

การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัส
ของคอลลอยด์นมโดยเทคนิคอัลตราโซนิก

ปริญญาานิพนธ์
ของ
ประภาษ มุลนา

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

2547

ประภาษ มูลนา. (2547). การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัสของ คอลลอยด์นมโดยเทคนิคอัลตราโซนิก. ปริญญาโท กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฟื่องลดา วีระสัย , อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล.

งานวิจัยนี้ได้วัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และค่าความหนาแน่นของคอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ที่มีปริมาณไขมัน และปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน ได้แก่ นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน , นมสดพาสเจอร์ไรส์ , นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ , นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง, และนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมันและแคลเซียมสูง ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 60 องศาเซลเซียส เพื่อนำไปหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัส ผลการวิจัยพบว่า ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด มีค่าลดลง เมื่อปริมาณไขมันเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของดิกคินสันและแมกคลิเมนส์ (Advance Food Colloids. 1995 : 191 – 192) เมื่อพิจารณา นมพาสเจอร์ไรส์แต่ละชนิด ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสมีค่าแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และ ค่าบัลค์มอดุลัสที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่ามีค่าแปรผกผันกับปริมาณไขมันและมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณแคลเซียม ผลการวิจัยนี้จะสามารถนำไปวิเคราะห์ลักษณะและความแตกต่างของ สารคอลลอยด์นมชนิดอื่นได้

Prapat Moonna. (2004). *Measurements of Specific Impedance and Bulk Modulus of Milk Colloids by Ultrasonic Techniques*. Master thesis, M.Ed.(Physics).
Bangkok : Graduate School. Srinakarinwirot University. Advisor Committee :
Asst. Prof. Dr. Fuanglada Veerasai , Mr. Somsak Maneerattanakul.

This research measured ultrasonic velocities and densities of five varieties of milk colloids with different fat and calcium contents, including pasteurized fat milk, pasteurized milk, pasteurized low-fat milk, pasteurized low-fat and high-calcium milk, and pasteurized non-fat and high-calcium milk. Measurements were made within the temperature, ranging from 30 to 60 degrees celsius to determine specific impedance and bulk modulus. Results suggest that ultrasonic velocities of five milk colloids reduce while fat contents increase, which corresponds with Dickinson and McClements experiment.(Advance Food Colloids. 1995 : 191 – 192) Specific impedance and bulk modulus are found to exhibit direct linear relationships with temperature. When compared at the same bulk modulus value and temperature, specific impedance is inversely proportional to fat contents and directly proportional to calcium contents. These research findings can also be used to analyze characteristics and differences among other milk colloids.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา เมตตาและให้ความช่วยเหลืออนุเคราะห์เป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย ประธานกรรมการควบคุมปริญญาโท อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตนกุล กรรมการควบคุมปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดุลย์ คนยัง อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไข ตลอดจนช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ และอาจารย์ธีรยุทธ ลีพรเจริญวงศ์ ที่ได้ร่วมเป็นกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาโท และกรุณาให้คำแนะนำต่างๆ ที่ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดระยะเวลาการศึกษา จนผู้วิจัยสามารถนำความรู้มาใช้ในการดำเนินการทำปริญญาโทจนสำเร็จ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ และรุ่นน้อง นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุก ๆ คนในครอบครัว ที่เป็นผู้ส่งเสริมและเป็นกำลังใจในการศึกษาของผู้วิจัย

ประกาศ มุลนา

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีในงานวิจัย.....	4
คลื่นอัลตราโซนิกและสมบัติทางกายภาพ.....	4
วิธีการตรวจวัดทางอัลตราโซนิก.....	16
นมพาสเจอร์ไรส์.....	17
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	26
วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
ขั้นตอนเลือก และสร้างอ่างใส่สารตัวอย่างขนาดเล็ก.....	32
ขั้นตอนการปรับเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น.....	32
วิธีดำเนินการทดลอง.....	34
4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
5 สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	84
สรุป.....	84
อภิปรายผล.....	85
ข้อเสนอแนะ.....	86
บรรณานุกรม.....	87
ภาคผนวก.....	89
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	97

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงค่าสมบัติทางกายภาพของของเหลวชนิดต่าง ๆ	5
2 ขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิต Fluid Milk Products	18
3 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	42
4 แสดงปริมาณไขมัน และแคลเซียมในนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	43
5 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	45
6 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	46
7 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	47
8 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	48
9 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	49
10 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ...	50
11 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	53
12 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	54
13 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	55
14 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	56
15 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	57

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
16 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	58
17 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	61
18 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	62
19 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	63
20 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	64
21 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	65
22 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ ที่มีไขมันแตกต่างกัน	66
23 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มี แคลเซียมแตกต่างกัน.....	68
24 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของ นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	70
25 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	73
26 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	74
27 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	75
28 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	76

บัญชีตาราง(ต่อ)

ตาราง	หน้า
29 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	77
30 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีไขมันแตกต่างกัน.....	78
31 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีแคลเซียม แตกต่างกัน	81
32 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	82

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในผลึกควอตซ์	6
2 แสดงลักษณะตัวกลางที่คลื่นตามยาวเคลื่อนที่ในแท่งวัตถุ.....	9
3 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่ผิวรอยต่อของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2	15
4 กราฟแสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในอิมัลชัน กับความเข้มข้นของอิมัลชัน (น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ) โดยใช้ความถี่คลื่นอัลตราโซนิก 2.25 MHz	21
5 ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของอนุภาคแขวนลอยของโลหะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 m ในน้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลอง กับแบบจำลองของฮาร์เกอร์ และเทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และฮาวเลย์ (A&H)	23
6 ความเข้มข้นร้อยละ 5.6 ของอนุภาคแขวนลอยของโพลีสเตอร์รีน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 nm ในน้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองฮาร์เกอร์ และเทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และฮาวเลย์ (A&H)	24
7 ความเข้มข้นร้อยละ 8 ของอนุภาคแขวนลอยซิลิกา เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 320 nm ในน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลอง กับแบบจำลองฮาร์เกอร์ และเทมเปิล (H&T) , อัลลิกรา และฮาวเลย์ (A&H) ...	25
8 รางเลื่อน	26
9 ฐานเลื่อนสเกลเวอร์เนีย	27
10 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ	27
11 อ่างใส่สารตัวอย่าง	28
12 ตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก	29
13 ตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก	29
14 ตัวจับ Transmitter	30
15 ตัวจับ Receiver	30
16 ตัวยึดสองทาง	31
17 กราฟแสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ	33

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
18 กราฟแสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในกลีเซอรินที่อุณหภูมิต่าง ๆ	33
19 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด	35
20 ขวดแก้วรูปชมพู่	38
21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	45
22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	46
23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	47
24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	48
25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	49
26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	51
27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	53
28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	54
29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	55
30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	56

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Not Fat and High Calcium Milk)	57
32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	59
33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	61
34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	62
35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	63
36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	64
37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	65
38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีไขมันแตกต่างกัน	67
39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีแคลเซียมแตกต่างกัน	69
40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	71
41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดูลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	73
42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดูลัสกับอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	74

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	75
44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	76
45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	77
46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีไขมันแตกต่างกัน	79
47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีแคลเซียมแตกต่างกัน	81
48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด	83

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

คลื่นเสียงเป็นคลื่นกล (Mechanical Wave) ชนิดหนึ่ง คลื่นกลนั้นส่งพลังงานผ่านตัวกลาง โดยการสั่นของโมเลกุลในตัวกลางนั้น จากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง โดยมีทิศทางของการสั่นอยู่ในแนวเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ซึ่งลักษณะดังกล่าวจัดเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว เมื่อให้คลื่นเสียงผ่านตัวกลางไม่ว่าจะเป็น ก๊าซ ของแข็ง หรือของเหลว คลื่นเสียงจะส่งผ่านพลังงานในตัวกลาง จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของคลื่นเสียงกับสมบัติทางกายภาพของตัวกลางชนิดนั้นได้ เช่น หาค่าความเร็วของคลื่นเสียง ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ ค่าบัลค์มอดุลัส และค่าความหนืดของตัวกลาง เป็นต้น โดยการตรวจวัดคลื่นเสียงที่ผ่านตัวกลางนั้น

อัลตราโซนิก (Ultrasonic) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงเกินกว่าที่มนุษย์ได้ยิน (มนุษย์ได้ยินเสียงที่มีความถี่ 20 – 2000 เฮิรตซ์) คลื่นเสียงที่มีระดับความถี่ต่ำกว่า 20 เฮิรตซ์ เรียก อินฟราโซนิก (Infrasonic) คลื่นเสียงที่มีระดับความถี่สูงกว่า 20,000 เฮิรตซ์ เรียก อัลตราโซนิก คลื่นเสียงความถี่สูงที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ ได้แก่ เสียงจากค้ำควา แมลง ปลาวาฬ เป็นต้น ซึ่งมีความถี่ประมาณ 120 กิโลเฮิรตซ์

การผลิตหรือการสร้างคลื่นอัลตราโซนิกอาศัยหลักการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) ขึ้นในผลึก สำหรับประโยชน์ของอัลตราโซนิกนั้น มีหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม หรือการตรวจสอบวัสดุ ทั้งนี้ข้อดีของเทคนิคอัลตราโซนิก คือ ใช้ทดสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย (Non – Destructive Testing of Materials) กล่าวคือ ถ้าเป็นการตรวจวินิจฉัยโรคจะไม่เกิดความเสียหายแก่เนื้อเยื่อภายใน ถ้าเป็นการทดสอบวัสดุชิ้นงาน หรือของเหลวโดยใช้เทคนิคอัลตราโซนิก (Ultrasonic Techniques) วัสดุชิ้นงานหรือของเหลวจะไม่เกิดความเสียหาย เกิดรอยแตกหรือรอยขีดข่วน นอกจากนั้นยังสามารถตรวจสอบลักษณะสมบัติสภาพโครงสร้างภายในหรือรอยแตกของวัสดุภายในโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ขนาด หรือสมบัติทางกายภาพ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์เทคนิคอัลตราโซนิกเพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารคอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณไขมันและแคลเซียมแตกต่างกัน กระบวนการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของนมพาสเจอร์ไรส์ทำได้หลายวิธี เทคนิคอัลตราโซนิกเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถตรวจสอบสมบัติทางกายภาพได้

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1.2.1 ทดสอบหาอุปกรณ์ที่เหมาะสม ได้แก่ ภาชนะใส่สารตัวอย่างที่เป็นคอลลอยด์นม และใช้คอลลอยด์นมในปริมาณที่น้อยหาความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและค่าบัลค์มอดุลัส ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส

1.2.2 เพื่อหาความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (Specific Impedance) และบัลค์มอดุลัส (Bulk Modulus) ของคอลลอยด์นมที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

1.2.3 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัสของ คอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

1.2.4 สามารถใช้ชุดทดลองนี้เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัส ของคอลลอยด์ชนิดอื่นต่อไป

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการเลือกและทดสอบภาชนะใส่ของเหลวเพื่อศึกษาในตัวกลาง ที่เป็นคอลลอยด์นม ซึ่งสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้ในช่วง 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพของคอลลอยด์นม ดังนี้ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความหนาแน่นของคอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณไขมันและแคลเซียมแตกต่างกัน 5 ชนิด คือ

1.3.2.1 นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

1.3.2.2 นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

1.3.2.3 นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

1.3.2.4 นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

1.3.2.5 นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

1.4 ความสำคัญของการวิจัย

1.4.1 ทราบค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ
ค่าบัลค์มอดุลัส ในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

1.4.2 สามารถใช้ชุดทดลองในการวิจัยไปใช้ศึกษาสมบัติคอลลอยด์นมชนิดอื่นได้
หรือสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้ประโยชน์เพื่อประกอบการศึกษางานวิจัยทาง
อัลตราโซนิกในตัวกลางของของเหลวชนิดอื่นได้

1.4.3 ความรู้เกี่ยวกับความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อน
จำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัส จะช่วยให้เข้าใจถึงกระบวนการกระเจิงของคลื่นในนมพาสเจอร์ไรส์
ที่มีปริมาณไขมันและแคลเซียมต่าง ๆ ช่วยให้สามารถรักษาเสถียรภาพของน้ำนมได้ดีขึ้น และ
น้ำนมมีอายุการเก็บรักษายาวนานขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีในงานวิจัย

2.1.1 คลื่นอัลตราโซนิกและสมบัติทางกายภาพ

2.1.2 วิธีการตรวจวัดทางอัลตราโซนิก

2.1.3 นมพาสเจอร์ไรส์

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีในงานวิจัย

2.1.1 คลื่นอัลตราโซนิกและสมบัติทางกายภาพ

คลื่นอัลตราโซนิกเป็นคลื่นกลชนิดหนึ่งที่ใช้ตัวกลางในการส่งผ่านพลังงาน เช่นเดียวกับคลื่นเสียงแต่มีความถี่สูงกว่าคลื่นเสียงที่มนุษย์ได้ยิน คือ มีความถี่มากกว่า 20,000 เฮิร์ตซ์ เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่ต่างกัน จะพบว่าค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของตัวกลางแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากสมบัติทางกายภาพของตัวกลางแตกต่างกัน

สมบัติทางกายภาพของตัวกลางของเหลวที่สำคัญและสามารถหาได้จากเทคนิคอัลตราโซนิก ได้แก่ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ บัลค์มอดุลัส และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงาน เป็นต้น โดยสมบัติดังกล่าวมานี้จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความดันของของเหลว และความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก ดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงค่าสมบัติทางกายภาพของของเหลวชนิดต่างๆ

ชนิดของเหลว	อุณหภูมิ (C)	ความหนา แน่น (kg/m ³)	บัลค์มอดุลัส (Pa)X10 ⁹	ความเร็วคลื่น อัลตราโซนิก (m/s)	ความต้านทาน เชิงซ้อนจำเพาะ (kg/m ² .s)X10 ⁶
น้ำกลั่น	20	998	2.18	1,481	1.48
น้ำทะเล	13	1026	2.28	1,500	1.54
เอซิลแอลกอฮอล์	20	970	-	1,150	0.91
ปรอท	20	13,600	25.3	1,450	19.7
กลีเซอริน	20	1,260	-	1,980	2.5
น้ำมันเครื่อง	20	950	-	1,540	1.45
น้ำมันสน	20	870	1.07	1,250	1.11

(Ultrasonic Testing of Materials. 1990 : 172)

คลื่นอัลตราโซนิกโดยทั่วไปสร้างมาจากอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้ามาเป็นพลังงานกล ทำให้เกิดการสั่นกลับไปมาจนก่อให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิก หรือในทางกลับกันก็สามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้กลับไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องมือนี้เรียกว่าอัลตราโซนิกทรานส์ดิวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) ทรานส์ดิวเซอร์มีหลายชนิด เช่น เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) ซึ่งสามารถแปลงไปมาระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับพลังงานกล โดยมีความถี่ของการสั่นพ้องอยู่ค่าหนึ่ง อัลตราโซนิกจะเกิดขึ้นเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปที่แผ่นอิเล็กโทรดที่ผิวหน้าของผลึกโมเลกุลจะยืดหรือหด ขึ้นกับศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป

ทรานส์ดิวเซอร์ คือ อุปกรณ์ที่สั่นสะเทือนทำให้เกิดคลื่นอัลตราโซนิกแล้วคลื่นจะส่งผ่านพลังงานไปในตัวกลางและมีทรานส์ดิวเซอร์อีกตัวหนึ่งทำหน้าที่รับคลื่นอัลตราโซนิกหรือทรานส์ดิวเซอร์อาจทำหน้าที่ทั้งส่งและรับคลื่นอัลตราโซนิกในเครื่องเดียวกัน

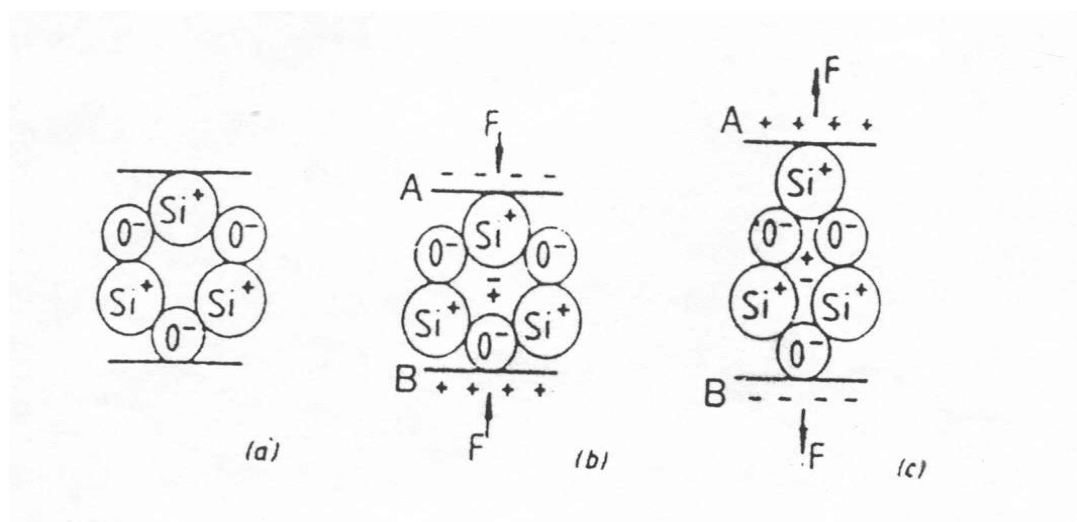
ปี ค.ศ. 1966 บลิซ และซิมสัน (Blitz and Simpson. 1966 : 298) กล่าวถึง ทรานส์ดิวเซอร์ทางด้านอัลตราโซนิก ดังนี้

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ทางด้านอัลตราโซนิกจะทำหน้าที่ 2 อย่าง คือ เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลหรือพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า กระบวนการแปลงพลังงานนี้เรียกว่าทรานส์ดักชัน (Transduction)

ทรานส์ดิวเซอร์ที่ใช้ในด้านอัลตราโซนิกมีสมบัติ คือ จะมีปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) สารเซรามิกเป็นสารที่มีคุณสมบัตินี้ จึงสามารถนำมาใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์และที่ใช้กันแพร่หลาย คือ ควอตซ์ (Quartz) แบเรียม (Barium) ตะกั่วเซอร์โคเนตไททาเนต (Lead

Circonate Titanate) สารเหล่านี้เมื่อนำมาใช้ทำทรานส์ดิวเซอร์ จะมีสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Electrical Capacitor) มีค่าความจุ (Capacitance) ในหน่วยไมโครฟารัด โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์ คล้ายกับตัวเก็บประจุ คือ มีอิเล็กโทรดที่อยู่สองข้างถูกแยกโดยช่องที่มีสารเซรามิกอยู่

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์ทำมาจากวัสดุที่แสดงปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ซึ่งปรากฏการณ์นี้พบและศึกษาครั้งแรก โดยปีแอร์ คูรี (Pierre Curie) ใน ค.ศ. 1880 ปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นโดยธรรมชาติในผลึกของสารบางชนิดที่เป็นอสมมาตร เช่น ผลึกควอตซ์ (Quartz) เกลือโรเชลล์ (Rochelle Salt) แร่ทัวร์มาลีน (Tourmaline) ลิเทียมซัลเฟต (Lithium Sulphate) แคดเมียมซัลไฟด์ (Cadmium Sulphide) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide) เป็นต้น เมื่อให้ความเค้นเชิงกลกระทำแก่ผลึกที่เป็นอสมมาตรจะมีประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นบนผิว ถ้าความเค้นเชิงกลเป็นความเค้นอัดประจุไฟฟ้าที่เกิดบนผิวของผลึก ด้านหนึ่งจะเป็นบวก อีกด้านหนึ่งจะเป็นลบ ถ้าความเค้นเชิงกลถูกแปลงเป็นการสั่นเชิงไฟฟ้า ปรากฏการณ์นี้เรียกว่าเพียโซอิเล็กทริกโดยตรง (Direct Piezoelectric) ถ้าเป็นกระบวนการผกผัน การสั่นเชิงไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นการสั่นเชิงกลจะเรียกว่า เพียโซอิเล็กทริกผกผัน (Converse Piezoelectric) หลักการของปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกสามารถอธิบายได้จากภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกที่เกิดขึ้นในผลึกควอตซ์

รูป (a) ผลึกควอตซ์ในสภาวะปกติ รูป (b) ผลึกควอตซ์ถูกแรงอัดกระทำ

รูป (c) ผลึกควอตซ์ถูกแรงดึงกระทำ

(Jack Blitz and Geoff Simpson. 1996 : 300)

จากภาพประกอบ 1 ผลึกควอตซ์เขียนในรูปสารประกอบทางเคมี คือ SiO_2 (ซิลิกอนไดออกไซด์) รูป (a) ประจุไฟฟ้าของอะตอมซิลิกอนและอะตอมออกซิเจนหักล้างกันหมด รูป (b) ผลึกถูกแรงอัดจะเกิดประจุลบที่ขั้วไฟฟ้า A และประจุบวกที่ขั้วไฟฟ้า B รูป (c) ผลึกถูกแรงดึงจะเกิดประจุบวกที่ ขั้วไฟฟ้า A และประจุลบที่ขั้วไฟฟ้า B นั่นคือ การสั่นเชิงกลจะถูกเปลี่ยนเป็นการสั่นเชิงไฟฟ้า

ในทางกลับกัน ถ้าต่อศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้า A และ B จะทำให้อะตอมซิลิกอนและอะตอมออกซิเจนเคลื่อนที่เข้าหากันหรือออกจากกันภายใต้แรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า นั่นคือ การสั่นเชิงไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นการสั่นเชิงกล

เมื่อเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์สัมผัสตัวกลางชนิดต่าง ๆ เช่น น้ำ เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ดิวเซอร์จะปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปจะเกิดการสั่นสะท้อนเป็นคลื่นอัลตราโซนิกที่มีการอัด (Compression) และการขยาย (Rarefaction) สลับกันแผ่กระจายในตัวกลาง กล่าวคือ เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในทรานส์ดิวเซอร์จะทำให้ทรานส์ดิวเซอร์เพียโซอิเล็กทริกขยายตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณพื้นผิวหน้าของทรานส์ดิวเซอร์เปิดของเหลวที่อยู่ติดกัน ทำให้ความดันและความหนาแน่นของตัวกลางเพิ่มขึ้น การชนกันของโมเลกุลในบริเวณนั้นจะส่งผ่านไปยังโมเลกุลที่ข้างเคียง ขณะที่บริเวณเดิมกลับมามีอยู่ในสภาพเดิม การส่งผ่านจะส่งต่อไปเรื่อย ๆ ตัวกลางที่มีสภาพอัดได้ต่ำ เช่น เหล็ก การกีดกันจากชั้นหนึ่งไปยังอีกชั้นหนึ่ง รวดเร็วมาก จึงมีความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกสูง ประมาณ 6,000 เมตรต่อวินาที แต่ตัวกลางที่มีสภาพอัดได้สูง ความเร็วอัลตราโซนิกจะมีค่าต่ำ เช่น น้ำ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ประมาณ 1,540 เมตรต่อวินาที

ความถี่ของคลื่นที่ทรานส์ดิวเซอร์สร้างจะขึ้นอยู่กับสมบัติเชิงกลและลักษณะรูปร่างของทรานส์ดิวเซอร์ ตัวอย่างเช่น เซรามิกแท่งเหลี่ยมแบนจะมีความถี่ของการสั่นพ้อง (Resonant Frequency) ได้ 3 อย่าง คือ การยืดและหดตามความหนา ตามความยาวและตามความกว้างแต่ถ้าเป็นแผ่นกลมจะสามารถยืดและหดได้ตามความหนาและรัศมี แต่อย่างไรก็ตามเมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในทรานส์ดิวเซอร์จะยืดและหดในแนวไหนก็ได้ซึ่งขึ้นกับขั้วไฟฟ้าที่ใช้

โครงสร้างของทรานส์ดิวเซอร์

ทรานส์ดิวเซอร์ที่นิยมใช้กันทั่วไป มีรูปร่างเป็นจานแบน มีหลายขนาด เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร หนา 1.8 มิลลิเมตร สำหรับใช้ผลิตคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร หนา 0.18 มิลลิเมตร สำหรับใช้ผลิตคลื่นอัลตราโซนิกความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ความหนาของผลึกเป็นตัวกำหนดความถี่ของทรานส์ดิวเซอร์

ในการสร้างทรานส์ดีวเซอร์นั้น ต้องทราบความถี่ที่ต้องการ แล้วจึงคำนวณค่าความยาวคลื่นอัลตราโซนิกในผลึกโดยใช้สูตร $c = f\lambda$ หลังจากนั้นจึงตัดผลึกให้มีความหนาเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เนื่องจากการสั่นพ้องหลักมูล (Fundamental Resonance) จะเกิดขึ้น เมื่อผลึกมีความหนาครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

เมื่อพิจารณาสภาวะซึ่งคลื่นสะท้อนกลับไปกลับมาะหว่างพื้นผิวหน้าสองอันที่อยู่ขนานกัน เนื่องจากคลื่นต้องเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้าม ดังนั้น จึงเกิดคลื่นสถิตขึ้น การสั่นพ้องจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวหน้าอยู่ห่างกันเท่ากับจำนวนครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น จะทำให้คลื่นมาเสริมกัน และทำให้การเปลี่ยนแปลงของความดันมากที่สุดถ้าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกเป็น f_0 และความหนาของผลึก t เท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ความสูงของแอมพลิจูดของคลื่นจะมีค่ามากที่สุด ค่านี้เป็นการสั่นพ้องหลักมูลที่ $t = \lambda/2$ ซึ่งเป็นค่าที่ให้ประสิทธิภาพและให้ความไวมากที่สุด

ปี ค.ศ. 1966 ฟิลิปซินสกีและคณะ (Filipczynski, et al. 1966 : 189) ใช้เทคนิคทางอัลตราโซนิกหาสมบัติต่างๆ ของตัวกลาง โดยการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางนั้น พบว่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นกับสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน

การลดลงของความเข้มของคลื่นอัลตราโซนิกเกิดจากสมบัติทางกายภาพของตัวกลางแบ่งออกเป็นการกระเจิง (Scattering) และการลด (Attenuation) ดังนี้

การกระเจิงเป็นการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไปจากทิศทางเดิมอันเนื่องมาจากการสะท้อนในตัวกลางมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง เช่น ฟองอากาศในของแข็ง สารแขวนลอยในของเหลว เป็นต้น

การลดคลื่นอัลตราโซนิก (ความสูงของแอมพลิจูดลดลง) เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางแล้วมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานคลื่นบางส่วนไปเป็นพลังงานรูปอื่นไว้ภายในในตัวกลาง เช่น เปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน เป็นต้น

สมบัติทางกายภาพ

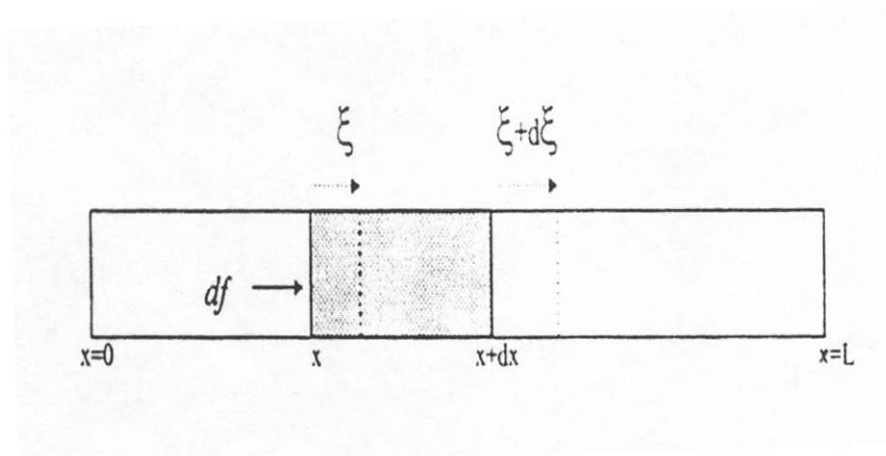
ปี ค.ศ. 1982 ออสติน และคณะ (Austin R, et al. 1982 : 57 – 60) อธิบายลักษณะและสมบัติทางกายภาพของคลื่นตามยาว ไว้ดังนี้

การเคลื่อนที่ของคลื่นที่สำคัญชนิดหนึ่ง คือ การเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาว เมื่อคลื่นตามยาวกระทบที่ปลายของแท่งวัตถุ อนุภาคจะมีการเคลื่อนที่ไปตามแท่งวัตถุขนานกับแกนของแท่งวัตถุ และถูกแรงยืดหยุ่นของเนื้อวัตถุดึงอนุภาคกลับสู่ตำแหน่งเดิมอีกครั้ง การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของอนุภาคนี้ทำให้โมเลกุลข้างเคียงมีการสั่นในลักษณะเดียวกัน การถ่ายทอดการสั่นของอนุภาคก็คือการส่งผ่านพลังงานนั่นเอง

พิจารณาตัวกลางเป็นแท่งวัตถุที่มีความยาว L พื้นที่หน้าตัด S ถ้าออกแรง df กระทำทางด้านซ้ายของตำแหน่ง x ภายในแท่งวัตถุในแนวตามยาว ที่ตำแหน่ง x นี้ อนุภาคในตัวกลางจะมีการกระจัดตามความยาวเท่ากับ (x,t) ดังภาพประกอบ 2 จะได้

$$(x,t) \dots\dots\dots(1)$$

คือ การกระจัดที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง x และ เวลา t



ภาพประกอบ 2 แสดงลักษณะตัวกลางที่คลื่นตามยาวเคลื่อนที่ในแท่งวัตถุ
(Austin R, et al. 1982 : 58)

ภาพประกอบ 2 พิจารณาตำแหน่งทางซ้ายสุดของแท่งวัตถุมีค่า $x = 0$ และทางขวาสุดของแท่งวัตถุตำแหน่ง $x = L$ พิจารณาส่วน dx เล็กๆ ที่อยู่ระหว่าง x และ $x + dx$ ที่เกิดขึ้นเมื่อแท่งวัตถุได้รับแรงกระทำน้อย ๆ df อนุภาคที่ตำแหน่ง x เคลื่อนที่ได้การกระจัดเป็นระยะ ในทำนองเดียวกันอนุภาคที่ตำแหน่ง $x + dx$ ที่ได้รับแรงกระทำน้อย ๆ df จะมีการกระจัดจะเพิ่มเป็น d

เนื่องจาก dx มีขนาดเล็ก ดังนั้น การกระจัดที่ตำแหน่ง x และ $x + dx$ สามารถแทนได้ด้วยสองเทอมแรกของการกระจายแบบเทเลอร์ (Taylor's Expansion) ของการกระจัด รอบตำแหน่ง x คือ

$$d = \frac{dx}{x} \dots\dots\dots(2)$$

การกระจัดตามยาวของแท่งวัตถุที่เพิ่มขึ้น จะเป็น

$$\left(\frac{d}{dx} \right) dx = d \dots\dots\dots(3)$$

ความเครียดตามยาว (Strain) คือ อัตราส่วนระหว่างความยาวที่เพิ่มขึ้นกับความยาวเดิม หรือ

$$\text{ความเครียด} = \frac{\frac{dx}{x}}{\frac{dx}{x}} \dots\dots\dots(4)$$

สมการคลื่นตามยาว (Longitudinal Wave Equation)

เมื่อใดก็ตามที่วัตถุที่มีความยืดหยุ่นได้รับแรงกระทำ จนทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในเนื้อวัตถุได้นั้น จะเรียกแรงนี้ว่าแรงเค้น

$$\text{แรงเค้น} = f = f(x,t) \dots\dots\dots(5)$$

f คือ แรงเค้นที่เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง x เวลา t

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

$$\text{ความเค้น} = \frac{f}{S} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเป็นไปตามกฎของฮุก (Hooke's law) คือ

$$\frac{f}{S} = Y \frac{x}{l} \quad \dots\dots\dots(7)$$

โดยที่ Y เป็นค่ามอดุลัสของยัง

$$f = SY \frac{x^2}{l^2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

ถ้า f เป็นแรงภายในที่ตำแหน่ง x ดังนั้น $f = \frac{f}{x} dx$ แรงภายในที่ตำแหน่ง $x + dx$ จะได้แรงสุทธิทางขวา คือ

$$df = f + \left(f \frac{f}{x} dx \right) = \frac{f}{x} dx \quad \dots\dots\dots(9)$$

มวลของส่วน dx มีค่าเท่ากับ $S \rho dx$ โดยที่ ρ เป็นความหนาแน่น ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวเขียนได้เป็น

$$df = S \rho dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{f}{x} dx = (SY) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \quad \dots\dots\dots(10)$$

กำหนดให้ $c^2 = \frac{Y}{\rho}$ เขียนสมการ (10) ได้เป็น

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = \frac{Y}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots(11)$$

สมการที่ (11) คือ สมการการเคลื่อนที่ของคลื่นตามยาวใน 1 มิติ โดยมีคำตอบทั่วไปของสมการเป็น

$$y = f_1(ct - x) + f_2(ct + x) \quad \dots\dots\dots(12)$$

ซึ่งเป็นฟังก์ชันคลื่นและมีค่าความเร็วเฟส (Phase Velocity) เป็น

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(13)$$

จากสมการ (13) ถ้าทราบความเร็วคลื่นตามยาวในแท่งวัตถุและความหนาแน่นของตัวกลางจะสามารถทราบค่ามอดุลัสของยังของวัตถุนั้นได้

ความเร็วของคลื่นเสียงในของเหลว

(Austin R, et al. 1982 : 105 – 107)

คลื่นที่เคลื่อนที่ในของเหลวจะเป็นคลื่นตามยาวเช่นเดียวกับในแท่งวัตถุ นั่นคือ โมเลกุลในของเหลวมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น มีผลทำให้โมเลกุลบริเวณที่อยู่ติดกับโมเลกุลที่มีการสั่นได้รับพลังงาน ทำให้เกิดการอัดและการขยายของโครงสร้าง (Configuration) เกิดเป็นคลื่นตามยาวในของเหลวและความเร็วคลื่นในของเหลวอธิบายได้ด้วยสมการ (13) สำหรับในของเหลวใช้ค่าบัลค์มอดุลัส แทนค่ามอดุลัสของยัง ดังนั้นจะได้ความเร็วคลื่นในของเหลวเป็น

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad \dots\dots\dots(14)$$

เมื่อแบบ เป็นค่าบัลค์มอดุลัสในระบบแอเดียแบติก

$$c_0 = \frac{P}{\rho} \dots\dots\dots(15)$$

เมื่อ c_0 เป็นความหนาแน่นที่ความดันสมดุล
 เป็นความหนาแน่นที่ความดันใด ๆ
 P เป็นความดันขณะใด ๆ

จากสมการ (14) และสมการ (15) เขียนสมการความเร็วในรูป

$$c = \sqrt{\frac{P}{\rho}} \text{ adiabatic} \dots\dots\dots(16)$$

จากสมการ (14) และ c_0 เป็นปริมาณที่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดันของของเหลว ซึ่งไม่สามารถหาความสัมพันธ์ที่แน่นอนได้ ดังนั้น จึงไม่สามารถหาความสัมพันธ์ของความเร็วคลื่นกับตัวแปรทั้งสองในรูปสมการที่แน่นอนได้เช่นกัน แต่สามารถหาความเร็วคลื่นในของเหลวได้โดยการทดลอง ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในสูตรเชิงตัวเลข (Numerical Formula) ตัวอย่างเช่น จากการทดลองหาความเร็วคลื่นในน้ำกลั่น ได้ค่าความเร็วสัมพันธ์กับความดันและอุณหภูมิ ดังนี้

$$c(p,t) = 1402.7 + 488t + 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(p_g/100) \dots\dots\dots(17)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วคลื่นเสียงในน้ำกลั่น หน่วย เมตรต่อวินาที
 $t = \frac{T}{100}$, T หน่วยองศาเซลเซียส
 p เป็นความดัน หน่วยบาร์ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
 p_g เป็นความดันเกจ หน่วยบาร์ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

จากสมการ (17) สมการนี้เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.05 % เมื่อทำการทดลองในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ $0 \leq T \leq 100^\circ\text{C}$ (Austin R, et al. 1982 : 107)

เมื่อมีแรงกระทำในตัวกลางทำให้อุณหภูมิในตัวกลางมีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความดันภายในของเหลว นั่น ค่าอัตราส่วนระหว่างความดันในตัวกลางกับ

ความเร็วของอนุภาคในตัวกลาง เรียกว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (Specific Impedance) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Z = \frac{p}{u} \dots\dots\dots(18)$$

เมื่อ Z เป็นความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ
 p เป็นความดัน
 u เป็นความเร็วของอนุภาค

สำหรับคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ในของเหลว การกระจัดของอนุภาคเป็น

$$A \sin(kx - t) \dots\dots\dots(19)$$

และมีความดันกับความเร็วของอนุภาคเป็น

$$p = k c^2 A \cos(kx - t) \dots\dots\dots(20)$$

และ

$$u = \frac{A}{t} \cos(kx - t) \dots\dots\dots(21)$$

แทนค่าความดันและความเร็วอนุภาคในสมการ (18) จะได้ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะเป็น

$$Z = \rho_0 c \dots\dots\dots(22)$$

เครื่องหมายบวกในสมการ (22) ขึ้นกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นว่าเคลื่อนที่ไปทางทิศใดและผลคูณของ $\rho_0 c$ เป็นค่าที่มีความสำคัญในการบอกถึงสมบัติของตัวกลางได้ดีกว่าค่า ρ_0 หรือ c เพียงค่าใดค่าหนึ่งและเรียกค่า $\rho_0 c$ ว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ ของตัวกลาง

การสะท้อนของคลื่นอัลตราโซนิค (Reflection of Ultrasonic Wave)

(Filipczynski, et. al. 1966 : 4 – 7)

เมื่อคลื่นตกกระทบบนผิวรอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด คลื่นจะมีการหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 และสะท้อนกลับสู่ตัวกลางเดิมได้ ดังนั้น พลังงานบางส่วนจะถูกสะท้อนกลับในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศที่ตกกระทบบ และบางส่วนจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลางอีกตัวหนึ่ง

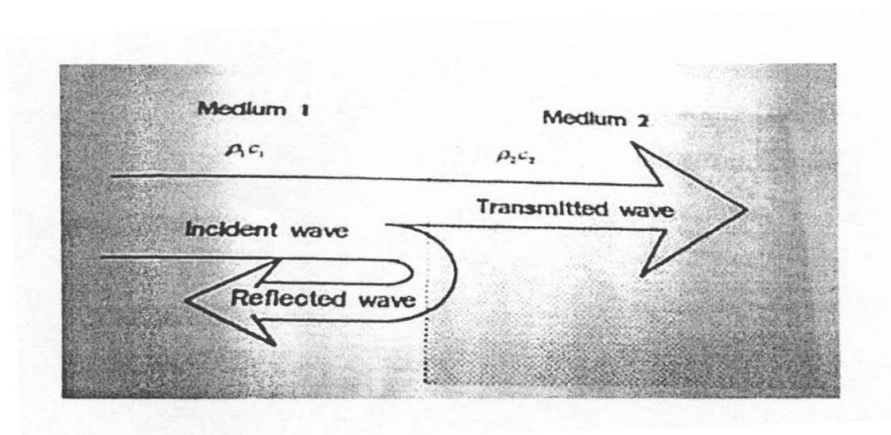
สำหรับคลื่นระนาบเมื่อเคลื่อนที่ตกกระทบบนตังฉากกับผิวรอยต่อของ 2 ตัวกลาง ค่าสัมประสิทธิ์ (Coefficient of Reflection ; r) ของการสะท้อน และค่าสัมประสิทธิ์ของการส่งผ่าน (Coefficient of Transmission ; t) ดังภาพประกอบ 3

$$r = \frac{I_r}{I_i} = \frac{2c_2 - c_1}{c_1 + 2c_2} \dots\dots\dots(23)$$

$$t = \frac{I_t}{I_i} = \frac{4c_1c_2}{(c_1 + c_2)^2} \dots\dots\dots(24)$$

- เมื่อ I_i เป็นความเข้มของคลื่นตกกระทบบ
- I_r เป็นความเข้มของคลื่นสะท้อน
- I_t เป็นความเข้มของคลื่นส่งผ่าน

ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (ρ_1c_1) ของตัวกลางที่ 1 และ ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (ρ_2c_2) ของตัวกลางที่ 2 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 3 แสดงการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่นที่ผิวรอยต่อของตัวกลางที่ 1 และตัวกลางที่ 2

2.1.2 วิธีการตรวจวัดทางอัลตราโซนิก (Ultrasonic Measurement)

การตรวจวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่ให้ความถูกต้องสูงนิยมใช้การศึกษาสัญญาณคลื่นที่ได้จากออสซิลโลสโคป มีขั้นตอนการตรวจวัดที่สำคัญอยู่ 6 ขั้นตอน

1. การสร้างสัญญาณกระตุ้น โดยใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Pulse Generator) เพื่อกระตุ้นทรานส์ดีวเซอร์ ให้สร้างคลื่นอัลตราโซนิก

2. การสร้างคลื่นอัลตราโซนิก จะให้สัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้าไปกระตุ้นทรานส์ดีวเซอร์ตัวส่ง (Transmitter) ให้สร้างคลื่นอัลตราโซนิกออกสู่ตัวกลางและมีทรานส์ดีวเซอร์ตัวรับ (Receiver) หลักการทำงานของทรานส์ดีวเซอร์ คือ การแปลงพลังงานจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกรูปแบบหนึ่งนั่นเอง ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะการแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลของการสั่น ทรานส์ดีวเซอร์ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปมีสองแบบ คือ ตัวสั่นแบบควอตซ์ (Quartz Oscillator) และตัวสั่นแบบเซรามิก (Ceramic Oscillator)

ทรานส์ดีวเซอร์แบบควอตซ์ ใช้ผลึกควอตซ์ที่เกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric Effect) เมื่อหาค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าผลึก จะทำให้เกิดความเค้นทางกล (Mechanical Stress) ขึ้นภายในโครงสร้างของผลึก และจะคืนกลับสู่โครงสร้างเดิมเมื่อความต่างศักย์ที่ค่อมผลึกหมดไปโดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทางไฟฟ้า เช่น ศักย์ไฟฟ้า และประจุไฟฟ้า กับปริมาณทางกล เช่น ความเค้นและความเครียด มีลักษณะเป็นเชิงเส้น

3. การเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลาง เมื่อคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ออกจากผิวหน้าของทรานส์ดีวเซอร์ ก็จะเข้าสู่ตัวกลางที่อาจจะแข็งหรือของเหลวก็ตาม ลักษณะการเคลื่อนที่ของคลื่นจะขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลาง ความดันและอุณหภูมิของตัวกลางด้วย

การศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวกลางได้ง่าย โดยการควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการทดลอง เช่น ทำการทดลองที่ค่าความดันค่าหนึ่ง ค่าอุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง การใช้ทรานส์ดีวเซอร์ที่ทราบค่าความถี่แน่นอน เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามการศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวกลางด้วยคลื่นอัลตราโซนิกต้องอาศัยการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางนั้นแล้ว ซึ่งต้องอาศัยทรานส์ดีวเซอร์อีกตัวหนึ่งในการแปลงสัญญาณคลื่นนั้น

4. การตรวจรับคลื่นอัลตราโซนิก จะใช้ทรานส์ดีวเซอร์อีกตัวหนึ่งที่มีสมบัติเหมือนกันทำหน้าที่รับคลื่นอัลตราโซนิกที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง โดยจะเปลี่ยนพลังงานกลของคลื่นให้อยู่ในรูปสัญญาณไฟฟ้า และจะส่งสัญญาณนั้นไปสู่ออสซิลโลสโคป

5. การวิเคราะห์สัญญาณ จากออสซิลโลสโคป ที่สามารถวัดค่าเวลา และความยาวคลื่นของคลื่นอัลตราโซนิกได้

6. การวิเคราะห์สัญญาณจากออสซิลโลสโคป โดยปรับสัญญาณที่รับจากทรานส์ดีวเซอร์ให้อยู่ในรูปคลื่นไซน์ จากนั้นหาความยาวคลื่นอัลตราโซนิกจากรูปคลื่นไซน์ นำค่าความยาวคลื่นที่ได้มาคูณกับความถี่คลื่นอัลตราโซนิกที่ใช้จะได้ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ดังสมการ $c = f$

2.1.3 นมพาสเจอร์ไรส์

วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิละ (2532 : 76 – 88) กล่าวถึงผลิตภัณฑ์นมที่จำหน่ายในท้องตลาดในสภาพของของเหลว หรือพร้อมดื่มมีมากมายหลายประเภท เช่น นมพร่องมันเนย (Whole Milk) นมไขมัน 2% นมไขมันต่ำ (Low Fat Milk) นมรสช็อกโกแลต หรือนมเปรี้ยว (Cultured Buttermilk) ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีการดัดแปลง ประจุแต่งด้วยวิตามิน แร่ธาตุ หรือเติมของแข็งในนม หรือปรับปริมาณไขมันให้เป็นไปตามความนิยมของผู้บริโภค และให้เป็นไปตามกฎหมายที่ได้ระบุไว้ในแต่ละประเทศ ขั้นตอนในกระบวนการผลิตนมที่จำหน่ายในท้องตลาดในสภาพของเหลว (Fluid Milk Products) แสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิต Fluid Milk Products

ขั้นตอน	วัตถุประสงค์
1. รีดนม	1. เพื่อได้น้ำนมมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ

<p>2. ทำให้น้ำนมเย็นลงที่อุณหภูมิ 4.44 C</p> <p>3. เก็บน้ำนมดิบที่อุณหภูมิ 4.44 C ภายในเวลาไม่เกิน 48 ชั่วโมง</p> <p>4. รับน้ำนมดิบ และขนส่งสู่โรงงานแปรรูปนม</p> <p>5. การขนถ่ายน้ำนมดิบสู่โรงงาน</p> <p>6. การหมุนเหวี่ยงแยกสิ่งสกปรก การปรับมาตรฐานของน้ำนม</p> <p>7. การพาสเจอร์ไรส์</p> <p>8. โฮโมจีไนส์</p> <p>9. บรรจุเก็บที่อุณหภูมิต่ำกว่า 7.22 C และรอจำหน่าย</p>	<p>วันนมควรมีสุขภาพดี สุขภาพสมบูรณ์ มีสุขภาพลักษณะที่เหมาะสม มีการถ่ายเทอากาศที่ดีในบริเวณที่รีดนม</p> <p>2. เพื่อลดอัตราการเจริญของจุลินทรีย์ โดยเริ่มแรกทำให้อุณหภูมิเย็นถึง 50 C ภายใน 1 ชั่วโมง และเย็นลงถึง 4.44 C หรือต่ำกว่าภายใน 2 ชั่วโมง</p> <p>3. เพื่อทำให้น้ำนมดิบยังคงมีคุณภาพที่ดี ขณะเก็บควรคน แต่ควรคนให้น้อยที่สุด ทั้งนี้เพื่อลดอัตราการเกิด Off – Flavors</p> <p>4. ถ้าน้ำนมดิบมีปริมาณมาก การขนถ่ายมักเป็นแบบ Tanktruck ซึ่งรับน้ำนมได้ครั้งละมากๆ ขณะขนส่งไปยังโรงงานแปรรูปนมจะมีการควบคุมอุณหภูมิให้น้ำนมเย็นที่ 4.44 – 10 C</p> <p>5. โรงงานนมจะรับน้ำนมเพื่อนำไปแปรรูป หรืออาจเก็บรอไว้จนถึงที่ทำให้น้ำนมมีอุณหภูมิ 4.44 C</p> <p>6. เพื่อแยกเอาสิ่งสกปรก เช่น ขนสัตว์ ฝุ่นละออง ตลอดจนจุลินทรีย์บางส่วนออกไป การปรับมาตรฐานไขมันเป็นขั้นตอนแยกเอากรีม (หรือไขมัน) ออกจากน้ำนมดิบเพื่อทำให้น้ำนมดิบมีไขมัน 3.3% หรือตามที่ต้องการ</p> <p>7. เพื่อทำให้น้ำนมมีอายุการเก็บระยะหนึ่งโดยที่น้ำนมมีคุณภาพเหมาะสมต่อการดื่ม โดยทั่วไปนิยมใช้กระบวนการถ่ายเทความร้อนแบบ Plate Heat Exchange</p> <p>8. เป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพ Physical – Chemical Nature ของน้ำนมป้องกันไม่ให้เกิดการแยกชั้นของไขมัน</p> <p>9. บรรจุในภาชนะที่เหมาะสม เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพดี</p>
---	--

(วรรณ ตังเจริญชัย และวิบูลย์ศักดิ์ กาวิลละ. 2532 : 77)

พาสเจอร์ไรส์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการแปรรูปนม เป็นขั้นตอนที่ใช้ความร้อนในการทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เป็นโรค (Pathogenic Bacteria) ซึ่งอาจติดตามมาในน้ำนมดิบ ชื่อของกรรมวิธีพาสเจอร์ไรส์ นี้ตั้งตามชื่อของนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส Louis

Pasteur มาตรฐานพาสเจอร์ไรส์ คือ กรรมวิธีที่ทำให้ทุกอนุภาคของน้ำนมได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 63 C นาน 30 นาที เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นอันตราย (Pathogenic Bacteria) และเอนไซม์ในน้ำนม ซึ่งอาจจะทำลายคุณสมบัติของน้ำนมได้ เป็นการปรับปรุงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาการพาสเจอร์ไรส์ ต้องไม่ทำให้เกิดการเสียหายของผลิตภัณฑ์ เช่น เกิดตะกอน การเปลี่ยนสีของน้ำนมเป็นสีน้ำตาล เป็นต้น

รัฐ แพลกสวอนศรี (2538 : 19) ศึกษาวิธีการตรวจประสิทธิภาพของการผลิตของโรงงานนมพาสเจอร์ไรส์ที่เหมาะสมวิธีหนึ่งก็คือการตรวจหาอายุการเก็บของนมพาสเจอร์ไรส์ นมพาสเจอร์ไรส์ที่เสียช้าแสดงว่าโรงงานนั้นมีการจัดการที่ดี มีประสิทธิภาพในการผลิต จากการศึกษาของรัฐ พบว่าโรงงานที่มีการจัดการที่ดีมีกรรมวิธีการผลิตที่เหมาะสมมีประสิทธิภาพในการผลิตนั้น อายุการเก็บของนมพาสเจอร์ไรส์ควรมากกว่า 21 วัน แต่บางประเทศสั้นเพียง 3-7 วัน หรือ 9 วัน

จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2541 : 145) อธิบายสารคอลลอยด์ (Colloidal Solution) ดังนี้

สารละลายที่มีของเหลวเป็นตัวทำละลาย อาจแบ่งตามขนาดของอนุภาคของตัวละลายเป็น 2 พวก คือ

1. สารละลายแท้ (True Solution) หมายถึง สารละลายที่อนุภาคของตัวละลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 10^{-7} เซนติเมตร เช่น ละลายของกรด เบส เกลือ แอลกอฮอล์ น้ำตาล เป็นต้น

2. สารละลายคอลลอยด์ (Colloidal Solution) หมายถึง สารละลายที่อนุภาคของตัวละลายมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-7} ถึง 10^{-4} เซนติเมตร เช่น กำมะถันคอลลอยด์ (Colloidal Sulfur) น้ำนม น้ำสบู่ เป็นต้น

สารละลายคอลลอยด์อาจแบ่งตามสถานะของตัวทำละลายและสถานะของตัวละลายได้ 4 ประเภท

1. โซล (Sol หรือ Suspensoid) เกิดจากอนุภาคของแข็งกระจายอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว เช่น Milk of Magnesia $Mg(OH)_2$ ในน้ำ กำมะถันคอลลอยด์ (S_8 ในน้ำเตรียมได้โดยหยด HCl ลงในสารละลาย $Na_2S_2O_3$)

2. อิมัลชัน (Emulsion หรือ Emulsoid) เกิดจากอนุภาคของเหลวชนิดหนึ่งกระจายอยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง เช่น น้ำนม (ไขมันในน้ำ) น้ำสลัด (น้ำมันพืชในน้ำส้มสายชู)

3. เจล (Gel) เกิดจากอนุภาคของแข็งเรียงตัวกระจายเป็นตาข่ายทั่ว ๆ ไปในของเหลวอีกชนิดหนึ่ง ต่อเนื่องกันไป เช่น เยลลี่ (Jelly) หรือ เจลาติน (Gelatin)

4. ละอองลอย (Aerosol) เกิดจากอนุภาคของแข็งหรือของเหลวฟุ้งกระจายในแก๊ส เช่น คาร์บอนในอากาศ) หมอก (น้ำในอากาศ)

คอลลอยด์ส่วนใหญ่ที่พบเห็น คือ โซล โดยปกตินุภาคในคอลลอยด์จะฟุ้งกระจายทั่วไปในสารละลายไม่มีทิศทางที่แน่นอนหรือเคลื่อนที่แบบราวเนียน สารละลายคอลลอยด์จะไม่ตกตะกอน เพราะอนุภาคในคอลลอยด์กระทบหรือชนกันตลอดเวลาและอนุภาคมีขนาดเล็กมวลน้อย คอลลอยด์บางชนิดถึงแม้อนุภาคจะมีมวลมาก ก็ไม่ตกตะกอน เพราะอนุภาคมีประจุเหมือนกัน อาจจะเป็นประจุบวกหรือลบก็ได้ เวลาอนุภาคเข้ามาชิดกันจะผลักซึ่งกันและกัน

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

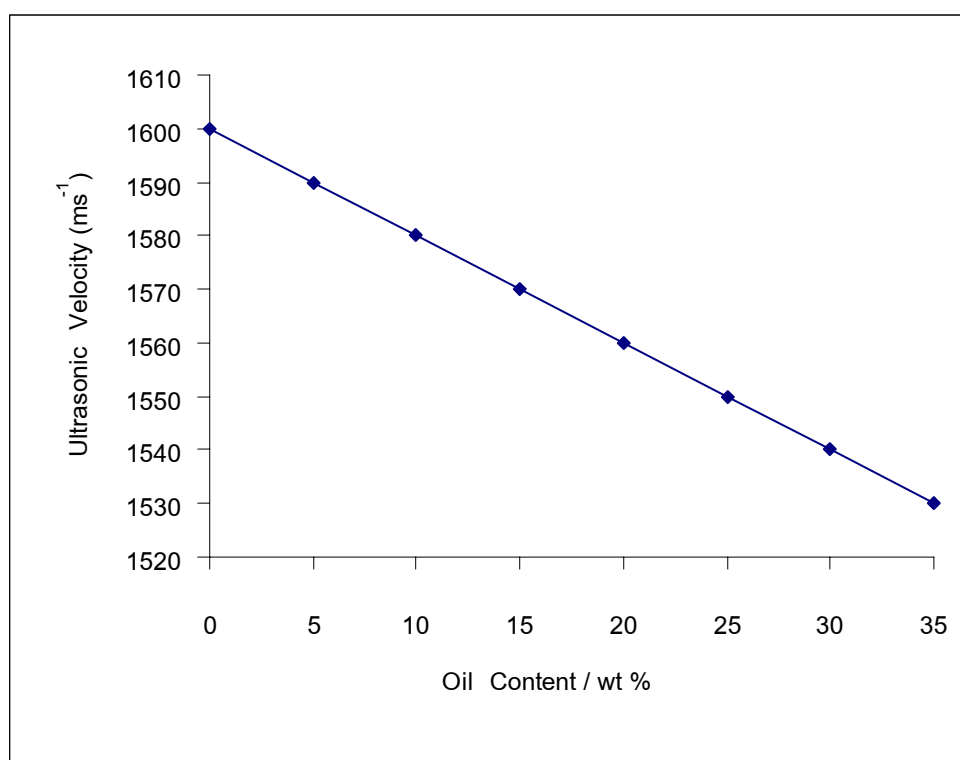
ศิริรัตน์ ด้วนนคร (2543 : 123–127) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นเครื่องยนต์โดยเทคนิคอัลตราโซนิกด้วยชุดทดลองอัลตราโซนิกเทคนิค เพื่อศึกษาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ ค่าบัลค์มอดุลัส และค่าสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิกในสารหล่อลื่นเครื่องยนต์ที่มีความหนืดต่างกัน 2 ชนิด คือ น้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ชนิดเกรดเดี่ยว 5 รหัส ได้แก่ SAE 30, SAE 40, SAE 50, SEA 90 และ SEA 140 และน้ำมันหล่อลื่นชนิด 2 รหัส ได้แก่ SEA 15 W – 40 และ SEA 20W – 50 ในช่วงอุณหภูมิ 30 – 60 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยปรากฏว่า ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัส เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิโดยความชันของกราฟลดลงแบบเชิงเส้น ซึ่งมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ ขณะเมื่ออุณหภูมิของสารหล่อลื่นเครื่องยนต์เพิ่มขึ้น สำหรับสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิกเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิแบบไม่เชิงเส้น แต่ลดแบบเอกซ์โพเนนเชียลที่อุณหภูมิต่างที่ใด ๆ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และบัลค์มอดุลัส มีค่าขึ้นกับความหนาแน่นของสารหล่อลื่นนั้น ๆ แต่การดูดกลืนคลื่นอัลตราโซนิกมีลักษณะเฉพาะ โดยแอมพลิจูดของคลื่นลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การลดคลื่นลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลในอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส

ปี ค.ศ. 1988 บี และคณะ (Bee and others. 1988 : 306-322) ได้ทำการศึกษาค่าความยืดหยุ่นของตัวกลางที่เป็นของเหลวประเภทอาหารเหลว โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ใช้ผสมอาหาร จากงานวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณของแข็งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในลักษณะเชิงเส้น

ปี ค.ศ. 1992 จอห์น และคณะ (John and others. 1992 : 191 – 194) ได้ทำการทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาสารอิมัลชัน พบว่า เมื่อส่งผ่านคลื่นอัลตราโซนิกผ่านตัวกลาง (สารอิมัลชัน) ตรวจพบว่า ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นกับอุณหภูมิของตัวกลาง เมื่อ

อุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มขึ้น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเพิ่มมากขึ้น และมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น

ปี ค.ศ. 1996 ดิกคินสัน และแม็คคลีแมน (Dickinson and McClements, 1995 : 191–192) ทำการทดลองหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในสารตัวอย่างที่เป็นคอลลอยด์ชนิดอิมัลชัน (ของเหลวละลายในของเหลว) คือ น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ ผลการทดลองดังแสดงภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 กราฟแสดงค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในอิมัลชัน กับความเข้มข้นของอิมัลชัน (น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ) โดยใช้ความถี่คลื่นอัลตราโซนิก 2.25 MHz (Dickinson and McClements, 1995 : 191)

ภาพประกอบ 4 เป็นกราฟแสดงค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกในอิมัลชัน คือน้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ โดยพิจารณาความเข้มข้นของน้ำมันดอกทานตะวันในอิมัลชัน

พบว่า ความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิกจะมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นของดอกทานตะวันเพิ่มขึ้น และมีลักษณะเชิงเส้น

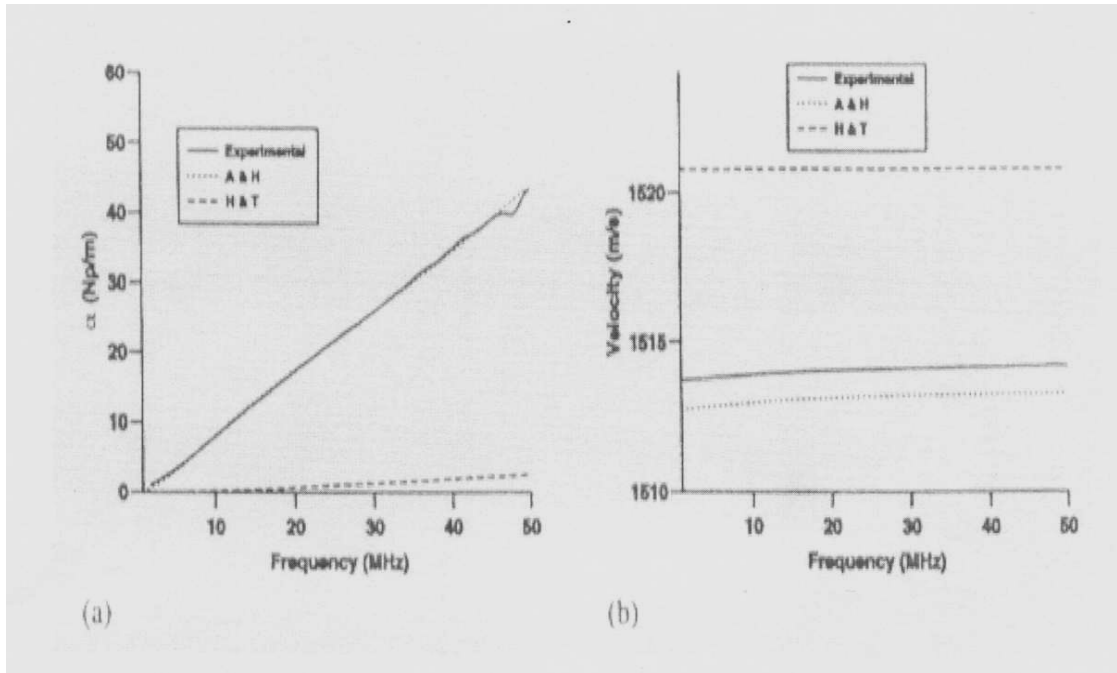
การทดลองนี้ให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับแบบจำลองของยูริค ซึ่งมีสมการอธิบายแบบจำลองตามสมการที่ 25 การเปลี่ยนแปลงของความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกขึ้นกับค่า (สัดส่วนความเข้มข้นต่อปริมาตรของอิมัลชัน) คือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความเข้มข้นต่อปริมาตรของสารอิมัลชัน กล่าวคือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าลดลง เมื่ออัตราส่วนความเข้มข้นต่อปริมาตรสารอิมัลชันเพิ่มขึ้น

ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะสัมพันธ์กับค่า ตามสมการของยูริค (Urick Equation)

$$\frac{1}{c^2} [k_2 (1 - k_1)]x [\quad (1 -)] \dots\dots\dots(25)$$

- เมื่อ c เป็นค่าความเร็วของคลื่นอัลตราโซนิก
- k_1 เป็นค่าคงตัวการอัดแบบอะเดียเบติกในสารที่ 1
- k_2 เป็นค่าคงตัวการอัดแบบอะเดียเบติกในสารที่ 2
- ρ_1 เป็นความหนาแน่นของสารที่ 1
- ρ_2 เป็นความหนาแน่นของสารที่ 2
- เป็นสัดส่วนความเข้มข้นต่อปริมาตรของสารอิมัลชัน

ออสติน และคณะ (Austin and others. 1996 : 369 – 374) ได้ทำการทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาสารแขวนลอยประเภทโลหะ และสารแขวนลอยดินขาว (Kaolin) โดยศึกษาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และสัมประสิทธิ์การดูดกลืน เมื่อเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารแขวนลอย ซึ่งจากผลการวิจัยหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน แล้วเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีแบบจำลองอัลลิกรา(Alligra) และฮาวเลย์ (Howley) ที่มีลักษณะของอนุภาคแขวนลอยแบบทรงกลม และทำการศึกษาการละลายและการจับตัวของดินขาวที่ละลายในตัวทำละลายด้วยทฤษฎีของฮาร์เกอร์(Harker) และเทมเปิล (Temple) ในช่วงความถี่ 2 – 50 MHz เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎี ซึ่งแสดงผลดังภาพประกอบ 5 ภาพประกอบ 6 และภาพประกอบ 7



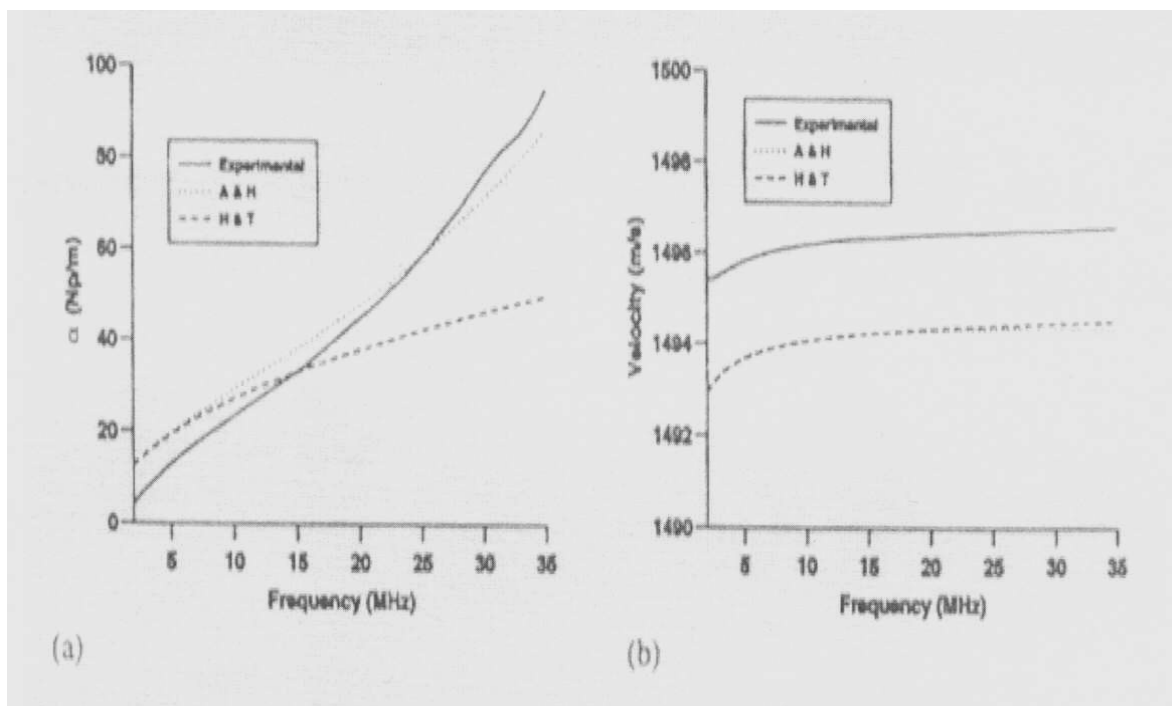
ภาพประกอบ 5 ความเข้มข้นร้อยละ 1 ของอนุภาคแขวนลอยของโลหะเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 μm ในน้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลอง กับแบบจำลองของ ฮาร์เกอร์ และเทมเปิล (H&T), อัลลิกรา และฮาวเลย์ (A&H)

(Austin J.C., et al. 1996 : 370)

ภาพประกอบ 5 อธิบายถึงผลการทดลองการใช้คลื่นอัลตราโซนิกหลายความถี่ ทดสอบสารแขวนลอยของโลหะในน้ำ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารแขวนลอย 4 μm ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลอง กับแบบจำลองของฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T), อัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H)

กราฟ (a) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเนเปอร์ต่อเมตร หรือ เดซิเบลต่อเมตร) และความถี่คลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมกะเฮิรตซ์) ปรากฏว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) คือผลการทดลองเมื่อให้ค่าความถี่คลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้น แล้ววัดค่าสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบเมื่อแทนค่าต่างๆ ในแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) จะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ส่วนแบบจำลองของ ฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T) ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองโดยให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิกน้อยกว่าผลการทดลอง

กราฟ (b) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมตรต่อวินาที) และความถี่คลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมกะเฮิรตซ์) ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) และ แบบจำลองของฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T)



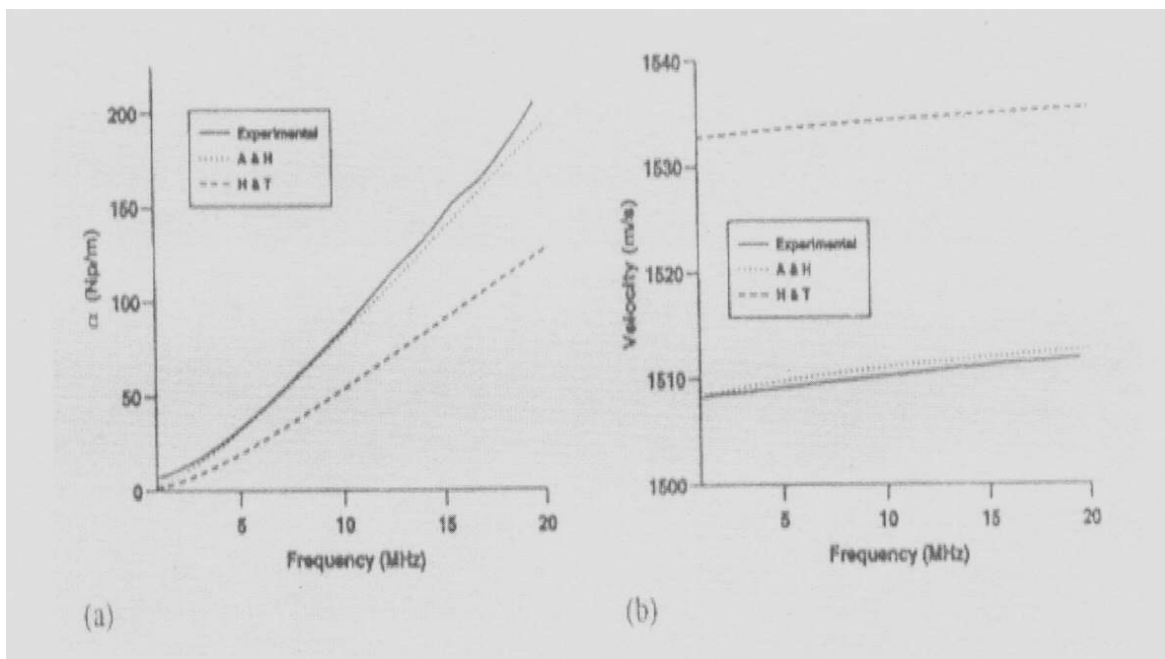
ภาพประกอบ 6 ความเข้มข้นร้อยละ 5.6 ของอนุภาคแขวนลอยของโพลีสเตอร์รีน เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 100 nm ในน้ำอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรียบผลการทดลอง กับแบบจำลองฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T), อัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H)

(Austin. J.C., et al. 1996 : 370)

ภาพประกอบ 6 อธิบายถึงผลการทดลองใช้คลื่นอัลตราโซนิกหลายความถี่ ทดสอบสารแขวนลอยโพลีสเตอร์รีนในน้ำ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5.6 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารแขวนลอย 100 nm ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลองกับแบบจำลองของฮาร์เกอร์ และเทมเปิล (H&T), อัลลิกรา และฮาวเลย์ (A&H)

กราฟ (a) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเนเปอร์ต่อเมตร หรือ เดซิเบลต่อเมตร) และความถี่คลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมกะเฮิรตซ์) ปรากฏว่าผลการทดลองไม่สอดคล้องกับแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) และ แบบจำลองของฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T)

กราฟ (b) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมตรต่อวินาที) และความถี่คลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมกะเฮิรตซ์) ผลการทดลองไม่สอดคล้องกับแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) และ แบบจำลองของฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T) เมื่อพิจารณาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจากกราฟ (b) แบบจำลองทั้งสองแบบให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบ 7 ความเข้มข้นร้อยละ 8 ของอนุภาคแขวนลอยซิลิกา เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 320 nm ในน้ำอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบผลการทดลอง กับแบบจำลองฮาร์เกอร์และเทเปิล (H&T), อัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) (Austin J.C., et al. 1996 : 371)

ภาพประกอบ 7 อธิบายถึงผลการทดลองการใช้คลื่นอัลตราโซนิกหลายความถี่ ทดสอบสารแขวนลอยซิลิกาในน้ำ ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 8 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของสารแขวนลอย 320 nm ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

กราฟ (a) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเนเปอร์ต่อเมตร หรือ เดซิเบลต่อเมตร) และความถี่คลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมกะเฮิร์ตซ์) ปรากฏว่า ผลการทดลองสอดคล้องกับแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) คือ ผลการทดลองเมื่อให้ค่าความถี่คลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้น แล้ววัดค่าสัมประสิทธิ์การลดคลื่นอัลตราโซนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเปรียบเทียบเมื่อแทนค่าต่างๆ ในแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) จะให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลอง ส่วนแบบจำลองของ ฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T) ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง

กราฟ (b) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมตรต่อวินาที) และความถี่คลื่นอัลตราโซนิก (หน่วยเมกะเฮิร์ตซ์) ผลการทดลองมีค่าสอดคล้องกับแบบจำลองของอัลลิกราและฮาวเลย์ (A&H) คือ ผลการทดลองเมื่อให้ค่าความถี่คลื่นอัลตราโซนิกเพิ่มขึ้น แล้ววัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนแบบจำลองของฮาร์เกอร์และเทมเปิล (H&T) ไม่สอดคล้องกับผลการทดลอง

บทที่ 3

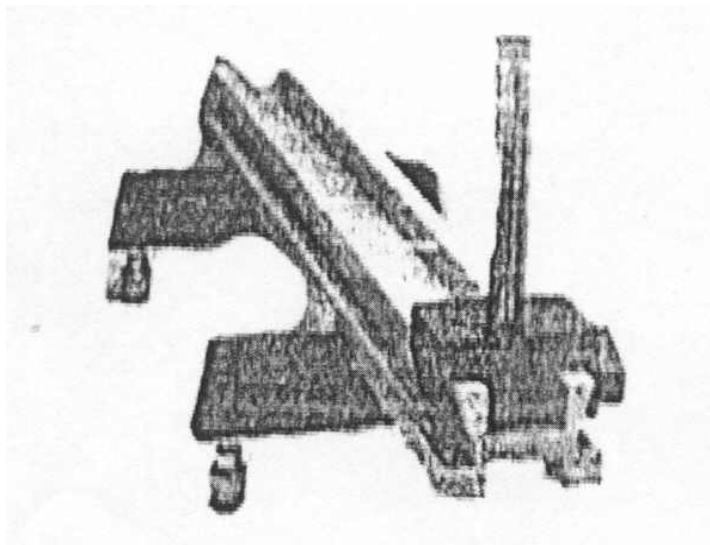
วัสดุอุปกรณ์และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษา และทำตามขั้นตอนดังนี้

- 3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย
- 3.2 ขั้นตอนการเลือก และสร้างอ่างใส่สารตัวอย่างขนาดเล็ก
- 3.3 ขั้นตอนการปรับเทียบอุปกรณ์
- 3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

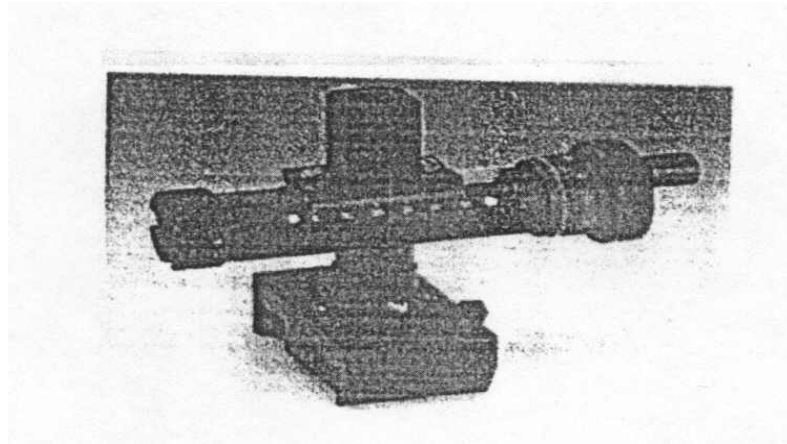
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. รางเลื่อน (Bench)



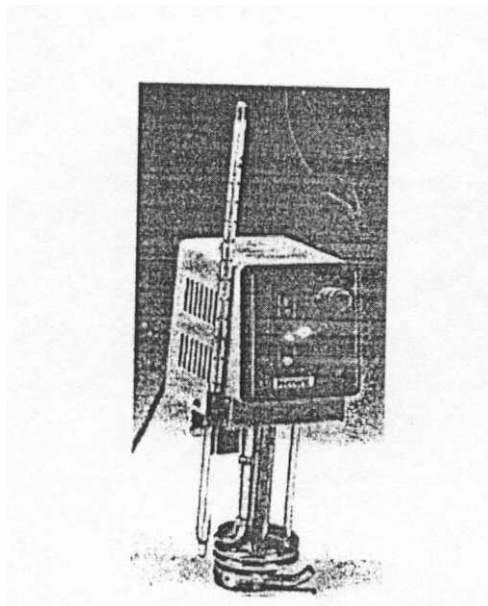
ภาพประกอบ 8 รางเลื่อน

2. ฐานเลื่อนสเกลเวอร์เนีย (Slide Mount)



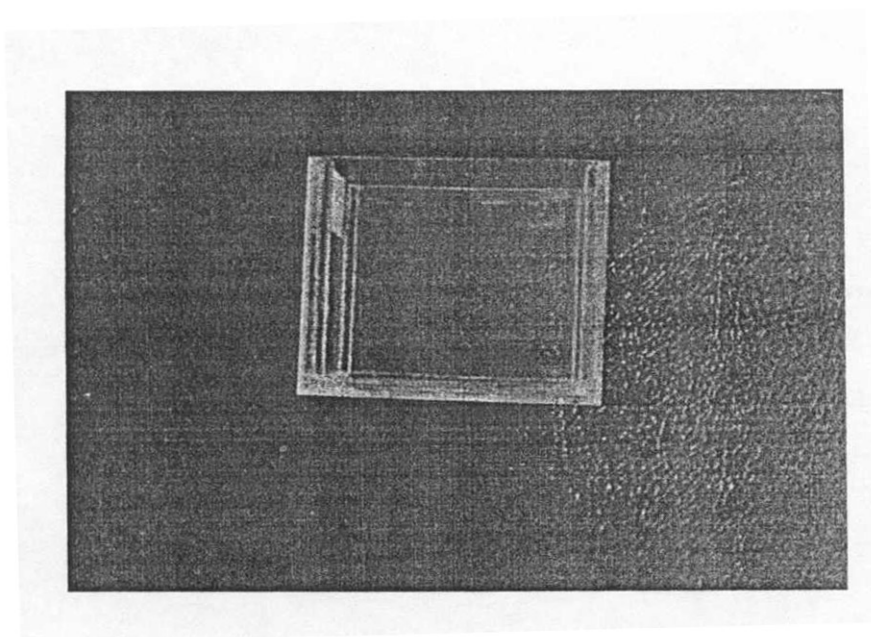
ภาพประกอบ 9 ฐานเลื่อนสเกลเวอร์เนีย

3. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ (Immersion Thermostats)



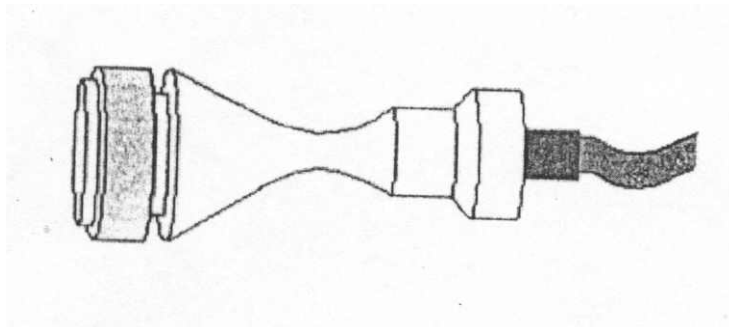
ภาพประกอบ 10 อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ

4. เครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Generator) ความถี่ 812 กิโลเฮิรตซ์
5. เครื่องนับสัญญาณดิจิทัล (Digital Counter)
6. ดิจิทัลออสซิลโลสโคป (Digital Oscilloscope) ขนาด 60 เมกะเฮิรตซ์
7. เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
8. อ่างใส่น้ำขนาด 5 ลิตร (Bath Vessel)
9. อ่างใส่สารตัวอย่างที่ทำจากพลาสติก ขนาด 252 มิลลิลิตร



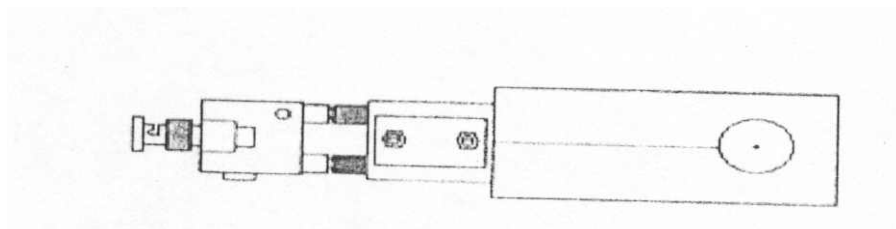
ภาพประกอบ 11 อ่างใส่สารตัวอย่าง

10. อัลตราโซนิกทรานส์ดีวเซอร์ (Ultrasonic Transducer) 2 ตัว ได้แก่
10.1 ตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก (Gtransmitter)



ภาพประกอบ 12 ตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก

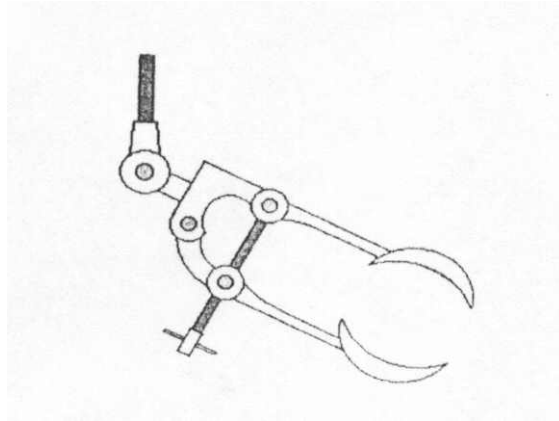
- 10.2 ตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก (Receiver)



ภาพประกอบ 13 ตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก

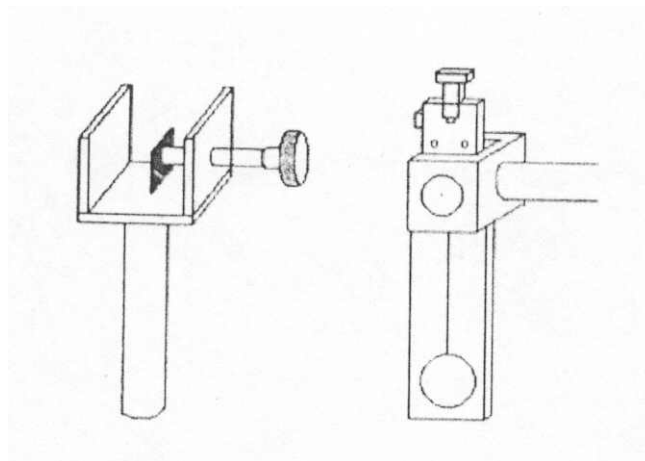
11. ตัวจับยึดอุปกรณ์ (Plate Holder) ได้แก่

11.1 ตัวจับตัวส่งคลื่นอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 14 ตัวจับ Transmitter

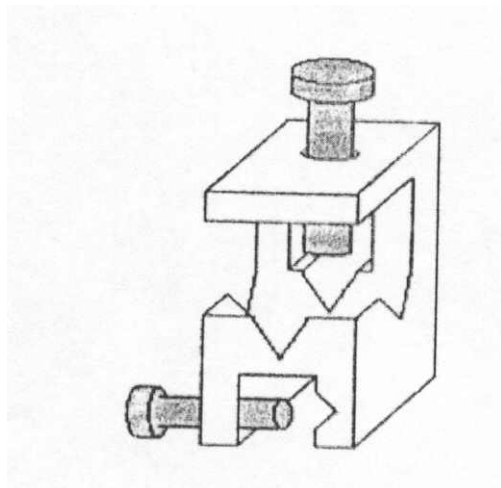
11.2 ตัวจับตัวรับคลื่นอัลตราโซนิก



ภาพประกอบ 15 ตัวจับ Receiver

11.3 ตัวจับเทอร์โมมิเตอร์

11.4 ตัวยึดสองทาง



ภาพประกอบ 16 ตัวยึดสองทาง

12. เจล ใช้สำหรับเชื่อมตัวส่ง (Couplant for Ultrasonic Testing)
13. สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง คือ นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด
 - 13.1 นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)
 - 13.2 นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)
 - 13.3 นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)
 - 13.4 นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)
 - 13.5 นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

3.2 ขั้นตอนเลือก และสร้างอ่างใส่สารตัวอย่างขนาดเล็ก

สมบัติทางกายภาพของนมพาสเจอร์ไรส์ ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (specific impedance) บัลค์มอดุลัส (bulk modulus) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนเลือกภาชนะใส่สารตัวอย่างและทดสอบประสิทธิภาพกับสารตัวอย่างที่ทำการทดลองเปรียบเทียบสารตัวอย่าง คือ น้ำ และกลีเซอริน ขั้นตอนการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในสารคอลลอยด์นม คือนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด (ที่มีปริมาณไขมันและแคลเซียมแตกต่างกัน) และขั้นตอนการหาความหนาแน่นของสารตัวอย่าง ซึ่งจะทำการทดลองในช่วงอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 เลือกอ่างใส่สารตัวอย่างและทดสอบประสิทธิภาพ

3.2.1.1 เลือกชนิดอ่างใส่สารตัวอย่างปริมาตร 252 มิลลิลิตร ขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 8.0 เซนติเมตร และสูง 7.0 เซนติเมตร โดยทำจาก อลูมิเนียม สแตนเลส พลาสติก

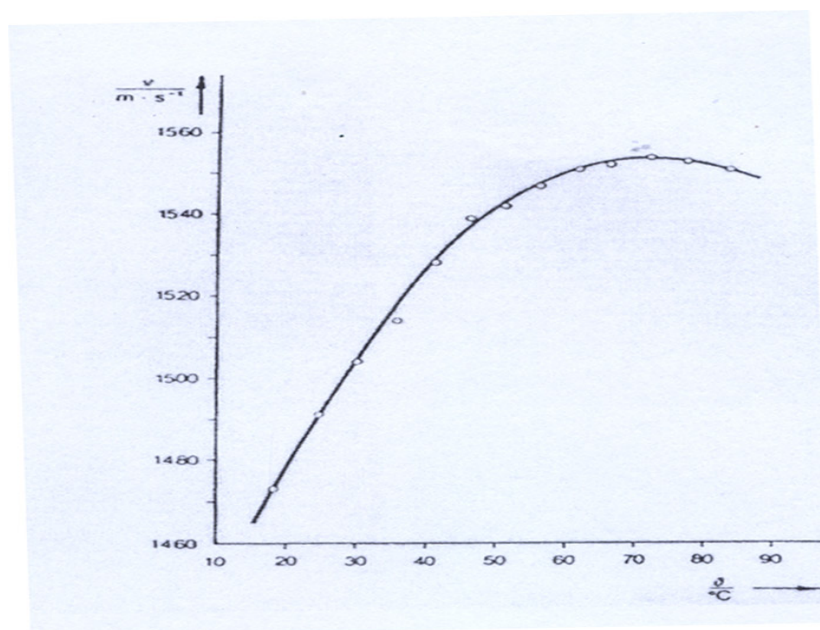
3.2.1.2 ใส่สารตัวอย่าง คือ น้ำ กลีเซอริน ลงในอ่างที่ทำจาก อลูมิเนียม สแตนเลส พลาสติก ไม่เติมสารตัวอย่างเต็มอ่างเพราะต้องจุ่มทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับในสารตัวอย่าง

3.2.1.3 ทดสอบประสิทธิภาพอ่าง โดยหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในสารตัวอย่าง คือ น้ำ กลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่า อ่างที่ทำจากพลาสติกให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองชุดการหาความเร็วของเสียงในของเหลวของการทดลองระดับมหาวิทยาลัย (University Laboratory Experiments Vol 1 – 5 : 101 – 102) ส่วนอ่างที่ทำจาก อลูมิเนียม สแตนเลส คลื่นอัลตราโซนิกไม่สามารถตรวจวัดได้เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มขึ้น

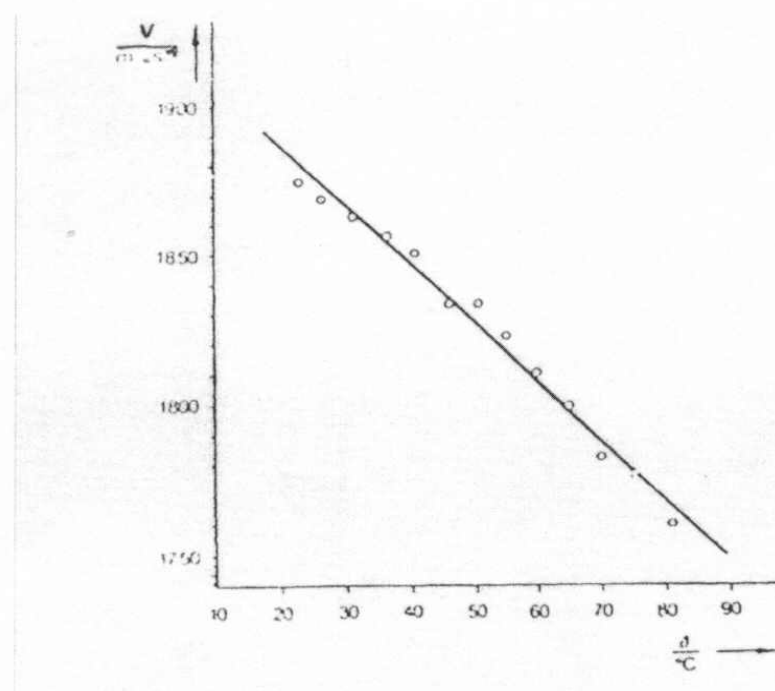
3.2.1.4 เลือกใช้อ่างใส่สารตัวอย่างที่ทำจากพลาสติก ปริมาตร 252 มิลลิลิตร ขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 8.0 เซนติเมตร และสูง 7.0 เซนติเมตร ทดลองกับนมพาสเจอร์ไรส์ ทั้ง 5 ชนิด

3.3 ขั้นตอนการเปรียบเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

ขั้นตอนนี้จะใช้อ่างพลาสติกข้อ 3.2.1.3 เปรียบเทียบกับคู่มือประกอบการทดลองชุดทดลองการหาความเร็วของเสียงในของเหลวของการทดลองระดับมหาวิทยาลัย (University Laboratory Experiments Vol 1- 5 : 101 – 102) ซึ่งใช้สารตัวอย่างเป็นน้ำและกลีเซอรินที่อุณหภูมิ 20 – 80 องศาเซลเซียส โดยค่าที่ใช้ได้จะต้องให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกัน สำหรับขั้นตอนการทดลองเปรียบเทียบอุปกรณ์จะเหมือนกับขั้นตอนการทดลองจริงทุกขั้นตอนเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองกับกราฟความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้



ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำที่อุณหภูมิต่างๆ
(University Laboratory Experiments : Physics Vol 1 – 5, 101)



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในกลีเซอรินที่อุณหภูมิต่างๆ
(University Laboratory Experiments : Physics Vol 1 – 5, 102)

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 ขั้นตอนการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

การตรวจวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในตัวกลางที่เป็นนมพาสเจอร์ไรส์ แบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

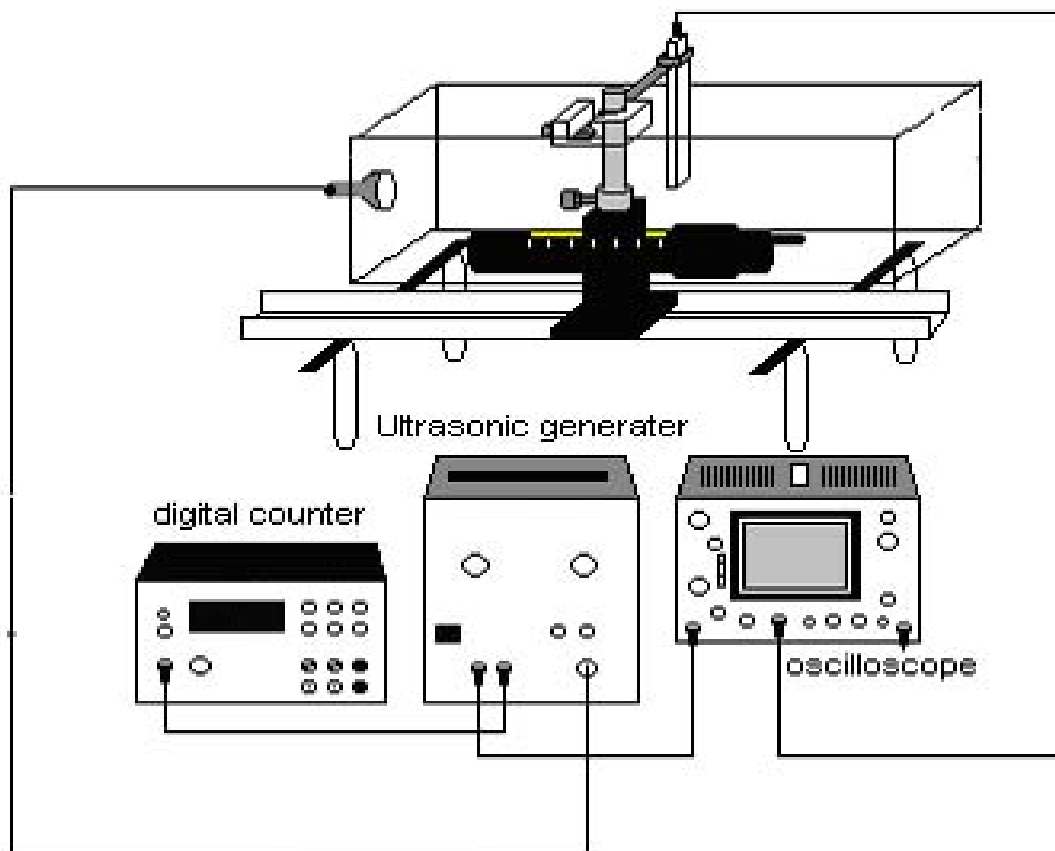
3.4.1.1 ติดตั้งทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่ง (Transmitter Transducer) ให้ผิวหน้าของทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งอยู่ตำแหน่งตรงและขนานกับทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ (Receiver Transducer) ติดตั้งโดยวางทาบติดกับผนังของขอบอ่างที่ใส่น้ำ 5 ลิตร และทาเจลที่หัวทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งและส่วนที่สัมผัสบริเวณอ่างที่ใส่น้ำเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอากาศระหว่างตัวส่งกับผนังอ่าง

3.4.1.2 ต่อสายส่งจากตัวส่งเข้ากับเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก (Ultrasonic Generator) โดยเลือกคลื่นที่เป็นรูปไซน์

3.4.1.3 ต่อสัญญาณขาออก (Output) จากเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเข้าสู่เครื่องนับสัญญาณเพื่อวัดความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่ส่งออกมา

3.4.1.4 เทน้ำใสภาชนะขนาด 5 ลิตร เทนมพาสเจอร์ไรส์ที่ต้องการใส่อ่างขนาดเล็กที่ทำจากพลาสติก ปริมาตร 252 มิลลิลิตร ขนาดกว้าง 4.5 เซนติเมตร ยาว 8.0 เซนติเมตร และสูง 7.0 เซนติเมตร แล้ววางอ่างพลาสติกขนาดเล็กในภาชนะขนาด 5 ลิตร ที่มีน้ำอยู่

3.4.1.5 ต่อทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ (Receiver) เข้ากับเวอร์เนียร์ และให้ปลายอีกด้านหนึ่งของทรานส์ดิวเซอร์จุ่มลงในนมพาสเจอร์ไรส์ ปรับระดับตัววัดของทรานส์ดิวเซอร์ให้ตรงกับระดับที่คลื่นถูกส่งออกมาจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่ง ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมด

3.4.1.6 ต่อสายรับสัญญาณจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับและสัญญาณจากเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิกเข้ากับเครื่องดิจิทัลออสซิลอสโคป ใช้ช่องสัญญาณที่ 1 รับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก และช่องสัญญาณที่ 2 รับสัญญาณที่วัดได้ในสารตัวอย่าง คือนมพาสเจอร์ไรส์ จากอ่างพลาสติกขนาดเล็ก

3.4.1.7 ปรับระยะทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ (ปรับจากเวอร์เนียที่หมุนแล้วทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับเคลื่อนไปด้วย) และปรับเฟสของคลื่นอัลตราโซนิกให้สัญญาณที่ได้ทั้งสองบนจอเครื่องดิจิทัลออสซิลอสโคปมีเฟสตรงกัน จะได้ระยะ l_1 ซึ่งเป็นระยะที่คลื่นสองคลื่นมีเฟสตรงกันครั้งที่ 1

3.4.1.8 เมื่อหน้าจอเครื่องดิจิทัลออสซิลอสโคปปรากฏคลื่นรูปไซน์สองคลื่น โดยที่คลื่นรูปหนึ่งจะมีลักษณะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนคลื่นอีกรูปหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่ส่งมาจากทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ

3.4.1.9 หมุนเวอร์เนียเพื่อปรับระยะทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับ เพื่อที่จะได้ระยะที่คลื่นทั้งสองรูปมีเฟสตรงกันใหม่อีกครั้ง ระยะนี้ คือ l_2 และหมุนเวอร์เนียเพื่อทำให้คลื่นมีเฟสตรงกันครั้งต่อไป อัตราการเปลี่ยนค่า l หรือ l เป็นระยะที่เฟสของคลื่นเปลี่ยนไป ซึ่งเป็นระยะที่คลื่นเปลี่ยนไปหนึ่งรอบ หรือหนึ่งความยาวคลื่น

3.4.1.10 เมื่อเปลี่ยนระยะระหว่างทรานส์ดิวเซอร์ตัวส่งกับทรานส์ดิวเซอร์ตัวรับโดยการหมุนเวอร์เนีย จะได้ระยะ l และเฟสของสัญญาณจะแตกต่างกันเป็น ϕ ซึ่งเริ่มแรก $\phi = 0$ จะได้ว่า

ถ้าระยะความยาวคลื่นคือ		มุมเฟสจะเปลี่ยนไป	2
ถ้าเปลี่ยนระยะเท่ากับ	l	มุมเฟสจะเปลี่ยนไป	$\frac{2\pi l}{\lambda}$

ดังนั้นถ้าเปลี่ยนระยะ l ให้คลื่นบนเครื่องดิจิทัลออสซิลอโคปมีเฟสตรงกันอีกครั้ง ซึ่งก็คือตำแหน่งส่วนอัดของคลื่น 2 ขบวน จะได้ว่า

$$2l = n\lambda$$

จะได้ว่า

$$l = \frac{n\lambda}{2}$$

ดังนั้นความยาวคลื่นในตัวกลางหาได้จาก

$$\lambda = \frac{2l}{n} \quad \dots\dots\dots(26)$$

เมื่อ f เป็นความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้จากเครื่องนับสัญญาณดิจิทัล และจากการทดลองความถี่มีค่าคงที่ คือ 812 กิโลเฮิรตซ์

3.4.1.11 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในอ่างที่มีน้ำปริมาตร 5 ลิตร

3.4.1.12 เติมน้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง คือ นมพาสเจอร์ไรส์ ลงในอ่างพลาสติกขนาดเล็ก

3.4.1.13 เปิดเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตราโซนิก เพื่อกระตุ้นให้ทรานส์ดิวเซอร์สร้างคลื่นอัลตราโซนิก

3.4.1.14 เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อปรับอุณหภูมิของสารตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง จากค่าอุณหภูมิห้องให้มีอุณหภูมิต่ำๆ สูงขึ้นจนถึงค่าที่ต้องการจะวัด

3.4.1.15 ปรับระยะห่างของทรานส์ดีวเซอร์ตัวส่งกับทรานส์ดีวเซอร์ตัวรับโดยให้ระยะห่างเป็น I_1 โดยให้มีระยะเท่ากับความยาวคลื่นเมื่อมีคลื่นสะท้อนและเป็นคลื่นนิ่งที่มีเฟสตรงกัน

3.4.1.16 บันทึกค่าความยาวคลื่นจากสัญญาณคลื่นสะท้อนกลับครั้งที่ 1 ได้ค่า I_1 แล้วทำการหมุนเวอร์เนียร์เพื่อทำการเปลี่ยนระยะทรานส์ดีวเซอร์ตัวส่งกับทรานส์ดีวเซอร์ตัวรับเป็นครั้งที่ $I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9, I_{10}$ แล้วบันทึกค่าความยาวคลื่นที่ตำแหน่งต่างๆ และทำการวัดที่อุณหภูมิเดียวกันเป็นจำนวน 10 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยของความยาวคลื่น (นำค่า I ทั้งสิบค่ามาเฉลี่ยจะได้ค่า I) ณ ตำแหน่ง อุณหภูมินั้น

3.4.1.17 ทำการทดลองซ้ำ ตามหัวข้อ 3.4.1.12 ถึง 3.4.1.16 โดยการเปลี่ยนอุณหภูมิจาก 30 องศาเซลเซียส เพิ่มอุณหภูมิครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.4.1.18 ทำการทดลองซ้ำ ตามหัวข้อ 3.2.2.17 อีก 4 ครั้ง

3.4.1.19 ทำการทดลอง ตามหัวข้อ 3.4.1.12 ถึง 3.4.1.16 โดยการเปลี่ยนเป็นนมพาสเจอร์ไรส์ชนิดต่างๆ คือ

-นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

-นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

-นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

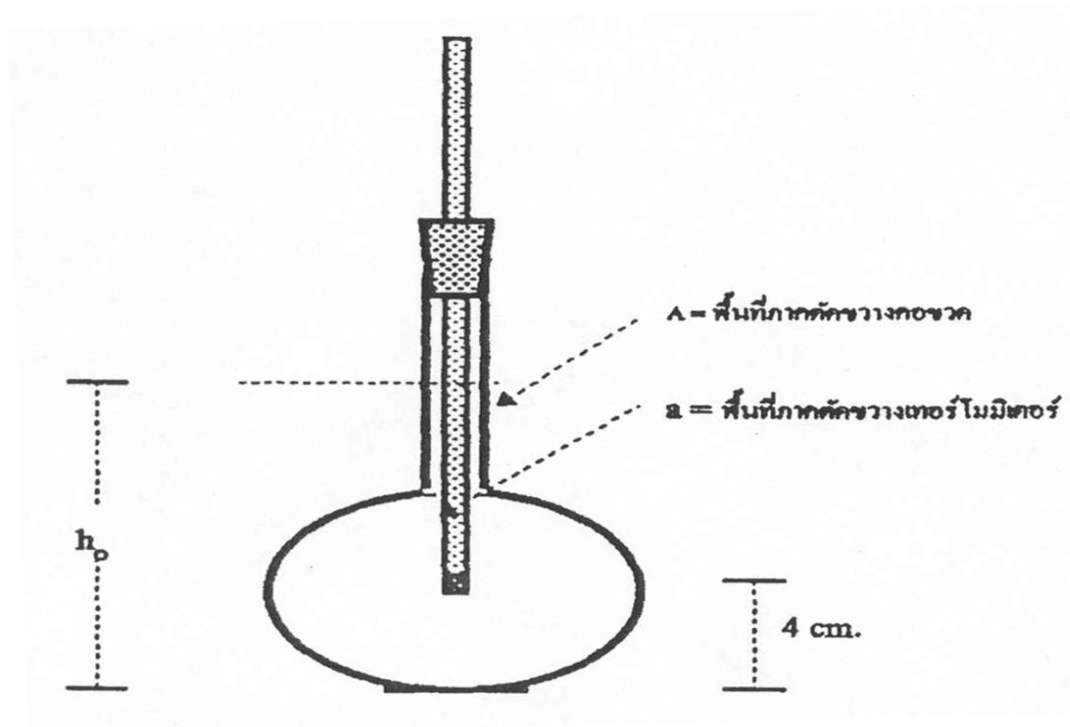
-นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

-นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

3.4.1.20 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้กับอุณหภูมิ

3.4.2 ขั้นตอนการหาความหนาแน่น

การหาความหนาแน่นนมพาสเจอร์ไรส์ เมื่อของเหลวได้รับความร้อนจากภายนอกจะเกิดการขยายตัวที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ลดลง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 20 ขวดแก้วรูปชมพู่

3.4.2.1 นำขวดแก้วชมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีเกลอบก ระดับความสูงของขวดไปซังน้ำหนักบนเครื่องชั่งดิจิทัลความละเอียดสูง แล้วทำการวัดพื้นที่ภาคตัดขวางของคอขวดพร้อมกับเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0–100 องศาเซลเซียสและวัดพื้นที่ภาคตัดขวางของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ด้วย

3.4.2.2 ตวงนมพาสเจอร์ไรส์ลงในขวดแก้วรูปชมพู่จนมีปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำไปหามวลของนมพาสเจอร์ไรส์

3.4.2.3 ปิดปากขวดแก้วรูปชมพู่ด้วยจุกยางที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ให้สนิท โดยให้กระเปาะปรอทของเทอร์โมมิเตอร์อยู่ที่ระดับความสูงจากก้นขวดรูปชมพู่ 4 เซนติเมตร

3.4.2.4 วางขวดแก้วรูปชมพู่ที่มีนมพาสเจอร์ไรส์ลงในอ่างใส่น้ำ 5 ลิตร พร้อมทั้งบันทึกระดับความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์ในขวดแก้วรูปชมพู่และอุณหภูมิขณะเริ่มต้น

3.4.2.5 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิที่อ่างใส่น้ำขนาด 5 ลิตร

3.4.2.6 เปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำในอ่างจนทำให้ อุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ในขวดแก้วรูปชมพู่ค่อยๆ สูงขึ้นจากอุณหภูมิตั้งเดิมจนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการจะวัด

3.4.2.7 บันทึกค่าอุณหภูมิขณะใด ๆ กับความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์ในขวด แก้วรูปชมพู เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งจนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการจะวัด ตามลำดับ

3.4.2.8 กำหนดค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ในหัวข้อที่ 3.4.2.6 ดังนี้

$$T \frac{m}{V_T} \dots\dots\dots(27)$$

เมื่อ

- T เป็นความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T
- m เป็นมวลของนมพาสเจอร์ไรส์
- V_T เป็นปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T

ในการทดลองจะได้ว่า ค่า V_T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่า

$$V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0) \dots\dots\dots(28)$$

- โดย V_0 เป็นปริมาตรที่อุณหภูมิตั้ง ซึ่งเท่ากับ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- h_0 เป็นระดับความสูงเริ่มต้นของนมพาสเจอร์ไรส์
- h_T เป็นระดับความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T
- A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดแก้วรูปชมพู
- a เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์

3.4.2.9 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.4.2.2 ถึง 3.4.2.8 ใหม่อีก 4 ครั้ง

3.4.2.10 เปลี่ยนของเหลวตัวอย่างเป็นนมพาสเจอร์ไรส์ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด โดยทำตามขั้นตอนตั้งแต่ข้อ 3.4.2.2 ถึง 3.4.2.9 ตามลำดับ

3.4.2.11 เขียนกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์กับ อุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ ทั้ง 5 ชนิด เพื่อนำไปใช้หาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และ ค่าบัลค์มอดุลัส ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ (Specific Impedance) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$Z = c \dots\dots\dots(29)$$

- โดยที่ Z เป็นค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ
- เป็นค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์
- c เป็นค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

ค่าบัลค์มอดุลัส (Bulk Modulus) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\beta = \rho c^2 \quad \dots\dots\dots(30)$$

โดยที่

- β เป็นค่าบัลค์มอดุลัส
- ρ เป็นค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์
- c เป็นค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนที่ของคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ แบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการปรับเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น คือ อ่างใส่นมพาสเจอร์ไรส์ ขั้นตอนการวิเคราะห์หาความเร็วคลื่นในนมพาสเจอร์ไรส์ ขั้นตอนการหาความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ ขั้นตอนการหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และขั้นตอนการหาค่าบัลค์มอดุลัสนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ได้แก่

1. นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) = FM
2. นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) = PM
3. นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) = LFM
4. นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) = LFHM
5. นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk) = NFHM

ผลการปรับเทียบอุปกรณ์

ผลการปรับเทียบอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น คือ อ่างใส่นมตัวอย่างที่ทำจากพลาสติก คือ การวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น โดยมีผลการวัดความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส แสดงไว้ใน ตาราง 3

ตาราง 3 ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก โดยใช้อ่างที่สร้างขึ้น (m/s)	ความเร็วมาตรฐานของน้ำ กลั่นจากสมการ (17) (m/s)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน
30	1508	1507	0.066
35	1518	1517	0.066
40	1527	1526	0.065
45	1535	1534	0.065
50	1543	1541	0.130
55	1548	1546	0.129
60	1555	1552	0.193

ผลการทดสอบอย่างพลาสติกกับการวัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่นที่ทราบค่าความเร็วมาตรฐาน ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 C ถึง 60 C พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่นมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 0.193 เปอร์เซ็นต์ จึงใช้อ่างพลาสติกในการทดลอง ส่วนอ่างที่ทำจากอลูมิเนียม สเตนเลส นั้นไม่ใช้เพราะคลื่นอัลตราโซนิกไม่สามารถตรวจวัดได้เมื่ออุณหภูมิตั้งแต่ 50 องศาเซลเซียสขึ้นไป

ตาราง 4 แสดงปริมาณไขมัน และแคลเซียมในนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

นมพาสเจอร์ไรส์	ร้อยละของปริมาณไขมันที่แนะนำต่อวัน*	ร้อยละของปริมาณแคลเซียมที่แนะนำต่อวัน*
นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)	17 %	36 %
นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)	12 %	25 %
นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)	5 %	30 %
นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)	5 %	55 %
นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)	0 %	35 %

ข้อมูลจากฉลากโภชนาการ ข้างขวดนมพาสเจอร์ไรส์ ยี่ห้อเมจิ ขนาด 830 มิลลิลิตร

*สถาบันวิจัยโภชนาการ มหาวิทยาลัยมหิดล (ฉลาดซื้อ, 2543 : 190) อธิบายความหมายของร้อยละจากข้อมูลฉลากโภชนาการ คือ ร้อยละของปริมาณที่แนะนำต่อวัน เช่น ถ้าฉลากโภชนาการ ระบุว่านมกล่องนั้นให้คาร์โบไฮเดรต 8 % หมายความว่านมกล่องนั้นให้คาร์โบไฮเดรต 8 % ต่อร่างกายต่อวัน เราต้องรับคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งอาหารอื่นอีก 92 % ถึงจะครบตามที่ร่างกายต้องการในหนึ่งวัน

ขั้นตอนการวิเคราะห์หาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์

จากผลการทดลองวัดความยาวคลื่นของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด และค่าความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกจากเครื่องกำเนิดอัลตราโซนิกที่ใช้ในการทดลองที่มีค่าคงตัว 812 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยนำมาคำนวณหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (c) ในนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส โดยใช้สมการ (26) ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วที่ได้กับอุณหภูมิตามลำดับ ดังนี้

$$c = f \lambda$$

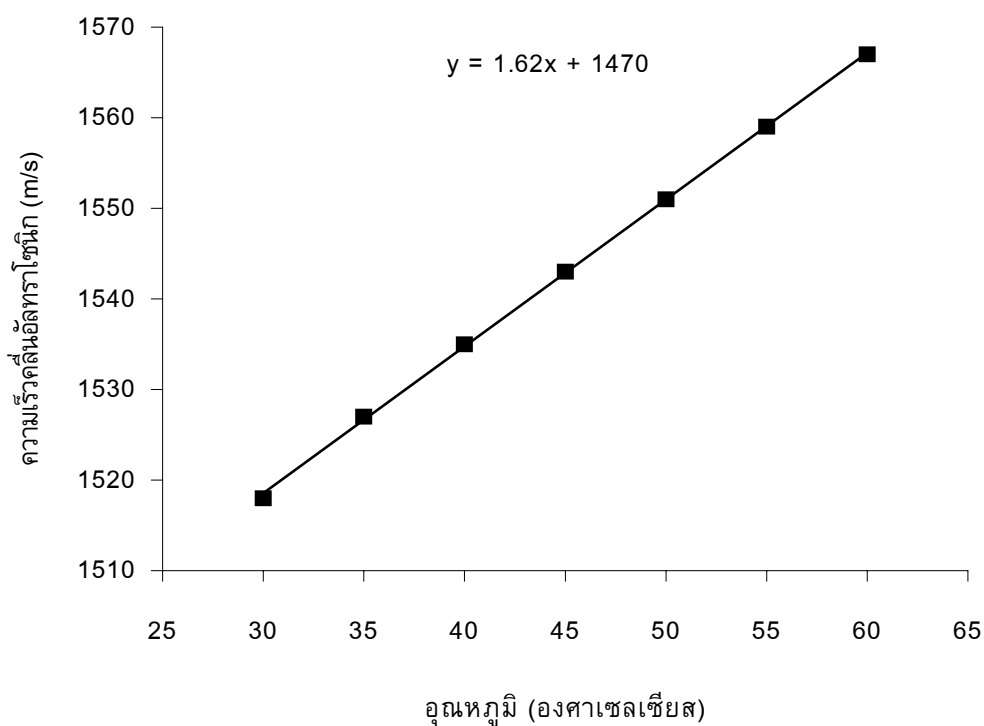
เมื่อ

c เป็นความยาวคลื่นอัลตราโซนิก

f เป็นความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิกที่วัดได้จากเครื่องนับดิจิทัล และจากการทดลองความถี่มีค่าคงที่ คือ 812 กิโลเฮิร์ตซ์

ตาราง 5 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)
30	1518
35	1527
40	1535
45	1543
50	1551
55	1559
60	1567

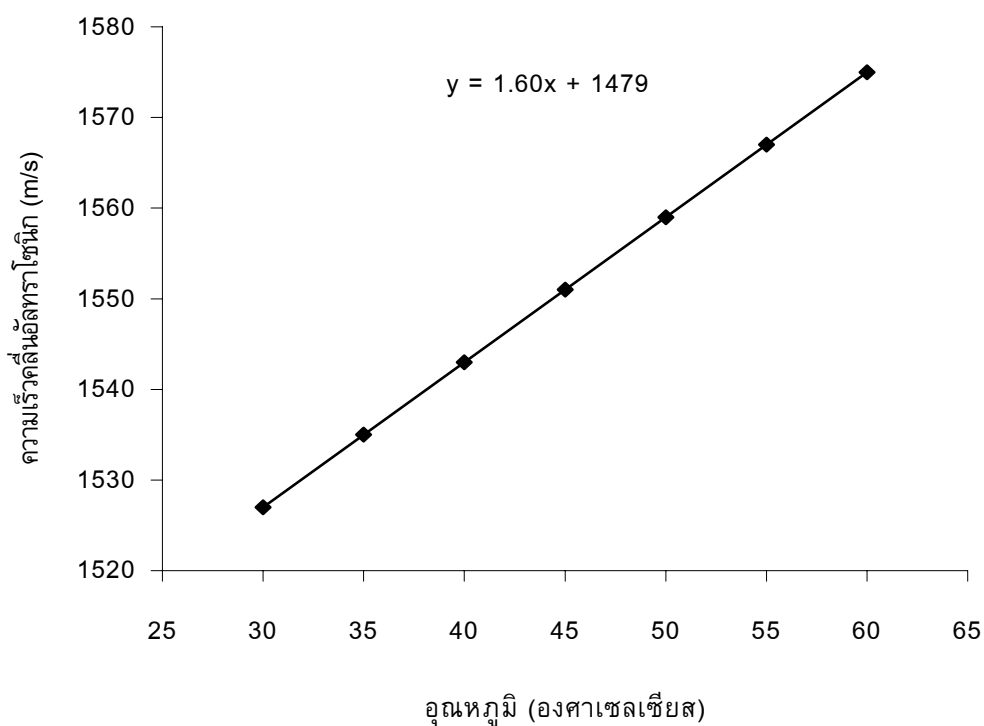


ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 1.62x + 1470$

ตาราง 6 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์
(Pasteurized Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)
30	1527
35	1535
40	1543
45	1551
50	1559
55	1567
60	1575

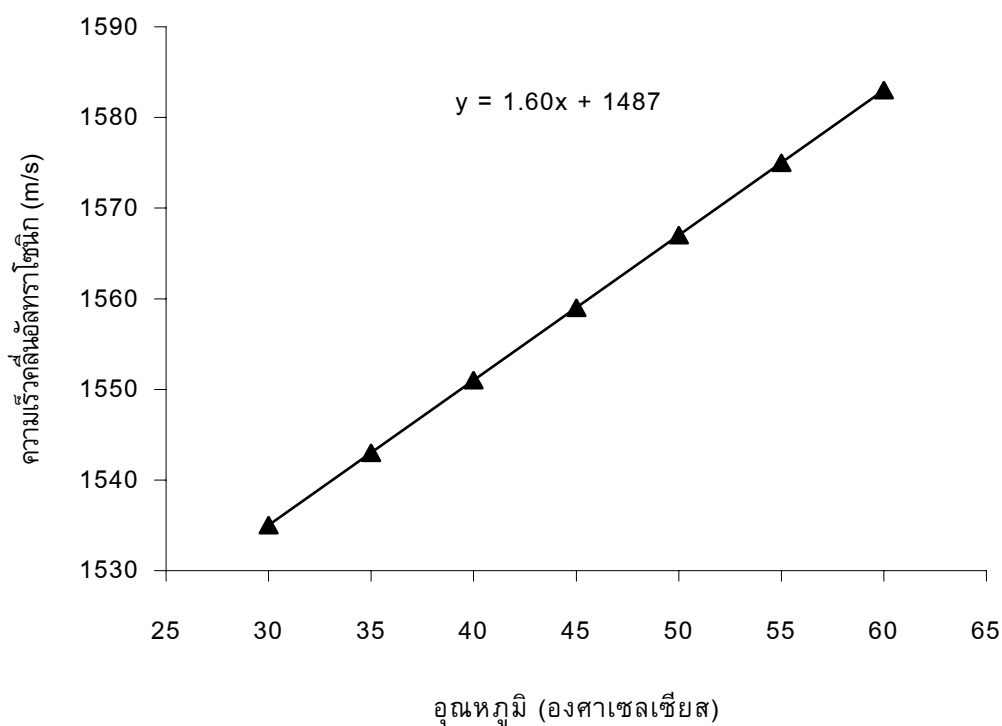


ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 1.60x + 1479$

ตาราง 7 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)
30	1535
35	1543
40	1551
45	1559
50	1567
55	1575
60	1583

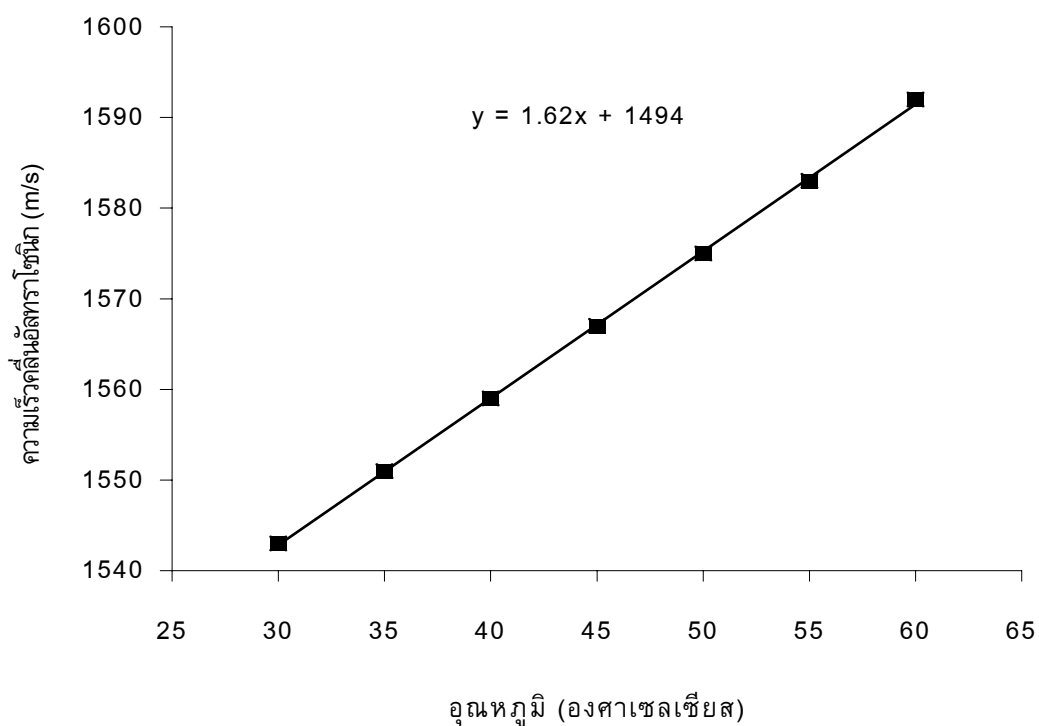


ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 1.60x + 1487$

ตาราง 8 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)
30	1543
35	1551
40	1559
45	1567
50	1575
55	1583
60	1592

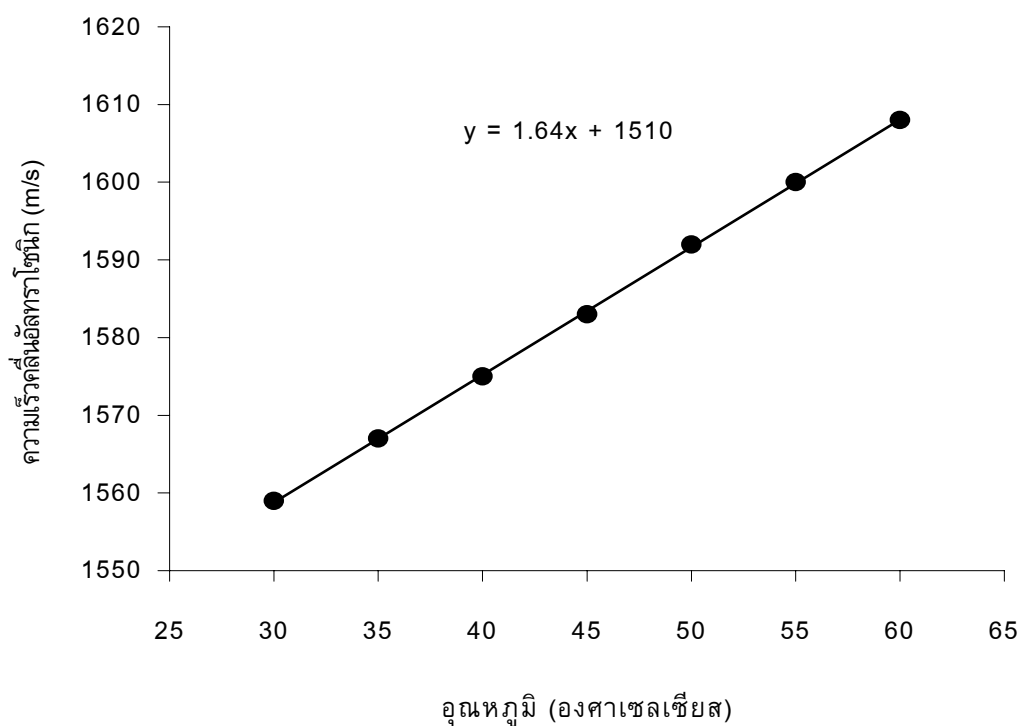


ภาพประกอบ 24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 1.62x + 1494$

ตาราง 9 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)
30	1559
35	1567
40	1575
45	1583
50	1592
55	1600
60	1608



ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 1.64x + 1510$

ตาราง 10 แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)				
	FM	PM	LFM	LFHM	NFHM
30	1518	1527	1535	1543	1559
35	1527	1535	1543	1551	1567
40	1535	1543	1551	1559	1575
45	1543	1551	1559	1567	1582
50	1551	1559	1567	1575	1592
55	1559	1567	1575	1583	1600
60	1567	1575	1583	1592	1608

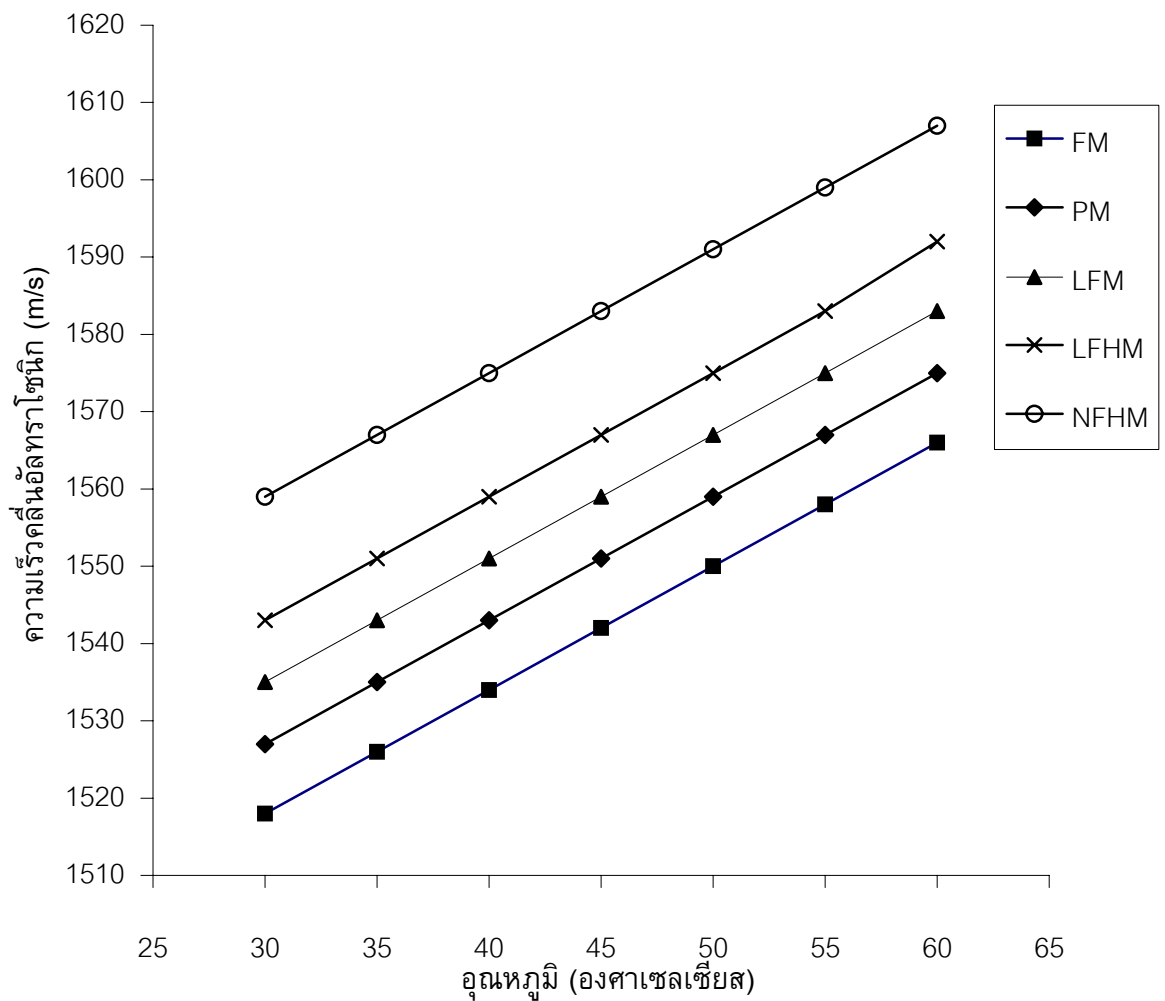
FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)



ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

ขั้นตอนการหาความหนาแน่นของของเหลว

การวัดค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ทำการทดลองในอ่างขนาด 5 ลิตร ที่มีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยใส่นมพาสเจอร์ไรส์ในขวดรูปชมพู่ เพื่อวัดความหนาแน่นในช่วงอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส แสดงผลที่ได้ดังต่อไปนี้

พื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดแก้วรูปชมพู่	$A = 29.88 \times 10^{-5}$	ตารางเมตร
พื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์	$a = 3.12 \times 10^{-5}$	ตารางเมตร
ปริมาตรเริ่มต้นที่อุณหภูมิห้อง	$V_0 = 250 \times 10^{-6}$	ลูกบาศก์เมตร

คำนวณหาค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

$$\text{จาก } \frac{m}{V_T}$$

เมื่อ

m เป็นมวลของนมพาสเจอร์ไรส์

V_T เป็นปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T

ในการทดลองจะได้ว่า ค่า V_T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่า

$$V_T = V_0 (A/a)(h_T/h_0)$$

โดย V_0 เป็นปริมาตรซึ่งเท่ากับ 250×10^{-6} ลูกบาศก์เมตร

h_0 เป็นระดับความสูงเริ่มต้นของนมพาสเจอร์ไรส์

h_T เป็นระดับความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T

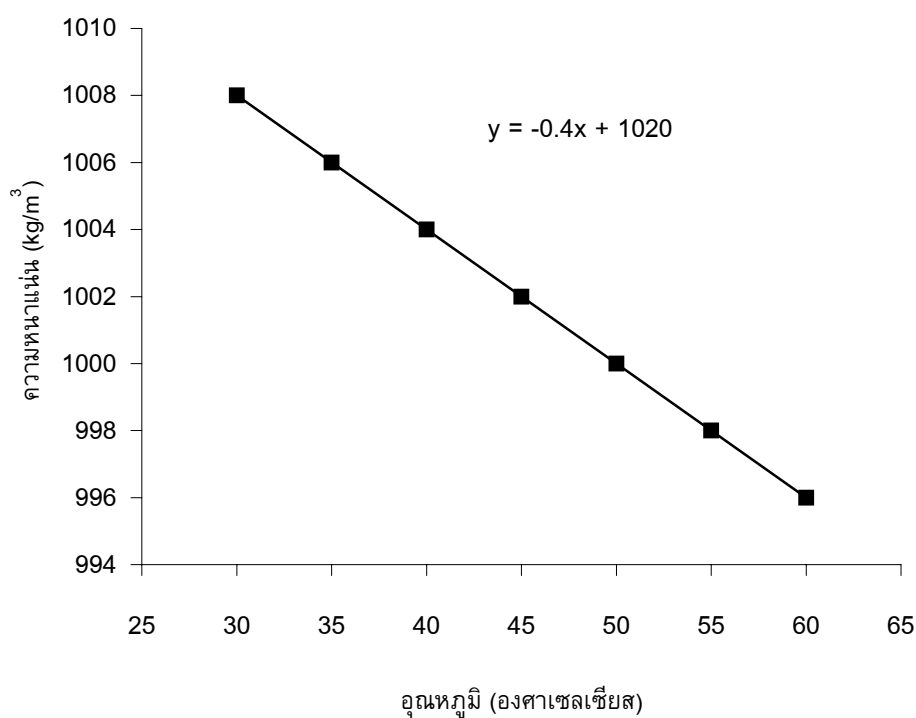
A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดแก้วรูปชมพู่

a เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์

ผลการทดลองได้แสดงไว้ในตารางและเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นที่ได้อุณหภูมิ ตามลำดับ ดังนี้

ตาราง 11 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
30	1008
35	1006
40	1004
45	1002
50	1000
55	998
60	996

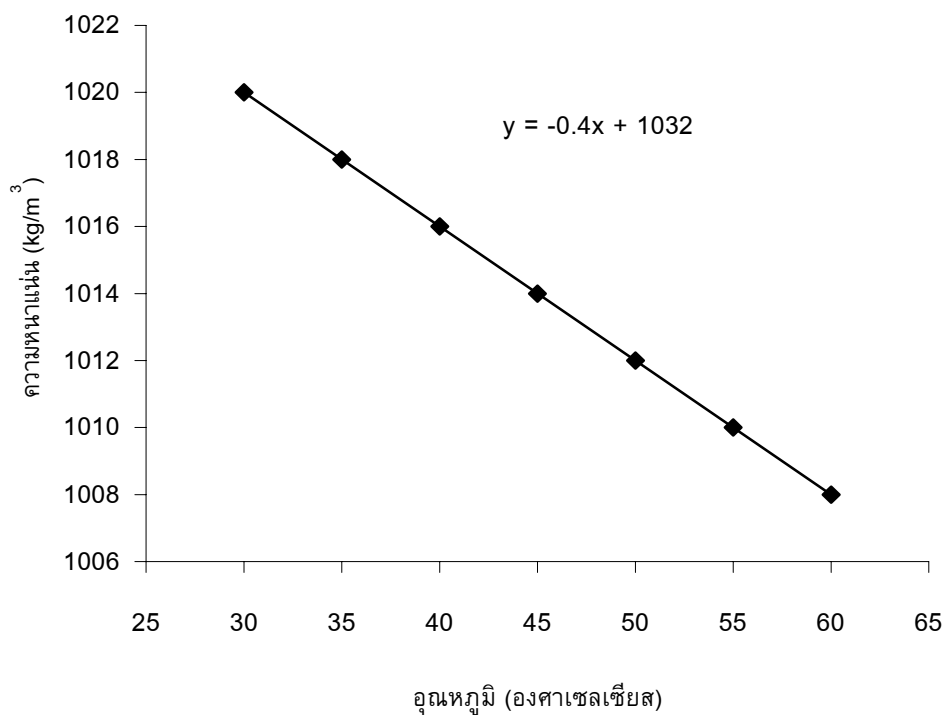


ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = -0.4x + 1020$

ตาราง 12 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์
(Pasteurized Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
30	1020
35	1018
40	1016
45	1014
50	1012
55	1010
60	1008

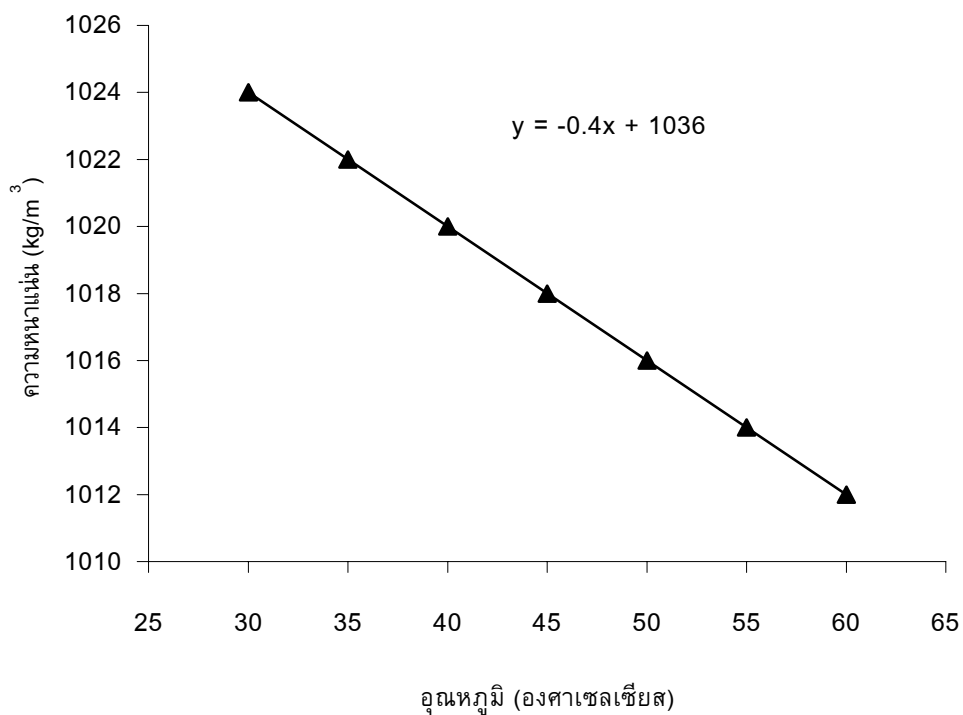


ภาพประกอบ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของ
นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = -0.4x + 1032$

ตาราง 13 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ
(Pasteurized Low Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
30	1024
35	1022
40	1020
45	1018
50	1016
55	1014
60	1012

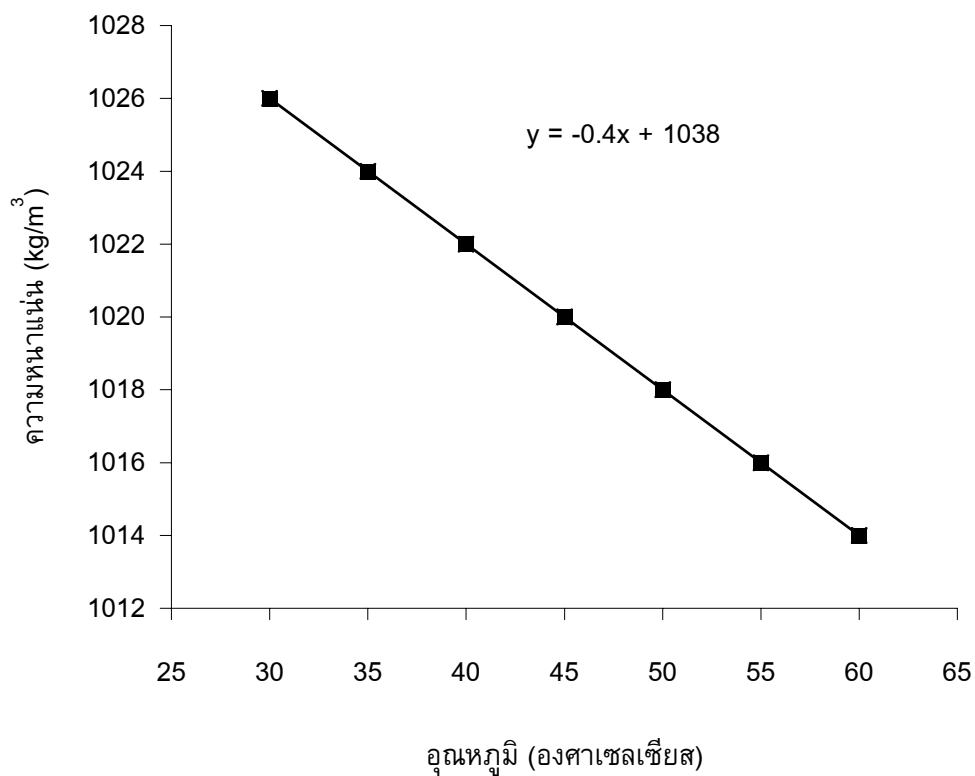


ภาพประกอบ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของ
นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = -0.4x + 1036$

ตาราง 14 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
30	1026
35	1024
40	1022
45	1020
50	1018
55	1016
60	1014



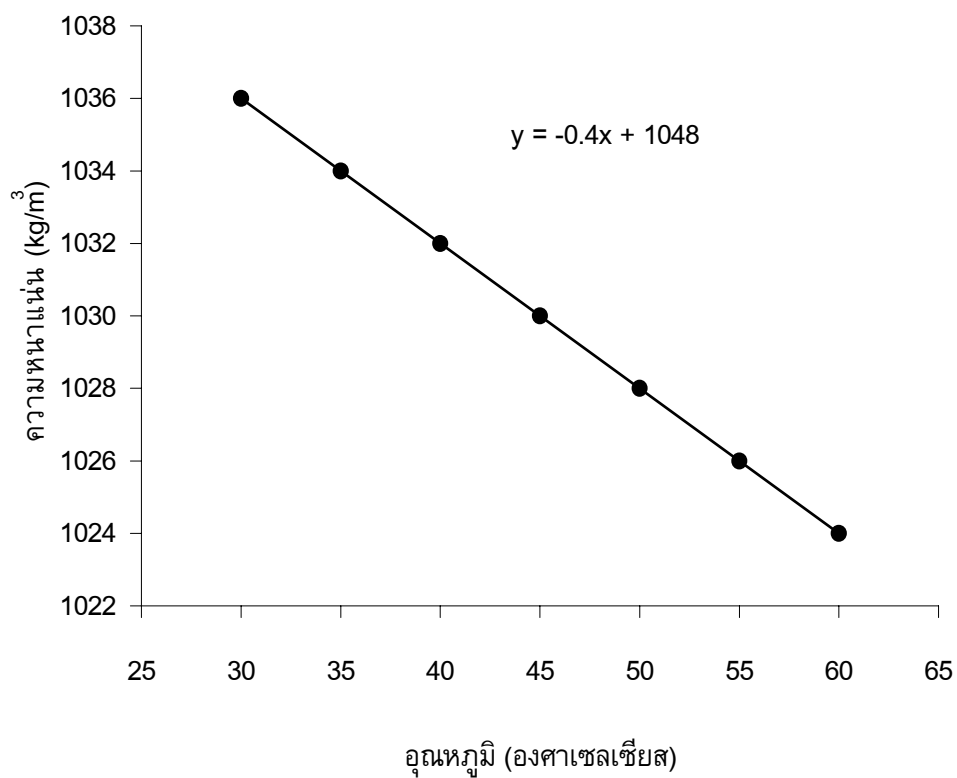
ภาพประกอบ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของ

นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = -0.4x + 1038$

ตาราง 15 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
30	1036
35	1034
40	1032
45	1030
50	1028
55	1026
60	1024



ภาพประกอบ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของ

นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = -0.4x + 1048$

ตาราง 16 แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)				
	FM	PM	LFM	LFHM	NFHM
30	1008	1020	1024	1026	1036
35	1006	1018	1022	1024	1034
40	1004	1016	1020	1022	1032
45	1002	1014	1018	1020	1030
50	1000	1012	1016	1018	1028
55	998	1010	1014	1016	1026
60	996	1008	1012	1014	1024

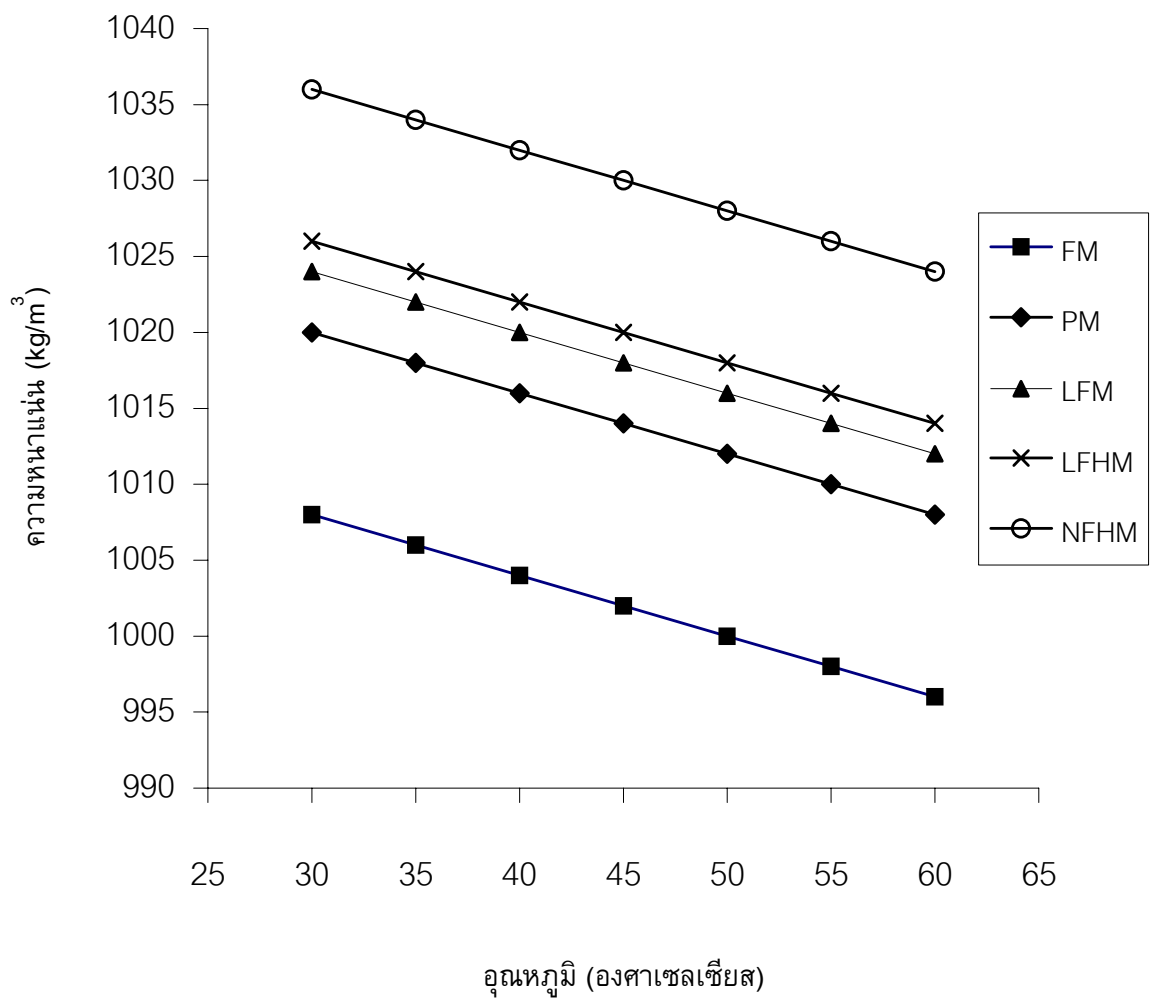
FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)



ภาพประกอบ 32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)
 NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

ขั้นตอนการหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ

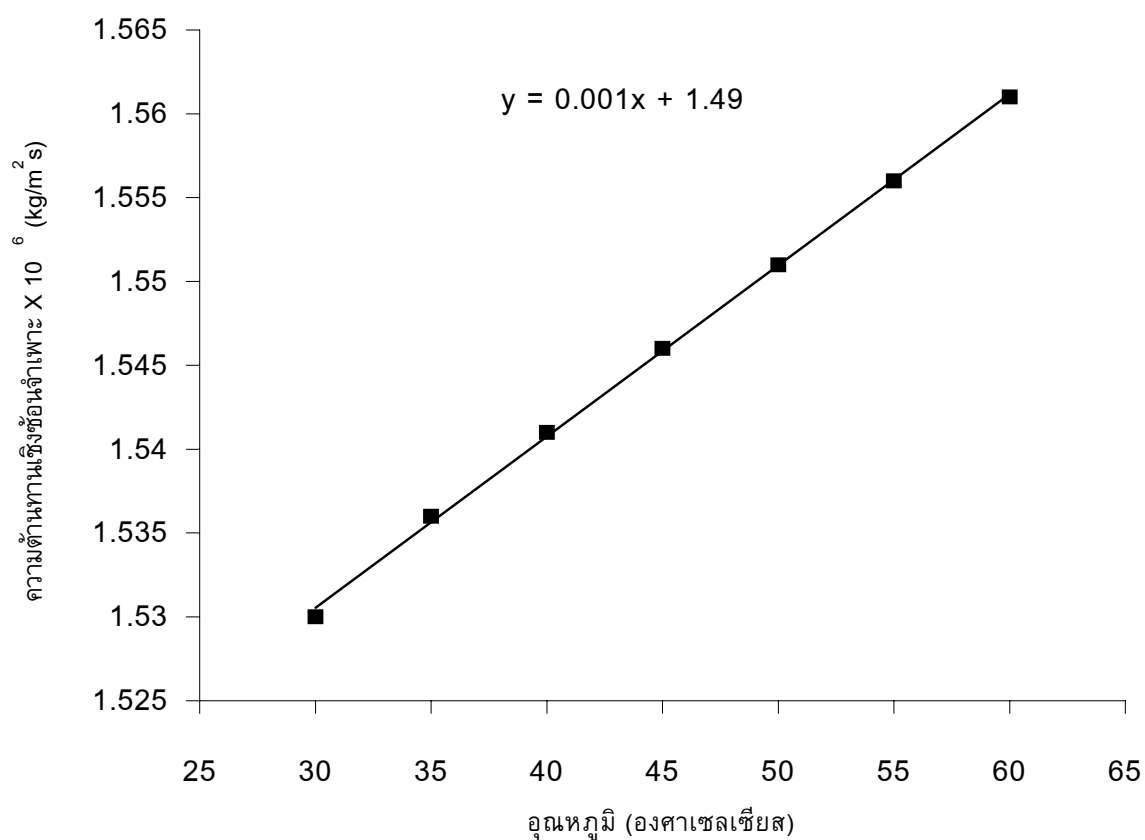
การหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ โดยอาศัยผลการทดลอง คือ ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและค่าความหนาแน่นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส การคำนวณโดยอาศัยสมการ (29) ผลการคำนวณมาเขียนกราฟระหว่างค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและอุณหภูมิ ได้ผลดังนี้

$$Z = c$$

เมื่อ Z เป็นค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ
 เป็นค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์
 c เป็นค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

ตาราง 17 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน
(Pasteurized Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ X 10 ⁶ (kg/m ² s)
30	1.530
35	1.536
40	1.541
45	1.546
50	1.551
55	1.556
60	1.561

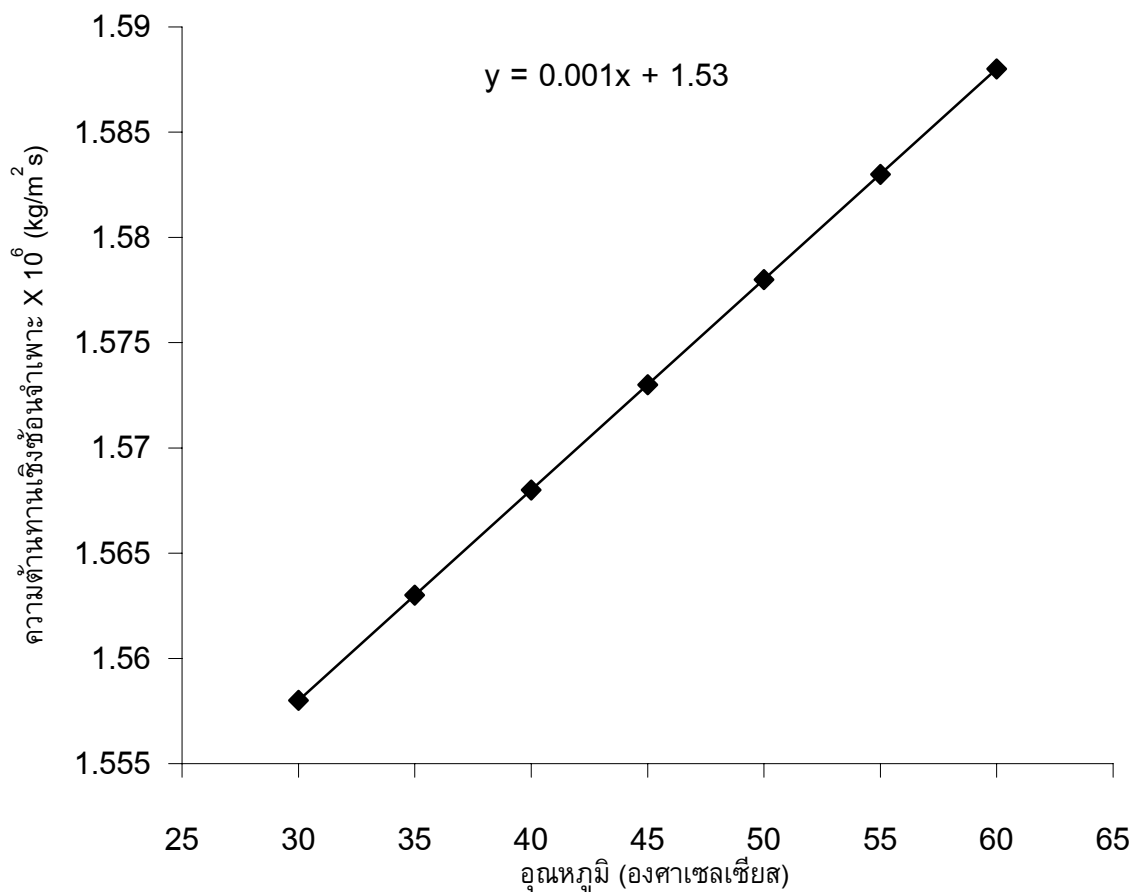


ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.001x + 1.49$

ตาราง 18 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ X 10^6 (kg/m ² s)
30	1.558
35	1.563
40	1.568
45	1.573
50	1.578
55	1.583
60	1.588

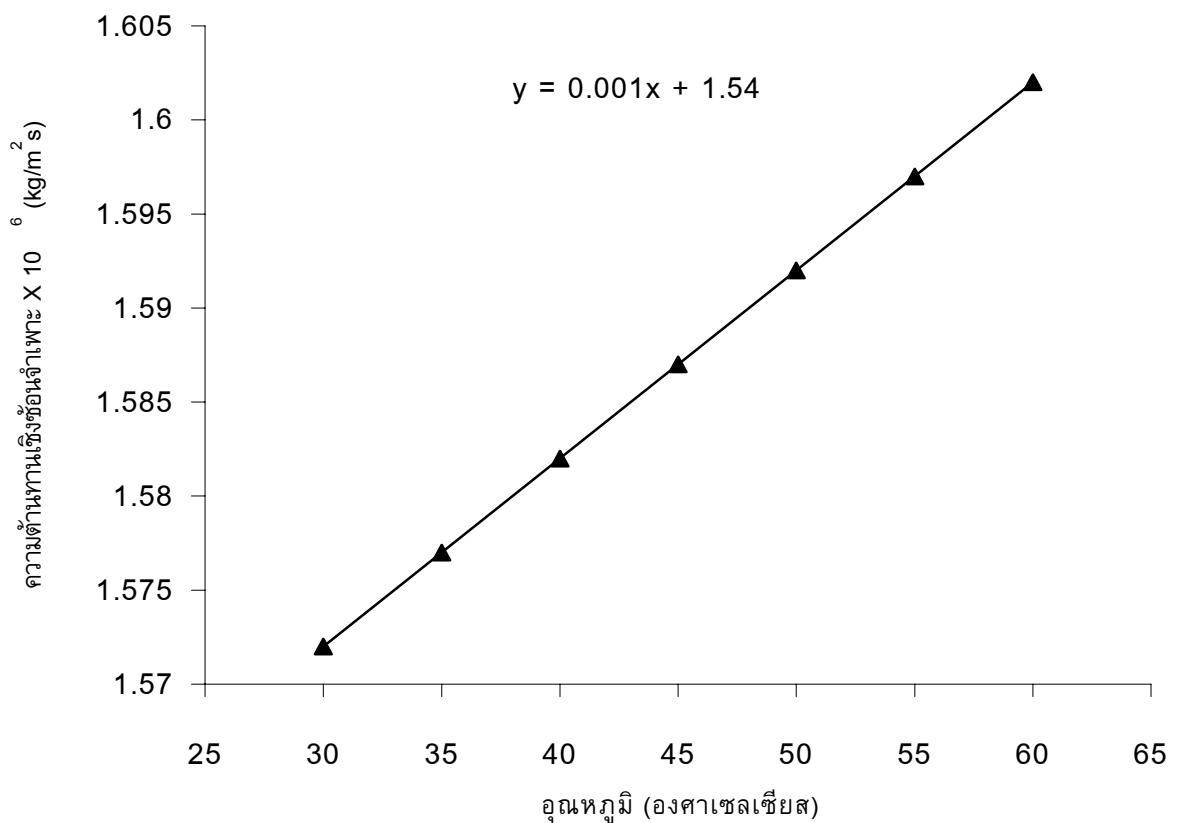


ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.001x + 1.53$

ตาราง 19 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ $\times 10^6$ (kg/m ² s)
30	1.572
35	1.577
40	1.582
45	1.587
50	1.592
55	1.597
60	1.602

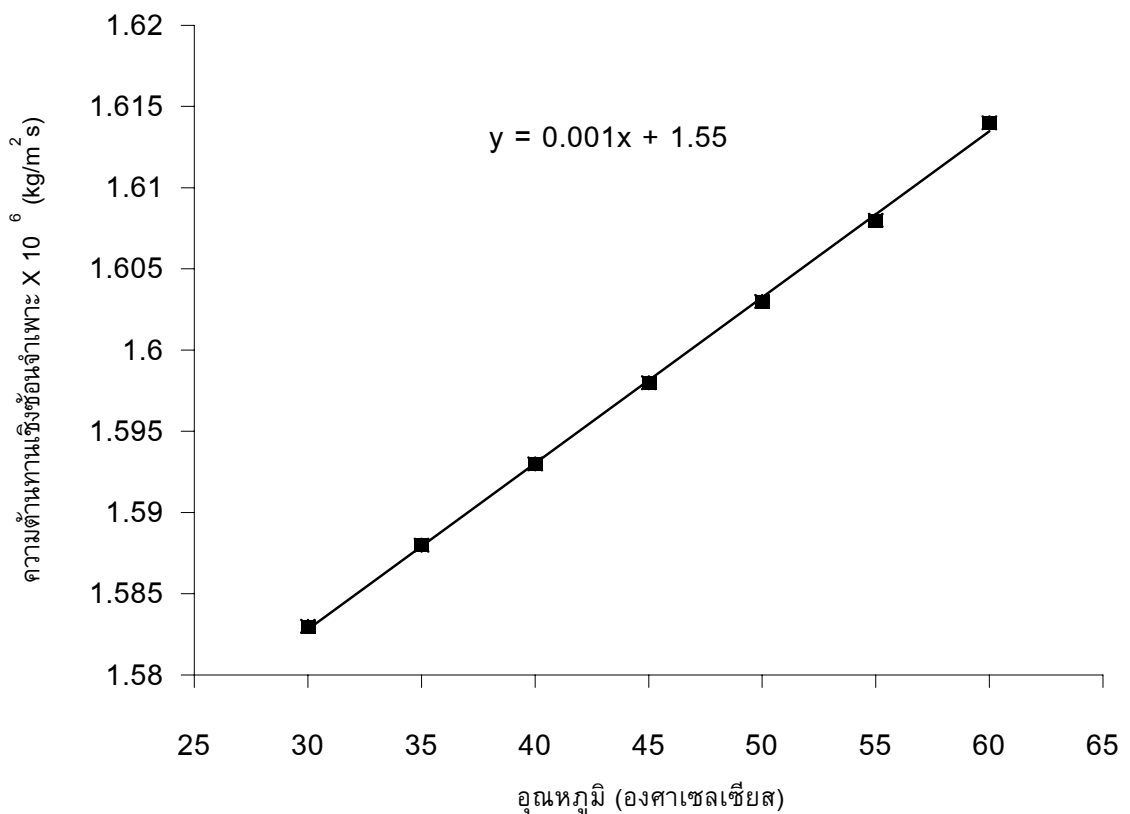


ภาพประกอบ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.001x + 1.54$

ตาราง 20 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ X 10^6 (kg/m ² s)
30	1.572
35	1.577
40	1.582
45	1.587
50	1.592
55	1.597
60	1.602

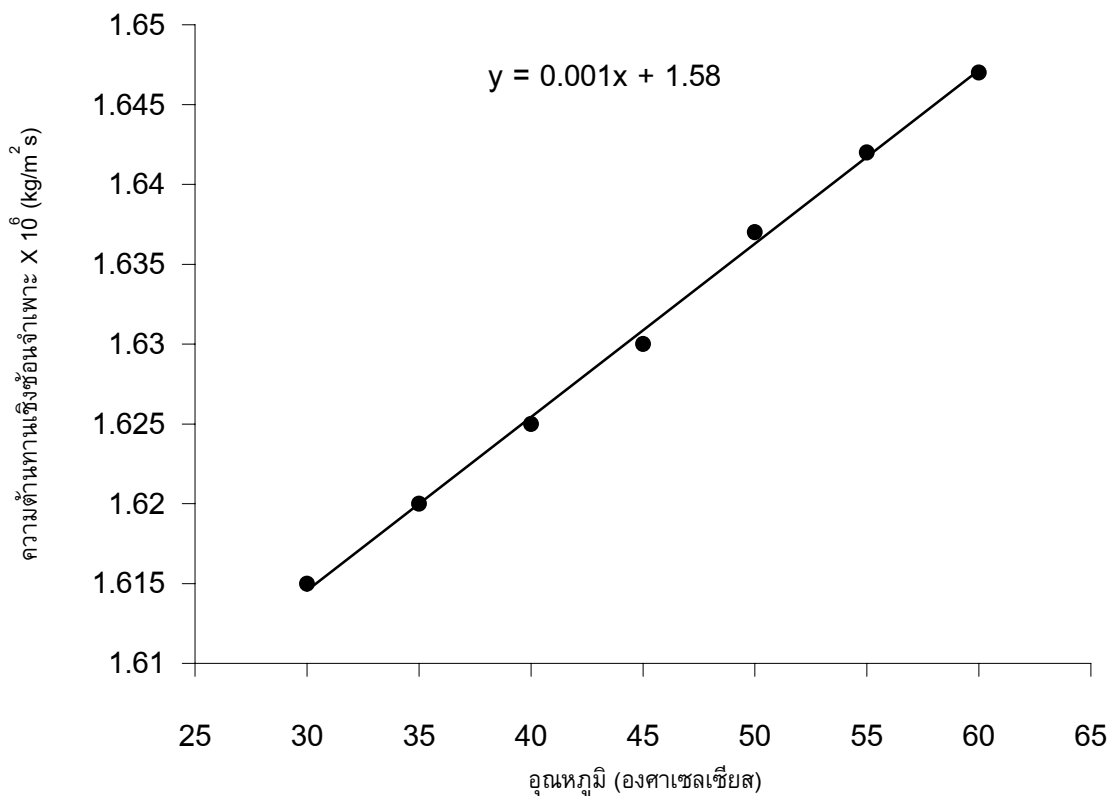


ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.001x + 1.55$

ตาราง 21 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ $\times 10^6$ (kg/m ² s)
30	1.615
35	1.620
40	1.625
45	1.630
50	1.637
55	1.642
60	1.647



ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิ นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.001x + 1.58$

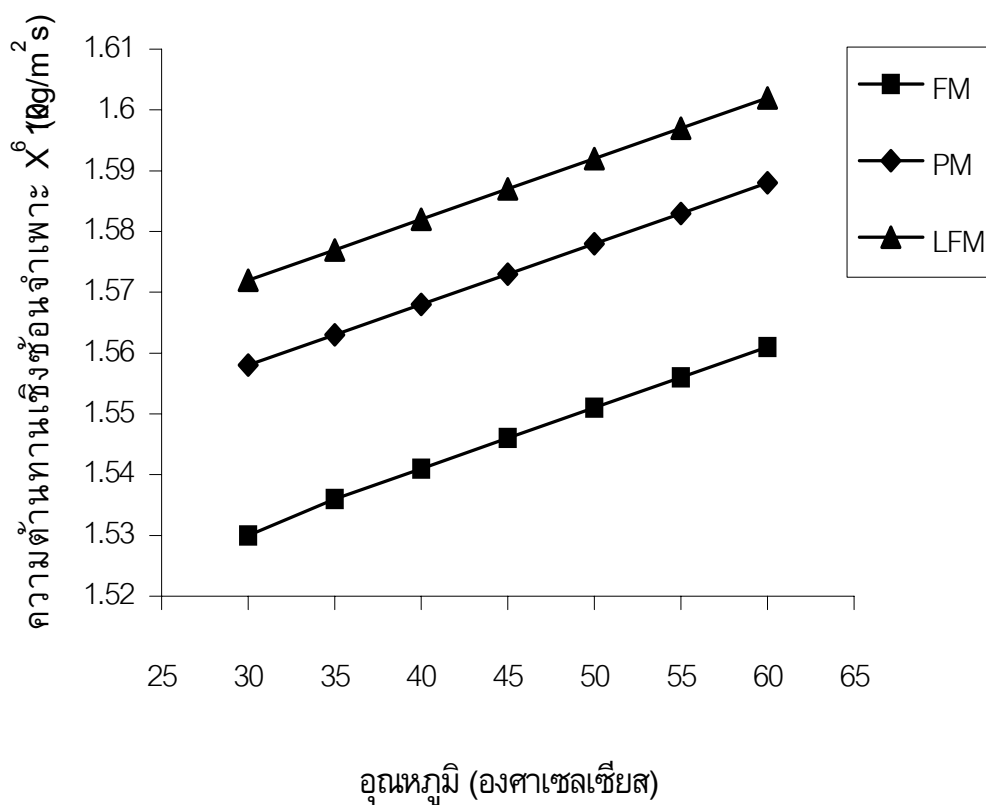
ตาราง 22 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มี ปริมาณไขมันแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ $\times 10^6$ (kg/m ² s)		
	FM	PM	LFM
30	1.530	1.558	1.572
35	1.536	1.563	1.577
40	1.541	1.568	1.582
45	1.546	1.573	1.587
50	1.551	1.578	1.592
55	1.556	1.583	1.597
60	1.561	1.588	1.602

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 17 %

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) มีปริมาณไขมัน 12 %

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 5 %



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีไขมันแตกต่างกัน

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 17 %

PM = นมพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) มีปริมาณไขมัน 12 %

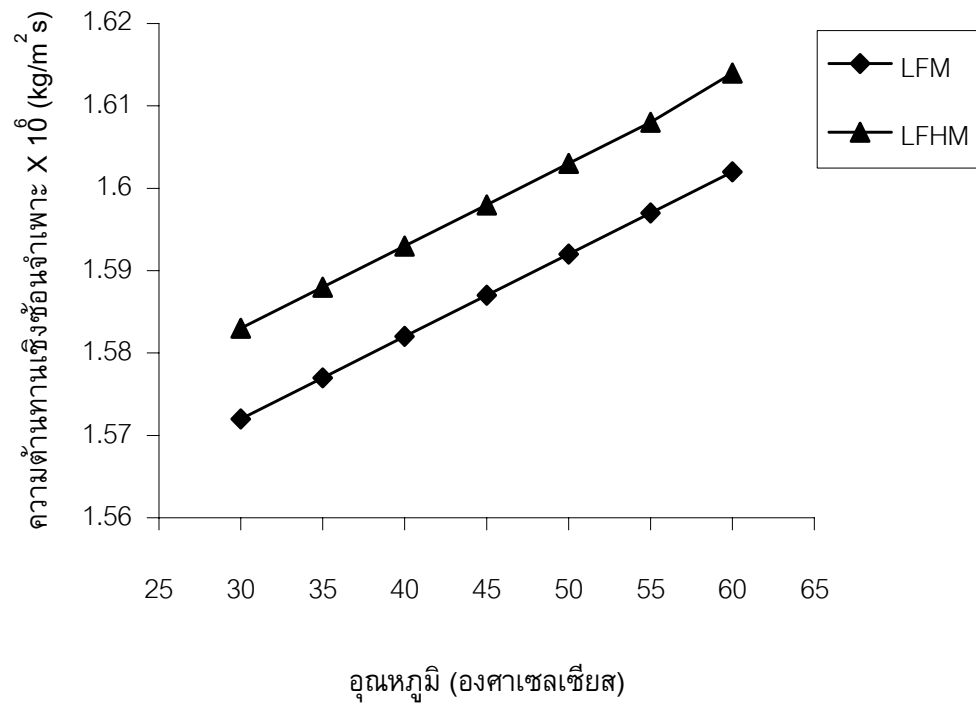
LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 5 %

ตาราง 23 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ X 10 ⁶ (kg/m ² s)	
	LFM	LFHM
30	1.572	1.583
35	1.577	1.588
40	1.582	1.593
45	1.587	1.598
50	1.592	1.603
55	1.597	1.608
60	1.602	1.614

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณแคลเซียม 30 %

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) มีปริมาณแคลเซียม 55 %



ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณแคลเซียม 30 %

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) มีปริมาณแคลเซียม 55 %

ตาราง 24 แสดงค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ X 10 ⁶ (kg/m ² s)				
	FM	PM	LFM	LFHM	NFHM
30	1.530	1.558	1.572	1.583	1.615
35	1.536	1.563	1.577	1.588	1.620
40	1.541	1.568	1.582	1.593	1.625
45	1.546	1.573	1.587	1.598	1.630
50	1.551	1.578	1.592	1.603	1.637
55	1.556	1.583	1.597	1.608	1.642
60	1.561	1.588	1.602	1.614	1.647

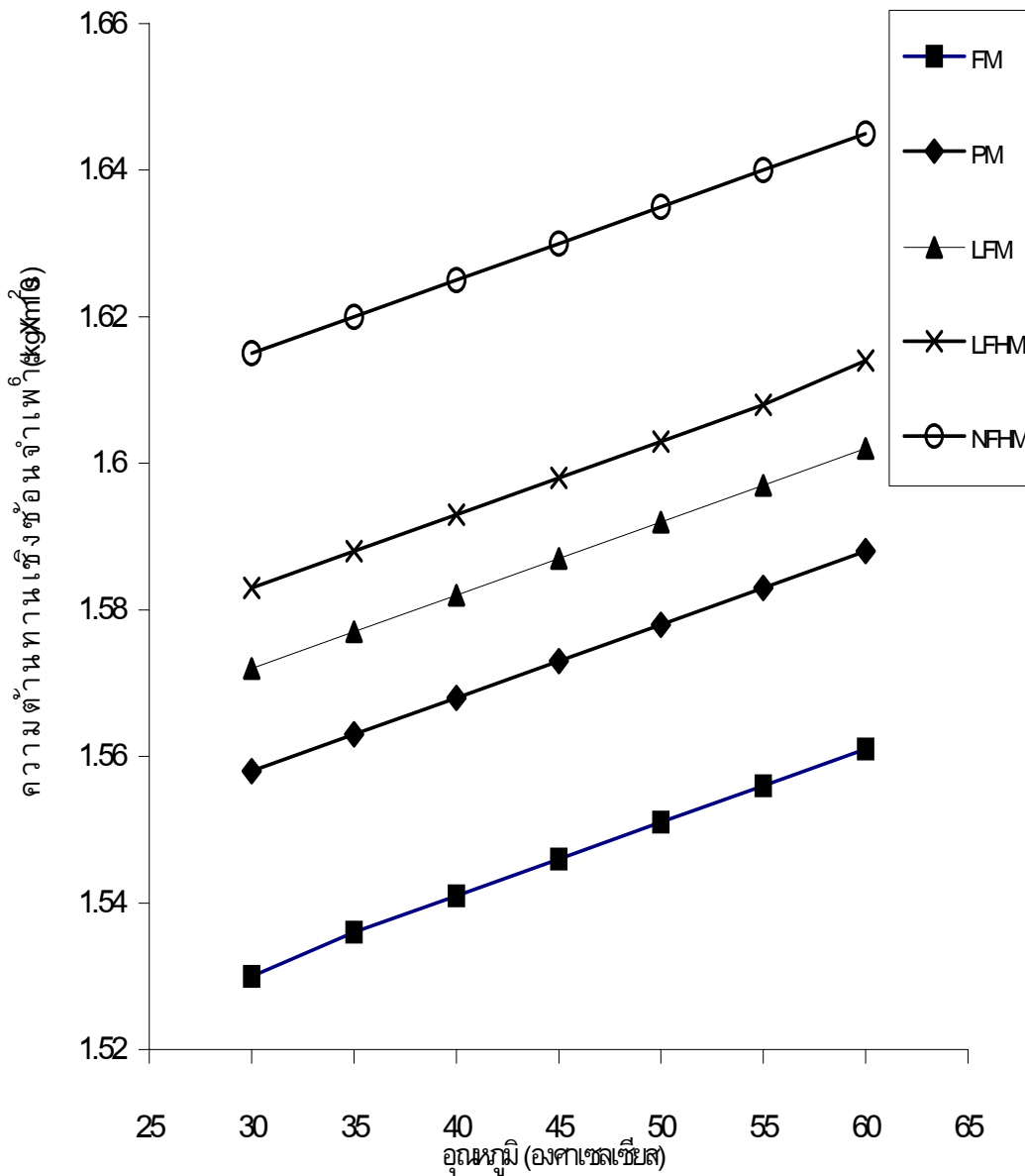
FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)



ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

- FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)
- PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

- LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)
 LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)
 NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

ขั้นตอนการหาค่าบัลค์มอดุลัส

การหาค่าบัลค์มอดุลัส โดยอาศัยผลการทดลอง คือ ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและค่าความหนาแน่นเปรียบเทียบกับอุณหภูมิในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส การคำนวณโดยอาศัยสมการ (30) ผลการคำนวณมาเขียนกราฟระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสและอุณหภูมิ ได้ผลดังนี้

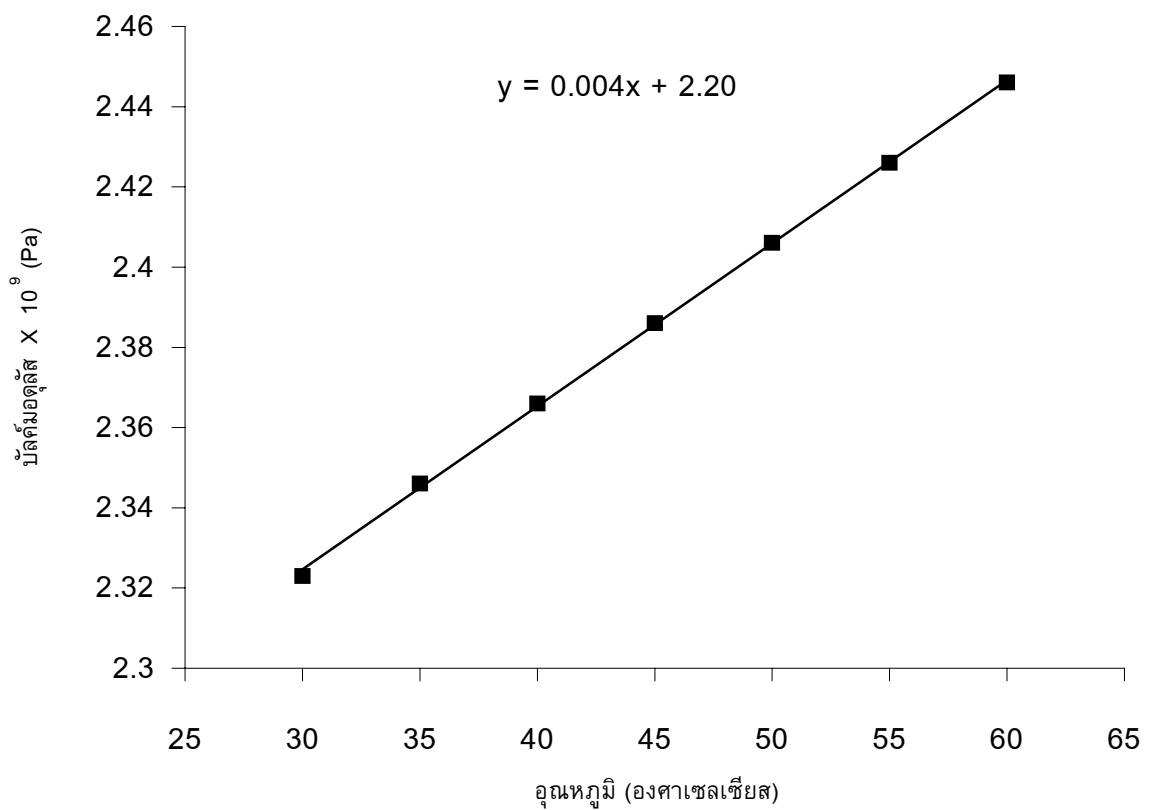
ค่าบัลค์มอดุลัส (Bulk Modulus) เขียนเป็นสมการได้เป็น

$$c^2$$

- เมื่อ
- เป็นค่าบัลค์มอดุลัส
 - เป็นค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์
 - c เป็นค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก

ตาราง 25 แสดงค่าบัลค์มอดูลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน
(Pasteurized Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดูลัส X 10 ⁹ (Pa)
30	2.323
35	2.346
40	2.366
45	2.386
50	2.406
55	2.426
60	2.446



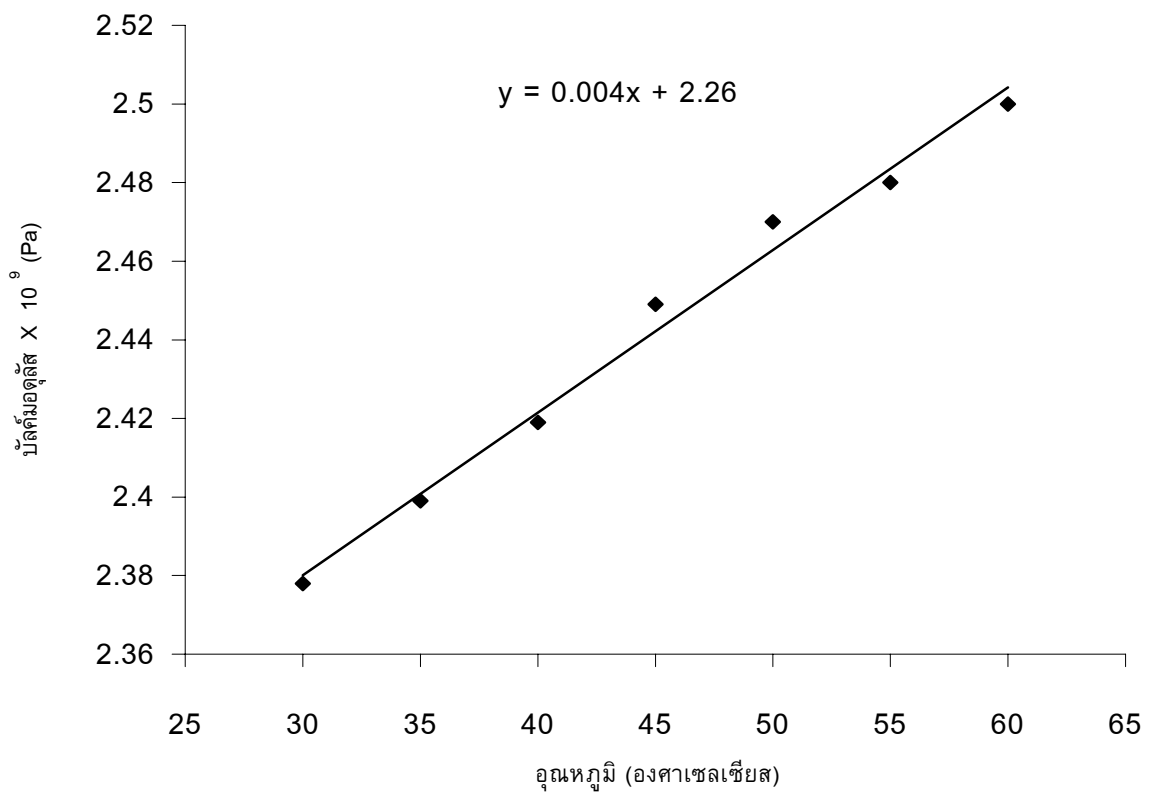
ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดูลัสกับอุณหภูมิของ

นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.004x + 2.20$

ตาราง 26 แสดงค่าบัลค์มอดูลัสกับค่าอุณหภูมิของนมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดูลัส X 10 ⁹ (Pa)
30	2.378
35	2.399
40	2.419
45	2.449
50	2.470
55	2.480
60	2.500



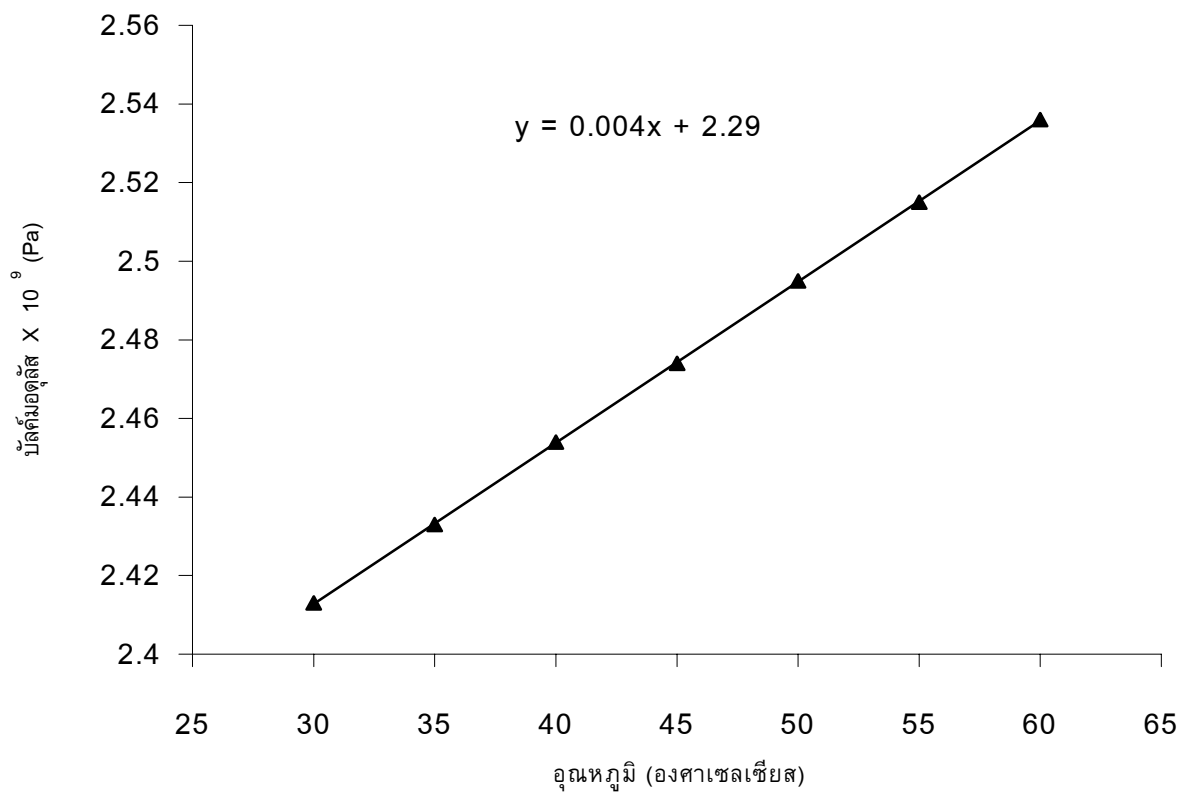
ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดูลัสกับอุณหภูมิของ

นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.004x + 2.26$

ตาราง 27 แสดงค่าบัลค์มอดูลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดูลัส X 10 ⁹ (Pa)
30	2.413
35	2.433
40	2.454
45	2.474
50	2.495
55	2.515
60	2.536



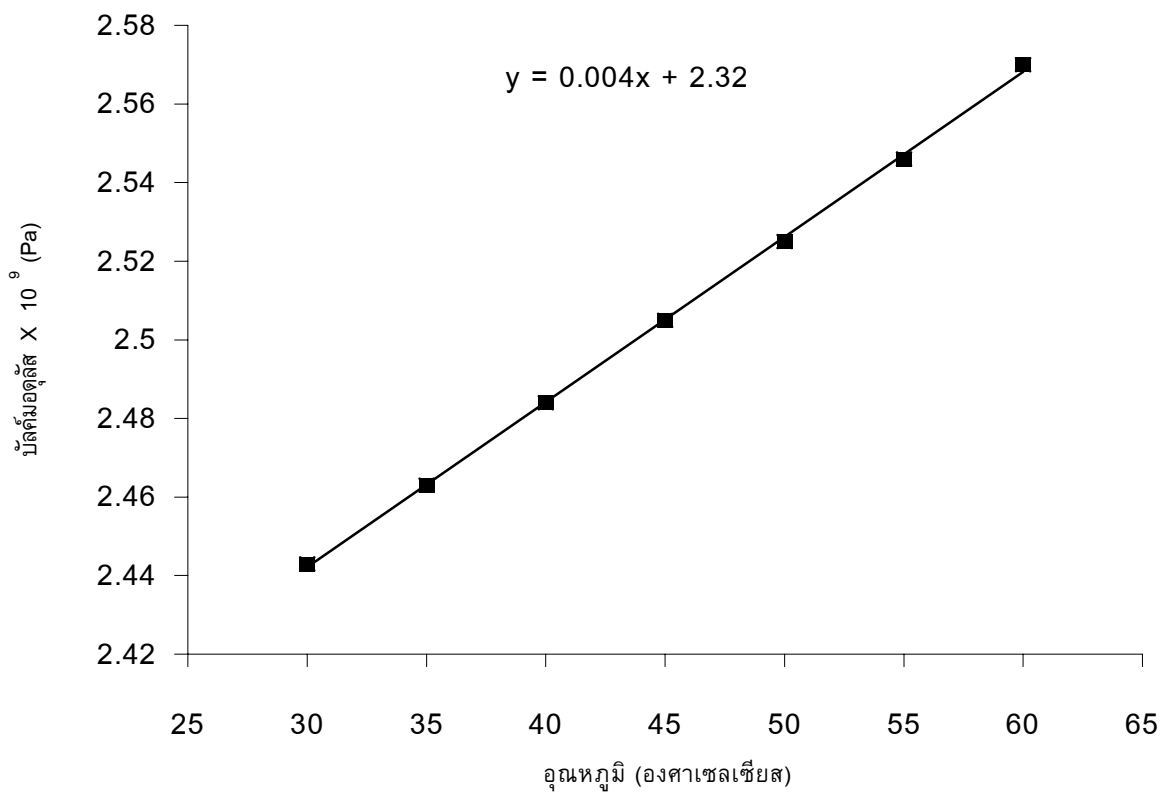
ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดูลัสกับอุณหภูมิของ

นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.004x + 2.29$

ตาราง 28 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa)
30	2.443
35	2.463
40	2.484
45	2.505
50	2.525
55	2.546
60	2.570



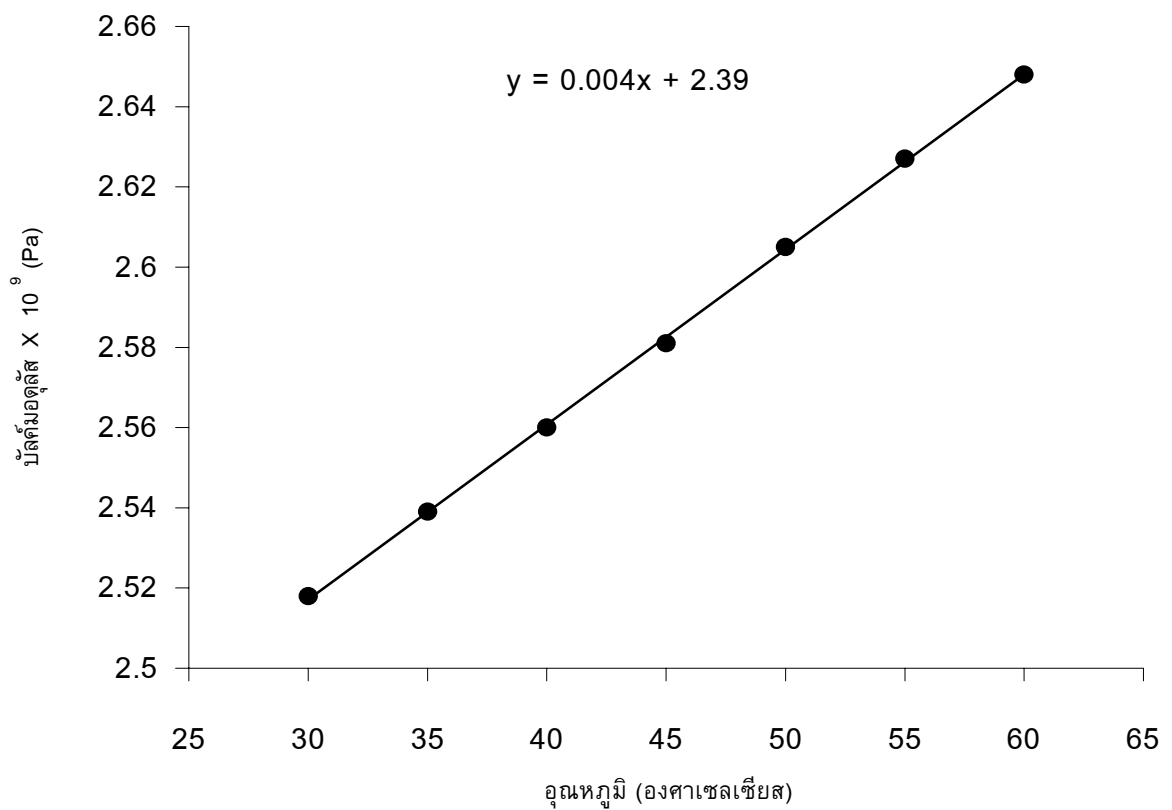
ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของ

นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.004x + 2.32$

ตาราง 29 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa)
30	2.518
35	2.539
40	2.560
45	2.581
50	2.605
55	2.627
60	2.648



ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของ

นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 0.004x + 2.39$

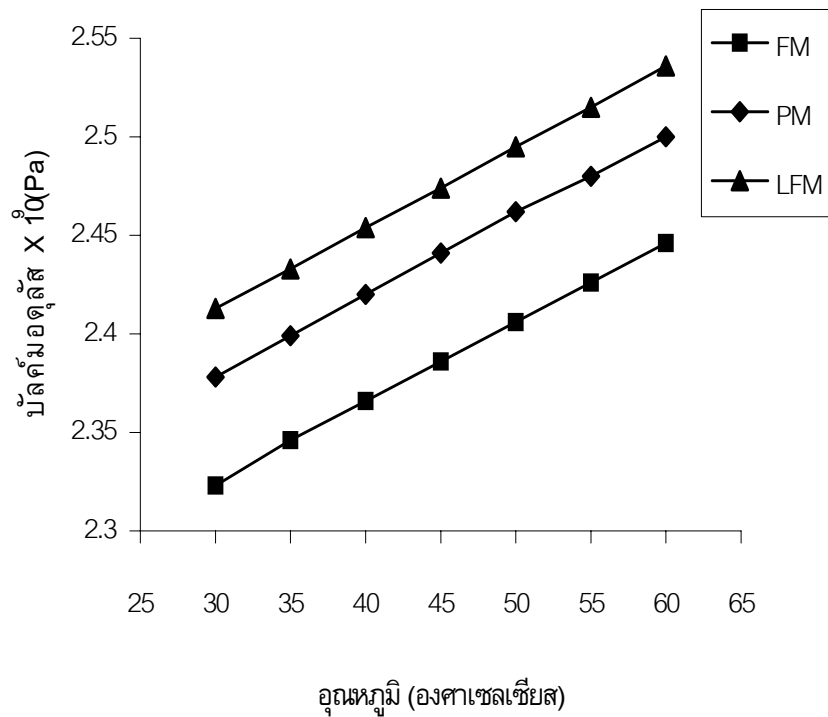
ตาราง 30 แสดงการเปรียบเทียบค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณไขมันแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส $\times 10^9$ (Pa)		
	FM	PM	LFM
30	2.323	2.378	2.413
35	2.346	2.399	2.433
40	2.366	2.419	2.454
45	2.386	2.449	2.474
50	2.406	2.470	2.495
55	2.426	2.480	2.515
60	2.446	2.500	2.536

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 17 %

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) มีปริมาณไขมัน 12 %

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 5 %



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีไขมันแตกต่างกัน

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 17 %

PM = นมพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) มีปริมาณไขมัน 12 %

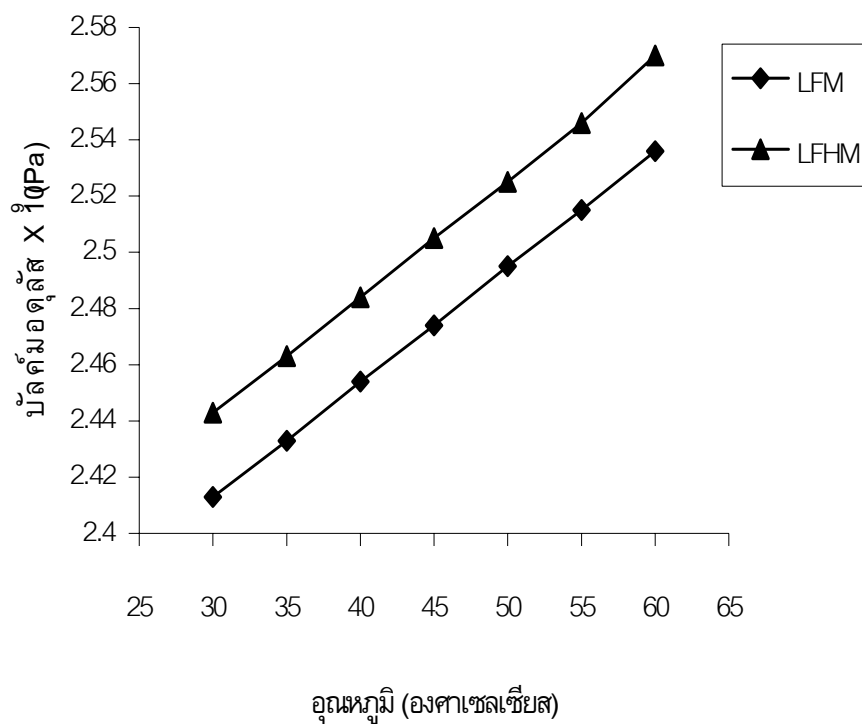
LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณไขมัน 5 %

ตาราง 31 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส X 10 ⁹ (Pa)	
	LFM	LFHM
30	2.413	2.443
35	2.433	2.463
40	2.454	2.484
45	2.474	2.505
50	2.495	2.525
55	2.515	2.546
60	2.536	2.570

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณแคลเซียม 30 %

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) มีปริมาณแคลเซียม 55 %



ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ที่มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน

- LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) มีปริมาณแคลเซียม 30 %
 LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) มีปริมาณแคลเซียม 55 %

ตาราง 32 แสดงค่าบัลค์มอดุลัสกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส X 10 ⁹ (Pa)				
	FM	PM	LFM	LFHM	NFHM
30	2.323	2.378	2.413	2.443	2.518
35	2.346	2.399	2.433	2.463	2.539
40	2.366	2.419	2.454	2.484	2.560
45	2.386	2.449	2.474	2.505	2.581
50	2.406	2.470	2.495	2.525	2.605
55	2.426	2.480	2.515	2.546	2.627
60	2.446	2.500	2.536	2.570	2.648

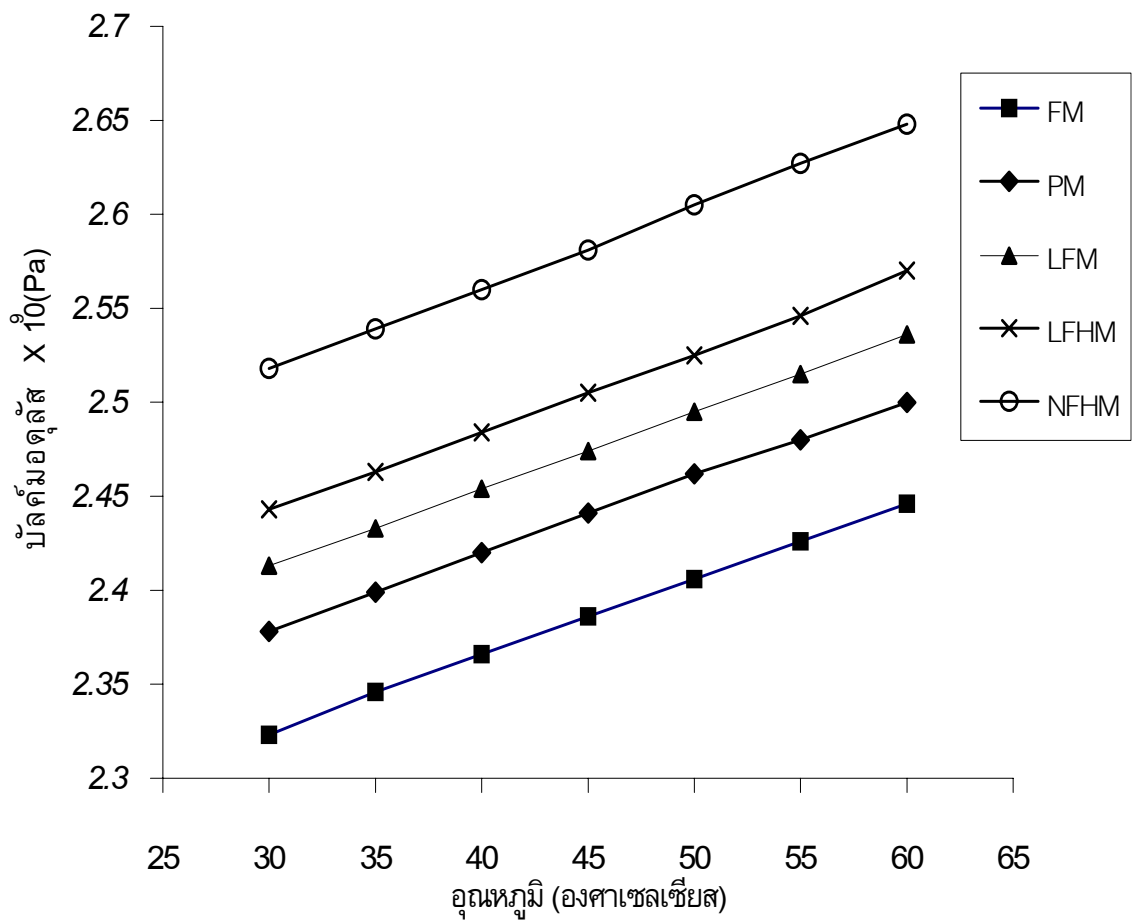
FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)



ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

FM = นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk)

PM = นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk)

LFM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

LFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk)

NFHM = นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk)

บทที่ 5

สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาสมบัติของนมพาสเจอร์ไรส์ โดยเทคนิคอัลตราโซนิก สำหรับงานวิจัยนี้เป็น การศึกษาสมบัติกายภาพด้านความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และ บัลค์มอดุลัส ของสารคอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ได้แก่ นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk), นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk), นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk), นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) และ นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมันและแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk) โดยมีขอบเขตการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส บันทึกข้อมูลในช่วง อุณหภูมิต่างกัน 5 องศาเซลเซียส โดยใช้คลื่นที่ได้จากเครื่องกำเนิดคลื่นอัลตรา โซนิกที่มีความถี่คงตัว ความถี่ 812 กิโลเฮิรตซ์ มีทรานส์ดีวเซอร์ 2 ตัว เป็นตัวส่งคลื่นอัลตราโซ นิก และรับคลื่นอัลตราโซนิก โดยผ่านตัวกลางที่เป็นนมพาสเจอร์ไรส์ ทรานส์ดีวเซอร์ตัวรับจะส่งผล ไปที่เครื่องออสซิลโลสโคปเพื่อคำนวณหาค่าต่างๆ ดังแสดงในผลการทดลอง ซึ่งสามารถสรุป ผลการวิจัยได้ดังนี้

1. จากการศึกษารวดเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด พบว่า ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ มีค่าขึ้นกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ โดยเมื่อ อุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์สูงขึ้น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์จะมีค่า ค่อยๆ เพิ่มขึ้น ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของตัวกลางเป็นแบบ เชิงเส้นในช่วงอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียสดังแสดงในภาพประกอบ 21,22,23,24,25 และ 26

การเปรียบเทียบค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด พบว่าที่ อุณหภูมิเดียวกัน ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกมีค่าเรียงลำดับจากน้อยที่สุดไปหามากที่สุด ได้แก่ นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) , นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) , นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) , นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำและ แคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) , และนมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมัน และแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk) ซึ่งสอดคล้องกับการ ทดลองของ ดิกคินสัน และแม็คคลีเมนส์ (Dickinson and McClements. 1995 : 191-192) โดย ที่ดิกคินสัน และแม็คคลีเมนส์ ทำการทดลองหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในสารตัวอย่างที่ เป็นคอลลอยด์ชนิดอิมัลชัน (ของเหลวละลายในของเหลว) คือน้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ

ผลการทดลอง คือ ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนความเข้มข้นของน้ำมันดอกทานตะวันในน้ำ กล่าวคือ เมื่อความเข้มข้นของน้ำมันดอกทานตะวันมากขึ้น ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจะมีค่าน้อยลง

2. จากการศึกษาความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด ที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าความหนาแน่นนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีลักษณะเชิงเส้นโดยที่อุณหภูมิเดียวกันจะมีความหนาแน่นจากน้อยสุดไปมากที่สุด ดังนั้นนมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน (Pasteurized Fat Milk) , นมสดพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurized Milk) , นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk) , นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ และแคลเซียมสูง (Pasteurized Low Fat and High Calcium Milk) , และ นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมันและแคลเซียมสูง (Pasteurized Non Fat and High Calcium Milk) ดังภาพประกอบ 27, 28, 29, 30, 31 และ 32

3. เมื่อพิจารณา นมพาสเจอร์ไรส์แต่ละชนิด ค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดูลัสมีค่าแปรผันตรงแบบเชิงเส้นกับอุณหภูมิ เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดูลัสที่อุณหภูมิเดียวกัน พบว่ามีค่าแปรผกผันกับปริมาณไขมันและมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณแคลเซียม ดังภาพประกอบ 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 และ 48

4. ผลการทดสอบประสิทธิภาพอ่าง โดยหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในสารตัวอย่าง คือ น้ำ และ กลีเซอริน ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ผลปรากฏว่า อ่างที่ทำจากพลาสติกให้ค่าใกล้เคียงกับการทดลองชุดการหาความเร็วของเสียงในของเหลวของการทดลองระดับมหาวิทยาลัย (University Laboratory Experiments Vol 1 – 5 : 101 – 102) ส่วนอ่างที่ทำจาก อลูมิเนียม สเตนเลส คลื่นอัลตราโซนิกไม่สามารถตรวจวัดได้เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางเพิ่มขึ้น

อภิปรายผล

จากการสร้างอ่างพลาสติกสำหรับใส่นมพาสเจอร์ไรส์ในการทดลอง ผลการทดสอบอ่างใสสารตัวอย่างกับการวัดค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่นที่ทราบค่าความเร็วมาตรฐาน ความเร็วมาตรฐาน คือ ความเร็วที่คำนวณจากสมการ (17) คือ

$$c(p,t) = 1402.7 + 488t + 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(p_g/100)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่น หน่วย เมตรต่อวินาที

$$t = \frac{T}{100}, T \text{ หน่วยองศาเซลเซียส}$$

p เป็นความดัน หน่วยบาร์ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

p_g เป็นความดันเกจ หน่วยบาร์ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

ผลการทดลองในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 C ถึง 60 C พบว่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในน้ำกลั่นมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดไม่เกิน 0.193 เปอร์เซ็นต์ จากสมการ (17)

จากการทดลองหาความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก ความหนาแน่น ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และบัลค์มอดุลัส ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ 30-60 องศาเซลเซียส จะพบว่าค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และบัลค์มอดุลัสที่ได้นั้นจะแปรผกผันกับปริมาณของไขมันและแปรผันตรงกับปริมาณแคลเซียมที่เป็นส่วนประกอบในนมพาสเจอร์ไรส์ ดังภาพประกอบ 38, 39, 46, และ 47

ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบอ่างภาชนะที่ใส่นมพาสเจอร์ไรส์เพื่อทดลองหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก อ่างพลาสติกที่ใช้มีข้อดีคือคลื่นอัลตราโซนิกเคลื่อนที่ผ่านได้ดี แต่การถ่ายเทความร้อนจากน้ำเข้าสู่นมพาสเจอร์ไรส์ได้ไม่ดี
2. ในการออกแบบและสร้างชุดทดลองทางอัลตราโซนิก เพื่อศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของตัวกลางที่จะศึกษา ควรที่จะทำในภาชนะที่ป้องกันการระเหยของไอของของเหลว เพื่อควบคุมอุณหภูมิและมวลของของเหลว
3. จากการหาค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ และค่าบัลค์มอดุลัสในนมพาสเจอร์ไรส์สามารถนำไปศึกษาหาปริมาณของไขมัน และแคลเซียมของคอลลอยด์นมชนิดอื่น ๆ ต่อไปได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2522). *เคมีทั่วไป*. หน้า 145. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชูรัฐ แปลกสงวนศรี.(2538). *จำนวนจุลินทรีย์กลุ่มต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตนมพาสเจอร์ไรส์*.
งานวิจัย. ลพบุรี : วิทยาลัยเกษตรกรรมลพบุรี.
- วรรณ ตังเจริญชัย และ วิบูลศักดิ์ กาวิละ. (2532). *นมและผลิตภัณฑ์นม*. กรุงเทพฯ :
คณะเทคโนโลยีทางการเกษตร. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- ศิริรัตน์ ดำนนคร. (2543). *การศึกษาสมบัติทางกายภาพของสารหล่อลื่นเครื่องยนต์โดย
เทคนิคอัลตราโซนิก*. วิทยานิพนธ์ วท.ม. (ฟิลิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ถ่ายเอกสาร.
- สถาบันวิจัยโภชนาการ. (2543). *ฉลาดซื้อ*. หน้า 190 กรุงเทพฯ : คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล.
- A.H. Harker and J.A.G. Temple,(1998). *J. Phys.D:Appl. Phys.* P 1576. New York :
Academic Press.
- Allegre, J.R. and Hawley, S.A.(1972). *J. A coust.Soc. Am.* P 51. New York :
Academic Press.
- Austin, J.C. et al.(1996). *Ultrasonic Wave Propagation in Colloid Suspensions
and Emulsion Recent Experimental Results*. PP. 369-374.
London : Ultrasonics.
- Bee, R.D. , Richmond, P. and Mingins, J.(1998). *Food Colloids*. PP. 306-322.
UK : Uniliver Research, Colworth.
- Bennet, J.C. and Tavlarides, L.L. (1987). *Ind. Eng. Chem. Res.*. PP. 26,811.
UK : Uniliver Research, Colworth.
- E. Dickinson and D.J. McClements. (1995). *Advance Food colloids*. PP.191-192.
Glasgow: Blackie academic & professional.
- Filipczynski, Leszek, Zdzislaw Pawlowski and Wehr Jerzy. (1966).
Ultrasonic Methods of Testing Materials. P. 189. London: Butterworths.
- Frey Austin R. et al. (1982). *Fundamentals of Acoustics*. 3rd ed. PP. 57-60.
California : John Wiley & Son.
- Jack Blitz and Geroff. (1996). *Ultrasonic Methods of Non-destructive
Testing*.P.298 London : Chapman & Hall.

- John Coupland, Eric. Dickinson, D. Julian McClements, Malcolm Povey, and
Christine de Rancourt de Mimmerand. (1992). *Food colloids And
Polymers: Stability and Mechanical Properties*. PP. 191-194. California : John
Wiley & Son.
- Krautkramer J. and Krautkamer H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials*. P. 172
Springers-Verlag Print.
- University Laboratory Experiments. (1995). *Physics Vol 1-5*. PP. 101-102. London :
Chapman & Hall.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ

วิธีการทดลองหาค่าความยาวคลื่นอัลตราโซนิกเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิต่างๆ (รายละเอียดวิธีการทดลองหน้า 34-37) สรุปได้ดังนี้

1. หมุนเวอร์เนียเพื่อปรับระยะทรานส์ดีวเซอร์ตัวรับ เพื่อที่จะได้ระยะที่คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกันและหมุนเวอร์เนียให้มีเฟสตรงกันไปเป็นจำนวน 11 ครั้ง (ระยะนี้คือ l) ระยะห่างระหว่างเฟสตรงกันแต่ละครั้งคือ ระยะ l ซึ่งก็คือความยาวคลื่น
2. นำค่าความยาวคลื่นมาคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกจากสมการ $c = f \lambda$ (เมื่อ f เป็นความถี่ของคลื่นอัลตราโซนิก มีค่าคงที่ คือ 8 1 2 กิโลเฮิรตซ์

ตารางแสดงผลการทดลองการหาค่าความยาวคลื่นของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ

อุณหภูมิ (C)	l_0 (cm)	l_1 (cm)	l_2 (cm)	l_3 (cm)	l_4 (cm)	l_5 (cm)	l_6 (cm)	l_7 (cm)	l_8 (cm)	l_9 (cm)	l_{10} (cm)	l_1 (cm)	l_2 (cm)	l_3 (cm)	l_4 (cm)	l_5 (cm)	l_6 (cm)	l_7 (cm)	l_8 (cm)	l_9 (cm)	l_{10} (cm)	เฉลี่ย	
30	0.937	1.126	1.314	1.504	1.691	1.879	2.069	2.259	2.452	2.639	2.827	0.189	0.188	0.190	0.187	0.188	0.190	0.190	0.193	0.187	0.188	0.189	0.189
35	0.469	0.659	0.850	1.045	1.229	1.420	1.603	1.797	1.982	2.171	2.366	0.190	0.191	0.195	0.184	0.191	0.183	0.194	0.185	0.195	0.189	0.190	0.190
40	0.649	0.842	1.032	1.221	1.417	1.610	1.798	1.989	2.180	2.371	2.562	0.193	0.190	0.189	0.196	0.193	0.188	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191	0.191
45	0.656	0.852	1.050	1.235	1.429	1.614	1.808	2.004	2.186	2.384	2.576	0.196	0.198	0.185	0.194	0.185	0.194	0.196	0.182	0.198	0.192	0.192	0.192
50	0.823	1.017	1.213	1.406	1.596	1.792	1.984	2.173	2.369	2.552	2.751	0.194	0.196	0.193	0.190	0.196	0.192	0.189	0.196	0.183	0.199	0.193	0.193
55	0.655	0.861	1.059	1.242	1.432	1.628	1.828	2.025	2.218	2.400	2.595	0.206	0.198	0.183	0.190	0.196	0.200	0.197	0.193	0.182	0.195	0.194	0.194
60	0.449	0.647	0.843	1.033	1.228	1.415	1.610	1.805	2.000	2.197	2.394	0.198	0.196	0.190	0.195	0.187	0.195	0.195	0.197	0.197	0.197	0.197	0.195

แทนค่าความยาวคลื่น ลงในสมการ $c = \lambda f$ จะได้ค่าความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก หน่วยเมตรต่อวินาที เช่น

1. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 30 C หาได้จาก

$$c = 0.189 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1535 m/s$$

2. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 35 C หาได้จาก

$$c = 0.190 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1543 m/s$$

3. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 40 C หาได้จาก

$$c = 0.191 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1551 m/s$$

4. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 45 C หาได้จาก

$$c = 0.192 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1559 m/s$$

5. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 50 C หาได้จาก

$$c = 0.193 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1567 m/s$$

6. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 55 C หาได้จาก

$$c = 0.194 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1575 m/s$$

7. ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกในนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ ที่อุณหภูมิ 60 C หาได้จาก

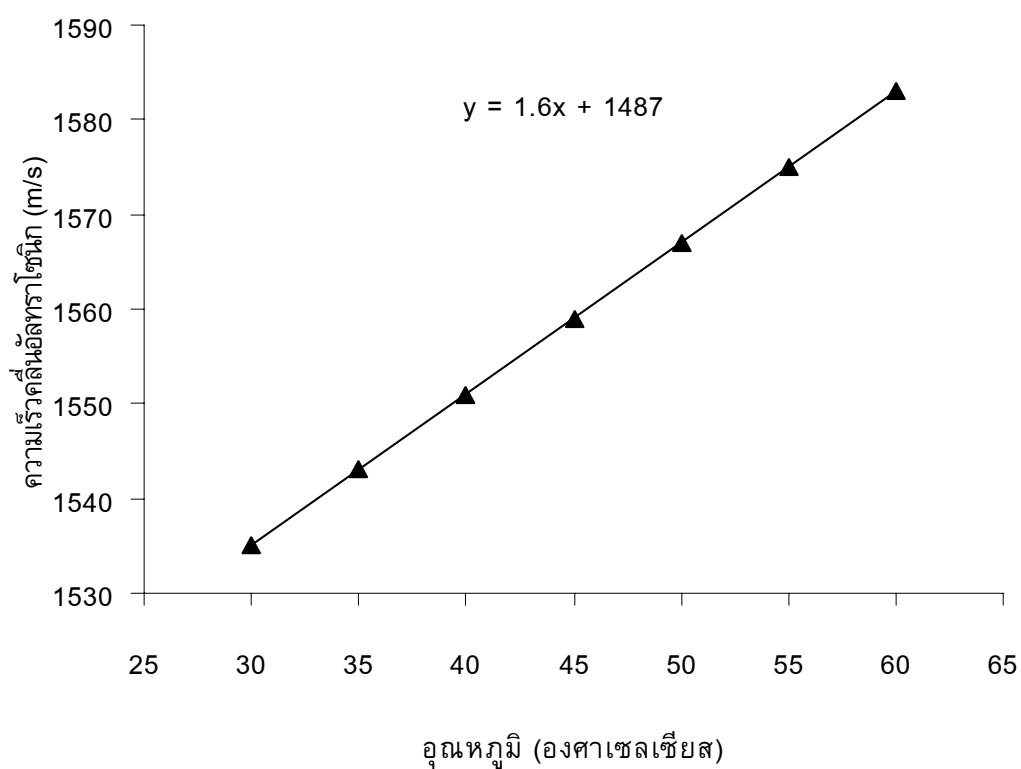
$$c = 0.195 \times 10^2 \times 812 \times 10^3 = 1583 m/s$$

นำข้อมูลความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกและอุณหภูมิมาเขียนกราฟ

ตาราง ก แสดงความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ

(Pasteurized Low Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความเร็วคลื่นอัลตราโซนิก (m/s)
30	1535
35	1543
40	1551
45	1559
50	1567
55	1575
60	1583



ภาพประกอบ ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลตราโซนิกกับอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = 1.6x + 1487$

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ

วิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิต่างๆ
(รายละเอียดวิธีการทดลองหน้า 37-39) สรุปได้ดังนี้

1. บันทึกค่าอุณหภูมิขณะใด ๆ กับความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์ในขวดแก้วรูปชมพู่ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิตั้งใจจนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการจะวัด จะได้ระยะ h ซึ่งก็คือระยะที่ความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์สูงขึ้นจากอุณหภูมิตั้งใจนั้นคือระยะ $h_T - h_0$

2. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ จากสมการ

$$\rho_T = \frac{m}{V_T}$$

เมื่อ

ρ_T เป็นความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T
 m เป็นมวลของนมพาสเจอร์ไรส์
 V_T เป็นปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T

ในการทดลองจะได้ว่า ค่า V_T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่า

$$V_T = V_0 + (A - a)(h_T - h_0)$$

โดย V_0 เป็นปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิตั้งใจ
 h_0 เป็นระดับความสูงเริ่มต้นของนมพาสเจอร์ไรส์
 h_T เป็นระดับความสูงของนมพาสเจอร์ไรส์ที่อุณหภูมิ T
 A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดแก้วรูปชมพู่
 a เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์

ตารางแสดงผลการทดลองการหาค่าความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมิ
ต่างๆ

อุณหภูมิ (C)	นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ m = 256.214 g
	h (cm) (h_T h_0)
30	0.10
35	0.26
40	0.44
45	0.62
50	0.80
55	0.97
60	1.15

1. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0)$ จะได้ปริมาตรของ
นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 30 C

$$V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^{-6} \text{ m}^3) (29.88 - 3.12) \times 10^{-5} \text{ m}^2 \times h \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^{-6} \text{ m}^3) (26.76 \times 10^{-5}) \text{ m}^2 \times (0.10 \times 10^{-2}) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^{-6} \text{ m}^3) (2.676 \times 10^{-7} \text{ m}^3)$$

$$V_T = 250.268 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^{-3} \text{ kg}}{250.268 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 1.024 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

2. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$ จะได้ปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 35 C

$$V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (29.88 + 3.12) \times 10^5 \text{ m}^2 \times h \times 10^2 \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (26.76 \times 10^5) \text{ m}^2 \times (0.26 \times 10^2) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (6.9576 \times 10^7 \text{ m}^3)$$

$$V_T = 250.696 \times 10^6 \text{ m}^3$$

แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^3 \text{ kg}}{250.696 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.022 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

3. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$ จะได้ปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 40 C

$$V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (29.88 + 3.12) \times 10^5 \text{ m}^2 \times h \times 10^2 \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (26.76 \times 10^5) \text{ m}^2 \times (0.44 \times 10^2) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (11.7744 \times 10^7 \text{ m}^3)$$

$$V_T = 251.177 \times 10^6 \text{ m}^3$$

แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^3 \text{ kg}}{251.177 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.020 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

4. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$ จะได้ปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 45 C

$$V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (29.88 + 3.12) \times 10^5 \text{ m}^2 \times h \times 10^2 \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (26.76 \times 10^5) \text{ m}^2 \times (0.62 \times 10^2) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (16.5912 \times 10^7 \text{ m}^3)$$

$$V_T = 251.659 \times 10^6 \text{ m}^3$$

แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^3 \text{ kg}}{251.659 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.018 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

5. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$ จะได้ปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 50 C

$$V_T = V_0 (A + a)(h_T + h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (29.88 + 3.12) \times 10^5 \text{ m}^2 \times h \times 10^2 \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (26.76 \times 10^5) \text{ m}^2 \times (0.80 \times 10^2) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (21.408 \times 10^7 \text{ m}^3)$$

$$V_T = 252.141 \times 10^6 \text{ m}^3$$

แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^3 \text{ kg}}{252.141 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.016 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

6. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0)$ จะได้ปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 55 C

$$V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (29.88 - 3.12) \times 10^5 \text{ m}^2 \times h \times 10^2 \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (26.76 \times 10^5) \text{ m}^2 \times (0.97 \times 10^2) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (25.9572 \times 10^7 \text{ m}^3)$$

$$V_T = 252.596 \times 10^6 \text{ m}^3$$

แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^3 \text{ kg}}{252.596 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.014 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

7. แทนค่า h ลงในสมการ $V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0)$ จะได้ปริมาตรของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำที่อุณหภูมินั้น เช่น ที่อุณหภูมิ 60 C

$$V_T = V_0 (A - a)(h_T - h_0)$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (29.88 - 3.12) \times 10^5 \text{ m}^2 \times h \times 10^2 \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (26.76 \times 10^5) \text{ m}^2 \times (1.15 \times 10^2) \text{ m}$$

$$V_T = (250 \times 10^6 \text{ m}^3) (30.774 \times 10^7 \text{ m}^3)$$

$$V_T = 253.078 \times 10^6 \text{ m}^3$$

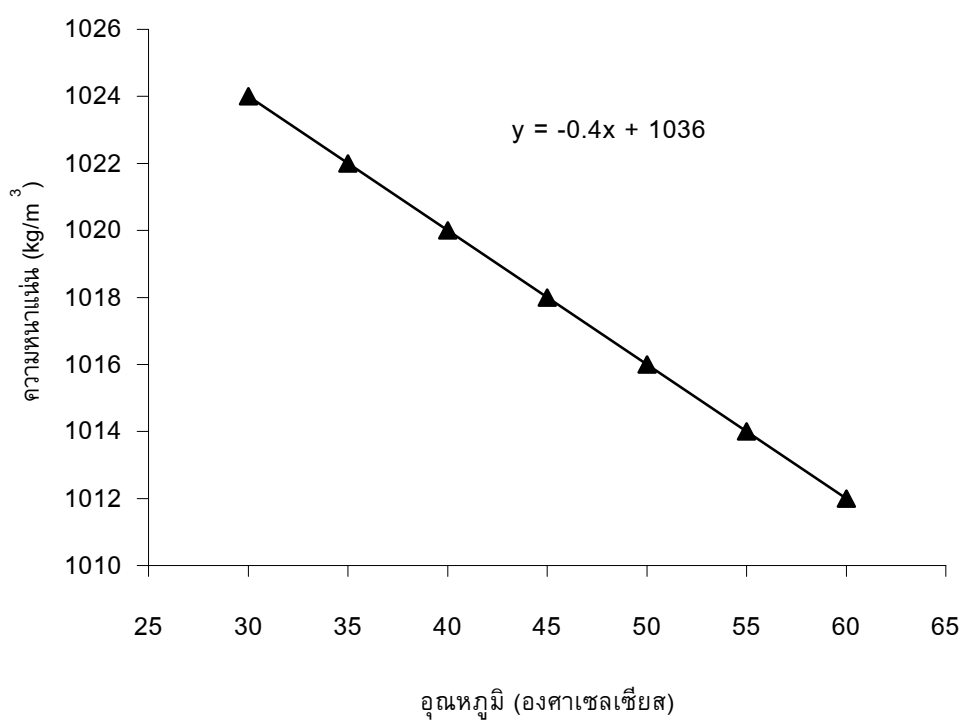
แทนค่า V_T ลงในสมการ $\rho_T = \frac{m}{V_T}$ จะได้

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{256.214 \times 10^3 \text{ kg}}{253.078 \times 10^6 \text{ m}^3} = 1.012 \times 10^3 \text{ kg / m}^3$$

นำข้อมูลความหนาแน่นของนมพาสเจอร์ไรส์และอุณหภูมิมาเขียนกราฟ

ตาราง ข แสดงค่าความหนาแน่นกับค่าอุณหภูมิของนมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ
(Pasteurized Low Fat Milk)

อุณหภูมิ (°C)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
30	1024
35	1022
40	1020
45	1018
50	1016
55	1014
60	1012



ภาพประกอบ ข กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของ
นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ (Pasteurized Low Fat Milk)

จากการปรับกราฟจะได้สมการ $y = -0.4x + 1036$

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายประภาส มุลนา
วันเดือนปีเกิด	29 กรกฎาคม 2514
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	144 ถนนนิคมสายกลาง ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี 34000
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	อาจารย์ 1 ระดับ 5
สถานที่ทำงาน	โรงเรียนโขงเจียมวิทยาคม ตำบลโขงเจียม อำเภอโขงเจียม จังหวัดอุบลราชธานี 34220
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2533	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนเบ็ญจะมะมหาราช ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี
พ.ศ. 2537	ค.บ. (วิทยาศาสตร์ทั่วไป) จาก วิทยาลัยครู อุบลราชธานี
พ.ศ. 2540	ค.บ. (ฟิสิกส์) จาก สถาบันราชภัฏอุบลราชธานี
พ.ศ. 2547	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ