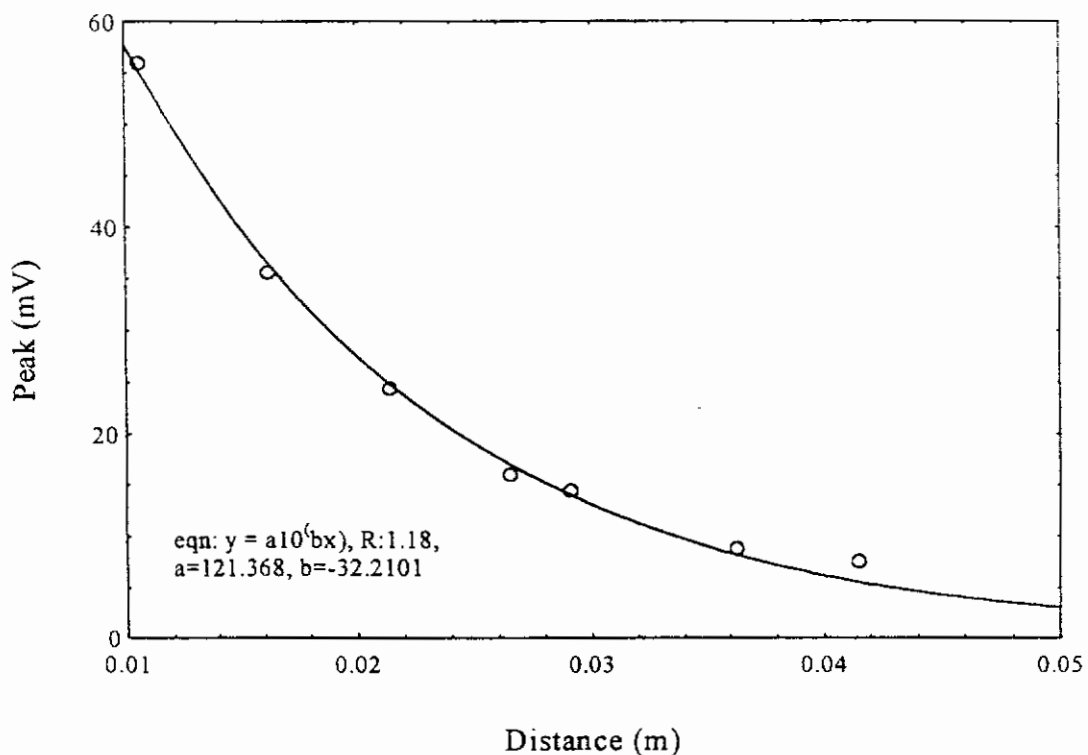
1. สารตัวอย่าง SAE 30

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C

1.1 ทดลองที่อุณหภูมิ 26°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 40 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 57

ตาราง 40 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 26°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	56.0	35.6	24.4	16.0	14.4	8.8	7.6



ภาพประกอบ 57 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 26°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 121.368$$

$$b = -32.2101$$

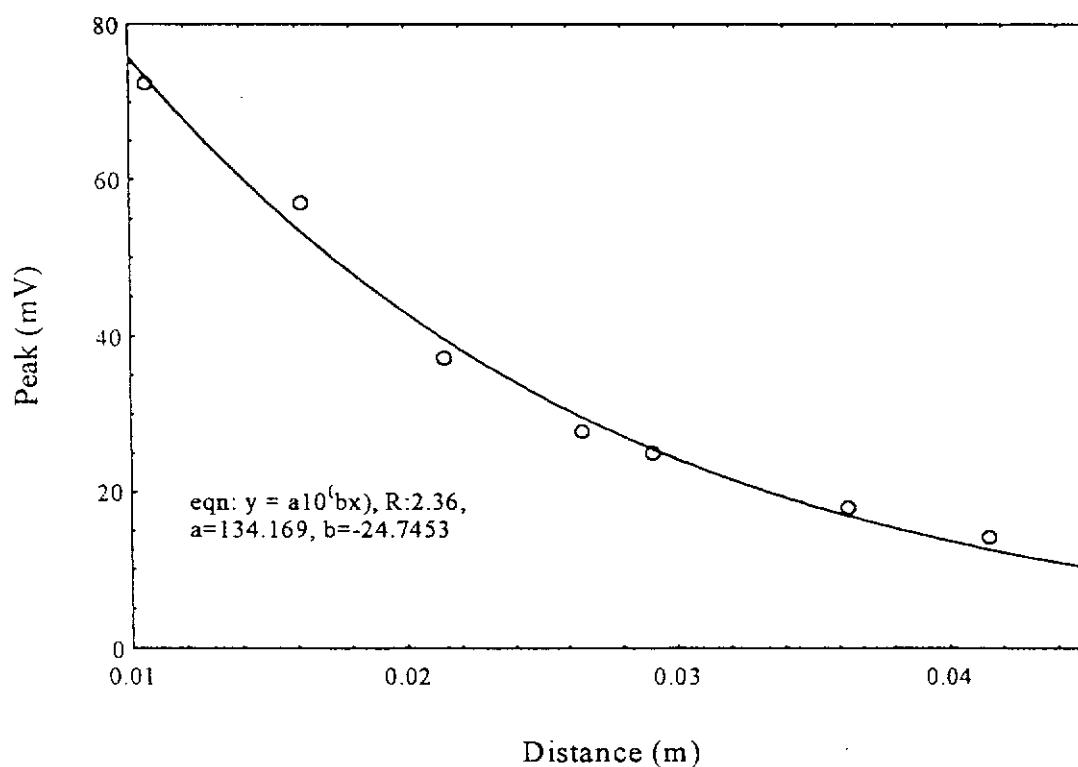
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 8.54 \text{ db/m.}$$

1.2 ทดลองที่อุณหภูมิ 32°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 41 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 58

ตาราง 41 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 32°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	72.4	57	37.2	27.8	25	18	14.2



ภาพประกอบ 58 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 32°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 134.169$$

$$b = -24.7453$$

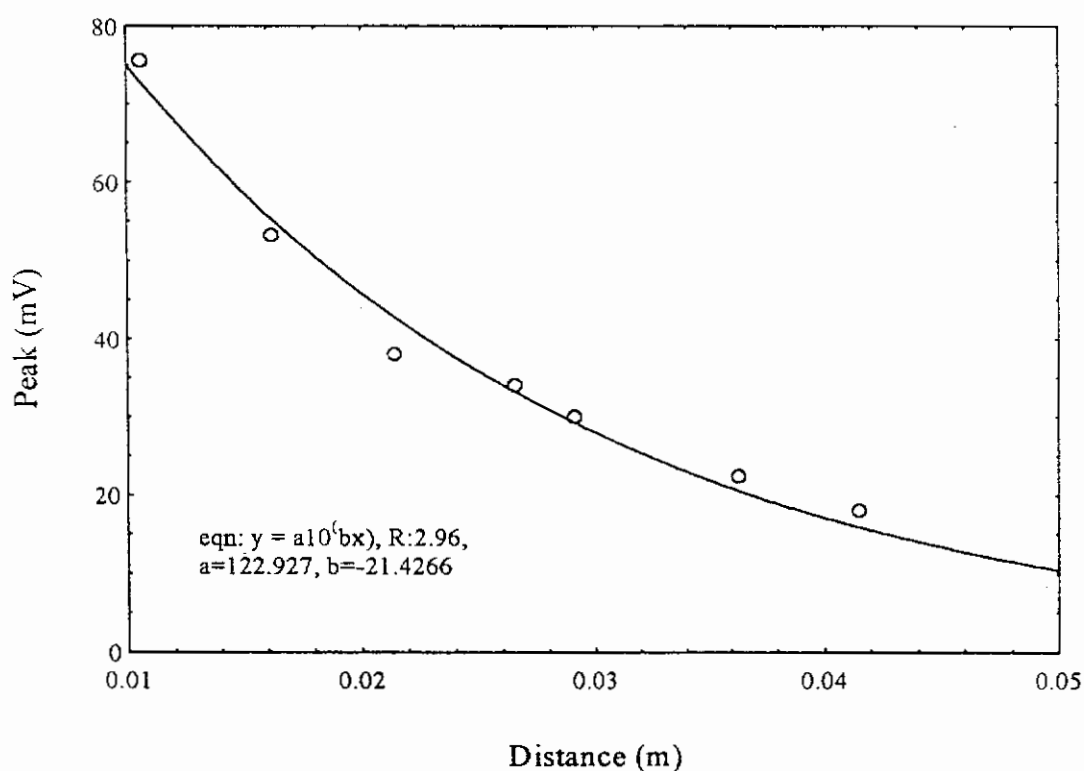
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 6.56 \text{ db/m}$$

1.3 ทดลองที่อุณหภูมิ 36°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 42 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 59

ตาราง 42 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 36°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	75.6	53.2	38.0	28.6	30.0	22.4	18.0



ภาพประกอบ 59 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 36°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 122.927$$

$$b = -21.4266$$

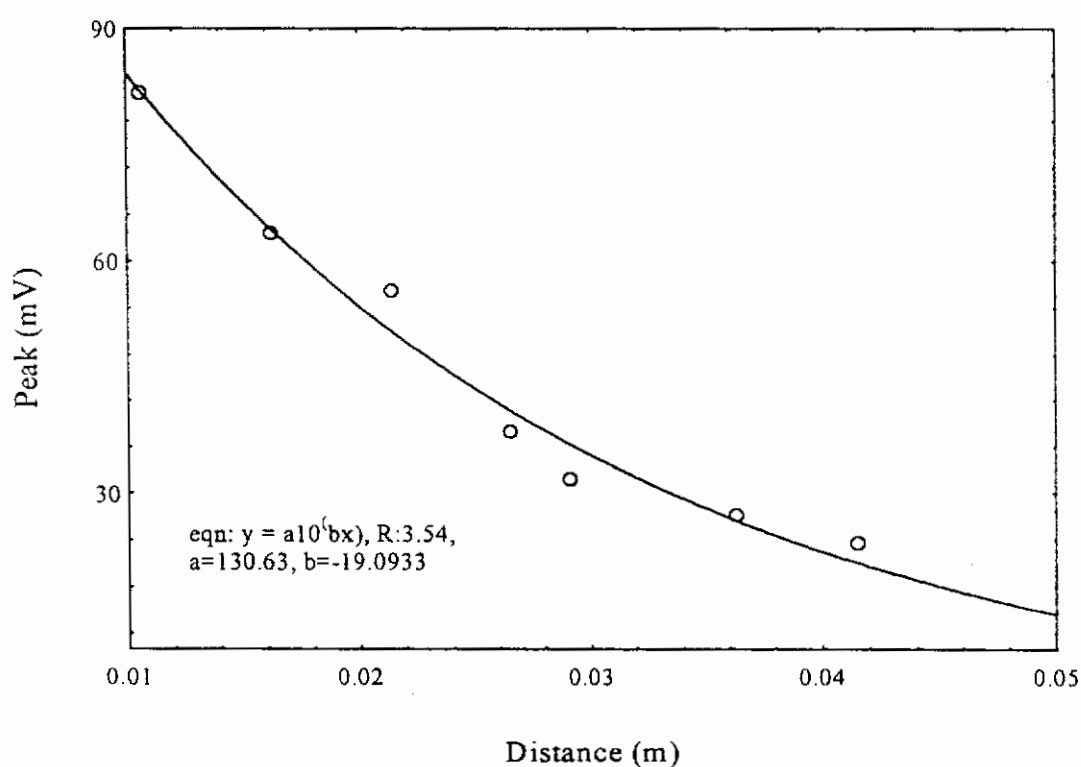
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 5.68 \text{ db/m.}$$

1.4 ทดลองที่อุณหภูมิ 40°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 43 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 60

ตาราง 43 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 40°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	81.6	63.6	56.2	38	31.8	27.2	23.6



ภาพประกอบ 60 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 40°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 130.63$$

$$b = -19.0933$$

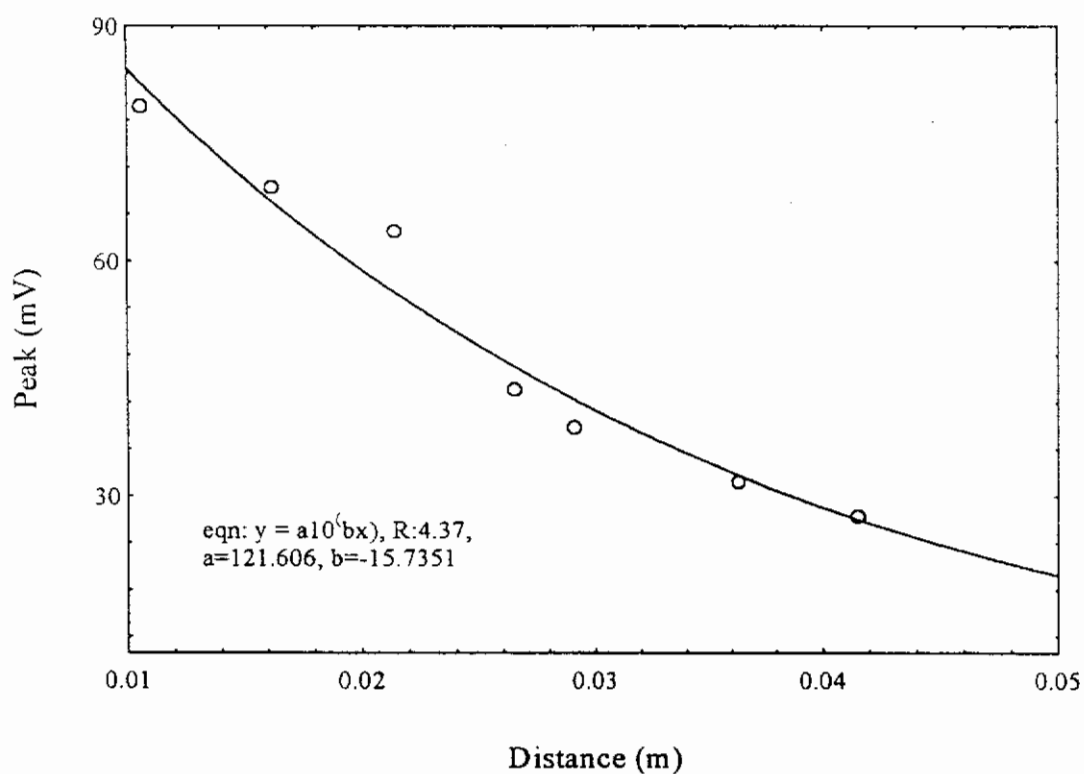
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 5.06 \text{ db/m.}$$

1.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 45°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 44 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 61

ตาราง 44 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 45°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	79.8	69.4	63.8	43.6	38.8	31.8	27.4



ภาพประกอบ 61 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 45°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 121.606$$

$$b = -15.7351$$

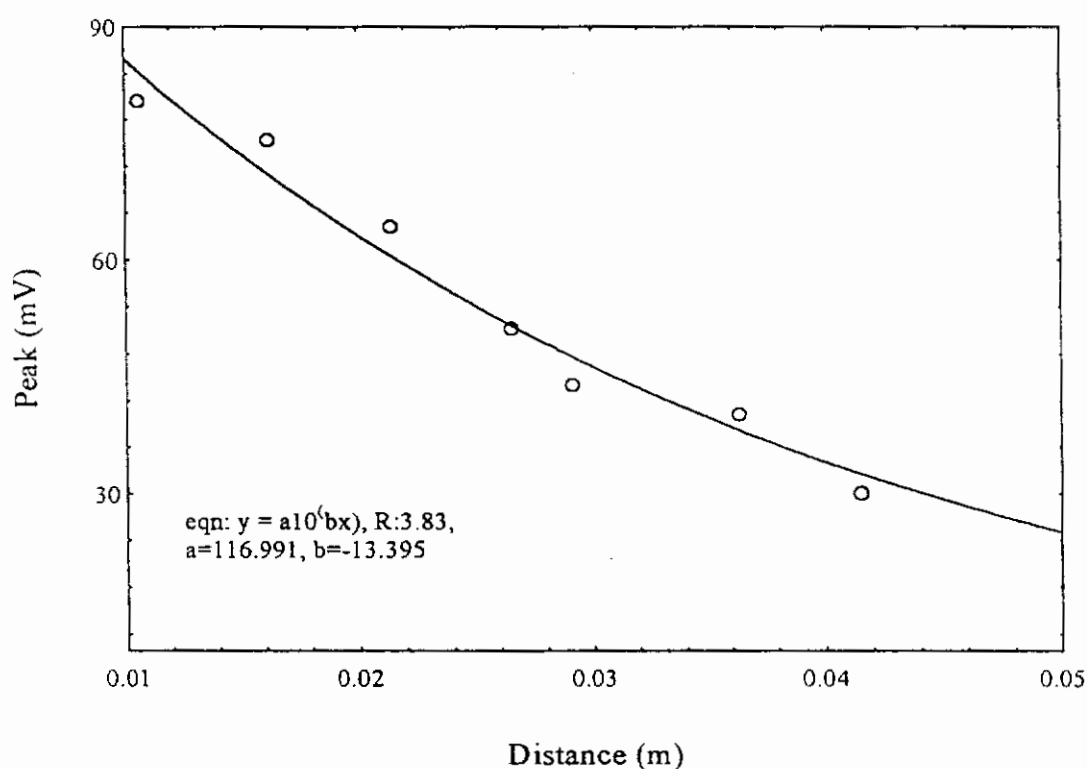
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 4.17 \text{ db/m.}$$

1.6 ทดลองที่อุณหภูมิ 49°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 45 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 62

ตาราง 45 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 49°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	80.4	75.4	64.2	51.2	36.2	40.2	30.0



ภาพประกอบ 62 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 49°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 116.991$$

$$b = -13.395$$

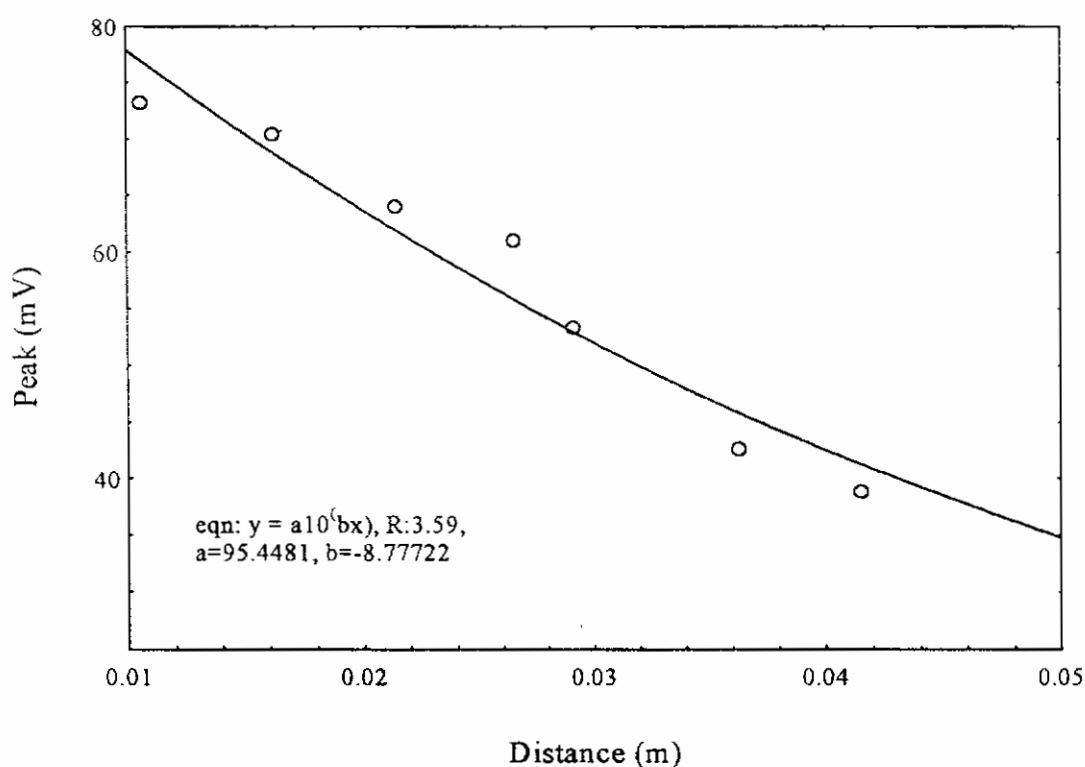
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 3.55 \text{ db/m.}$$

1.7 ทดลองที่อุณหภูมิ 54°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 46 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 63

ตาราง 46 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 54°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	73.2	70.4	76.4	61.0	53.4	42.6	38.8



ภาพประกอบ 63 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 54°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 95.4481$$

$$b = -8.77722$$

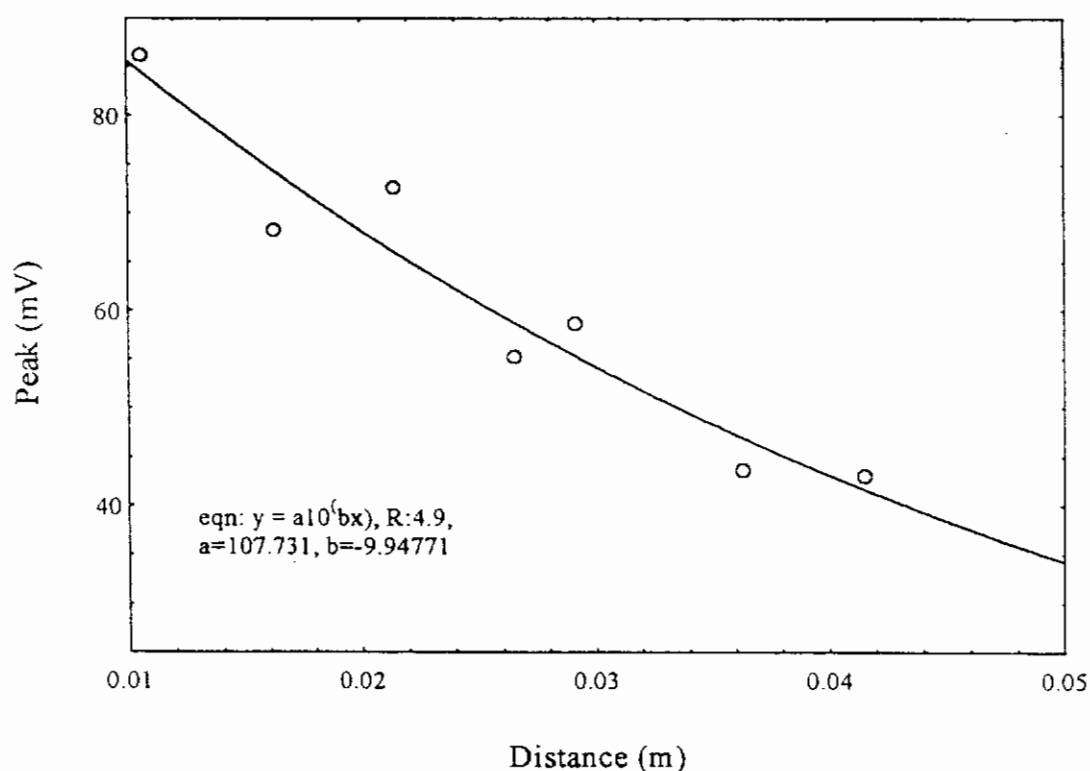
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 2.33 \text{ db/m.}$$

1.8 ทดลองที่อุณหภูมิ 58°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 47 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 64

ตาราง 47 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 58°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	86.2	68.2	72.6	55.2	58.6	43.6	43.0



ภาพประกอบ 64 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 58°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 107.731$$

$$b = -9.94771$$

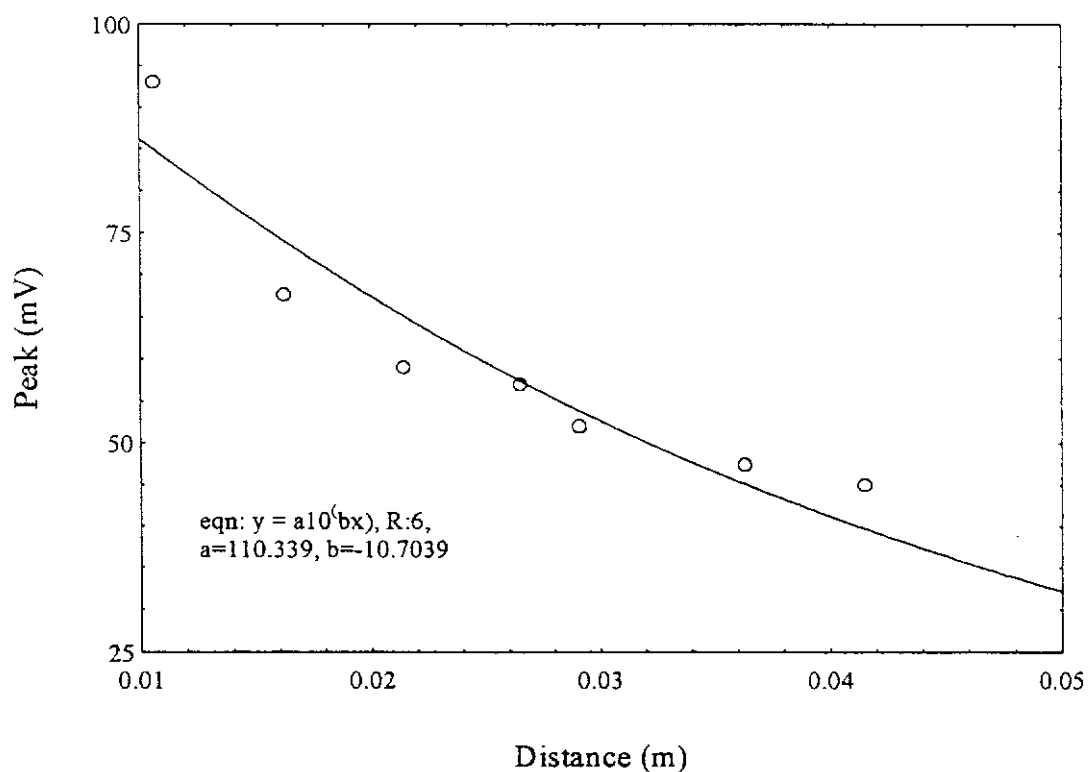
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 2.64 \text{ db/m.}$$

1.9 ทดลองที่อุณหภูมิ 65°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 48 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 65

ตาราง 48 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 65°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	93	67.6	40.0	57.0	67.4	47.4	45



ภาพประกอบ 65 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่อุณหภูมิ 65°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 110.339$$

$$b = -10.7039$$

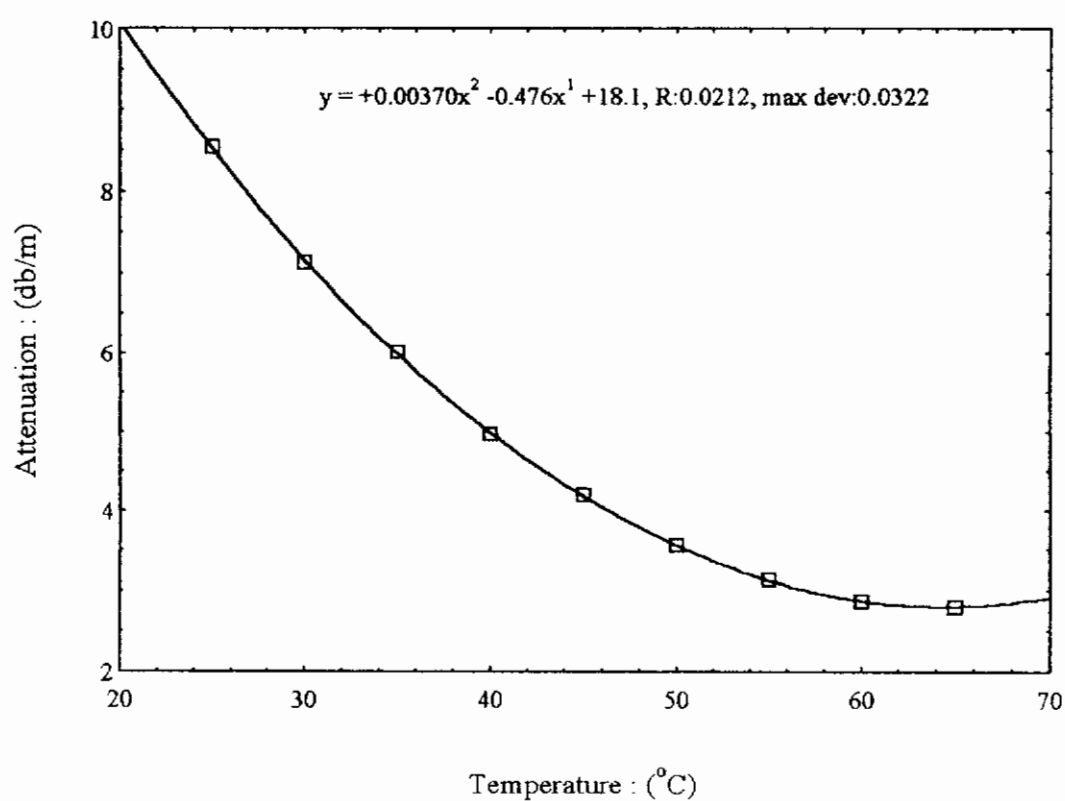
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 2.84 \text{ db/m.}$$

นำผลที่ได้จากการวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก ในของเหลวตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังตาราง 49 และเขียนกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับ อุณหภูมิตามภาพประกอบ 66

ตาราง 49 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับค่าอุณหภูมิ ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 30

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Attenuation (db/m)
25	8.54
30	7.13
35	6.01
40	4.97
45	4.20
50	3.56
55	3.13
60	2.87
65	2.80



ประกอบ 66 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับอุณหภูมิของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30

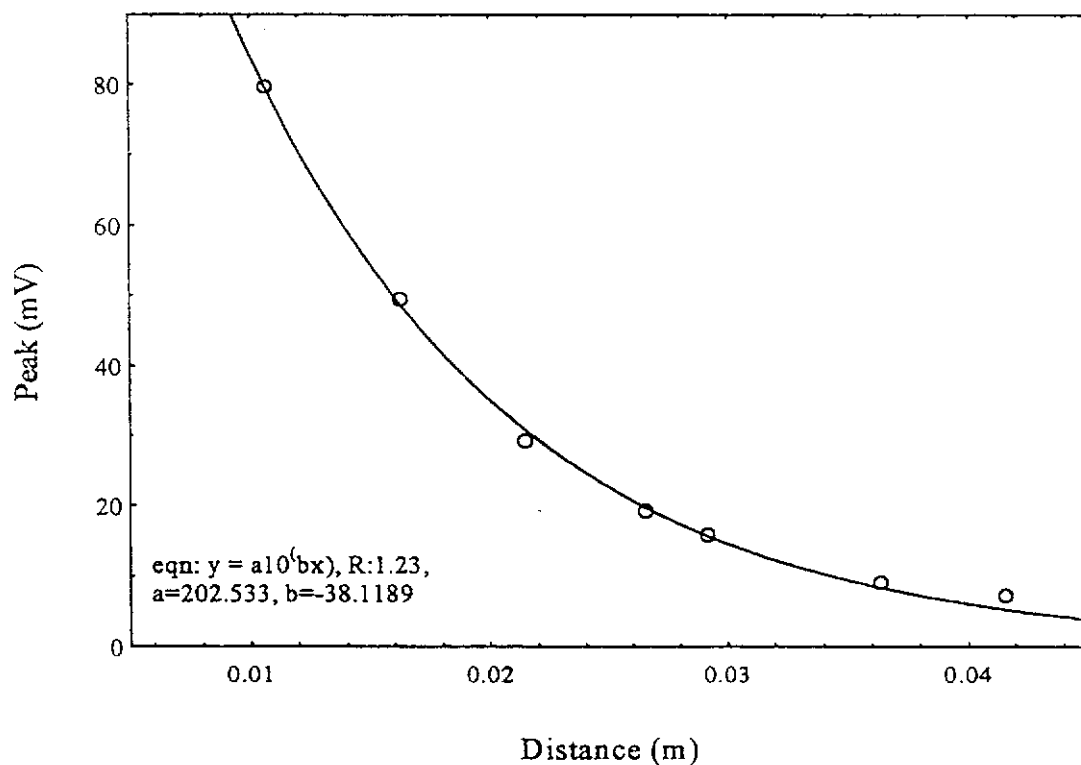
2 สารตัวอย่าง SAE 40

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C

2.1 ทดลองที่อุณหภูมิ 27°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 50 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 67

ตาราง 50 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 27°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	79.6	49.4	29.2	19.2	15.8	9.0	7.2



ภาพประกอบ 67 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 27°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 202.533$$

$$b = -38.1189$$

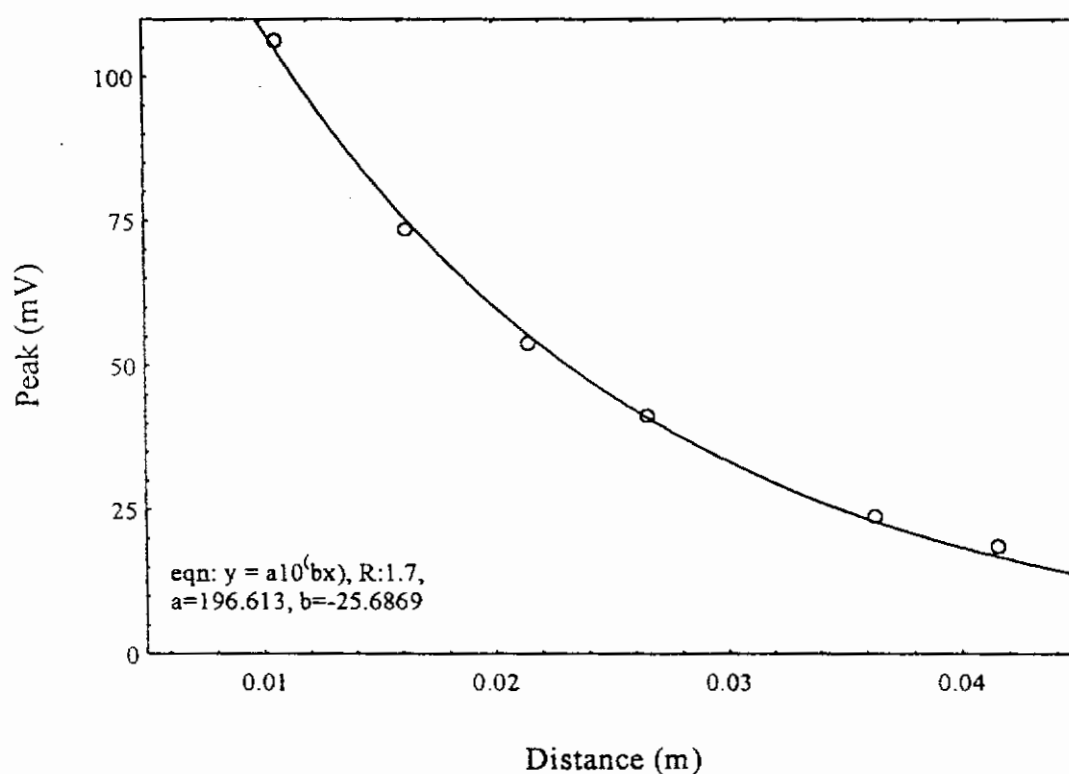
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 10.10 \text{ db/m.}$$

2.2 ทดลองที่อุณหภูมิ 36°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 51 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 68

ตาราง 51 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 36°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	106.2	73.4	53.8	41.2	23.8	18.6



ภาพประกอบ 68 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 36°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 196.613$$

$$b = -25.6869$$

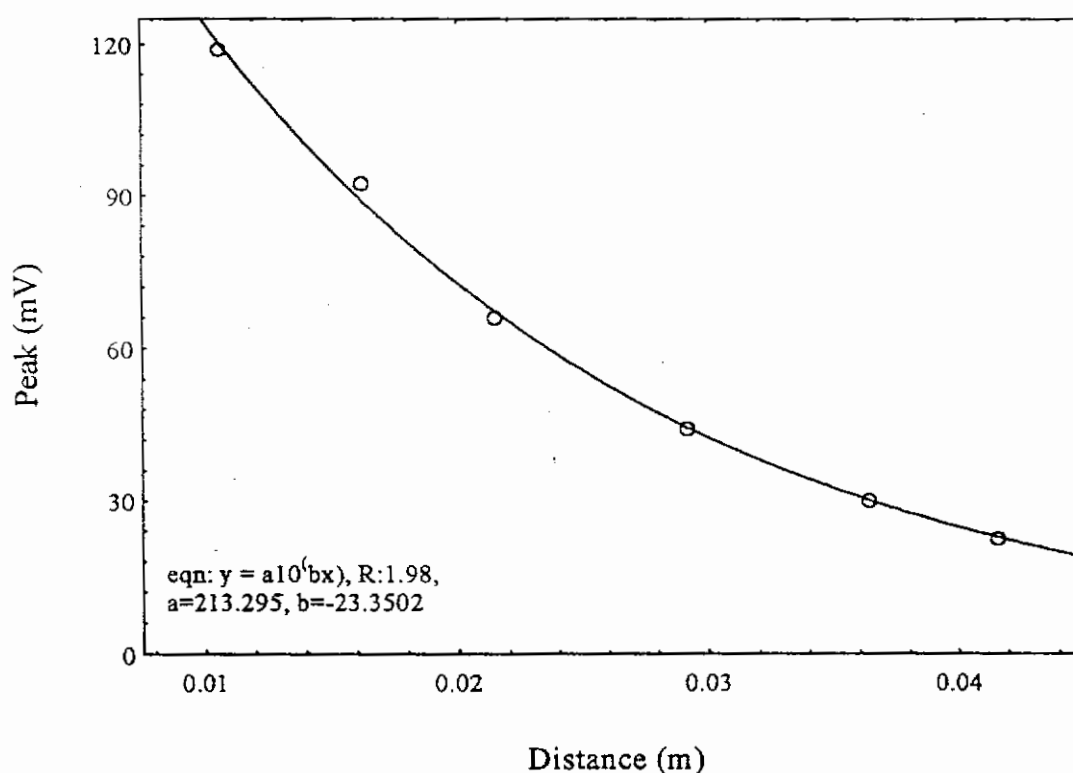
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 6.81 \text{ db/m.}$$

2.3 ทดลองที่อุณหภูมิ 39°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 52 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 69

ตาราง 52 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 39°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	118.8	92.4	66.0	44.2	30.0	22.4



ภาพประกอบ 69 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 39°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 213.295$$

$$b = -23.3502$$

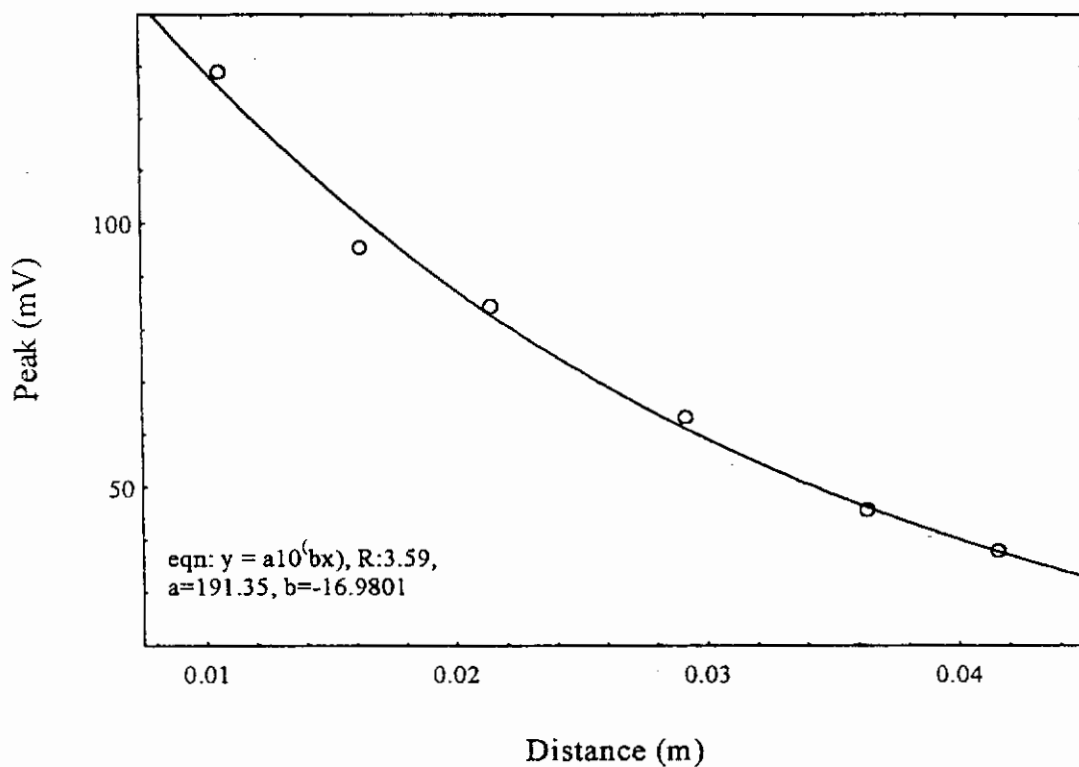
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 6.19 \text{ db/m.}$$

2.4 ทดลองที่อุณหภูมิ 46°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 53 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 70

ตาราง 53 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 46°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	129	95.4	84.4	63.4	45.6	37.8



ภาพประกอบ 70 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 46°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 191.35$$

$$b = -16.9801$$

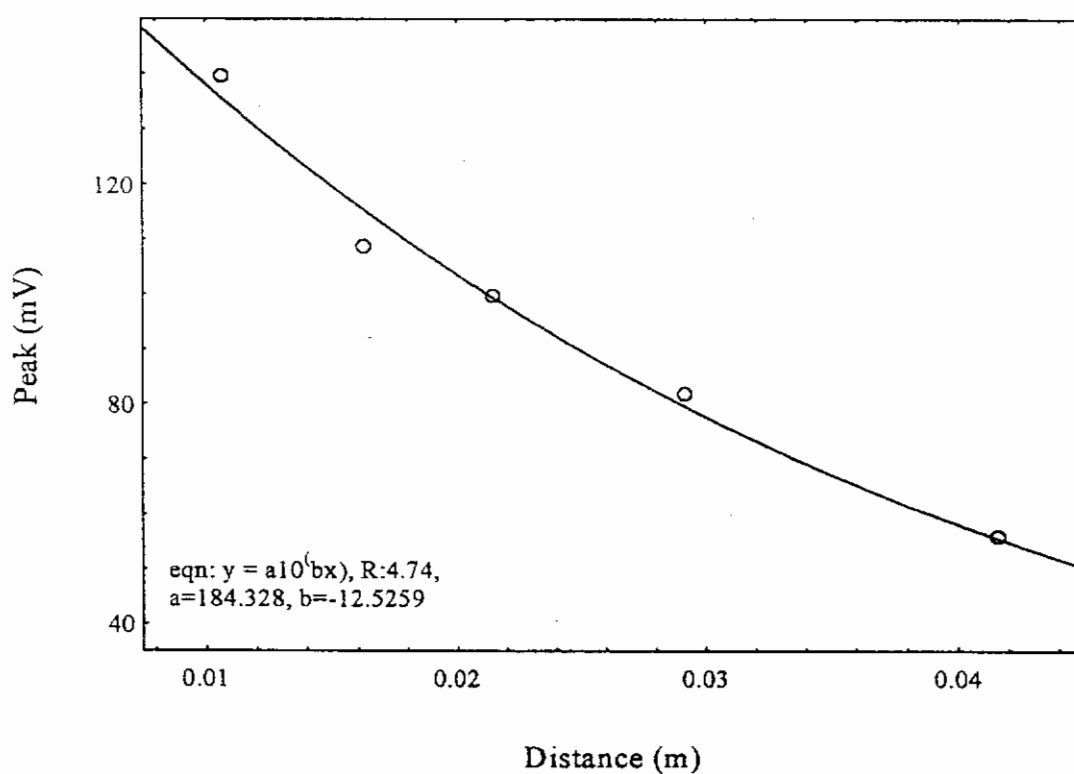
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 4.50 \text{ db/m.}$$

2.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 53°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 54 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 71

ตาราง 54 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 53°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0292	0.0416
peak (mV)	139.6	108.6	99.6	81.8	56.0



ภาพประกอบ 71 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 53°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 184.328$$

$$b = -12.5259$$

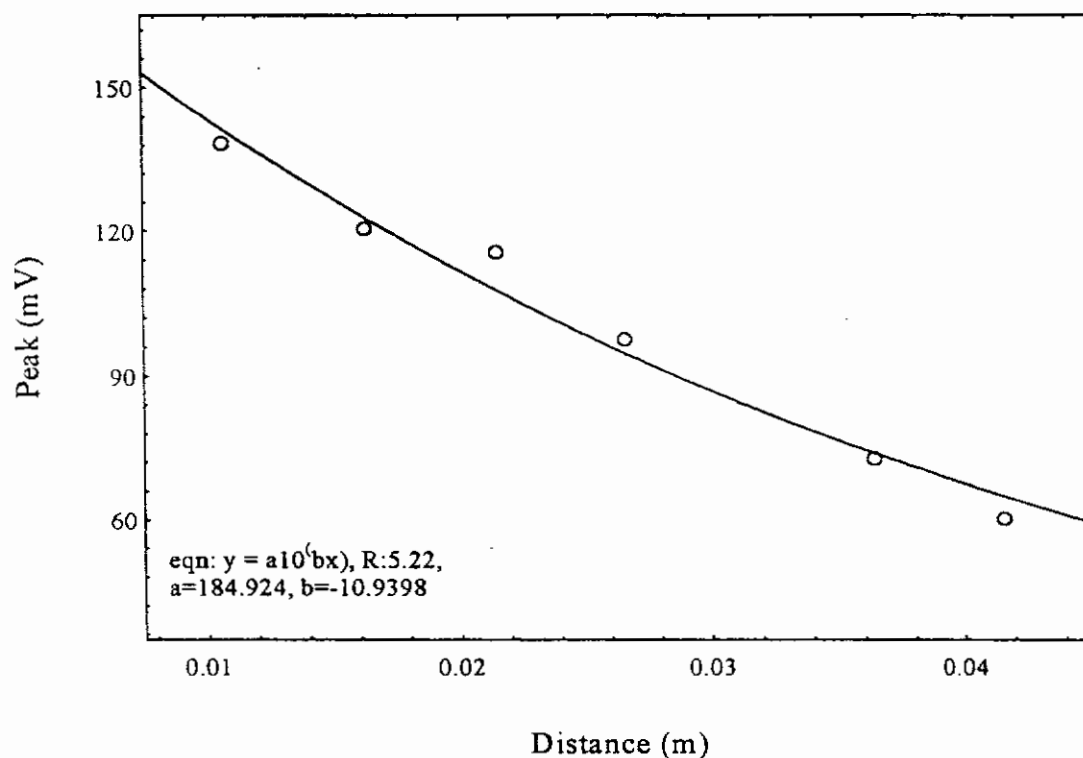
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 3.32 \text{ db/m.}$$

2.6 ทดลองที่อุณหภูมิ 59°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 55 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 72

ตาราง 55 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 59°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	138.4	120.4	115.6	97.6	72.8	60.2



ภาพประกอบ 72 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 59°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 184.924$$

$$b = -10.9398$$

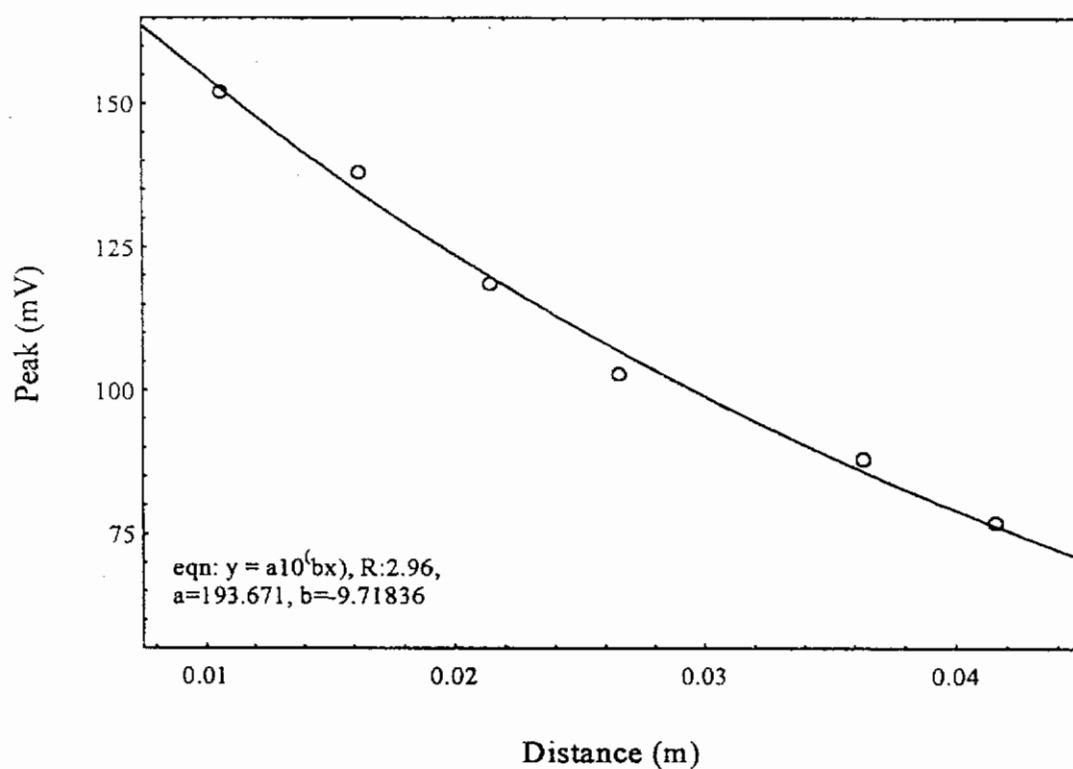
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 2.90 \text{ db/m.}$$

2.7 ทดลองที่อุณหภูมิ 65°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 56 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 73

ตาราง 56 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 65°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	152	138	118.6	102.8	88	77



ภาพประกอบ 73 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่อุณหภูมิ 65°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 193.671$$

$$b = -9.71836$$

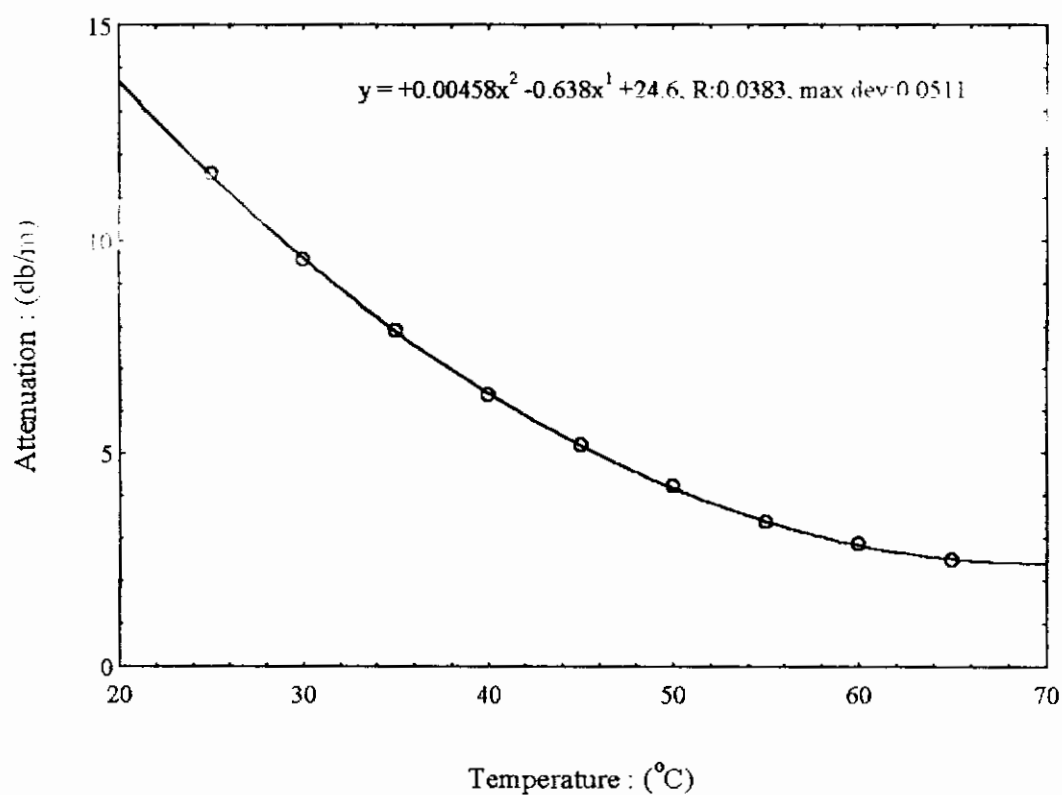
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 2.58 \text{ db/m.}$$

นำผลที่ได้จากการวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลวตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังตาราง 57 และเขียนกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับอุณหภูมิตามภาพประกอบ 74

ตาราง 57 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับค่าอุณหภูมิ ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Attenuation (db/m)
25	11.57
30	9.57
35	7.93
40	6.39
45	5.19
50	4.23
55	3.38
60	2.86
65	2.49



ประกอบ 74 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

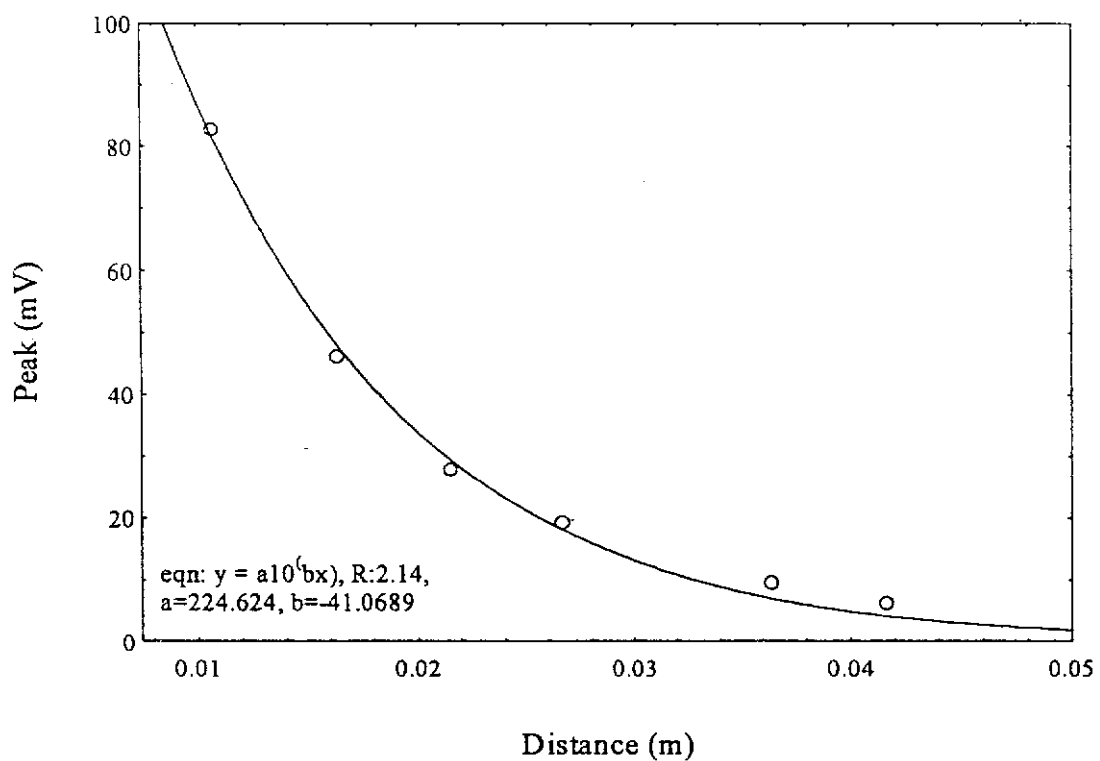
3 สารตัวอย่าง SAE 50

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C

3.1 ทดลองที่อุณหภูมิ 30°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 58 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 75

ตาราง 58 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 30°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	82.8	46.2	27.8	19.2	9.6	6.4



ภาพประกอบ 75 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 30°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 224.624$$

$$b = -41.0689$$

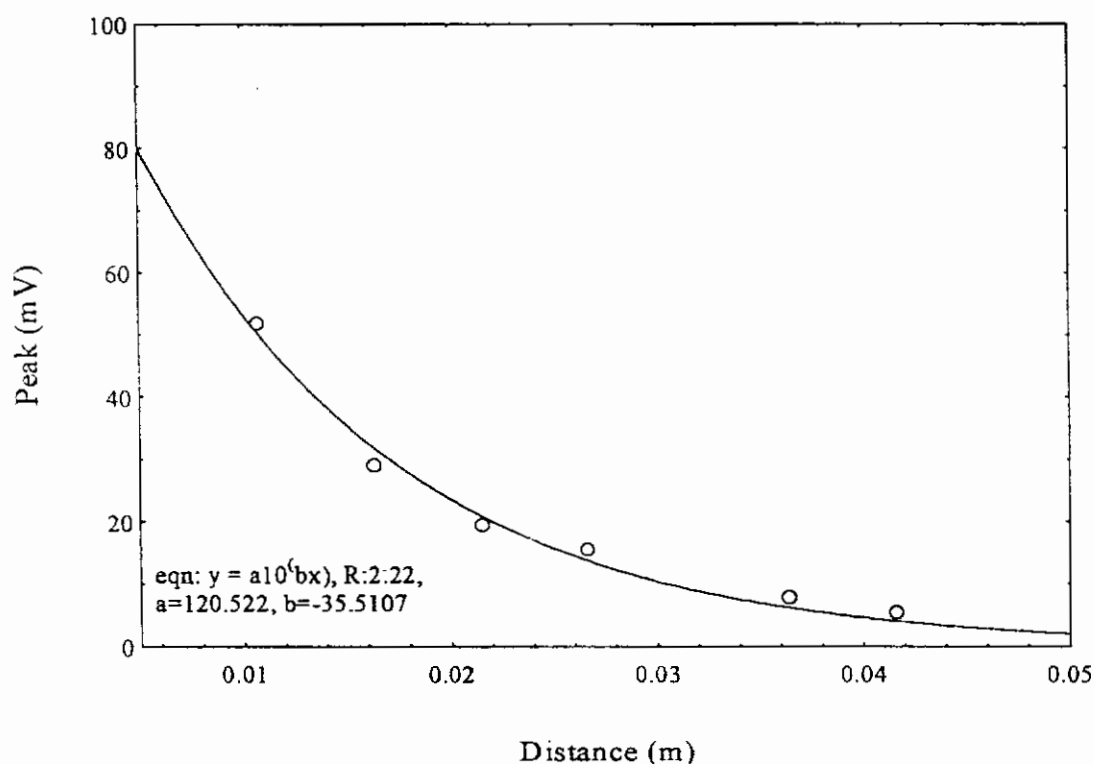
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 10.89 \text{ db/m.}$$

3.2 ทดลองที่อุณหภูมิ 35°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 59 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 76

ตาราง 59 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	51.8	29	19.4	15.4	0	7.8	5.4



ภาพประกอบ 76 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 35°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 120.522$$

$$b = -35.5107$$

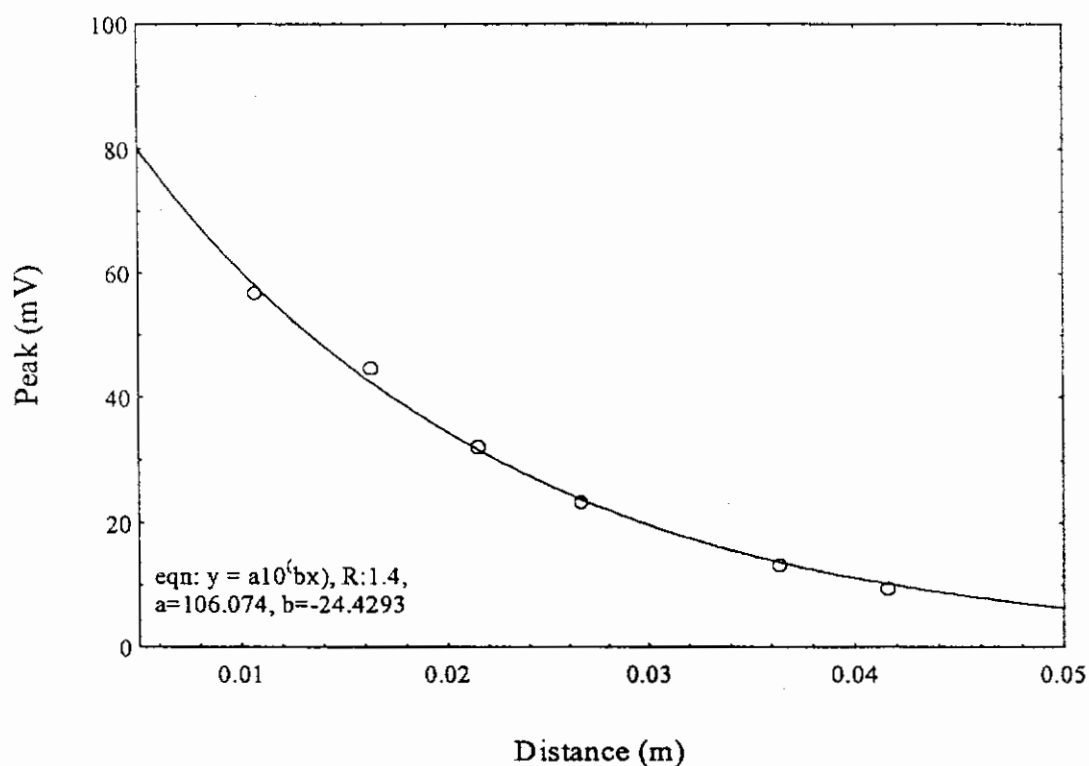
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 9.41 \text{ db/m.}$$

3.3 ทดลองที่อุณหภูมิ 40°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 60 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 77

ตาราง 60 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	56.8	44.6	32	23.2	0	13.2	9.4



ภาพประกอบ 77 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 40°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 106.074$$

$$b = -24.4293$$

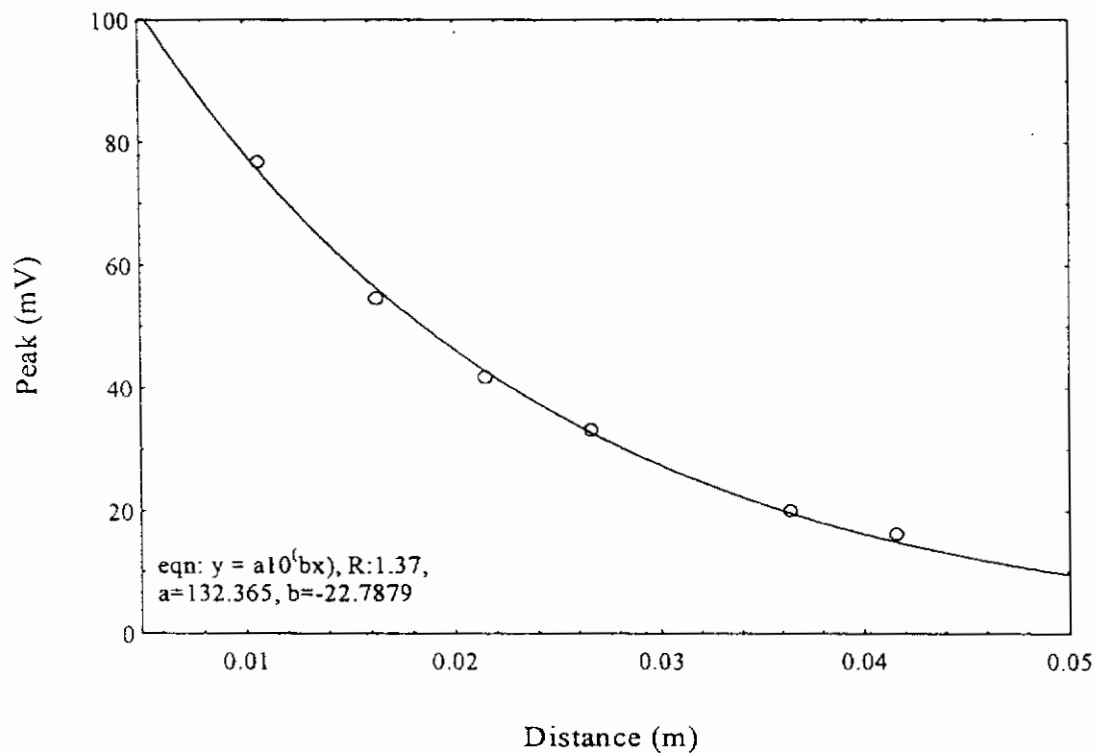
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 6.48 \text{ db/m.}$$

3.4 ทดลองที่อุณหภูมิ 44°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากฮอสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 61 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 78

ตาราง 61 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	76.8	54.6	41.8	33.2	20	16.2



ภาพประกอบ 78 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 44°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 132.365$$

$$b = -22.7879$$

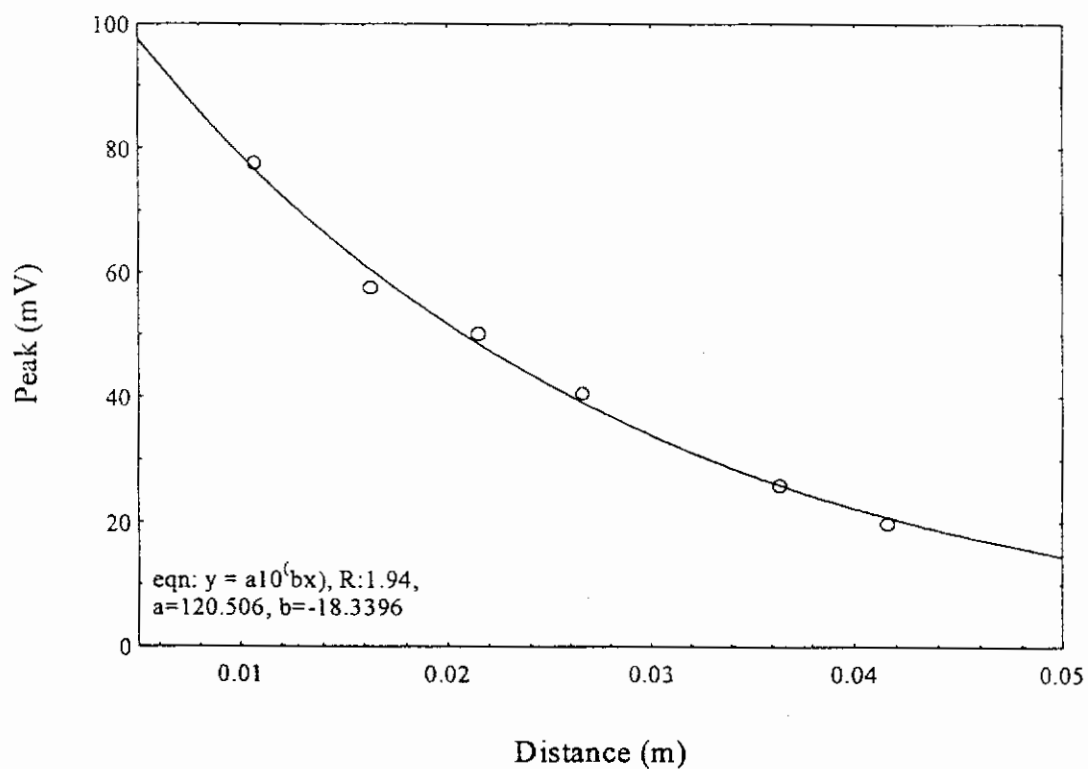
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 6.04 \text{ db/m.}$$

3.5 ทดลองที่อุณหภูมิ 49°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 62 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 79

ตาราง 62 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	77.6	57.6	50.2	40.6	25.8	19.8



ภาพประกอบ 79 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 49°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซโพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 120.506$$

$$b = -18.3396$$

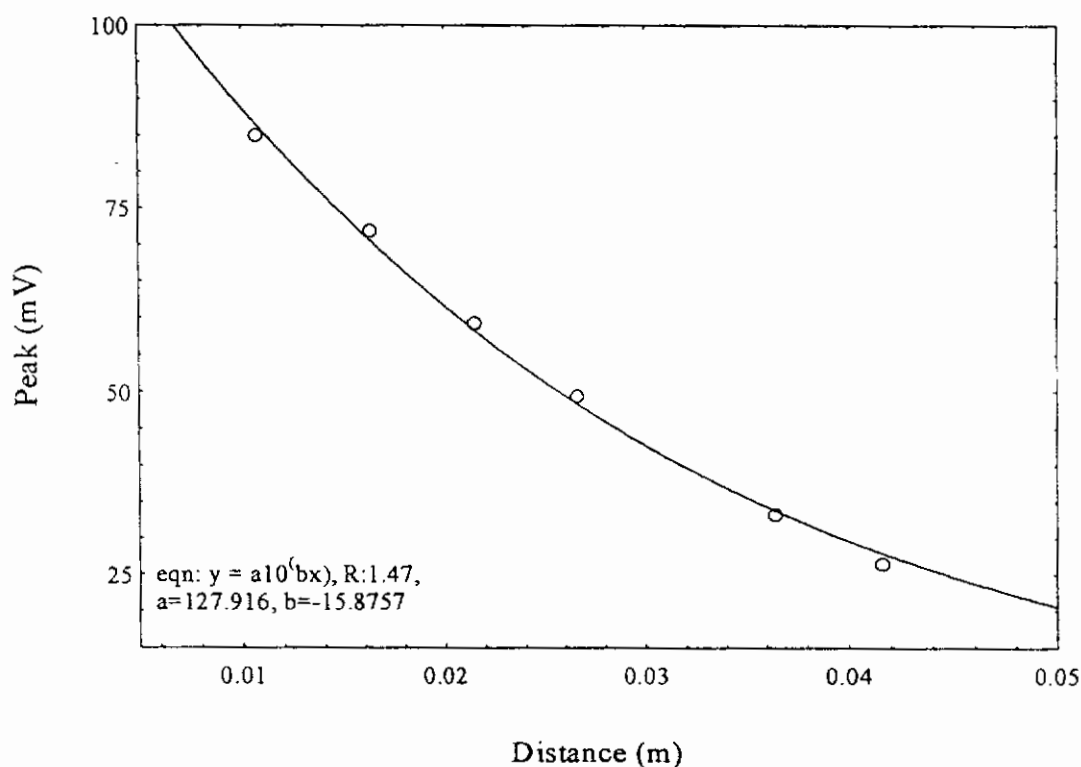
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 4.86 \text{ db/m.}$$

3.6 ทดลองที่อุณหภูมิ 54°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 63 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 80

ตาราง 63 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0364	0.0416
peak (mV)	85	71.8	59.2	49.4	33.2	26.4



ภาพประกอบ 80 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 54°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 107.65$$

$$b = -12.7396$$

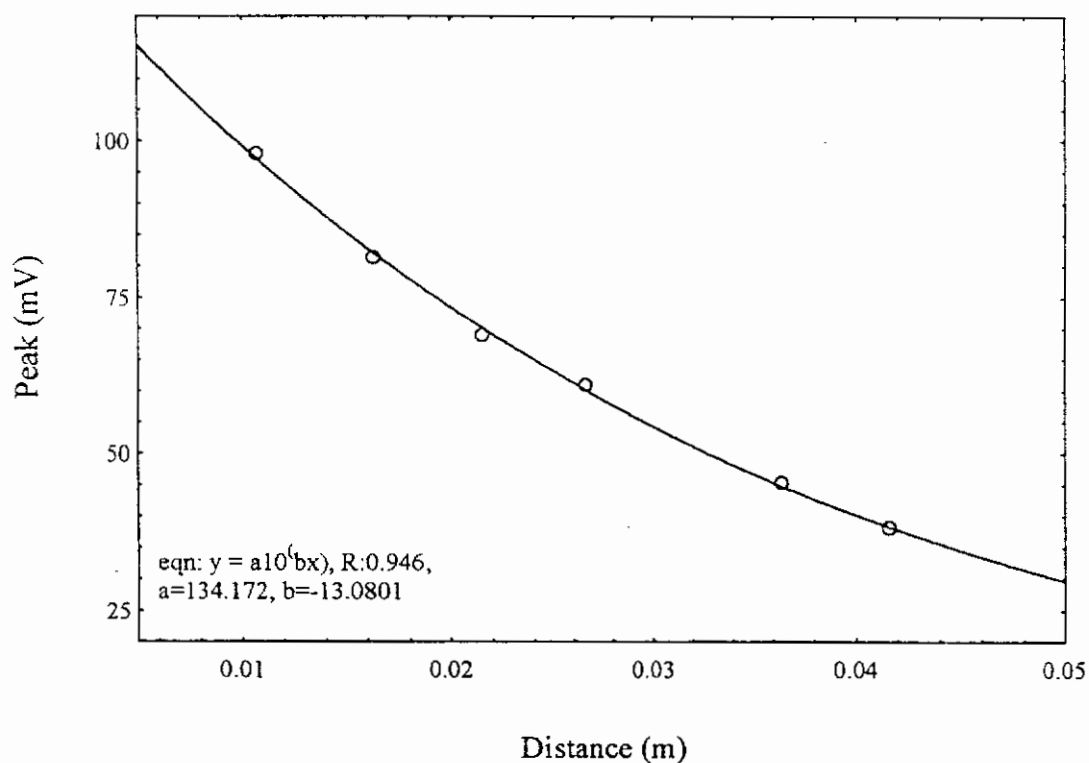
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 3.38 \text{ db/m.}$$

3.7 ทดลองที่อุณหภูมิ 59°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 64 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 81

ตาราง 64 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	98	81.4	69	61	0	45.4	38.2



ภาพประกอบ 81 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่น ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 59°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 134.172$$

$$b = -13.0801$$

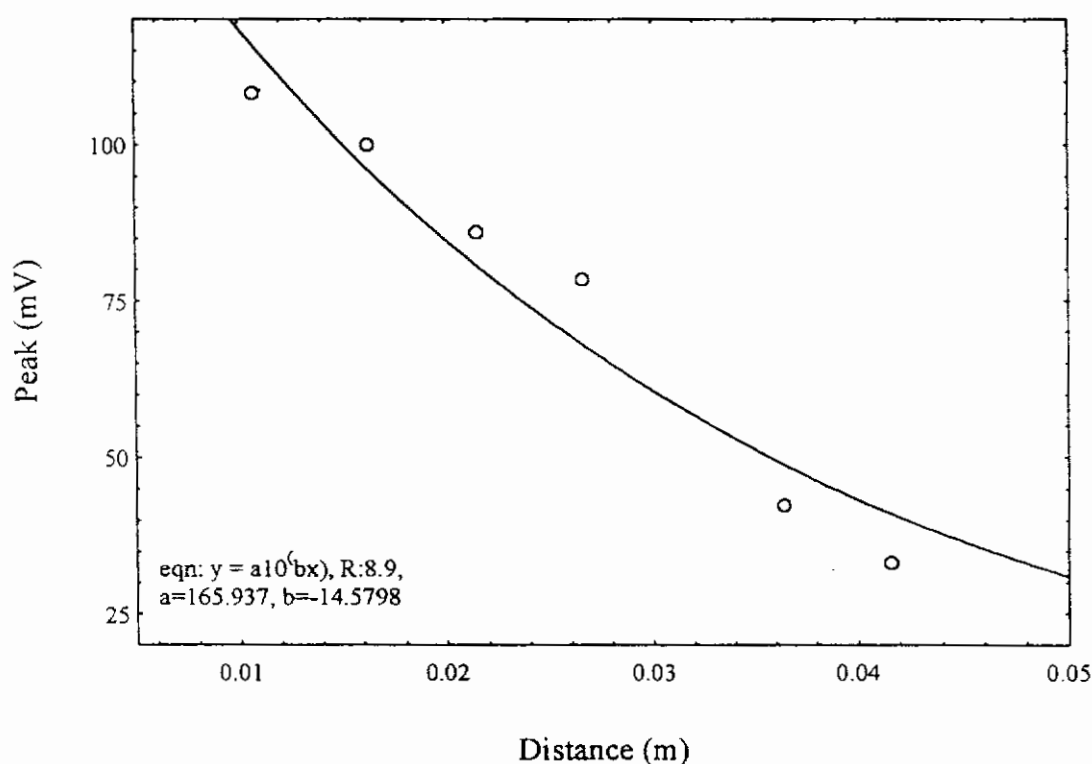
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 3.47 \text{ db/m.}$$

3.8 ทดลองที่อุณหภูมิ 64°C แสดงผลที่ได้จากการวัดระยะห่างระหว่าง ทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นอัลตราโซนิก ที่ได้จากออสซิลโลสโคปไว้ในตาราง 65 และแสดงความสัมพันธ์ตามภาพประกอบ 82

ตาราง 65 แสดงระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64°C

ระยะห่าง (m)	0.0107	0.0163	0.0215	0.0266	0.0292	0.0364	0.0416
peak (mV)	108.2	100	86	78.4	0	42.4	33.2



ภาพประกอบ 82 แสดงความสัมพันธ์ของระยะห่างทรานส์ดิวเซอร์กับความสูงของยอดสัญญาณคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่อุณหภูมิ 64°C

นำข้อมูลของกราฟหาค่ากำลังสองน้อยที่สุดในรูปเอกซ์โพเนนเชียลจะได้ค่าพารามิเตอร์ดังนี้

$$a = 165.937$$

$$b = -14.5798$$

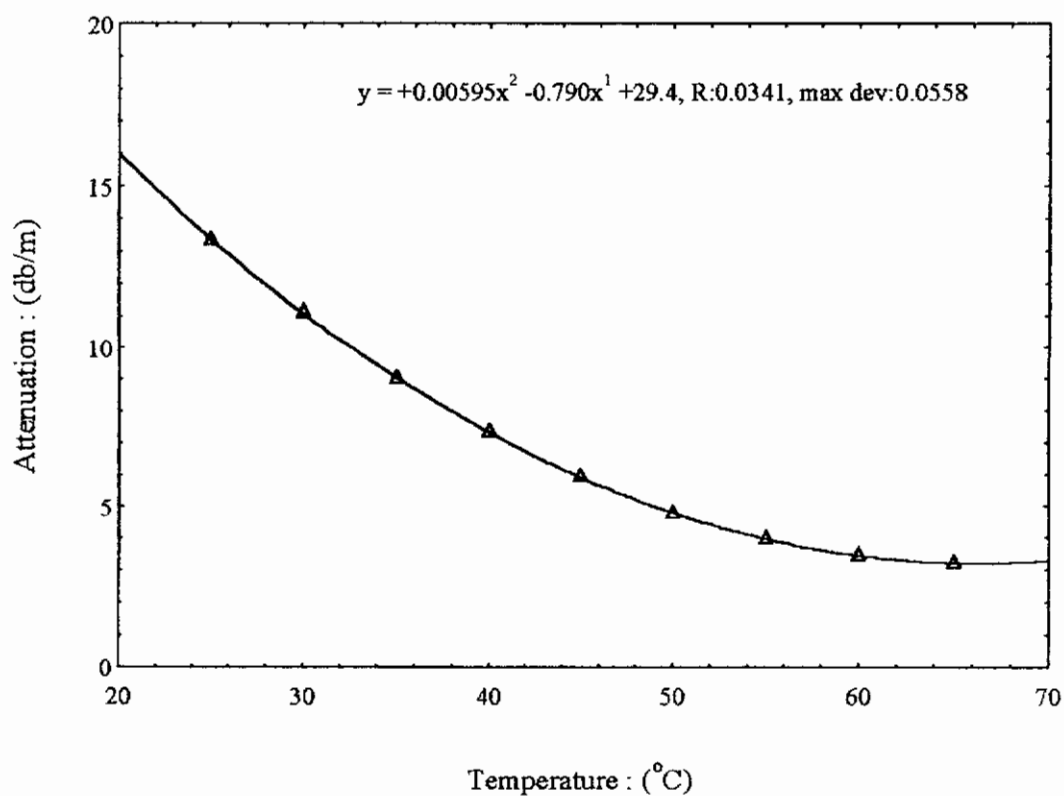
ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าเป็น

$$\alpha = 3.86 \text{ db/m.}$$

นำผลที่ได้จากการวัดสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก ในของเหลวตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆแสดงได้ดังตาราง 66 และเขียนกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับอุณหภูมิตามภาพประกอบ 83

ตาราง 66 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับค่าอุณหภูมิ ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50

Temperature (°C)	Attenuation (db/m)
25	13.37
30	11.14
35	9.03
40	7.37
45	5.94
50	4.78
55	3.97
60	3.47
65	3.22



ประกอบ 83 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นกับอุณหภูมิ ในน้ำมันหล่อลื่น SAE 50

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส

การหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัสของน้ำมันหล่อลื่น จะใช้สมการ (18) และสมการ (13) ตามลำดับ โดยอาศัยผลการทดลองที่ผ่านมาคือ ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและค่าความหนาแน่นที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่นทั้งสามชนิด แสดงได้ดังนี้

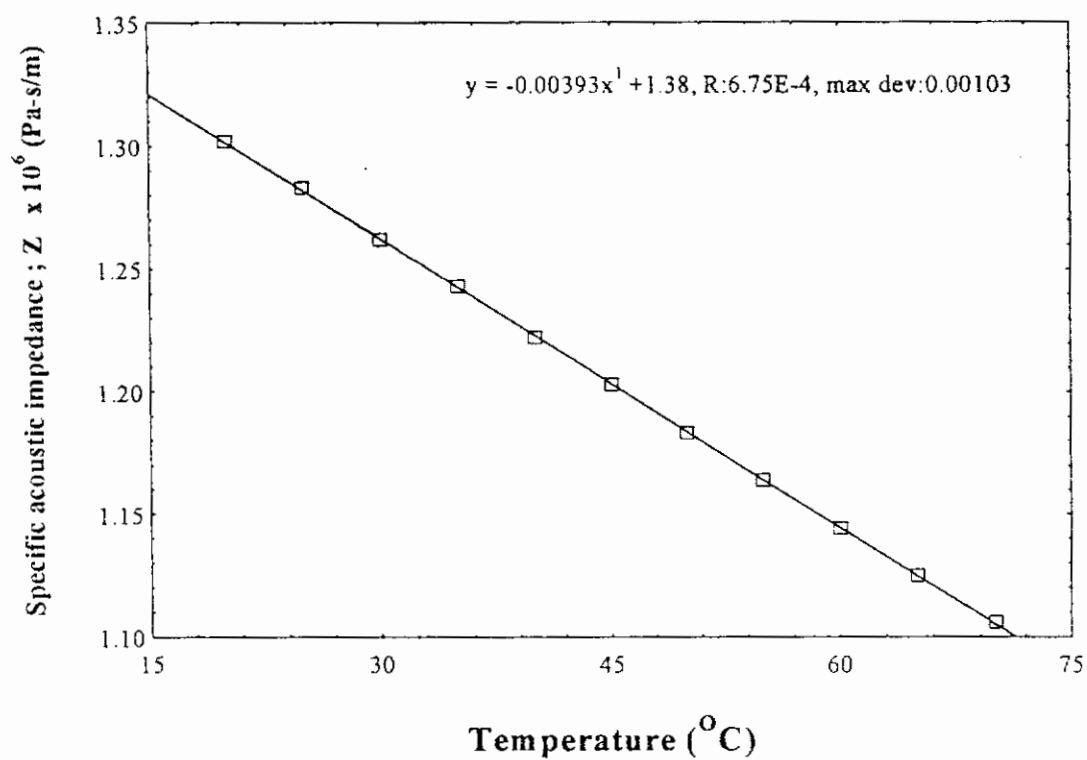
1. สารตัวอย่าง SAE 30

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัสแสดงได้ดังตาราง 67

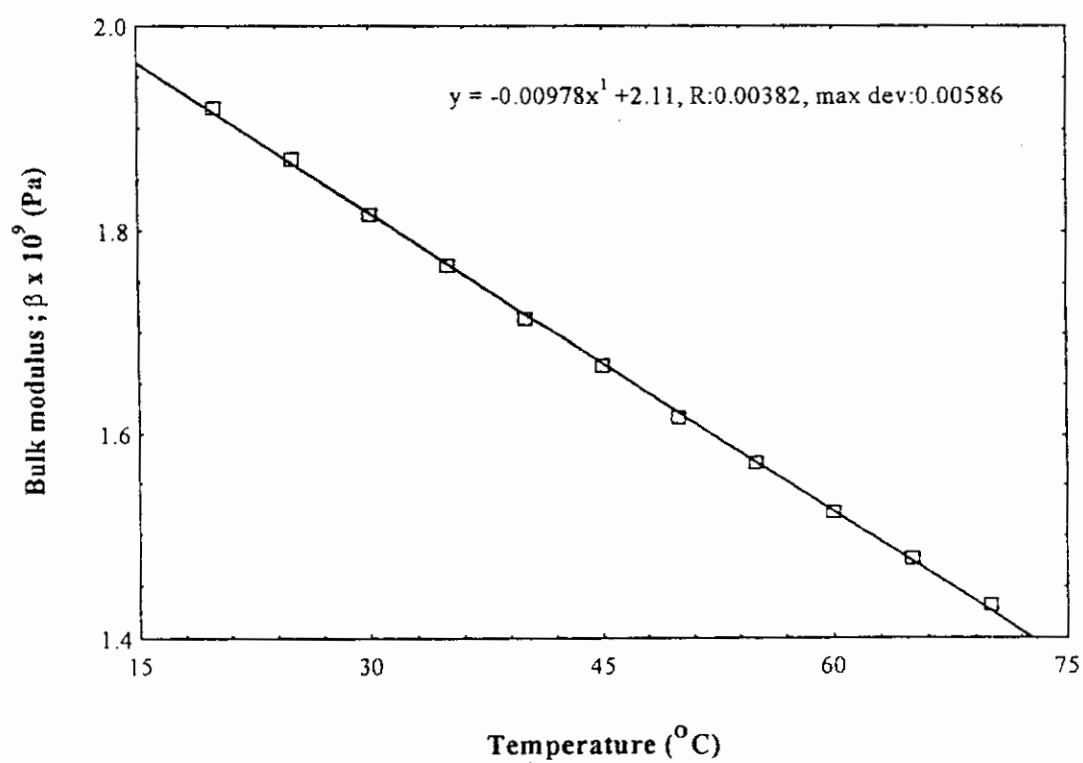
ตาราง 67 แสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) T	ความหนาแน่น (kg/m^3) ρ_0	ความเร็ว (m/s) C	อิมพีแดนซ์จำเพาะ $\times 10^6$ (Pa-s/m) $\rho_0 C$	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa) β
20	882.56	1475	1.302	1.920
25	879.70	1458	1.283	1.870
30	876.84	1439	1.262	1.816
35	873.98	1422	1.243	1.767
40	871.12	1403	1.222	1.715
45	868.26	1386	1.203	1.668
50	865.40	1367	1.183	1.617
55	862.54	1350	1.164	1.572
60	859.68	1331	1.144	1.523
65	856.82	1313	1.125	1.477
70	853.96	1295	1.106	1.432

จากข้อมูลที่ได้ก็นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกายภาพทั้งสองกับอุณหภูมิแสดงได้ดังภาพประกอบ 84 และภาพประกอบ 85



ภาพประกอบ 84 กราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30



ภาพประกอบ 85 เขียนกราฟค่าบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30

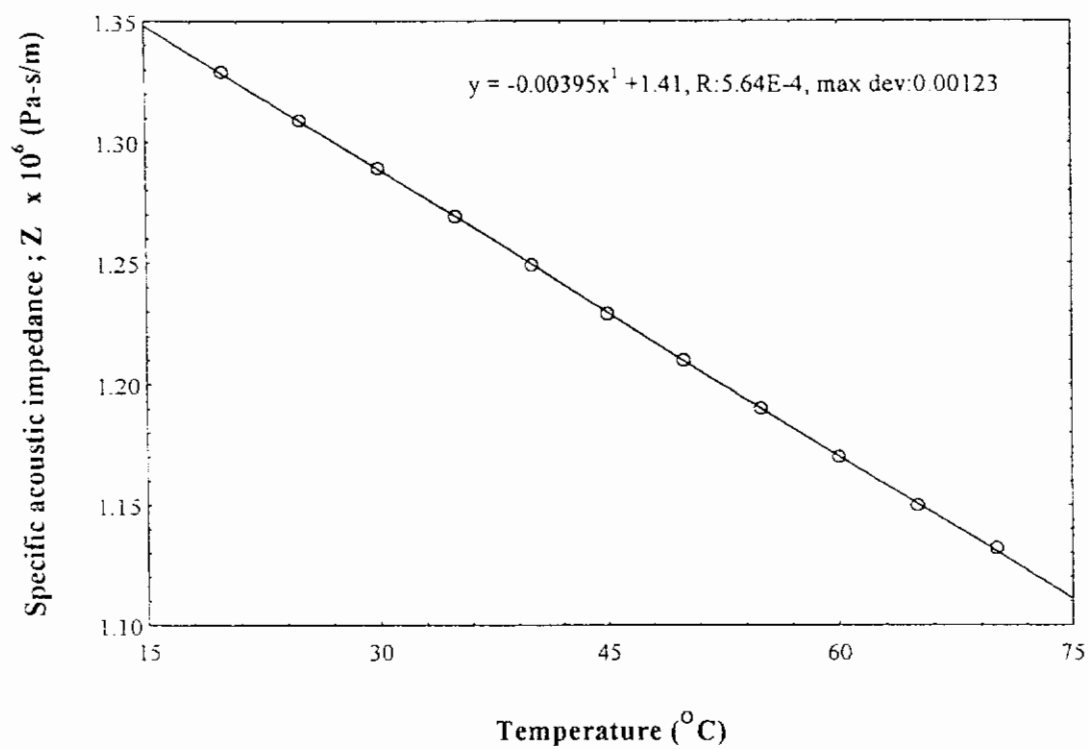
2. สารตัวอย่าง SAE 40

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัสแสดงได้ดังตาราง 68

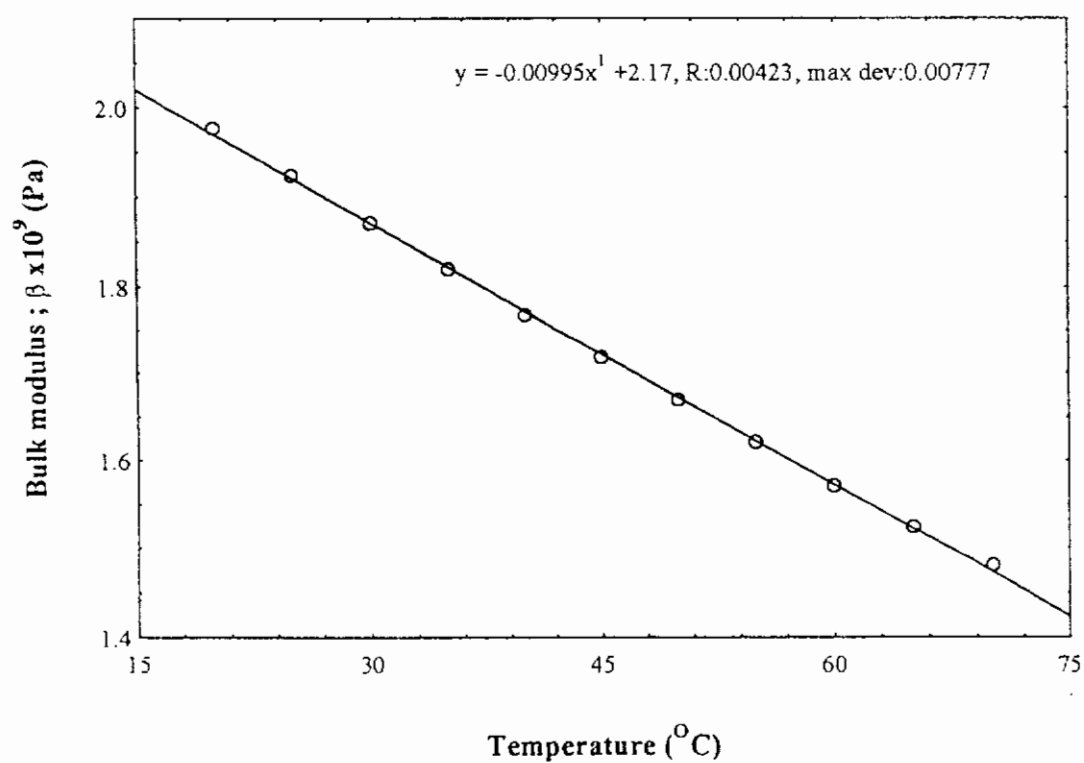
ตาราง 68 แสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$) T	ความหนาแน่น (kg/m^3) ρ_0	ความเร็ว (m/s) C	อิมพีแดนซ์จำเพาะ $\times 10^6$ (Pa-s/m) $\rho_0 C$	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa) β
20	892.98	1488	1.329	1.977
25	890.23	1470	1.309	1.924
30	887.47	1452	1.289	1.871
35	884.72	1434	1.269	1.819
40	881.96	1416	1.249	1.768
45	879.21	1398	1.229	1.718
50	876.45	1380	1.210	1.669
55	873.70	1362	1.190	1.621
60	870.94	1343	1.170	1.571
65	868.19	1325	1.150	1.524
70	865.43	1308	1.132	1.481

จากข้อมูลที่ได้ก็นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกายภาพทั้งสองกับอุณหภูมิแสดงได้ดังภาพประกอบ 86 และภาพประกอบ 87



ภาพประกอบ 86 เขียนกราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40



ภาพประกอบ 87 เขียนกราฟค่าบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 40

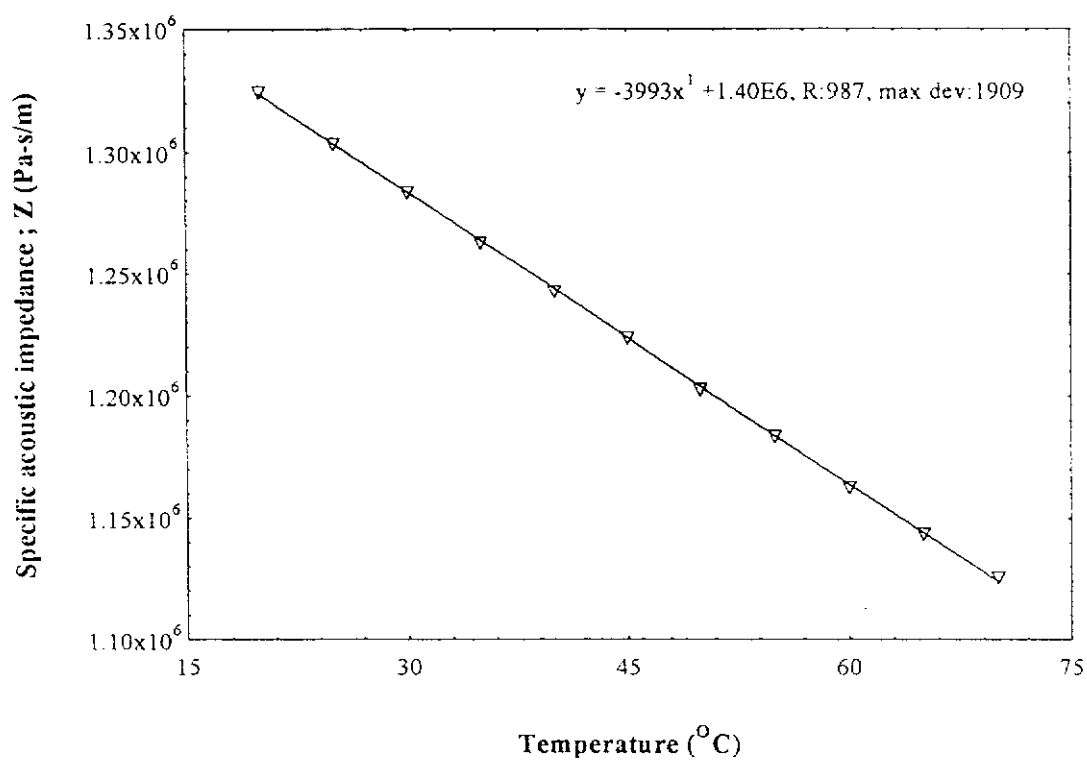
3 สารตัวอย่าง SAE 50

ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 70°C คำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัสแสดงได้ดังตาราง 69

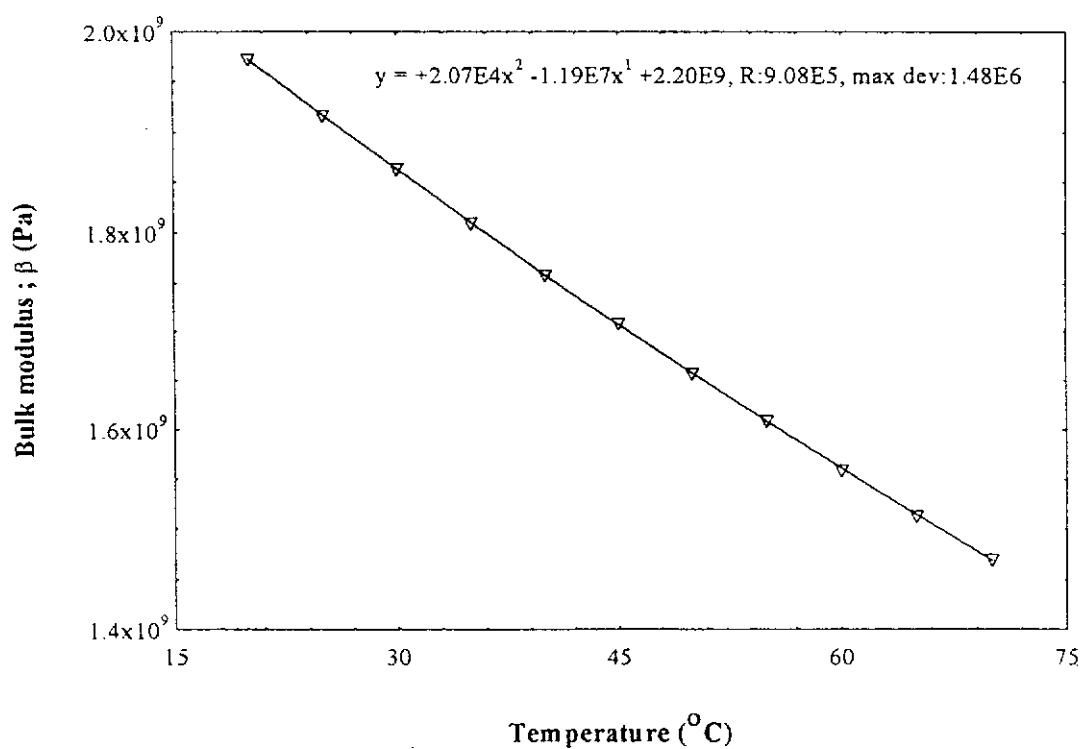
ตาราง 69 แสดงผลการคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50 ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (°C) T	ความหนาแน่น (kg/m ³) ρ_0	ความเร็ว (m/s) C	อิมพีแดนซ์จำเพาะ $\times 10^5$ (Pa-s/m) $\rho_0 C$	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa) β
20.	889.8	1489	1.325	1.973
25	887.1	1470	1.304	1.917
30	884.3	1452	1.284	1.864
35	881.5	1433	1.263	1.810
40	878.7	1415	1.243	1.759
45	875.9	1397	1.224	1.709
50	873.1	1378	1.203	1.658
55	870.3	1360	1.184	1.610
60	867.5	1341	1.163	1.560
65	864.7	1323	1.144	1.514
70	861.9	1306	1.126	1.470

จากข้อมูลที่ได้ก็นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติกายภาพทั้งสองกับอุณหภูมิแสดงได้ดังภาพประกอบ 89 และภาพประกอบ 89



ภาพประกอบ 88 เขียนกราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50



ภาพประกอบ 89 เขียนกราฟค่าบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ของน้ำมันหล่อลื่น SAE 50

เปรียบเทียบผลการทดลอง

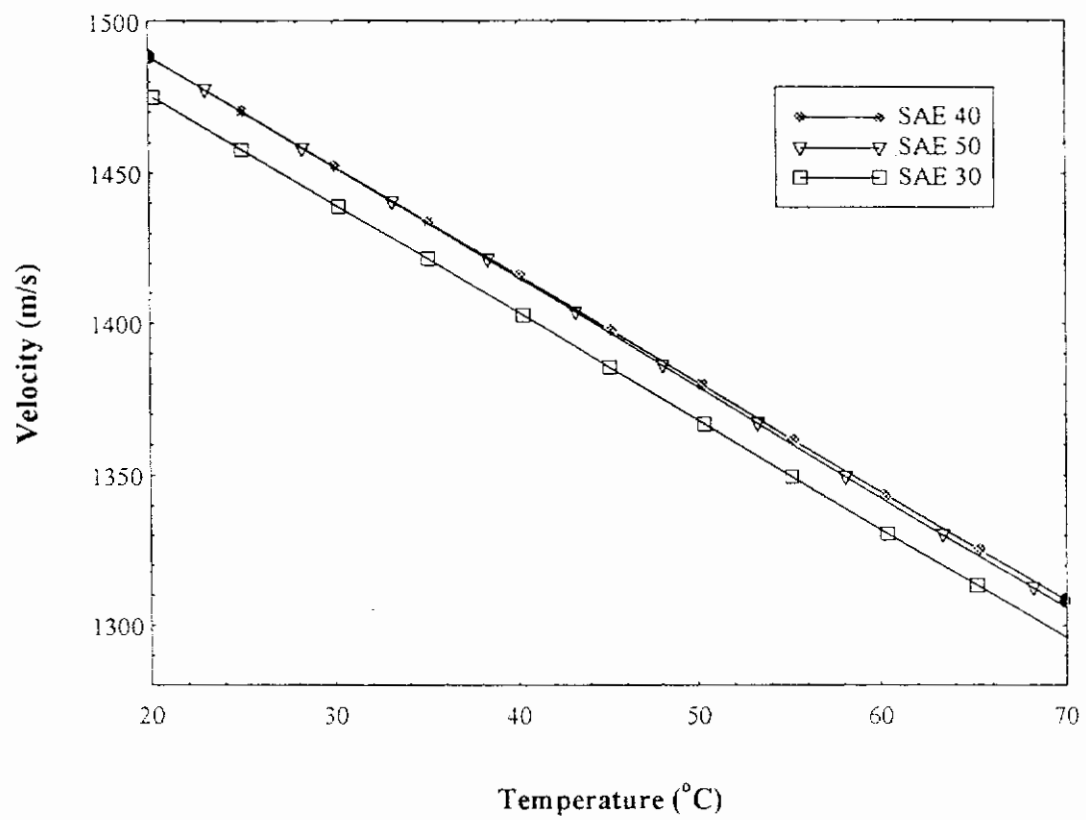
ในการศึกษาสมบัติกายภาพของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50 ประกอบด้วย ค่าความเร็วคลื่น ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัส โดยทดลองในช่วงอุณหภูมิ 20°C - 70°C สามารถเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวได้ดังนี้

ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น 3 ชนิด สามารถแสดงได้ดังค่าดังตาราง 70 และเปรียบเทียบกราฟได้ดังภาพประกอบ 90

ตาราง 70 ข้อมูลค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	ความเร็วคลื่น (m/s)		
	SAE 30	SAE 40	SAE 50
20	1475	1488	1489
25	1458	1470	1470
30	1439	1452	1452
35	1422	1434	1433
40	1403	1416	1415
45	1386	1398	1397
50	1367	1380	1378
55	1350	1362	1360
60	1331	1343	1341
65	1313	1325	1323
70	1295	1308	1306



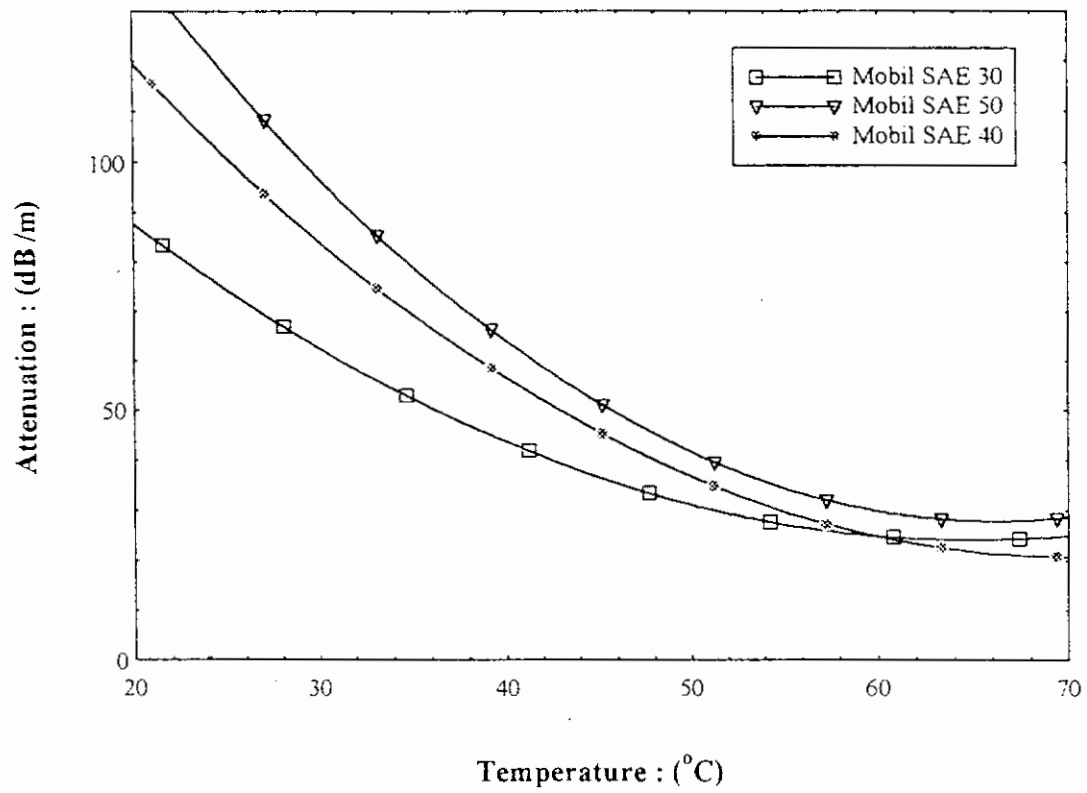
ภาพประกอบ 90 กราฟค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ,SAE40 ,SAE 50

สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก

การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่นที่มีฉาม
หนืดต่างกัน 3 ขนาด สามารถแสดงได้ดังค่าดังตาราง 71 และเปรียบเทียบกราฟได้ดังภาพประกอบ 91

ตาราง 71 ข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 ,SAE 40
และ SAE 50

อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น (db/m)		
	SAE 30	SAE 40	SAE 50
20	10.02	13.63	16.22
25	8.54	11.57	13.37
30	7.13	9.57	11.14
35	6.01	7.93	9.03
40	4.97	6.39	7.37
45	4.20	5.19	5.94
50	3.56	4.23	4.78
55	3.13	3.38	3.97
60	2.87	2.86	3.47
65	2.80	2.49	3.22
70	2.80	2.38	3.30



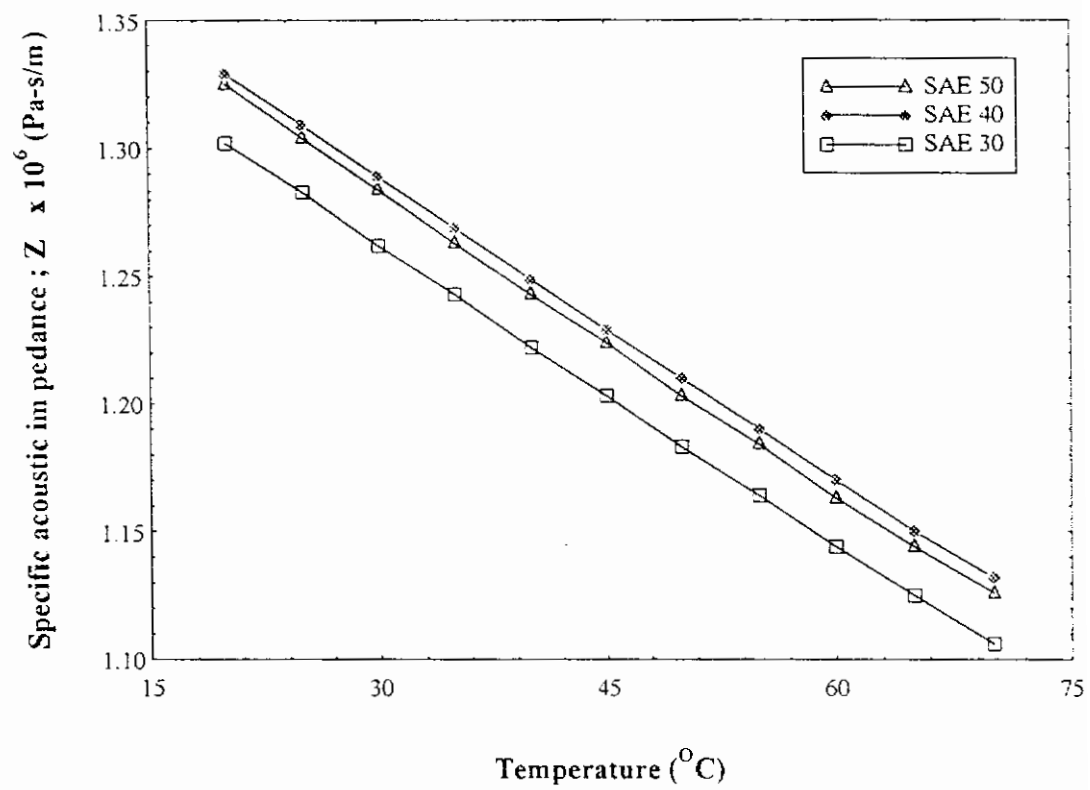
ภาพประกอบ 91 กราฟค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE40 และ SAE 50

อิมพีแดนซ์จำเพาะ

การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น 3 ชนิด สามารถแสดงได้ดังค่าดังตาราง 72 และเปรียบเทียบกราฟได้ดังภาพประกอบ 92

ตาราง 72 ข้อมูลค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50

อุณหภูมิ (°C)	อิมพีแดนซ์จำเพาะ $\times 10^5$ (Pa-s/m)		
	SAE 30	SAE 40	SAE 50
20	1.302	1.329	1.325
25	1.283	1.309	1.304
30	1.262	1.289	1.284
35	1.243	1.269	1.263
40	1.222	1.249	1.243
45	1.203	1.229	1.224
50	1.183	1.210	1.203
55	1.164	1.190	1.184
60	1.144	1.170	1.163
65	1.125	1.150	1.144
70	1.106	1.132	1.126



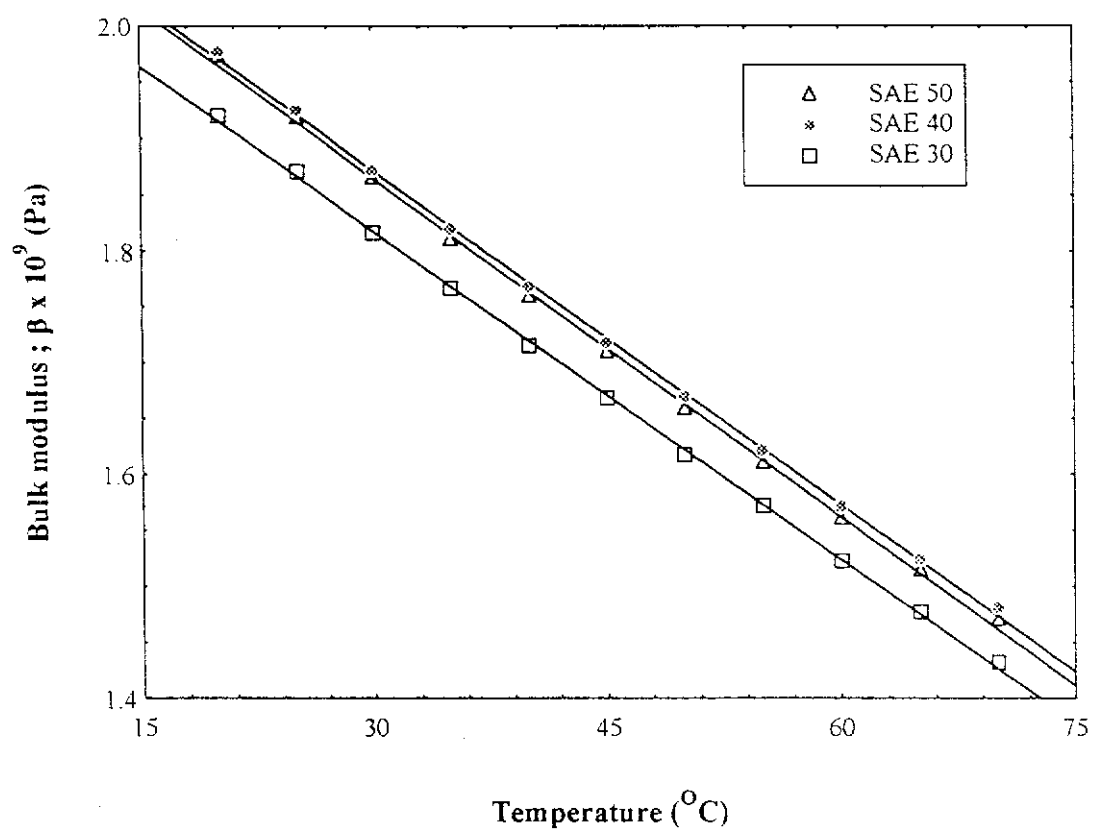
ภาพประกอบ 92 กราฟค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE40 และ SAE 50

บัลค์มอดุลัส

การเปรียบเทียบค่าบัลค์มอดุลัสในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น 3 ชนิด สามารถแสดงได้ดังค่าดังตาราง 73 และเปรียบเทียบกราฟได้ดังภาพประกอบ 93

ตาราง 73 ข้อมูลค่าบัลค์มอดุลัสในตัวอย่างน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa)		
	SAE 30	SAE 40	SAE 50
20	1.920	1.977	1.973
25	1.870	1.924	1.917
30	1.816	1.871	1.864
35	1.767	1.819	1.810
40	1.715	1.768	1.759
45	1.668	1.718	1.709
50	1.617	1.669	1.658
55	1.572	1.621	1.610
60	1.523	1.571	1.560
65	1.477	1.524	1.514
70	1.432	1.481	1.470



ภาพประกอบ 93 กราฟค่าบัลค์มอดุลัสในตัวของน้ำมันหล่อลื่น SAE 30 , SAE40 และ SAE 50

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุป และอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษา ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น จากแหล่งกำเนิดทรานส์ดิวเซอร์ที่ผลิตคลื่นตามยาว ค่าความถี่ 5.5 MHz. ในตัวกลางน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่างกัน 3 ชนิดคือ SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50 โดยมีขอบเขตว่า ในแต่ละตัวกลางจะศึกษา การเปลี่ยนแปลงความเร็วคลื่น และการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น เมื่อทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในช่วง 20°C - 70°C โดยบันทึกข้อมูลที่ค่าอุณหภูมิต่างกัน 5°C และในแต่ละครั้ง จะศึกษาสัญญาณคลื่นที่ระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์ 1.07 , 1.63 , 2.15 , 2.66 , 2.92 , 3.64 , 4.16 เซนติเมตร ในการหาค่าทั้งสองนี้ ได้ใช้คอมพิวเตอร์ประมวลผลข้อมูลที่ได้จากสัญญาณ นอกจากนี้ต้อง ศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสารตัวอย่าง เพื่อใช้หาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ โดยมีผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้

การออกแบบและสร้างชุดทดลองทางอัลตราโซนิกในตัวกลางของเหลว

ในการออกแบบอุปกรณ์ชุดทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นในตัวกลางของเหลว และสามารถควบคุมอุณหภูมิของเหลวได้ในช่วง 20°C - 70°C อุปกรณ์ชุดนี้สามารถนำไปใช้ศึกษาของเหลวชนิดอื่นได้อีก โดยมีคุณสมบัติคือ ควบคุมอุณหภูมิของตัวกลางของเหลวได้ในช่วง 20°C ถึง 70°C และปรับระยะห่างระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ให้เลื่อนไปบนรางขนานได้ตั้งแต่ระยะ 10.2 มิลลิเมตร

จากการทดสอบการทำงานของชุดทดลอง โดยศึกษาค่าความเร็วคลื่นในตัวกลางที่เป็นน้ำกลั่น เปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Lovett J.R. พบว่าความเร็วคลื่นที่วัดได้ในช่วงอุณหภูมิ 40°C - 50°C ให้ผลออกมาต่ำกว่าผลของโลเวตต์ อยู่ 4 เมตร/วินาที หรือมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.25 เปอร์เซ็นต์

สำหรับการหาระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของทรานส์ดิวเซอร์ทั้งสอง พบว่าระยะห่างที่ให้ค่าความเร็วคลื่นถูกต้องและมีค่าไม่แปรปรวน จะเริ่มตั้งแต่ 10.2 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพราะผลของการสะท้อนกลับของคลื่นในบริเวณนั้น ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วคลื่นเมื่อทดลองที่ระยะใกล้ ดังนั้นชุดทดลองนี้จะใช้ศึกษาสมบัติกายภาพได้ถูกต้องในระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์มีค่าตั้งแต่ 10.2 มิลลิเมตรไปจนถึง 90 มิลลิเมตร

การศึกษาสมบัติกายภาพด้วยวิธีทางอัลตราโซนิก

การศึกษาสมบัติกายภาพที่สำคัญในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย การตรวจวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น โดยมีรายละเอียดของวิธีการและขั้นตอนดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 และได้แสดงผลการทดลองไว้ในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำมันหล่อลื่นตัวอย่าง พบว่าเมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ในน้ำมัน จะมีค่าความเร็วไม่คงที่โดยขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลาง มีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นกับอุณหภูมิเป็นเชิงเส้น ในช่วง 20°C - 70°C โดยเมื่ออุณหภูมิของตัวกลางมีค่าสูงขึ้นความเร็วคลื่นจะมีค่าลดลง ดังแสดงในภาพประกอบ 39 , 47 และ 56

จากการศึกษาความเร็วคลื่นในน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่างกัน 3 ขนาด คือ SAE 30 , SAE 40 และ SAE 50 พบว่า ค่าความเร็วคลื่นมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะเส้นตรงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้น ของเหลวทั้งสามชนิดจะขยายตัว ทำให้ความหนาแน่นมีค่าลดลงดังภาพประกอบ 29 ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นนั่นเอง

สำหรับการเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นในน้ำมันหล่อลื่นทั้ง 3 ชนิด พบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าความเร็วคลื่นใน SAE 50 มีค่าใกล้เคียงกับความเร็วคลื่นใน SAE 40 เป็นอย่างมาก แต่สำหรับ SAE 30 ค่าความเร็วคลื่นมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากความหนาแน่นของ SAE 30 มีค่าต่ำกว่ามากเมื่อเทียบความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นทั้งสองชนิดนั้น พิจารณาได้ดังภาพประกอบ 29 และ 90

2. การศึกษาสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิก เป็นวิธีการและขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลสัญญาณคลื่น ที่ได้จากออสซิลโลสโคป โดยบันทึกความสูงของยอดสัญญาณคลื่นที่ได้จากการทดลองในตำแหน่งต่างๆของทรานส์ดิวเซอร์ ซึ่งพบว่า ความสูงสัญญาณจะลดลงเมื่อระยะระหว่างทรานส์ดิวเซอร์มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์กันในรูปเอกซ์โพเนนเชียล ดังภาพประกอบ 8 ซึ่งการลดลงของสัญญาณมีลักษณะเป็นไปตามสมการ 29 ทั้งนี้เพราะเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง จะถูกตัวกลางนั้นดูดกลืนพลังงานเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานรูปอื่น เช่นการเพิ่มขึ้นของความร้อนในของเหลวเป็นต้น หรือพลังงานบางส่วนเกิดการสะท้อนเนื่องจากอนุภาคแขวนลอยปนอยู่ในของเหลว เป็นต้น ถ้าผลของการสะท้อนและการเลี้ยวเบนมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับการดูดกลืนพลังงานของตัวกลางเอง ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่น (α) จะเป็นปริมาณที่ใช้แทนการดูดกลืนพลังงานของตัวกลางได้

สัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นในน้ำมันหล่อลื่น มีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของตัวกลางด้วย โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสัมประสิทธิ์จะลดลง ดังภาพประกอบ 66 , 74 และ 83 ทั้งนี้เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น น้ำมันหล่อลื่นจะมีความหนืดลดลง

จากการศึกษาพบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่งสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นใน SAE 50 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ SAE40 และ SAE 30 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 91 และยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นด้วย

3. การหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ(Z)และค่าบัลค์มอดุลัส(β) หาได้จากการนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาความหนาแน่น และค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ในช่วงอุณหภูมิ 20°C - 70°C ของน้ำมันหล่อลื่นทั้งสามชนิด มาทำการหาค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะตามสมการ (18) และค่าบัลค์มอดุลัสจากสมการ (13) ได้ผลดังภาพประกอบ 92 และ 93 จะเห็นว่า ค่าทั้งสองมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของตัวกลาง ในลักษณะเชิงเส้น โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัส มีค่าลดลงเช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะ ค่าสมบัติกายภาพทั้งสองจะขึ้นกับความหนาแน่นของตัวกลางเป็นสำคัญ จึงทำให้ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสของน้ำมัน SAE 40 มีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือ SAE 50 และ SAE 30 ตามลำดับ เช่นเดียวกับลำดับความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นทั้งสามนี้

ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบและสร้างชุดทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาสมบัติกายภาพของของเหลว ควรทดลองในระบบปิดป้องกันการระเหยของไอของเหลว ซึ่งจะทำให้การควบคุมอุณหภูมิและมวลของเหลว เป็นไปอย่างถูกต้องยิ่งขึ้น
2. ในการศึกษาค่าความเร็วคลื่นในของเหลว เครื่องมือสำหรับวัดระยะห่างของทรานส์ดิวเซอร์ จะต้องมีความละเอียด และความถูกต้องมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ค่าความเร็วคลื่นมีความถูกต้องยิ่งขึ้น
3. ในการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลว ต้องปรับกล่องบรรจุ ทรานส์ดิวเซอร์ ให้ผิวหน้าของหัววัดทั้งสองขนานกันทุกครั้งของการวัดในแต่ละตำแหน่ง ทั้งนี้เพื่อให้ลำของ แนวนคลื่นอัลตราโซนิกที่ออกจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่ง สามารถเข้าสู่ทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับได้พอดี
4. วิธีการศึกษาสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นอัลตราโซนิกในของเหลว และการตรวจวัดความเร็ว คลื่น สามารถนำไปศึกษาหาค่าความหนืดของของเหลวในการวิจัยขั้นต่อไปได้ เช่น หาค่าความหนืดในของ เหลวที่เป็นประเภท สารแขวนลอย หรือของเหลวบริสุทธิ์ เป็นต้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ธนรัตน์ ทรายเพชร. ความรู้เกี่ยวกับผลิตภัณฑ์หล่อลื่นและเบรก. กรุงเทพฯ : แผนกวิเคราะห์คุณภาพน้ำมันหล่อลื่น กองควบคุมคุณภาพ การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2535.
- สุรุฒิ กิจสัมพันธ์. การวัดสมบัติทางกลของวัสดุแบบไม่ทำลายด้วยวิธีอัลตราโซนิก. กรุงเทพฯ : หน่วยวิจัยเครื่องมือวัดอัลตราโซนิก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2535.
- Austin J.C. et al. "Ultrasonic Wave Propagation in Colloid Suspensions and Emulsions Recent Experimental Results," Ultrasonics. 34(1) : 369-374 ; 1996.
- Daridon J.L. et al. "Ultrasonic Velocity in a Hyperbaric Reservoir Fluid," Ultrasonics. 34(1) : 447-449 ; 1996.
- Filipczynski, Leszek, Zdzislaw Pawlowski and Wehr Jerzy. Ultrasonic Methods of Testing Materials. London : Butterworths, 1966.
- Frey , Austin R. et al. Fundamentals of Acoustics. 3rd ed. California : John Wiley & Son, 1982.
- Lovett J. R. "Speed of Sound in H_2O ," Acoustics. 45 : 1052 ; 1969.
- Sehgal, Chandra M. "Non-linear Ultrasonics to Determine Molecular Properties of Pure Liquids," Ultrasonics. 33(2) : 155-161 ; August, 1994.
- Truell, Rohn, Charles Elbaum and Bruce B. Chick. Ultrasonic Methods in Solid State Physics. New York : Academic Press, 1969.

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายสาริต บุญยรัตกลิน
วันเดือนปีเกิด	1 ธันวาคม 2504
สถานที่เกิด	เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	747 หมู่ 1 ถนนประชาอุทิศ แขวงทุ่งครุ เขตราชบุรีบูรณะ กรุงเทพมหานคร 10140
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์ 2 ระดับ 5
สถานที่ทำงาน	โรงเรียน ภ.ป.ร. ราชวิทยาลัย ในพระบรมราชูปถัมภ์
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2522	มัธยมศึกษาปีที่ 5 จาก โรงเรียนอิสลามวิทยาลัย แห่งประเทศไทย
พ.ศ. 2527	วท.บ. (ฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ บางแสน
พ.ศ. 2540	วท.ม. (ฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

การออกแบบและสร้างชุดทดลอง เพื่อศึกษาสมบัติกายภาพบางประการ ของน้ำมันหล่อลื่น
โดยวิธีอัลตราโซนิก ช่วงอุณหภูมิ 20°C ถึง 70°C

บทคัดย่อ
ของ
สาริต บุญยรัตกลิน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกฟิสิกส์
มีนาคม 2541

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย เพื่อออกแบบและสร้างชุดทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก อิมพีแดนซ์จำเพาะ บัลค์มอดุลัส และสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นในน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่างกัน 3 ขนาด คือ SAE30 , SAE40 และ SAE 50 ในช่วงอุณหภูมิ 20°C ถึง 70°C

จากการวิจัยพบว่าในน้ำมันหล่อลื่นชนิดหนึ่งๆ ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าอิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสมีค่าแปรผกผันแบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าแปรผกผันแบบไม่เป็นเชิงเส้นกับอุณหภูมิ และเมื่อเปรียบเทียบค่าสมบัติกายภาพทั้ง 4 ในน้ำมันหล่อลื่นที่มีความหนืดต่างกันพบว่า ที่อุณหภูมิคงที่ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก อิมพีแดนซ์จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสมีค่าขึ้นกับความหนาแน่นของน้ำมันหล่อลื่นนั้นๆ ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของคลื่นมีค่าขึ้นกับความหนืดของน้ำมันหล่อลื่นแต่ละชนิด

A DESIGN AND CONSTRUCTION EQUIPMENT FOR A STUDY OF SOME PHYSICAL
PROPERTIES OF LUBRICATING OILS BY ULTRASONIC METHOD IN TEMPERATURE
RANGE 20^oC TO 70^oC

AN ABSTRACT
BY
SATIT BOONYARATGALIN

Presented in partial fulfillment of the requirements
for the Master of Science degree in Physics
at Srinakharinwirot University
March 2541

The purpose of this research is to design and construct the ultrasonic equipment for study the velocity of ultrasonic wave, the specific acoustic impedance, the bulk's modulus and the attenuation coefficient of lubricating oils which have different viscosities; SAE 30, SAE 40 and SAE 50 in temperature range 20°C - 70°C

The results of the research show that the velocity of ultrasonic wave, the specific acoustic impedance and the bulk's modulus of each lubricating oil are linear variable inversely to temperature, but the attenuation coefficient is nonlinear variable inversely to temperature. At constant temperature, the velocity of ultrasonic wave, the specific acoustic impedance and the bulk's modulus are dependent on the density of each lubricating oil, but the attenuation coefficient is dependent on the viscosity of each lubricating oil.