การศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่โดยเทคนิคอัลทราโซนิก

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุรเชษฐ์ กฤชแสงโชติ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2549
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่โดยเทคนิคอัลทราโซนิก

บทคัดย่อ

ของ

สุรเชษฐ์ กฤชแสงโชติ

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2549

สุรเชษฐ์ กฤชแสงโชติ. (2549). *การศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่โดยเทคนิคอัลทราโซนิก*. ปริญญานิพนธ์ วท.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย, อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตนะกูล, อาจารย์ศรีวิกรณ์ ดิษฐอุดมโพธิ์.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่โดยเทคนิคอัลทราโซนิก เพื่อการตรวจสอบสมบัติเชิงกลของเยลลี่กระเจี๊ยบ ในขณะที่เยลลี่กำลังเปลี่ยนจากโซลเป็นเจล โดยใช้สารตัวอย่างคือเยลลี่ที่มีปริมาณของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม โดยในเยลลี่แต่ละตัวอย่าง มีร้อยละโดยน้ำหนักของโลคัสต์บีนกัมอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 จำนวน 6 ตัวอย่าง ทดลองในช่วงอุณหภูมิ 30 – 70 องศาเซลเซียส โดยใช้คลื่นอัลทราโซนิกความถี่ 812 $\pm$ 0.5 กิโลเฮิรตซ์ เพื่อหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ (v) และหาความหนาแน่นของเยลลี่ (ρ) รวมถึงการวัดความหนืด (η) ด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield รุ่น RDVT II และมอดุลัสเฉือน (G) ที่แปรผันตามอุณหภูมิและแปรผันตามร้อยละของโลคัสต์บีนกัม เมื่อนำปริมาณทั้งสาม (v, ρ, G) มาคำนวณหาบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กระเจี๊ยบ และได้ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับอุณหภูมิ และความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมโดยน้ำหนัก ในรูปแบบของสมการเชิงตัวเลข ผลการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าบัลค์มอดุลัสจะลดต่ำลงแบบเชิงเส้น และเมื่อเพิ่มร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ค่าบัลค์มอดุลัสจะค่อย ๆ ลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ เชน ที่พบว่า เมื่อเพิ่มร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นจะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และจากการทดลองนี้ ได้ค่าอุณหภูมิที่เยลลี่เริ่มเปลี่ยนจากโซลเป็นเจล อยู่ที่ 46 $\pm$ 2 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของซิเมโอเน ที่พบว่าอุณหภูมิที่เยลลี่เริ่มเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลอยู่ที่ 44 องศาเซลเซียส

A STUDY OF SOL-GEL TRANSITION OF JELLY BY ULTRASONIC TECHNIQUES

AN ABSTRACT

BY

SURACHATE KRISHSANGCHOTE

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Master of Science Degree in Physics

at Srinakharinwirot University

October 2006

Surachate Krishsangchote (2006*). A Study of Sol-Gel Transition of Jelly by Ultrasonic Techniques.* Master Thesis, M.Sc.(Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist.Prof.Dr.Fuanglada Veerasai, Instructor Somsak Maneerattanakul, Instructor Srivikorn Dit-Udom-Po

This research was the study of the sol-gel transition of jelly by ultrasonic techniques. The purpose of this work was determined the mechanical properties of roselle jelly during the process of its sol-gel transition using 1 percentage weight of the sample element of jelly. The mixtures of the combination between κ-Carrageenan and Locust Bean Gum (LBG) from 6 samples, were between 0 - 1 percentage weight of LBG. The experiment was carried out in the temperature range 30°C – 70°C. The ultrasound was used in the frequency of 812 ± 0.5 kHz in order to find the ultrasonic velocity (v) in the jelly. Its density (ρ) was obtained and the viscosity (η) was measured by the Brookfield Viscometer (RDVT II) for calculating shear modulus (G) which varied as the temperature and varied as the percentage of LBG. From the value of ultrasonic velocity (v), the density (ρ) and the shear modulus (G), the bulk modulus (B) of the jelly was calculated. The relations between bulk modulus of the jelly and the temperature, and the relations between bulk modulus of the jelly and percentage of LBG by weight were obtained in the form of numerical expression. The results indicated that the bulk modulus decreased linearly with increasing temperature, and slowly decreased non-linearly with increasing the percentage of LBG. The result of this study is consistent with Chen's research that when the percentage of LBG in jelly increased, the elastic modulus decreased non-linearly. By considering the changing rate of viscosity comparing with temperature, the gelation temperature was 46°C ± 2°C. This result was also consistent with Simeone's gelation temperature of 44 °C.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่โดยเทคนิคอัลทราโซนิก

ของ
สุรเชษฐ์ กฤชแสงโชติ

ได้รับการอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)
วันที่..... เดือน..... พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย)

..... กรรมการ
(อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตนะกูล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ศรีวิกรณ์ ดิษฐอุดมโพธิ์)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(รองศาสตราจารย์สุวรรณ คูสำราญ)

..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฟื่องลดา วีระสัย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย อาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตนะกูล และ อาจารย์ศรีวิกรณ์ ดิษฐอุดมโพธิ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาและข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำงานวิจัย ผู้วิจัยซาบซึ้งและขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์สุวรรณ คูสำราญ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และ อาจารย์ ดร.วิชุดา บุญยรัตกลิน ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รวมทั้งให้คำแนะนำและแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและประสิทธิ์ประสาทวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษาในสถาบันแห่งนี้

ขอขอบพระคุณผู้อำนวยการ ดร.ธงชัย ชิวปรีชา ผู้อำนวยการโรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ ผู้ให้การสนับสนุนและอนุมัติให้ผู้วิจัยลาศึกษาต่อด้วยทุนพัฒนาบุคลากรของโรงเรียน อาจารย์อัมพร บุญญาสถิตสถาพร หัวหน้าสาขาวิชาฟิสิกส์ ที่สนับสนุนและอนุญาตให้ใช้เวลาในช่วงที่ไม่มีภาระงานสอนเพื่อทำงานวิจัยนี้ ตลอดจนเพื่อนครูในสาขาวิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ช่วยแบ่งเบาภาระหน้าที่งานสอนในขณะที่ผู้วิจัยลาศึกษาต่อโดยใช้เวลาบางส่วน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือที่ใช้ในการทำการทดลองบางส่วนของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่เป็นกำลังใจและสร้างบรรยากาศทางวิชาการที่ดีตลอดมา

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่เป็นทั้งกำลังใจ แรงผลักดันให้ผู้วิจัยได้ศึกษาในสาขาที่รักและมุ่งหวังจนสำเร็จลุล่วงอย่างไม่มีเงื่อนไข และขอบคุณพี่สาว ที่ให้ทั้งกำลังใจและความช่วยเหลือตลอดมา

สุรเชษฐ์ กฤชแสงโชติ

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	**บทนำ**.....	1
	ภูมิหลัง.....	1
	จุดมุ่งหมายของงานวิจัย.....	1
	ขอบเขตการวิจัย.....	2
	ความสำคัญของงานวิจัย.....	2
2	**ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง**.....	3
	ทฤษฎีในงานวิจัย.....	3
	สมบัติทางกายภาพของตัวกลาง.....	3
	ทรานสดิวเซอร์ และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก.....	4
	ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลาง และมอดุลัสความยืดหยุ่น.....	5
	คอลลอยด์.....	10
	โซล และเจล.....	11
	ปัจจัยที่มีผลต่อการแข็งตัวของเจล.....	12
	ไฮโดรคอลลอยด์.....	13
	ความหนืด.....	15
	คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีมกัม.....	19
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
3	**วิธีดำเนินการทดลอง**.....	27
	ขั้นตอนการเตรียมเยลลี่.....	27
	ขั้นตอนการหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่.....	28
	ขั้นตอนการหาความหนาแน่นของเยลลี่.....	30
	ขั้นตอนการวัดความหนืดและหามอดุลัสเฉือนของเยลลี่.....	32
	ขั้นตอนการคำนวณหาบัลค์มอดุลัสของเยลลี่.....	34

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
4	**ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล**.....	36
	ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่.....	36
	ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อความหนาแน่นของเยลลี่.....	37
	ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อความหนืดของเยลลี่....	39
	ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อมอดุลัสเฉือนของเยลลี่.....	41
	ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อบัลค์มอดุลัสของเยลลี่...	42
5	**สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ**.....	44
	สรุปผลการทดลอง.....	44
	อภิปรายผลการทดลอง.....	44
	ข้อเสนอแนะ.....	45
บรรณานุกรม.....		47
ภาคผนวก.....		51
ประวัติย่อผู้วิจัย.....		63

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	ค่าสมบัติทางกายภาพของของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	3
2	ค่าประมาณของมอดุลัสยืดหยุ่น.....	8
3	ค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของวัสดุชนิดต่าง ๆ.....	9
4	ระบบคอลลอยด์ที่พบในอาหาร.....	11
5	สมบัติของไฮโดรคอลลอยด์และภาวะที่เหมาะสมในการเกิดเจล.....	15
6	แสดงค่าความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	16
7	การเปรียบเทียบสมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด.....	21
8	การเปรียบเทียบสมบัติของแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอโอตา-คาร์ราจีแนนในระบบเจล.....	21
9	อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่ใช้ในการทดลอง.....	28
10	สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน.....	37
11	สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน.....	38
12	สมการความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน.....	46
13	ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน.....	51
14	ค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	51

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง		หน้า
15	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน……..	52
16	ความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบเฉลี่ยกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน……..…….....	52
17	ความหนืดเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน…….....	53
18	มอดุลัสเฉือนของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน……..……	53
19	มอดุลัสเฉือนของเยลลี่กระเจี๊ยบกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน……..……..……..	54
20	บัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน……..……..……..	54
21	บัลค์มอดุลัสกับปริมาณโลคัสต์บีนกัมเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน……..……..……..	55
22	แสดงค่าระยะที่เฟสของคลื่นสองขบวนตรงกัน (L_0, L_1, L_2, L_3) และค่าผลต่างระยะ (ΔL_1, ΔL_2, ΔL_3) ซึ่งคือค่าความยาวคลื่น λ ที่วัดในตัวกลางเยลลี่ J1 โดยใช้ความถี่คลื่น 812.5 กิโลเฮิรตซ์……..…….....	56
23	แสดงผลต่างความสูงของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ……..……	58
24	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิ……..……	60

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ **หน้า**

1 วัสดุความยาว L พื้นที่ A ถูกยืดออกเป็นระยะ ΔL ด้วยแรง F..... 6
2 การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงเฉือน..... 7
3 วัสดุเปลี่ยนปริมาตร โดยไม่เปลี่ยนรูปทรง เมื่อได้รับแรงดันจากภายนอก..... 8
4 วัสดุได้รับแรงดึงเกิดความเครียดทั้งสองแนวแกน..... 9
5 การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ ในขณะที่เปลี่ยนจากโซลเป็นเจล 12
6 ความหนืดของของไหลชนิดต่าง ๆ เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ..... 16
7 โครงสร้างของแคปปา-คาร์ราจีแนน ไอโอตา-คาร์ราจีแนน และ
แลมบ์ดา-คาร์ราจีแนน..... 20
8 กลไลการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน..... 20
9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิในตัวกลางนม
พาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด..... 22
10 กราฟแสดงค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในอิมัลชัน กับความเข้มข้นของ
อิมัลชัน (น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ) โดยใช้ความถี่คลื่นอัลทรา
โซนิก 2.25 MHz..... 23
11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผสมของแคปปาคาร์ราจีแนน
และโลคัสต์บีนกัม กับค่ามอดุลัส ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของ
โพแทสเซียมคลอไรด์ที่แตกต่าง..... 24
12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับความเข้มข้นของสารละลาย
โพแทสเซียมคลอไรด์ในชุดการทดสอบที่มีปริมาณของแคปปาคาร์ราจีแนน
และโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน (ปริมาณรวม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก).... 25
13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสความยืดหยุ่นกับอุณหภูมิของสารละลาย
ผสมที่ผสมด้วยเจลเลนและแคปปาคาร์ราจีแนน โดยมีอัตราการเย็นตัวที่
แตกต่างกัน..... 26
14 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (การหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก)..... 29
15 การหาความหนาแน่นของเยลลี่..... 30
16 เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer..... 32
17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกใน
ตัวกลางเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์รา
จีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของ
โลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน..... 36

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ **หน้า**

18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน..... 38

19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนืดเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน..... 39

20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเทียบกับอุณหภูมิเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่ที่แตกต่างกัน..... 40

21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเทียบกับความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน..... 40

22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน..... 41

23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน..... 42

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ภูมิหลัง

คลื่นเหนือเสียงหรืออัลทราซาวนด์ (Ultrasound) เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นขีดจำกัดของการได้ยินของมนุษย์

ในด้านวิทยาศาสตร์การอาหาร การตรวจสอบความยืดหยุ่นของโซลและเจล (Sol & Gel) จะใช้เครื่องมือคือ เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัสอาหาร (Texture Analyser) หรือ เพเนโทรมิเตอร์ (Penetrometer) ซึ่งจะต้องอาศัยการเจาะทะลวงลงในเนื้อเจล ซึ่งเกิดความเสียหายกับอาหาร หรือใช้เครื่องวัดความหนืดในการวิเคราะห์ขณะที่เป็นโซล แต่วิธีการทางวิทยาศาสตร์การอาหารนั้น ใช้เวลาค่อนข้างนาน เครื่องมือที่ใช้ราคาแพง และมีพิกัดการใช้งานที่ไม่ครอบคลุมถึงในทุกสถานะ แต่เทคนิคอัลทราโซนิก (Ultrasonic Techniques) เป็นอีกวิธีการที่สามารถตรวจสอบความยืดหยุ่นของอาหารได้ในทุกช่วงสถานะ

การใช้เทคนิคอัลทราโซนิกเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) ทั้งนี้ ในการใช้เทคนิคอัลทราโซนิกจะช่วยให้เนื้ออาหารไม่เสียหาย ช่วยลดเวลาในการตรวจสอบและประหยัดกว่าการใช้เครื่องมือดังกล่าว และทราบถึงการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจล ซึ่งเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์การอาหารไม่สามารถทำได้

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์เทคนิคอัลทราโซนิก เพื่อศึกษาการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่ในกรณีที่ปริมาณของแคปปาคาร์ราจีแนน (κ-Carrageenan) โลคัสต์บีนกัม (Locust Bean Gum) เป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่แตกต่างกันและในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของเยลลี่ และศึกษาช่วงอุณหภูมิที่เป็นช่วงเกิดเจลของเยลลี่

1.2 จุดมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 หาความสัมพันธ์ของบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ที่เป็นฟังก์ชันกับปริมาณของโลคัสต์บีนกัม

1.2.2 ความสัมพันธ์ของบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ พร้อมทั้งหาสมการเชิงตัวเลขของความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่และอุณหภูมิ

1.2.3 หาช่วงอุณหภูมิที่เยลลี่เปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์การอาหารที่มีอยู่

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 หาค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ที่มีปริมาณรวมของแคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม เป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ปรับอัตราส่วนของปริมาณแคป-ปาคาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม จำนวน 6 การทดลอง คือ 10:0 , 8:2 , 6:4 , 4:6 , 2:8 , 0:10) เมื่อช่วงอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 70 - 30 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในช่วงที่แคปปา-คาร์ราจีแนน ยังรักษาสภาพการเกิดเจล และหาช่วงอุณหภูมิของเยลลี่ เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

1.3.2 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล

1.3.3 เปรียบเทียบค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของเยลลี่กับผลงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์การอาหารที่มีอยู่ก่อนได้

1.4 ความสำคัญของงานวิจัย

1.4.1 ได้สมการเชิงตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับปริมาณของโลคัสต์บีนกัม สมการเชิงตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่

1.4.2 ได้อุณหภูมิใช้ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงจากโซลเป็นเจลของเยลลี่

1.4.3 ได้แนวทางสำหรับการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของเยลลี่ ในกรณีที่เครื่องมือวัดทางวิทยาศาสตร์การอาหาร เช่น เครื่องวัดความหนืด หรือเครื่องวัดเนื้อสัมผัส ไม่สามารถทำได้

บทที่ 2
ทฤษฎี และเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีในงานวิจัย

2.1.1 สมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

2.1.2 ทรานสดิวเซอร์ และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก

2.1.3 ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลาง และมอดุลัสความยืดหยุ่น

2.1.4 คอลลอยด์

2.1.5 โซล และ เจล

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการแข็งตัวของเจล

2.1.7 ไฮโดรคอลลอยด์

2.1.8 ความหนืด

2.1.9 คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีในงานวิจัย

2.1.1 สมบัติทางกายภาพของตัวกลาง

สมบัติทางกายภาพของตัวกลางของเหลว ที่สามารถหาได้จากวิธีทางอัลทราโซนิก ได้แก่ ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก บัลค์มอดุลัส ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ เป็นต้น ดังตารางที่ 1

ตาราง 1 แสดงค่าสมบัติทางกายภาพของของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส
ที่มา : Lide,D.R.. (1996). Handbook of Chemistry and Physics p.14-35

ชนิดของของเหลว	ความหนาแน่น (kg/m^3)	บัลค์มอดุลัส $(Pa)x10^9$	ความเร็วคลื่น (m/s)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ $(kg/m^2 \cdot s)x10^6$
น้ำกลั่น	998	2.23	1,496.7	1.49
น้ำทะเล	1025	2.40	1,531	1.57
ปรอท	13,500	28.3	1,450	19.58
กลีเซอรีน	1,260	4.57	1,904	2.4

ตาราง 1 (ต่อ)

ที่มา : Lide,D.R.. (1996). Handbook of Chemistry and Physics. P.14-35.

ชนิดของของเหลว	ความหนาแน่น (kg/m^3)	บัลค์มอดุลัส (Pa)x10^9	ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก (m/s)	ความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะ ($kg/m^2 \cdot s$)x10^6
คลอโรฟอร์ม	1,490	1.45	987	1.47
เบนซีน	870	1.46	1,295	1.13
ไนโตรเบนซีน	1,200	2.57	1,463	1.76
เมทานอล	791	0.96	1,103	0.87
คาร์บอนเตตระคลอไรด์	1,595	1.37	926	1.48
อะซีโตน	790	1.08	1,174	0.93
เอทานอลอะไมด์	1,018	3.03	1,724	1.76

2.1.2 ทรานสดิวเซอร์ และปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก

ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) คือ อุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนไปมา ระหว่างพลังงานไฟฟ้าและพลังงานกล และมีความสามารถในการส่งและรับคลื่นได้ โดยทรานดิวเซอร์บางตัวสามารถทำหน้าที่รับส่งคลื่นอัลทราโซนิกในตัวเดียวกัน ทรานสดิวเซอร์มีหลายชนิด เช่น เพียโซอิเล็กตริกทรานสดิวเซอร์ (Piezoelectric Transducer) แมกนีโตสตริกทีฟทรานดิวเซอร์ (Magnetostrictive Transducer)

ปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริก ถูกค้นพบขึ้นโดย ปีแอร์ คูรี (Pierre Curie) ในปี ค.ศ.1880 ซึ่งปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริกนี้จะเกิดขึ้นตามธรรมชาติ ในผลึกของสารบางชนิดที่เป็นอสมมาตร เมื่อให้ความเค้นเชิงกลกระทำแก่ผลึกที่เป็นอสมมาตร จะเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นบนผิว โดยชนิดของประจุจะขึ้นกับความเค้นเชิงกลที่กระทำ นั่นคือการสั่นเชิงกลถูกเปลี่ยนให้เป็นการสั่นทางไฟฟ้า โดยในการเปลี่ยนไปมาระหว่างการสั่นทางไฟฟ้าและการสั่นเชิงกล จะมีความถี่สั่นพ้อง (Resonance Frequency) อยู่ค่าหนึ่ง

สารเซรามิกบางตัว ที่มีคุณสมบัติการเกิดปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กตริก สามารถนำมาใช้เป็นทรานดิวเซอร์ได้ โดยทรานสดิวเซอร์ที่ใช้ในเทคนิคอัลทราโซนิก คือเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ สารที่ใช้กันแพร่หลายคือ แบเรียมไททาเนต (Barium Titanate : $BaTiO_3$) ควอตซ์ (Quartz : SiO_2) เลดเซอโคเนียมไทนาเนต (Lead Zirconium Titanate : PZT)

2.1.3 ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลาง และมอดุลัสความยืดหยุ่น

จากสมการคลื่นในหนึ่งมิติ

$$\frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 S(x,t)}{\partial t^2} \qquad \text{----------(1)}$$

จะพบว่าความเร็วของคลื่นอัลทราโซนิก (Ultrasonic Velocity) ในตัวกลางใด ๆ ขึ้นกับปริมาณ 2 ปริมาณ คือ มอดุลัสของความยืดหยุ่น (Elastic Modulus) และความหนาแน่น (Density) ของตัวกลางนั้นตามความสัมพันธ์ (McClement, D.J. 1995. : 293)

$$\frac{1}{v^2} = \frac{\rho}{E} \qquad \text{----------(2)}$$

เมื่อ

v เป็นความเร็วของคลื่นอัลทราโซนิก หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

ρ เป็นความหนาแน่นของตัวกลาง หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

E เป็นมอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวกลาง หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

ซึ่งเขียนได้อีกรูปคือ

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \text{----------(3)}$$

เมื่อ

v เป็นความเร็วของคลื่นอัลทราโซนิก หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

ρ เป็นความหนาแน่นของตัวกลาง หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

E เป็นมอดุลัสของความยืดหยุ่นของตัวกลาง หน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร

มอดุลัสความยืดหยุ่น

มอดุลัสความยืดหยุ่นมีหลายประเภท เช่นมอดุลัสของยัง (Young's Modulus) มอดุลัสเฉือน (Shear Modulus) และบัลค์มอดุลัส (Bulk Modulus)

มอดุลัสของยัง คือมอดุลัสความยืดหยุ่นของการยืดหรือหด ให้นิยามคืออัตราส่วนระหว่างความเค้นตามยาวต่อความเครียด ใช้สัญลักษณ์คือ Y เขียนในรูปสมการได้คือ

$$Y = \frac{F_{\perp} / A}{\Delta L / L} \qquad \text{----------(4)}$$

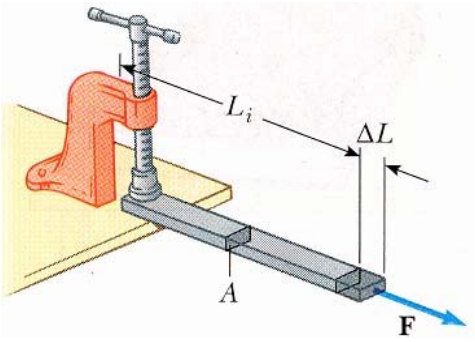
เมื่อ Y คือ มอดุลัสของยัง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

$F_{\perp}$ คือ แรงที่กระทำกับวัตถุในแนวตั้งฉากกับพื้นที่ หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

A คือ พื้นที่ของวัตถุ หน่วยเป็นตารางเมตร

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนไป หน่วยเป็นเมตร

L_i คือ ความยาวเดิมของวัตถุ หน่วยเป็นเมตร

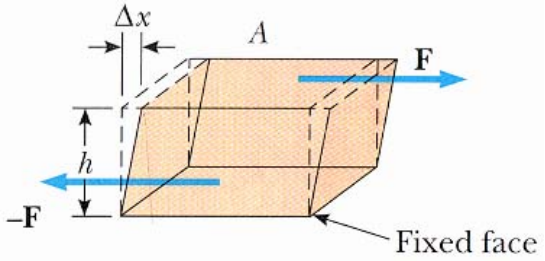


ภาพประกอบ 1 วัสดุความยาว L_i พื้นที่ A ถูกยืดออกเป็นระยะ ΔL ด้วยแรง F

ที่มา : Serway A.R. (2000). Physics For Scientists and Engineers with Modern Physics. 5th edition. Florida : Saunders College.

มอดุลัสเฉือน คือมอดุลัสที่เกิดจากการผิดรูปของวัตถุที่อยู่ภายใต้ความเค้นเฉือน นิยามความเค้นเฉือนคือเป็นแรงในแนวสัมผัสกับผิวของวัตถุต่อพื้นที่ซึ่งแรงนั้นกระทำ ใช้สัญลักษณ์คือ G เขียนในรูปสมการได้คือ

$$G = \frac{F_{\parallel} / A}{\Delta x / h} \qquad \text{----------(5)}$$



ภาพประกอบ 2 การเปลี่ยนรูปร่างของวัตถุเมื่อได้รับแรงเฉือน

ที่มา : Serway A.R. (2000). Physics For Scientists and Engineers with Modern Physics. 5th edition. Florida : Saunders College.

เมื่อ

G เป็นมอดุลัสเฉือน หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

$F_{||}$ เป็นแรงที่กระทำกับวัตถุในแนวขนานกับพื้นที่ หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

A เป็นพื้นที่ของวัตถุ หน่วยเป็นตารางเมตร

Δx เป็นระยะที่วัตถุโย้ไป หน่วยเป็นเมตร

h เป็นความสูงของวัตถุ หน่วยเป็นเมตร

ในกรณีของวัตถุที่มีลักษณะเป็นแท่งหรือก้อน แรงที่กระทำจากภายนอก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตร ให้นิยามของบัลค์มอดุลัสเป็นอัตราส่วนของความเค้นต่อการความเครียดเชิงปริมาตร ซึ่งจะเขียนเป็นความสัมพันธ์

$$B = \frac{\Delta P}{-\Delta V / V} \qquad \text{----------(6)}$$

เมื่อ

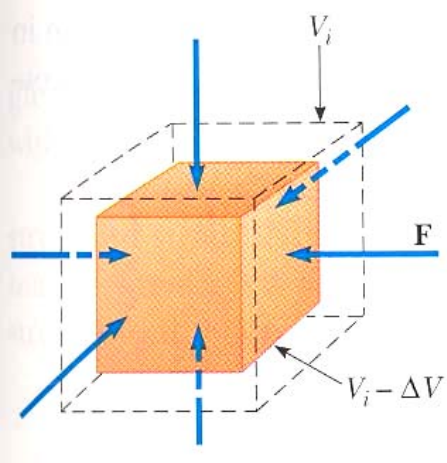
B เป็นบัลค์มอดุลัสของตัวกลาง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

ΔP เป็นความเค้นเชิงปริมาตรที่กระทำกับวัตถุ หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

ΔV เป็นปริมาตรที่เปลี่ยนไป หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

V เป็นปริมาตรเดิมของตัวกลางก่อนถูกบีบอัด หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

เครื่องหมาย – แสดงการเปลี่ยนของ ΔP และ ΔV ที่ตรงข้ามกัน



ภาพประกอบ 3 วัสดุเปลี่ยนปริมาตร โดยไม่เปลี่ยนรูปทรง เมื่อได้รับแรงดันจากภายนอก

ที่มา : Serway A.R. (2000). Physics For Scientists and Engineers with Modern Physics. 5th edition. Florida : Saunders College.

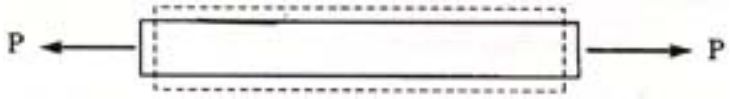
ตาราง 2 แสดงค่าประมาณของมอดุลัสยืดหยุ่น

ที่มา : ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2547). ฟิสิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 1 หน้า 339

วัสดุ	มอดุลัสของยัง Y (Pa)	มอดุลัสเฉือน G (Pa)	บัลค์มอดุลัส B (Pa)
อะลูมิเนียม	7.0×10^{10}	2.5×10^{10}	7.5×10^{10}
ทองเหลือง	9.0×10^{10}	3.5×10^{10}	6.0×10^{10}
ทองแดง	11.0×10^{10}	4.4×10^{10}	14.0×10^{10}
แก้วคราวน์	6.0×10^{10}	2.5×10^{10}	5.0×10^{10}
เหล็ก	21.0×10^{10}	7.7×10^{10}	16.0×10^{10}
ตะกั่ว	1.6×10^{10}	0.6×10^{10}	4.1×10^{10}
นิกเกิล	21.0×10^{10}	7.8×10^{10}	17.0×10^{10}
เหล็กกล้า	20.0×10^{10}	7.5×10^{10}	16.0×10^{10}

อัตราส่วนปัวส์ซอง (Poisson's Ratio)

เมื่อก้อนวัตถุรับแรงดึงจะเกิดการยืดตัวตามแนวแกน อันเป็นผลเนื่องมาจากการหดตัวของก้อนวัตถุตามขวางดังรูป เส้นประจะแสดงก้อนวัตถุก่อนการรับแรงดึง ส่วนเส้นทึบจะแสดงก้อนวัตถุหลังจากที่รับแรงดึง



ภาพประกอบ 4 วัสดุได้รับแรงดึงเกิดความเครียดทั้งสองแนวแกน

ที่มา : ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. (2543). *กลศาสตร์ของแข็ง*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ส.ส.ท.

ความเครียดตามขวางของก้อนวัตถุจะเป็นสัดส่วนกับความเครียดในแนวแกนที่ตำแหน่งเดียวกัน ถ้าวัตถุนั้นมีความยืดหยุ่นเชิงเส้น ประการแรกวัตถุจะต้องเป็นเนื้อเดียวกันตลอดแท่ง และค่ามอดุลัสของยังจะมีค่าเท่ากันตลอดไม่ว่าจะอยู่ในทิศทางใด

อัตราส่วนของความเครียดตามขวางกับความเครียดตามยาว เรียกว่า “อัตราส่วนปัวส์ซอง” เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ σ

$$\sigma = \frac{\text{ความเครียดตามขวาง}}{\text{ความเครียดตามยาว}} \qquad \text{----------(7)}$$

ตาราง 3 แสดงค่าอัตราส่วนปัวส์ซองของวัสดุชนิดต่าง ๆ

ที่มา : Siegmund, A.W. (1996). Available on http://www-mtl.mit.edu/~lincc/constant.html

วัสดุ	อัตราส่วนปัวส์ซอง
อะลูมิเนียม (2024 – T3)	0.330
เบริลเลียม (QMV)	0.030
โบโรซิลิเกต (Ohara E6)	0.195
ทองแดง	0.420
ตะกั่ว	0.420
แมกนีเซียม (AZ31B – H24)	0.350
แมกนีเซียม (HK31A – H24)	0.350
โมลิบดินัม	0.320
เงิน	0.370
แพลทินัม	0.390
เหล็ก (AISI-304)	0.290
แทนทาลัม	0.350

มอดุลัสความยืดหยุ่นทั้ง 3 แบบของวัสดุต่าง ๆ มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$B = \frac{Y}{6(0.5-\sigma)} \qquad \text{----------(8)}$$

และ

$$G = \frac{Y}{2(1-\sigma)} \qquad \text{----------(9)}$$

จากสมการที่ 8 และ 9 จะได้

$$B = \frac{G(1-\sigma)}{3(0.5-\sigma)} \qquad \text{----------(10)}$$

อัตราเร็วของเสียงตามยาวมีความสัมพันธ์กับบัลค์มอดุลัสและมอดุลัสเฉือนตามสมการ

$$V_L = \sqrt{\frac{B+\frac{4}{3}G}{\rho}} \qquad \text{----------(11)}$$

(Asmani, M.; et al. 2000. : 624)

เมื่อ

v_L เป็นความเร็วของคลื่นตามยาวในตัวกลาง หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

B เป็นบัลค์มอดุลัสของตัวกลาง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

G เป็นมอดุลัสเฉือนของตัวกลาง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

ρ เป็นความหนาแน่นของตัวกลาง หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.1.4 คอลลอยด์

สารละลายที่เป็นคอลลอยด์ (Colloid) อนุภาคมีขนาดระหว่าง 10 – 1,000 อังสตรอม อนุภาคของคอลลอยด์มองเห็นด้วยกล้องอัลทราไมโครสโคป (Ultra-microscope) เมื่อนำสารละลายคอลลอยด์ไปผ่านเมมเบรน (Membrane) จะไม่มีการเคลื่อนย้ายของอนุภาคผ่านเมมเบรน

ไลโอฟิลิกคอลลอยด์ (Lyophilic Colloid)

ไลโอฟิลิกคอลลอยด์เป็นคอลลอยด์ที่มีความดึงดูด (Affinity) ต่อตัวกลางสูง มีการดูดซับน้ำไว้ (Hydrated) ซึ่งอาจเรียกว่า ไฮโดรโซล (Hydrosol) และมีความคงตัว (Stability) สูง

สารมี 3 สถานะ แบ่งระบบคอลลอยด์ได้ทั้งหมด 8 ชนิดตามลักษณะของคอลลอยด์ ซึ่งคอลลอยด์ที่พบในอาหารมี 4 ชนิดคือ สารแขวนลอย อิมัลชัน โฟม และโฟมของแข็ง ดังตารางที่ 4

ตาราง 4 แสดงระบบคอลลอยด์ที่พบในอาหาร
ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร หน้า 61

อนุภาคคอลลอยด์	ตัวกลาง	ชื่อระบบคอลลอยด์	ตัวอย่าง
ของแข็ง	ของเหลว	ไลโอโซล โซล	ยาสีฟัน เยลลี่
ของเหลว	ของเหลว	อิมัลชัน	น้ำนม มายองเนส
ก๊าซ	ของเหลว	โฟม	ฟองสบู่ วิพพ์ครีม
ก๊าซ	ของแข็ง	โฟมของแข็ง	ขนมปัง เค้ก

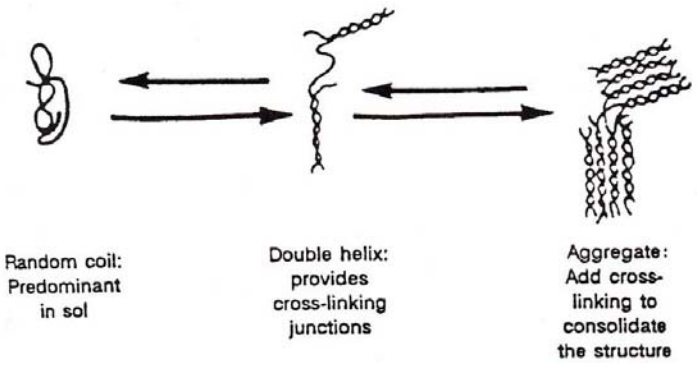
ในระบบคอลลอยด์ที่ประกอบไปด้วยของแข็งและของเหลว อาจเป็นได้ทั้งเจลและโซล ถ้าระบบมีสภาพเป็นของเหลว คือ ตัวกลางอยู่ในสถานะของเหลวและไหลได้ จัดเป็นโซล แต่ถ้าอยู่ในสภาพของแข็งหรือกึ่งของแข็ง (Semi – Solid) ตัวกลางอยู่ในสภาพของแข็งและไหลไม่ได้จะจัดเป็นเจล ดังนั้นคอลลอยด์เป็นได้ทั้งโซลและเจล ขึ้นอยู่กับสภาวะเช่นอุณหภูมิ ในระยะเริ่มต้นเมื่อส่วนผสมถูกทำให้ร้อนจะอยู่ในรูปของโซล และเมื่อปล่อยให้เย็นลงของเหลวที่เป็นโซลจะเปลี่ยนเป็นเจล ดังนั้นโซลและเจลจึงมีสมบัติเปลี่ยนไปมาหากัน (Reversible Sol-Gel Transformation Property)

2.1.5 โซล และ เจล

โซล เป็นคอลลอยด์ชนิดหนึ่งที่มีอนุภาคคอลลอยด์เป็นของแข็ง และตัวกลางเป็นน้ำหรือของเหลว อนุภาคคอลลอยด์ในโซลทำให้ลำแสง ของแสงโพลาไรซ์ กระเจิงออก (Scatter) ดังนั้นเมื่อลำแสงผ่านโซลจะเกิดปรากฏการณ์ทินดอลล์ (Tyndall Effect) และโซลจะมีความดันออสโมซิสต่ำ อนุภาคคอลลอยด์ในโซลจะมีการเคลื่อนที่แบบบราวน์เนียน (Brownian Movement) ถ้าทำให้อนุภาคในโซลมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น อาจจะมีการตกตะกอนของอนุภาคได้

เจล เป็นคอลลอยด์ชนิดไลโอฟิลิกที่มีความหนืดสูง ลักษณะเป็นกึ่งของแข็ง และเมื่อแข็งตัวจะมีรูปทรงคล้ายของแข็งได้ (Rigidity) โดยทั่วไป โครงสร้างของเจลเกิดจากโมเลกุลของอนุภาคคอลลอยด์มาเกาะกันเป็นคู่ แต่ละคู่จะจับรวมกันเป็นผลึก เพิ่มขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อย ๆ โดย

ผลึกหนึ่งจะไปจับกับอีกผลึกหนึ่งกลายเป็นเจล โครงสร้างของเจลจึงมีโมเลกุลเป็นจำนวนมาก จับตัวกันเป็นตาข่าย และมีโมเลกุลน้ำซึ่งเคลื่อนที่ไม่ได้แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของอนุภาคคอลลอยด์ภายในตาข่าย ทำให้เจลแข็งตัวมีรูปร่างแน่นอน ภายในโครงสร้างของเจลมีจุดเชื่อม (Loci) เกิดขึ้นบนโมเลกุลเพื่อให้โมเลกุลเกาะตัวยึดจับกันเป็นเจล จำนวนจุดเชื่อมจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของเจล การเกาะตัวยึดจับกันระหว่างโมเลกุลส่วนใหญ่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังภาพประกอบที่ 5



ภาพประกอบ 5 การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของพอลิแซ็กคาไรด์ ในขณะที่เปลี่ยนจากโซลเป็นเจล
ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร. หน้า 67

การที่โครงสร้างของเจลเกิดการแข็งตัวขึ้นตามธรรมชาตินี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการทดสอบสมบัติทางกายภาพของเจล เครื่องมือที่ใช้วัดความแข็งแรงของเจลคือ เพเนโทรมิเตอร์ ซึ่งในการวัดจะต้องกำหนดอุณหภูมิวัดที่แน่นอน และวัดภายหลังจากปล่อยให้เจลแข็งตัวอย่างน้อย 5-6 ชั่วโมง เพื่อให้การแข็งตัวของเจลค่อนข้างคงที่ สำหรับความอ่อนนุ่ม ของเจลจะประเมินโดยใช้การทดสอบทางประสาทสัมผัส (Sensory Test)

2.1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการแข็งตัวของเจล

เนื่องจากอนุภาคคอลลอยด์มีประจุชนิดเดียวกันอยู่ที่ผิว จึงเกิดจากการผลักกันระหว่างอนุภาคคอลลอยด์ ทำให้อนุภาคคอลลอยด์ยากที่จะเข้ามาใกล้กันและเกาะตัวกัน ดังนั้น ปัจจัยใดที่มีอิทธิพลช่วยให้อนุภาคคอลลอยด์เกาะตัวกันได้ง่ายขึ้นจะช่วยเร่งการแข็งตัวของเจลด้วย ได้แก่

1. ธรรมชาติของคอลลอยด์ ไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์เกิดเจลได้ง่ายกว่าไฮโดรโฟบิกคอลลอยด์ เช่น เพกติน ใช้มากในอุตสาหกรรมอาหาร ช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารอยู่ในรูปของเจล เช่น แยม

2. ความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์มีความสำคัญต่อการเกิดเจล ความเข้มข้นสูงจะเกิดเจลได้ง่ายกว่า แต่ต้องสัมพันธ์กับอุณหภูมิและระยะเวลาด้วย ตัวอย่างเช่น สารละลายเจลาตินที่มีความเข้มข้น 2 เปอร์เซ็นต์ จะแข็งตัวภายในเวลาประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

ถ้าสารละลายเจลาตินมีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ จะแข็งตัวภายในเวลาประมาณ 30 นาที ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส

3. การลดอุณหภูมิของสารละลายลงจะทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น อนุภาคคอลลอยด์เคลื่อนที่ได้ช้าลง ช่วยให้โมเลกุลที่อยู่ใกล้กันเกาะตัวกันได้เร็วขึ้น เจลจะแข็งตัวได้เร็วขึ้น และการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จะทำให้เจลกลายเป็นโซล

4. เกลือบางชนิดเป็นตัวเร่งให้เจลแข็งตัวเร็วขึ้น แต่บางชนิดทำให้เจลแข็งตัวช้าลงขึ้นอยู่กับไอออนที่เป็นองค์ประกอบของเกลือ ตัวอย่างเช่น คาร์ราจีแนน ต้องการโพแทสเซียมไอออนเป็นตัวช่วยเร่งการเกิดเจล ส่วนผลของสารที่ไม่ใช่อิเล็กโทรไลต์ต่อการแข็งตัวของเจลไม่มีกฎที่แน่นอน เช่น น้ำตาลซูโครสที่ความเข้มข้นเหมาะสมจะช่วยให้เกิดเจลได้เร็วขึ้น

5. อุณหภูมิที่ทำให้เจลเป็นของเหลวมักจะสูงกว่าอุณหภูมิที่เจลแข็งตัว ช่วงห่าง (lag) ของอุณหภูมิที่แตกต่างกันเรียกว่า ฮิสเทอรีซิส (Hysteresis)

6. การกวน (stir) มีผลต่อการแข็งตัวเจล เพราะการกวนจะไปทำลายการเกาะตัวกันของโมเลกุล ถ้ามีการกวนหลังจากที่เจลแข็งตัวเรียบร้อยแล้ว จะทำให้โครงสร้างของเจลแตกและมีของเหลวไหลออกมามากขึ้น การทำให้ระบบคอลลอยด์ของเจลเปลี่ยนภาวะเนื่องจากการกวนหรือการเขย่า เรียกว่า ทิโซโทรพี (Thixotropy)

7. Degree of hydration ของอนุภาคคอลลอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยน พีเอช ความเข้มข้นของเกลือ และความเข้มข้นของสารที่ไม่ใช่อิเล็กโทรไลต์ การเติมพวกกรด-ด่างที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.05 นอร์มัล จะทำให้การเกิดเจลช้าลง ส่วนเกลือมีทั้งเร่งและทำให้การเกิดเจลช้าลงได้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของไอออนในเกลือ และชนิดของไอออนที่ถูกเลือกดูดซับไว้ที่ผิวของอนุภาคคอลลอยด์

ซินเนอรีซิส (Syneresis)

เป็นการไหลซึมออกมาของของเหลวที่เป็นส่วนประกอบของเจลโดยไม่คำนึงถึงความดันไอ ของเหลวที่ไหลออกมาเป็นโซลที่เจือจางมาก การเกิดซินเนอรีซิสพบมากในขนมหวานที่ทำด้วยเจลาติน นมเปรี้ยวที่แข็งตัว (Curd) หรือเนย เป็นต้น เนื่องจากมีการสะสมของของเหลวอยู่ในโมเลกุล

2.1.7 ไฮโดรคอลลอยด์

ไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) หรือไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ (Hydrophilic Colloid) หมายถึง สารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์กัม (Polysaccharide Gums) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาวและน้ำหนักโมเลกุลสูง ในโมเลกุลอาจจะประกอบไปด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมด เรียกว่า โฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) เช่น เดกซ์แทรน (Dextran) และ ฟอสโฟแมนแนน

(Phosphomannan) หรือประกอบด้วย โมโนแซ็กคาไรด์หลายชนิด เรียกว่า เฮเตอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) เช่น กัมอะราบิก (Gum Arabic) กัมแกตติ (Gum Ghatti) และกัมคารายา (Gum Karaya) เป็นต้น

สามารถจำแนกไฮโดรคอลลอยด์ ได้ 2 วิธี คือ

1. การจำแนกตามแหล่งที่มา

ซึ่งแบ่งไฮโดรคอลลอยด์ออกเป็น 3 กลุ่มคือ

1. กลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่ได้มาจากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ยาง เมล็ด ราก หัว และสาหร่ายทะเล บางชนิดได้มาจากสัตว์ เช่น เจลาติน

2. กลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นอนุพันธ์ของสารที่ได้จากธรรมชาติหรือดัดแปลงสารจากธรรมชาติ เช่นอนุพันธ์ของเซลลูโลส และอนุพันธ์ของสตาร์ช

3. กลุ่มของไฮโดรคอลลอยด์ที่เป็นสารสังเคราะห์ (Synthetic) เช่น พอลิไวนิลไพโรลิดีน (Polyvinylpyrrolidene) และพอลิเอทิลีน ออกไซด์พอลิเมอร์ (Polyethylene Oxide Polymers)

2. จำแนกตามโครงสร้างของโมเลกุล และหมู่ฟังก์ชัน

ซึ่งแบ่งไฮโดรคอลลอยด์ออกเป็น 4 กลุ่มคือ

1. กลุ่มที่ประกอบด้วยหมู่ซัลเฟต (Sulfated) เช่น คาร์ราจีแนน (Carrageenan) เฟอเซลลาแรน (Furcellaran) อะการ์ (Agar)

2. กลุ่มที่ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลิก (Carboxylic) เช่น แอลจิเนต (Alginate) เพกทิน (Pectin) กัมอะราบิก (Gum Arabic) กัมทรากาแคนต์ (Gum Tragacanth) กัมคารายา (Gum Karaya) กัมแกตติ (Gum Ghatti) แซนแทนกัม (Xanthan Gum) ลาร์ชกัม (Larch Gum)

3. กลุ่มที่ประกอบด้วยหมู่ฟอสโฟรีเลต (Phosphorylated) เช่น ฟอสโฟแมนแนน (Phosphomannan)

4. กลุ่มนอนไอออนิก (Nonionic) เช่น เดกซ์แทรน (Dextrans) กัวร์กัม (Guar Gum) โลคัสต์บีนกัม (Locust Bean Gum) แทมมารินด์กัม (Tamarind Seed Gum) ลามินาแรน (Laminaran)

การเกิดเจล (Gel Formation)

พอลิแซ็กคาไรด์กัมบางชนิด สามารถเกิดเจลได้ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม เช่น เพกติน (Pectin) จะเกิดเจลได้ดีในน้ำร้อนที่มีน้ำตาลและกรด จึงใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมผลิตแยมและเยลลี่ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อเรียบและเป็นเจลที่แผ่ออกได้ (Spreadable Gel) ซึ่งเพกทินที่มีหมู่เมทอกซิลน้อยจะเกิดเจลได้ดีเมื่อมีแคลเซียมและไม่มีน้ำตาล

สำหรับคาร์ราจีแนนเมื่อละลายในน้ำร้อนและปล่อยให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง จะเกิดเจลชนิดเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลและเจลเป็นโซลได้ด้วยความร้อน (Thermo-Reversible Gel) และไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดยังต้องใช้สภาวะพิเศษที่เหมาะสมในการทำให้เกิดเจล เช่น ต้องการโพแทสเซียมไอออน หรือแคลเซียมไอออน แสดงในตารางที่ 5

ตาราง 5 แสดงสมบัติของไฮโดรคอลลอยด์และภาวะที่เหมาะสมในการเกิดเจล
ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร หน้า 197

ไฮโดรคอลลอยด์	การละลาย		ผลของอิเล็กโทรไลต์		ผลของความร้อน	กลไกของการเกิดเจล		ภาวะเกิดเจล
	ร้อน	เย็น	มี	ไม่มี		ความร้อน	เคมี	
แคปปา-คาร์ราจีแนน	✓	-	-	✓	ไม่หลอมเหลวที่อุณหภูมิห้อง	✓	-	ใช้ K^+
แคปปา-คาร์ราจีแนน + โลคัสต์บีนกัม	✓	-	-	✓	-	✓	-	ใช้ K^+
เฟอเซลลาแรน	✓	-	-	✓	-	✓	-	ใช้ K^+
ไอโอตา-คาร์ราจีแนน	✓	-	-	✓	-	✓	-	ใช้ Ca^{+2}
เพกทิน	✓	-	-	✓	-	-	✓	ใช้น้ำตาล
แซนแทนกัม + โลคัสต์บีนกัม	✓	-	-	✓	-	✓	-	ต้องผสมกัน

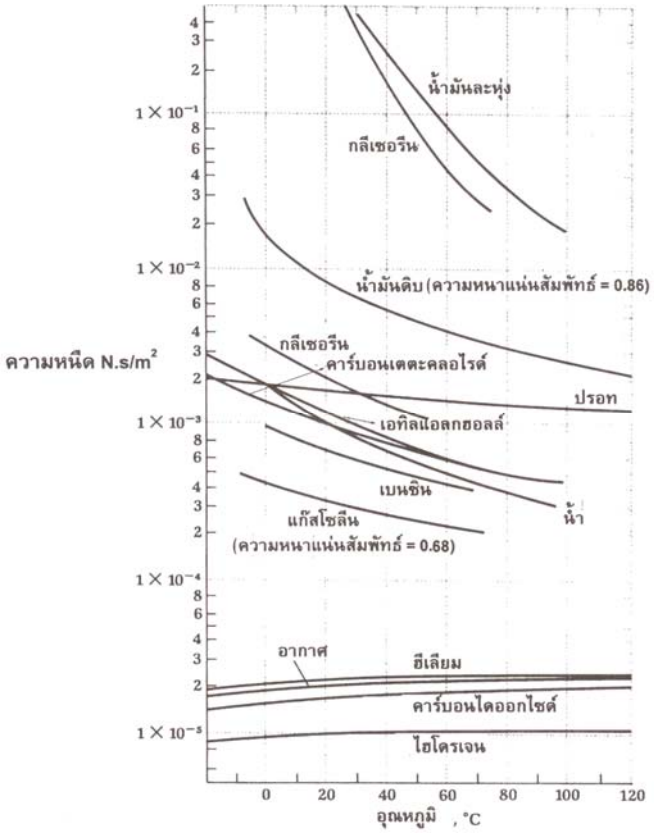
2.1.8 ความหนืด

ของเหลวที่ไหลได้ง่าย เช่นน้ำและน้ำมัน มีความหนืดต่ำกว่าของเหลวที่ข้น เช่นน้ำผึ้งหรือน้ำมันเครื่อง ความหนืดของของไหลทุกชนิดมีค่าแปรตามอุณหภูมิเป็นอย่างมาก โดยเพิ่มขึ้นสำหรับก๊าซและลดลงสำหรับของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดของของไหล แสดงในตารางที่ 6

ตาราง 6 แสดงค่าความหนืดของของไหลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา : Lide,D.R.. (1996). Handbook of Chemistry and Physics p.15-31

ชนิดของไหล	อุณหภูมิ (^{o}C)	สัมประสิทธิ์ความหนืด (พอยส์)
น้ำ	10	0.01308
น้ำ	20	0.01005
กลีเซอรีน	0	121.1
กลีเซอรีน	20	17.9
น้ำมันละหุ่ง	10	24.2
น้ำมันละหุ่ง	20	9.86



ภาพประกอบ 6 ความหนืดของของไหลชนิดต่าง ๆ เปลี่ยนค่าตามอุณหภูมิ

ที่มา : จรัส บุณยธรรมา. (2545). ฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย ภาคกลศาสตร์ของไหล ความร้อน และคลื่น. หน้า 61

การวัดความหนืดโดยใช้เครื่องมือวัดความหนืด Brookfield Viscometer

เครื่องวัดความหนืดที่จะใช้ในการทดลองคือ Brookfiled Viscometer ลักษณะเป็นภาชนะทรงกระบอก ภายในมีเข็มสำหรับหมุนในแนวขนานกับผิวของเหลว โดยการวัดความหนืด จะแสดงผลในหน่วยของเซนติพอยส์

หน่วยของความหนืดในระบบเอสไอคือ พาสคัลวินาที แต่หน่วยที่นิยมใช้คือพอยส์ (poise) โดยกำหนดว่า 1 พอยส์ = 0.1 พาสคัลวินาที

นิยามความหนืดของของไหลว่าเป็นอัตราส่วนของความเค้นเฉือนต่ออัตราการเฉือน เขียนเป็นสมการได้คือ

$$\eta = \frac{\text{ความเค้นเฉือน}}{\text{อัตราการเฉือน}} = \frac{\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)}{\left(\frac{u}{y}\right)} \qquad \text{----------(12)}$$

เมื่อ

η เป็นความหนืดของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัลวินาที

$\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)$ เป็นความเค้นเฉือนของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัล

$\left(\frac{u}{y}\right)$ เป็นอัตราการเฉือน มีหน่วยเป็น ต่อวินาที

จัดรูปสมการใหม่ จะเห็นได้ว่าแรงที่ใช้แปรผันตรงกับความเร็ว ดังสมการ

$$F_{\parallel} = \eta A \frac{u}{y} \qquad \text{----------(13)}$$

ในกรณีของเครื่องวัดความหนืด Brookfield สามารถเขียนความนิยามของความหนืดได้ดังนี้

$$\eta = \frac{\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)}{\left(\frac{u}{y}\right)}$$

เมื่อ

η เป็นความหนืดของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัลวินาที

$\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)$ เป็นความเค้นเฉือนของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัล

u เป็นความเร็วในการหมุนของเข็ม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

y เป็นระยะทางจากเข็มถึงเนื้อเยลลี่ มีหน่วยเป็นเมตร

จากนิยามของความเร็ว ในกรณีที่ความเร็วในการหมุนของเข็มนั้นคงที่

$$u = \frac{s}{\tau} \qquad \text{----------(14)}$$

เมื่อ

u เป็นความเร็วในการหมุนของเข็ม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

s เป็นระยะทางที่เข็มเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ มีหน่วยเป็นเมตร

τ เวลาที่ใช้ในการหมุนครบ 1 รอบของเข็ม ในเยลลี่ มีหน่วยเป็นวินาที

ดังนั้นจึงได้ว่า

$$\eta = \frac{\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)}{\left(\frac{s}{\tau y}\right)} = \frac{\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)\tau}{\left(\frac{s}{y}\right)} \qquad \text{----------(15)}$$

จากนิยามของมอดุลัสเฉือน

$$G = \frac{\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)}{\left(\frac{s}{y}\right)} \qquad \text{---------- (16)}$$

เมื่อ

G เป็นมอดุลัสเฉือนของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัล

$\left(\frac{F_{\parallel}}{A}\right)$ เป็นความเค้นเฉือนของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัล

$\left(\frac{s}{y}\right)$ เป็นความเครียดเฉือนของเยลลี่ ไม่มีหน่วย

ดังนั้นจากสมการที่ 15 และ 16 จึงได้ว่า

$$G = \frac{\eta}{\tau} \qquad \text{----------(17)}$$

(Greenwood, M.S.; Bamberger, J.A. 2002. : 624)

เมื่อ

G เป็นมอดุลัสเฉือนของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัล

η เป็นความหนืดของเยลลี่ มีหน่วยเป็นพาสคัลวินาที

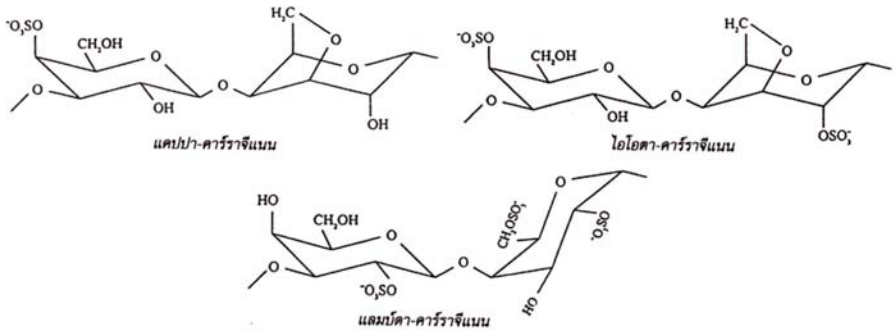
τ เวลาที่ใช้ในการหมุนครบ 1 รอบของเข็ม ในเยลลี่ มีหน่วยเป็นวินาที

2.1.9 คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม

คาร์ราจีแนน หรือ ไอริสมอส (Irish Moss) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ซัลเฟตชนิดหนึ่งที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีแดง คาร์ราจีแนนแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ แคปปา (Kappa) ไอโอตา (Iota) และแลมบ์ดา (Lambda) โดยทั่วไปสาหร่ายทะเลจะมีคาร์ราจีแนนอย่างน้อย 2-3 ชนิดผสมกันอยู่

คาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบเป็นน้ำตาลกาแล็กโทสที่ถูกเอสเทอริไฟด์ด้วยกรดซัลฟิวริกที่ตำแหน่งและระดับต่าง ๆ ซึ่งแคปปา-คาร์ราจีแนน และไอโอตาคาร์ราจีแนน เท่านั้นที่มีคุณสมบัติในการเกิดเจลได้เมื่อมีโพแทสเซียมไอออน ส่วนแลมบ์ดาคาร์ราจีแนนไม่เกิดเจล

แคปปา-คาร์ราจีแนน มีความไวต่อโพแทสเซียมเช่นเดียวกับไอโอตาคาร์ราจีแนน และสามารถตกตะกอนแยกจากแลมบ์ดาคาร์ราจีแนน ได้โดยใช้โพแทสเซียมคลอไรด์ โครงสร้างของคาร์ราจีแนนทั้ง 3 ชนิด แสดงดังภาพประกอบ 7

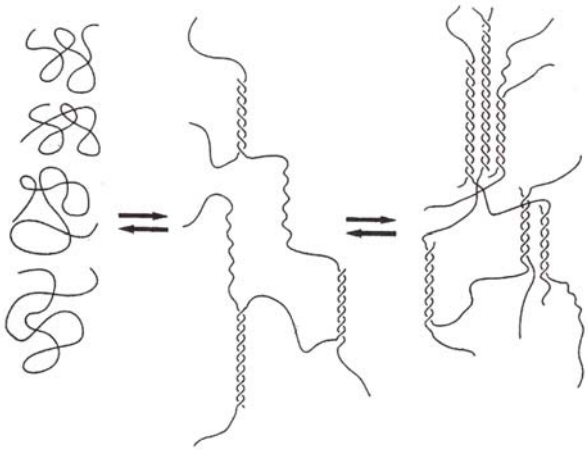


ภาพประกอบ 7 โครงสร้างของแคปปา-คาร์ราจีแนน ไอโอตา-คาร์ราจีแนนและ แลมบ์ดา-คาร์ราจีแนน

ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร. หน้า 204

คาร์ราจีแนนละลายได้ดีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และมีน้ำตาลปนอยู่ในสารละลายด้วย ซึ่งทั้งแคปปา-คาร์ราจีแนน และแลมบ์ดา-คาร์ราจีแนน ละลายได้ดีเมื่อได้รับความร้อนเพียงพอ ส่วนไอโอตา-คาร์ราจีแนนจะละลายหรือกระจายตัวได้น้อยกว่าสองชนิดแรก คาร์ราจีแนนแต่ละชนิดมีสมบัติในการเกิดเจลแตกต่างกัน สำหรับแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอโอตา-คาร์ราจีแนน จะเกิดเจลแบบกลับไปมาได้ด้วยความร้อน

แคปปา-คาร์ราจีแนนและไอโอตา-คาร์ราจีแนน ไม่ละลายในน้ำเย็น (ยกเว้นที่เป็นเกลือโซเดียม) แต่จะละลายอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสขึ้นไป คาร์ราจีแนนที่อยู่ในรูปสารละลายในน้ำจะมีโครงสร้างกระจัดกระจาย เมื่อทำให้เย็นลงจะเกิดเป็นตาข่ายพอลิเมอร์ แต่ละสายของพอลิเมอร์จะรวมตัวกันและเข้ามาใกล้กันเกิดเป็น จุดเชื่อม (Junction Point) เมื่อเย็นลงอีกจะมีการเกาะตัวกันของจุดเชื่อมมากขึ้นทำให้เกิดการแข็งตัวของเจล แคปปา-คาร์ราจีแนนจะเกิดเจลที่เปราะแตกง่ายและมีซินเนอรีซิสเกิดขึ้น ส่วนไอโอตา-คาร์ราจีแนนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่นและไม่เกิดซินเนอรีซิส สำหรับแลมบ์ดา-คาร์ราจีแนนละลายได้ในน้ำเย็นและไม่เกิดเป็นเจล



ภาพประกอบ 8 กลไลการเกิดเจลของคาร์ราจีแนน

ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร. หน้า 205

การเติมโลหะไอออนจะมีผลต่อการเกิดเจล เช่นเมื่อเติมโพแทสเซียมไอออนในแคปปาคาร์ราจีแนน เมื่อเติมโพแทสเซียมไอออนจะเกิดเจลที่มีความยืดหยุ่น สมบัติที่สำคัญของคาร์ราจีแนนทั้งสามชนิด แสดงดังตารางที่ 7

ตาราง 7 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของคาร์ราจีแนนแต่ละชนิด
ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร หน้า 197

สมบัติ	แคปปา	แลมบ์ดา	ไอโอตา
ปริมาณซัลเฟต	25%	35%	32%
ผลของประจุบวก	เกิดเจลกับ K^+	ไม่เกิดเจล	เกิดเจลกับ Ca^{+2}
ชนิดของเจล	เปราะ เกิดซินเนอรีซิส คืนกลับด้วยความร้อน	ไม่เกิดเจล	ยืดหยุ่น ไม่เกิดซินเนอรีซิส คืนกลับด้วยความร้อน
การละลายในสารละลายน้ำตาล	ละลายในสารละลายร้อน	ละลายในสารละลายร้อน	ละลายได้ยาก-ไม่ละลาย

เมื่อผสมคาร์ราจีแนนชนิดแคปปา-กับไอโอตา-เข้าด้วยกันจะทำให้สมบัติการเกิดเจลดีขึ้น เจลที่ได้มีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและอัตราการเกิดซินเนอรีซิสน้อยลง โดยการเปรียบเทียบคุณสมบัติของแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอโอตา-คาร์ราจีแนน ดังแสดงใน ตารางที่ 8

ตาราง 8 การเปรียบเทียบสมบัติของแคปปา-คาร์ราจีแนนและไอโอตา-คาร์ราจีแนนในระบบเจล
ที่มา : นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). เคมีอาหาร หน้า 207

แคปปา-คาร์ราจีแนน	ไอโอตา-คาร์ราจีแนน
เนื้อเจลเปราะ	เนื้อเจลยืดหยุ่น
แข็งและมีรูปทรง	อ่อนนุ่ม
เกิดซินเนอรีซิสมาก	ไม่เกิดซินเนอรีซิส
ต้องการโพแทสเซียมในการเกิดเจล	ต้องการแคลเซียมในการเกิดเจล

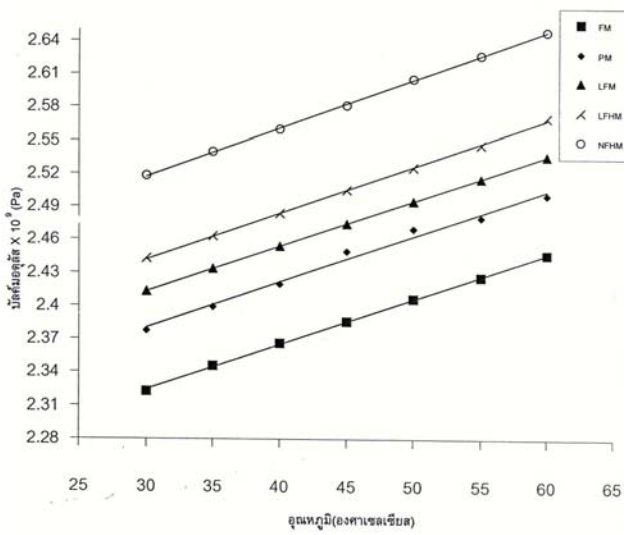
โลคัสต์บีนกัม ได้มาจากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดจากต้นคาร์ลอบ (Carob) หรือโลคัสต์บีน (Locust Bean : Ceratonia Siliqua) ซึ่งเป็นไม้ยืนต้นในพืชตระกูลถั่วชนิดหนึ่ง มีขนาดใหญ่สูงประมาณ 40 - 50 ฟุต มีเมล็ดอยู่ในฝักประมาณ 10 เมล็ดต่อฝัก คุณสมบัติของโลคัสต์บีนกัมคือ

ไม่ละลายในน้ำเย็น ต้องใช้ความร้อนช่วยในการละลาย จะให้สารละลายที่มีความหนืดสูงสุดเมื่อได้รับความร้อนสูงสุดถึง 95 องศาเซลเซียส แล้วจึงทำให้เย็นลง ปัจจุบันได้พัฒนาโลคัสต์บีนกัมให้มีสมบัติพองตัวได้ในน้ำเย็นและนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์นม

โลคัสต์บีนกัมเมื่อรวมกับแคปปา-คาร์ราจีแนนจะเพิ่มความแข็งแรงของเจลทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสเปลี่ยนไป และลดการเกิดซินเนอรีซิส หน้าที่หลักของโลคัสต์บีนกัม คือ เพิ่มความหนืดและความคงตัวให้กับเจล และช่วยยับยั้งการเกิดซินเนอรีซิส อัตราส่วนที่เหมาะสมของแคปปา-คาร์ราจีแนนต่อโลคัสต์บีนกัม คือ 2:1 ผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดที่ใช้โลคัสต์บีนกัม ได้แก่ อาหารกระป๋อง ซอส ขนมหวาน บาร์บีคิวซอส เครื่องดื่ม เนยแข็ง ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์เนื้อ นอกจากนี้การใช้โลคัสต์บีนกัมในไอศกรีมจะทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวและช่วยอุ้มน้ำ ทำให้เนื้อไอศกรีมมีลักษณะเนียน

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ. 2547 ประภาษ มูลนา (2547 : 74-75) ได้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของนมพาสเจอร์ไรส์ เพื่อศึกษา ค่าบัลค์มอดุลัส ของคอลลอยด์นมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด นมพาสเจอร์ไรส์ นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ นมพาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำและแคลเซียมสูง นมพาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมันและแคลเซียมสูง นมพาสเจอร์ไรส์มีไขมัน ผลการทดลองพบว่าบัลค์มอดุลัส มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ในนมพลาสเจอร์ไรส์ที่ใช้ทดสอบทั้ง 5 ชนิด ดังภาพประกอบที่ 9



ภาพประกอบ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิในตัวกลางนมพาสเจอร์ไรส์ 5 ชนิด

ที่มา : ประภาษ มูลนา. (2547). การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัสของคอลลอยด์นมโดยเทคนิคอัลทราโซนิก. ปริญญานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.

เมื่อ

FM เป็นนมพลาสเจอร์ไรส์มีไขมัน

PM เป็นนมสดพลาสเจอร์ไรส์

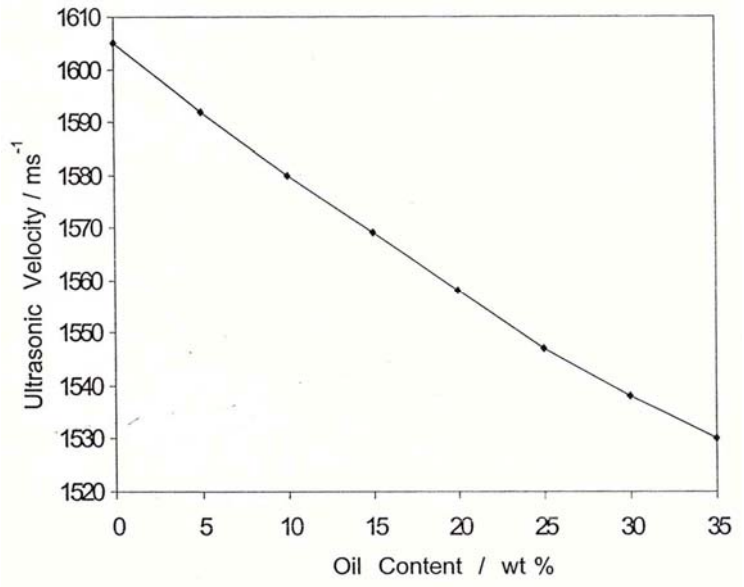
LFM เป็นนมพลาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำ

LFHM เป็นนมพลาสเจอร์ไรส์ไขมันต่ำและแคลเซียมสูง

NFHM เป็นนมพลาสเจอร์ไรส์ไม่มีไขมันและแคลเซียมสูง

ปี ค.ศ.1988 บี และคณะ (Bee et al. 1988 : 306-322) ได้ทำการศึกษาหาค่าความยืดหยุ่นของตัวกลางที่เป็นของเหลวประเภท อาหารเหลว โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งที่ใช้ผสมอาหาร จากงานวิจัยพบว่า ร้อยละของปริมาณของแข็งจะมีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในลักษณะเชิงเส้น

ปี ค.ศ. 1996 ดิกคินสัน และ แม็คคลีเมน (Dickinson & McClements. 1995 : 191-192) ทำการทดลองหาค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในสารตัวอย่างที่เป็นคอลลอยด์ชนิดอิมัลชัน (ของเหลวละลายในของเหลว) คือ น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ ผลการทดลอง พบว่า เมื่อความเข้มข้นของอิมัลชันเพิ่มขึ้น ความเร็วอัลทราโซนิกในอิมัลชันจะลดลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 10

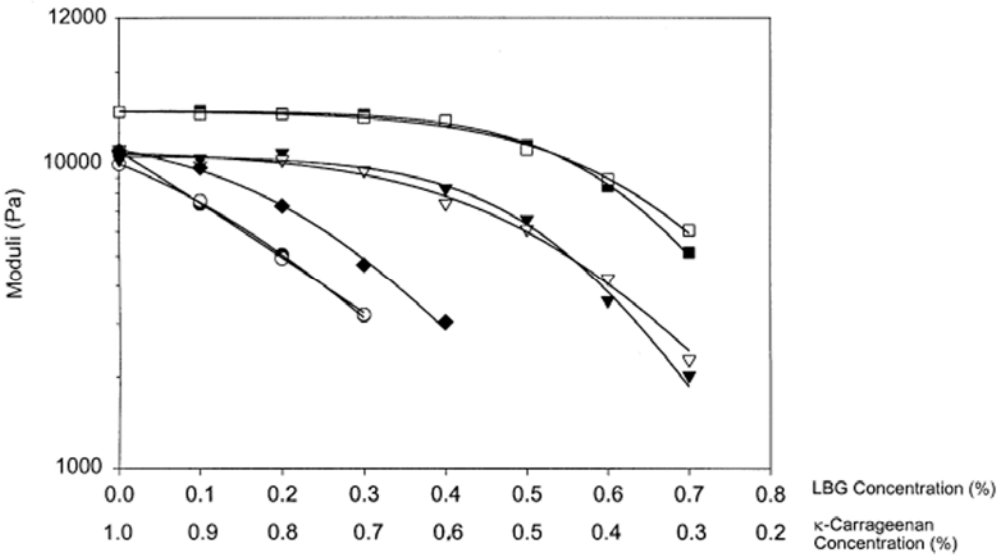


ภาพประกอบ 10 กราฟแสดงค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในอิมัลชัน กับความเข้มข้นของอิมัลชัน (น้ำมันดอกทานตะวันละลายในน้ำ) โดยใช้ความถี่คลื่นอัลทราโซนิก 2.25 MHz

ที่มา : Dickinson, E. and McClements, D.J. (1995). *Advances in Food Colloids*. Glasgow : Blackie Academic & Professional. 191 - 192.

ปี ค.ศ. 1998 คามาโช และคณะ (Camacho, M.M.; et al. 1998 : 653 – 658) ได้ศึกษาความคงตัวของวิพพ์ครีม ที่มีอัตราส่วนของโลคัสต์บีนกัม และแลมบ์ดาคาร์ราจีแนน ผลการทดลองพบว่า การเติมโลคัสต์บีนกัมและแลมบ์ดาคาร์ราจีแนน โดยที่อัตราส่วนของโลคัสต์บีนกัมมากขึ้น ความยืดหยุ่นจะลดลง

ปี ค.ศ. 2001 เชน และคณะ (Y.Chen; et al. 2001 : 117-124) ได้ศึกษาสมบัติความยืดหยุ่นของตัวกลางสารละลาย ที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมคอลไรด์ (Potassium Chloride) ที่แตกต่างกัน โดยมีปริมาณรวมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน กับโลคัสต์บีนกัมที่ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ใช้อัตราส่วนต่างกัน) ผลการทดลองพบว่า ค่ามอดุลัสจะลดต่ำลงเมื่ออัตราการผสมของโลคัสต์บีนกัมมากขึ้นในทุก ๆ ความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์ ดังภาพประกอบ 11 และ 12

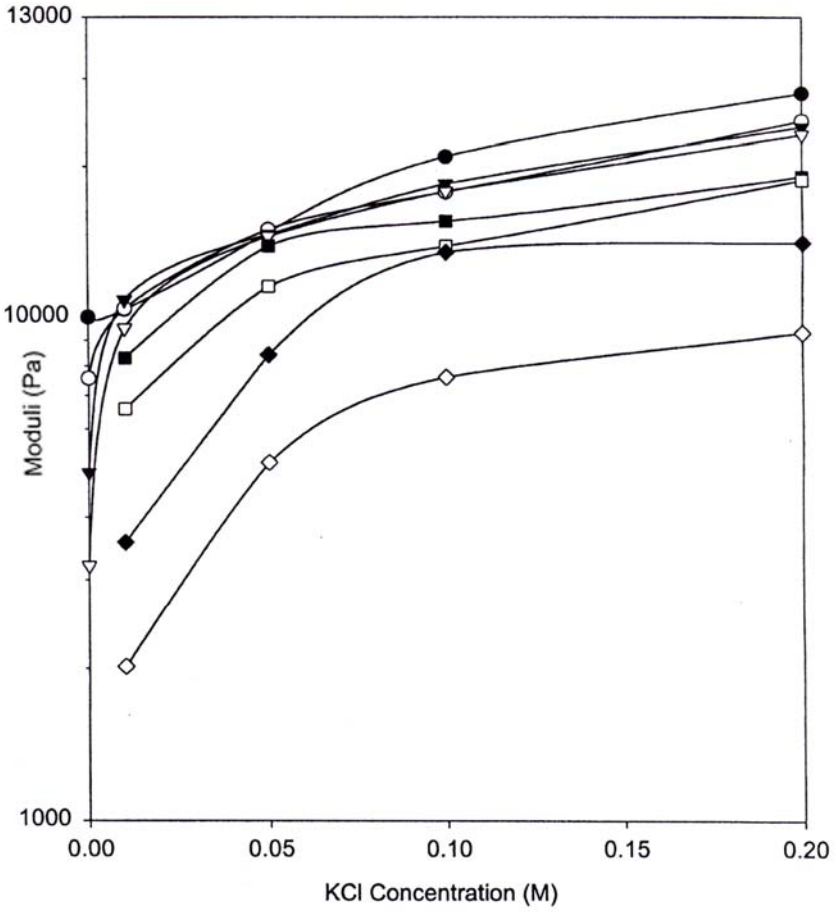


ภาพประกอบ 11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผสมของแคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม กับค่ามอดุลัส ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมคลอไรด์ที่แตกต่าง

ที่มา : Chen, Y.; et al. (2001). Rheological Characterisation of κ-Carrageenan / Locust Bean Gum Mixtures. *Carbohydrate Polymers*. 46. : 117 – 124

เมื่อ

- ● คือน้ำกลั่น
- ▽ คือสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์
- ■ คือสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.05 โมลาร์
- ◆ คือสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.01 โมลาร์ ที่มีแต่แคปปา-คาร์ราจีแนน



ภาพประกอบ 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสกับความเข้มข้นของสารละลายโพสแทสเซียมคลอไรด์ ในชุดการทดสอบที่มีปริมาณของแคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน (ปริมาณรวม 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)

ที่มา : Chen, Y.; et al. (2001). Rheological Characterisation of κ-Carrageenan/Locust Bean Gum Mixtures. *Carbohydrate Polymers*. 46. : 117 – 124

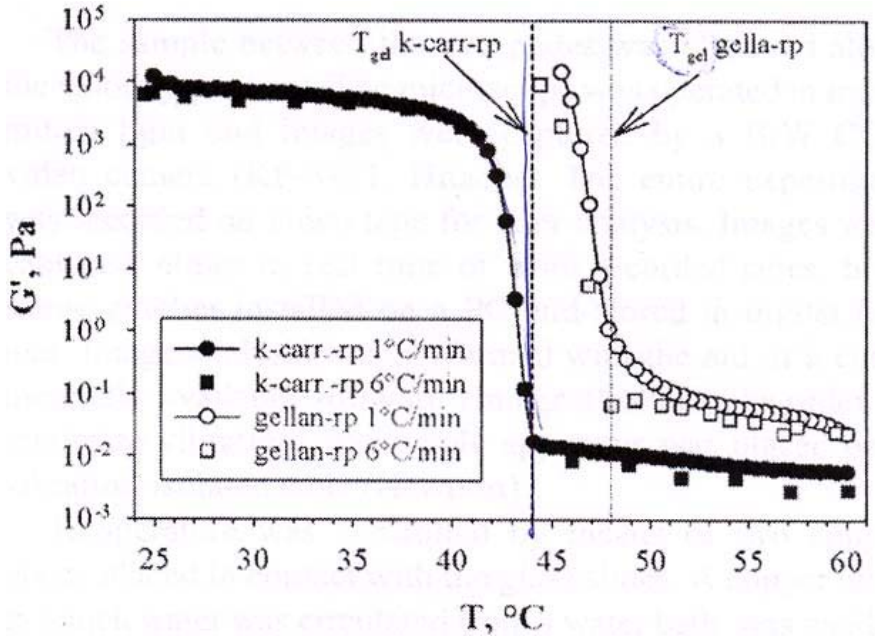
เมื่อ

- ● อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 10 : 0
- o อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 9 : 1
- ∇ อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 8 : 2
- ∇ อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 7 : 3
- ■ อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 6 : 4
- □ อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 5 : 5
- ◆ อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 4 : 6
- ◊ อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และ โลคัสต์บีนกัม เป็น 3 : 7

ปี ค.ศ. 2002 รามิเรซ และคณะ (J.A. Ramirez et al. 2002 : 11-16) ได้ศึกษาผลของการผสมแซนแทน และโลคัสต์บีนกัมในซูริมิ (Surimi) ผลการทดลองพบว่า เมื่อปรับเปลี่ยนอัตราการผสมระหว่างแซนแทนกับโลคัสต์บีนกัม โดยให้อัตราส่วนของโลคัสต์บีนกัมมากขึ้น พบว่าค่ามอดุลัสเฉือนของซูริมิ มีค่าน้อยลงเมื่ออัตราส่วนของโลคัสต์บีนกัมมากขึ้น

ปี ค.ศ. 2003 หัว และคณะ (Y. Hua et al. 2003 : 889 - 894) ได้ศึกษาสมบัติการเกิดเป็นเจลของโปรตีนถั่วเหลือง โดยการวัดมอดุลัสความยืดหยุ่นของโปรตีนถั่วเหลือง เมื่อเติมผงกัมชนิดต่าง ๆ พบว่าในกรณีของการเติมแคปปา-คาร์ราจีแนนลงในโปรตีนถั่วเหลือง จะทำให้ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นในลักษณะเป็นเชิงเส้น

ปี ค.ศ. 2005 ซิเมโอเน (M. Simeone et al. 2005 : 488 – 494) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสถานะจากโซลเป็นเจลในของเหลวที่ผสมด้วยเจลเลน และของเหลวที่ผสมด้วยแคปปา-คาร์ราจีแนน โดยการใช้คลื่นอัลทราโซนิกวัดมอดุลัสในตัวกลาง โดยลดอุณหภูมิจาก 90 องศาเซลเซียส ถึง 20 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราการลดของอุณหภูมิจำนวน 2 ค่าคือ 1 องศาเซลเซียสต่อนาที และ 6 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อหาช่วงอุณหภูมิที่ทำให้เปลี่ยนจากโซลเป็นเจล พบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลและเปลี่ยนสถานะอยู่ที่ 44 – 48 องศาเซลเซียส ทั้งของเหลวที่ผสมด้วยไฮโดรคอลลอยด์ทั้ง 2 ชนิด ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดุลัสเฉือนกับอุณหภูมิของสารละลายที่ผสมด้วยเจลเลนและแคปปา-คาร์ราจีแนน โดยอัตราการเย็นตัวต่างกัน

ที่มา : Simeone, M.; et al. (2005). Effect of sol-gel transition on shear-induce drop deformation in aqueous mixture of gellan and κ-Carrageenan. *Colloid and Interface Science*. 281. : 488 – 494

บทที่ 3
วิธีดำเนินการทดลอง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาและทำตามขั้นตอนดังนี้

3.1 การเตรียมเยลลี่

3.2 การหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่

3.3 การหาความหนาแน่นของเยลลี่

3.4 การวัดความหนืดและหามอดุลัสเฉือนของเยลลี่

3.5 การคำนวณหาบัลค์มอดุลัสของเยลลี่

3.1 การเตรียมเยลลี่

การเตรียมเยลลี่ที่ใช้ในการทดลอง แต่ละการทดลองจะใช้เยลลี่กระเจี๊ยบ ที่มีส่วนประกอบของตัวทำเจลเป็นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จำนวน 600 กรัม มีส่วนประกอบที่ใช้คือ

1. น้ำกระเจี๊ยบ	73.35	เปอร์เซ็นต์ (440.10 กรัม)
2. น้ำตาลทราย	25	เปอร์เซ็นต์ (150 กรัม)
3. แคปปา–คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม	1	เปอร์เซ็นต์ (6 กรัม)
4. กรดซิตริก	0.4	เปอร์เซ็นต์ (2.40 กรัม)
5. โพแทสเซียมซิเตรต	0.25	เปอร์เซ็นต์ (1.5 กรัม)

ส่วนขั้นตอนการเตรียมเยลลี่มีดังนี้

1. แบ่งน้ำตาลทรายออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน คือส่วนละ 75 กรัม
2. แบ่งน้ำกระเจี๊ยบออกมาเล็กน้อย ประมาณ 10 กรัม
3. ผสมน้ำต้มกระเจี๊ยบส่วนมาก กับน้ำตาลทราย 1 ส่วน คนให้เข้ากัน
4. นำน้ำตาลทรายอีกส่วนที่เหลือ ผสมเข้ากับแคปปา–คาร์ราจีแนน โลคัสต์บีนกัม และโพแทสเซียมซิเตรต
5. เมื่อน้ำกระเจี๊ยบมีอุณหภูมิประมาณ 90-95 องศาเซลเซียส ให้ผสมส่วนผสมในข้อ 4 ลงไป คนให้เข้ากัน และปล่อยให้เย็นลง จนถึงอุณหภูมิราว 70-75 องศาเซลเซียส
6. นำน้ำกระเจี๊ยบที่แบ่งไว้มาละลายกับกรดซิตริก และเทกลับเข้าไปผสมกับส่วนผสมทั้งหมด คนให้เข้ากันจะได้เยลลี่ในรูปของโซลที่พร้อมนำไปใช้งาน

ในการเตรียมเยลลี่ จะใช้เยลลี่จำนวน 6 ตัวอย่าง ที่มีอัตราการผสมของตัวทำเจล ที่ประกอบไปด้วย แคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม เป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เปลี่ยนสัดส่วนของแคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม ดังต่อไปนี้

ตาราง 9 อัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อเรียกของเยลลี่	ปริมาณของแคปปา-คาร์ราจีแนน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	ปริมาณของโลคัสต์บีนกัม (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)
J1	1.0	0.0
J2	0.8	0.2
J3	0.6	0.4
J4	0.4	0.6
J5	0.2	0.8
J6	0.0	1.0

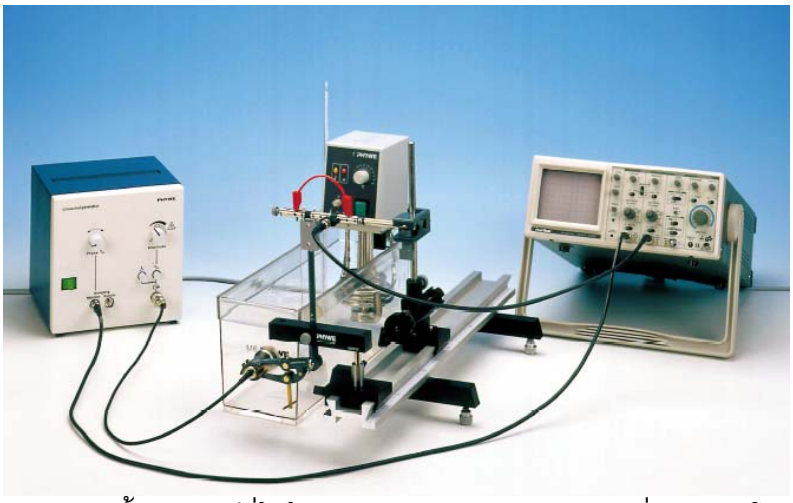
3.2 การหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่

การหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. รางเลื่อนและฐานเลื่อนสเกลเวอร์เนีย
2. อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ
3. เครื่องกำเนิดคลื่นอัลทราโซนิกความถี่ 812 กิโลเฮิร์ตซ์
4. เครื่องนับสัญญาณดิจิตอล
5. ดิจิตอลออสซิโลสโคป 60 เมกะเฮิร์ตซ์
6. อ่างใส่สารตัวอย่าง ที่แบ่งเป็น 2 ส่วน
7. อัลทราโซนิกทรานสดิวเซอร์ ทั้งตัวส่งและรับ
8. ตัวยึดจับตัวส่งและรับคลื่นอัลทราโซนิก
9. สายสัญญาณเชื่อมต่อ
10. เยลลี่ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1

ส่วนขั้นตอนการหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกมีดังนี้

1. ติดตั้งเครื่องมือตามภาพประกอบ 14
2. เทเยลลี่ J1 ที่ผสมได้จากหัวข้อ 3.1 ลงในอ่างด้านเล็ก และเทน้ำในอ่างอีกข้างปรับตัวควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้เยลลี่ได้อุณหภูมิคงที่ 70 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 14 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย (การหาความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก)
ที่มา : University Laboratory Experiments. 1995 : 101 – 102

3. นำทรานดิวเซอร์ตัวรับ จุ่มในเยลลี่กระเจี๊ยบขณะที่ยังไม่แข็งตัว ปรับเฟสของคลื่นอัลทราโซนิกให้สัญญาณที่ได้ทั้งสองบนจอออสซิโลสโคป มีเฟสตรงกัน บันทึกระยะเป็น L_0

4. หมุนเวอร์เนียเพื่อให้ได้ระยะที่คลื่นทั้งสองรูปมีเฟสตรงกันใหม่ ระยะนี้คือ L_1 และหมุนเวอร์เนีย เพื่อให้คลื่นมีเฟสตรงกันครั้ง ต่อ ๆ ไป ค่า Δl เป็นระยะที่เฟสของคลื่นเปลี่ยนไป $\Delta\phi$ ซึ่งเป็นระยะที่คลื่นเปลี่ยนไปหนึ่งรอบ หรือหนึ่งความยาวคลื่น λ

5. ปรับลดอุณหภูมิลงครั้งละ 5 องศาเซลเซียส และทำการวัดความยาวคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กระเจี๊ยบ บันทึกค่า เพื่อคำนวณหาค่าความเร็วของคลื่นอัลทราโซนิก ตามสมการ

$$v = \lambda f \qquad \text{----------(18)}$$

เมื่อ

v เป็นความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

λ เป็นความยาวคลื่นอัลทราโซนิก มีหน่วยเป็น เมตร

f เป็นความถี่ของคลื่นอัลทราโซนิกที่วัดได้จากเครื่องนับดิจิตอล มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์

6. ทดสอบซ้ำตามข้อ 2 – 5 บันทึกค่า

7. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีมกัมในเยลลี่ พร้อมหาสมการเชิงตัวเลขระหว่าง 2 ปริมาณ

8. เปลี่ยนเยลลี่ที่ใช้เป็น J2 – J6 ที่ได้จากการเตรียม ในหัวข้อ 3.1 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 – 7 บันทึกค่า

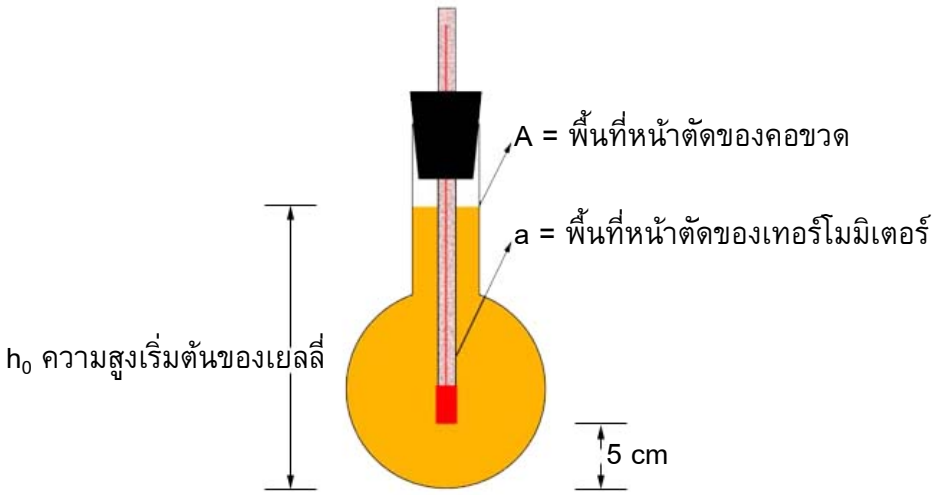
3.3 การหาความหนาแน่นของเยลลี่

การหาความหนาแน่นของเยลลี่ มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. ขวดแก้วก้นกลม
2. เตาไฟฟ้า
3. เครื่องชั่งดิจิตอล
4. เทอร์โมมิเตอร์
5. ไม้บรรทัด
6. เยลลี่ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1

ส่วนขั้นตอนการหาความหนาแน่นมีดังนี้

1. นำขวดแก้วรูปก้นกลมขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ที่มีสเกลบอกระดับความสูงของขวดไปชั่งน้ำหนักบนเครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียดสูง แล้วทำการวัดพื้นที่ภาคตัดขวางของคอขวดพร้อมกับเตรียมเทอร์โมมิเตอร์ที่วัดค่าอุณหภูมิได้ในช่วง 0-100 องศาเซลเซียสและวัดพื้นที่ภาคตัดขวางของแท่งเทอร์โมมิเตอร์ด้วย
2. ตวงเยลลี่ J1 ในรูปของโซล ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1 ที่มีอุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียส ลงในขวดแก้วจนมีปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร และนำไปชั่งหามวลของเยลลี่



ภาพประกอบ 15 การหาความหนาแน่นของเยลลี่

3. ปิดปากขวดแก้วด้วยจุกยางที่มีเทอร์โมมิเตอร์เสียบอยู่ โดยให้กระเปาะปรอทของเทอร์โมมิเตอร์อยู่ที่ระดับความสูงจากก้นขวด 5 เซนติเมตร
4. วางขวดแก้วที่มีเยลลี่ลงบนเตาไฟฟ้า พร้อมทั้งบันทึกระดับความสูงของเยลลี่ในขวดแก้วที่อุณหภูมิขณะเริ่มต้น

5. บันทึกความสูงของเยลลี่ในขวดแก้ว เมื่ออุณหภูมิลดลงทุก ๆ 5 องศาเซลเซียส

6. คำนวณหาปริมาตรของเยลลี่ขณะอุณหภูมิใด ๆ จาก

$$V_T = V_0 - (A - a)(h_T - h_0) \qquad \text{----------(19)}$$

เมื่อ

V_T เป็นปริมาตรซึ่งเท่ากับของเยลลี่ ที่อุณหภูมิ T ใด ๆ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

V_0 เป็นปริมาตรเริ่มต้น ซึ่งเท่ากับ 250×10^{-6} ลูกบาศก์เมตร

A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดแก้ว ซึ่งเท่ากับ 1.539×10^{-4} ตารางเมตร

a เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งเท่ากับ 2.272×10^{-5} ตารางเมตร

h_T เป็นระดับความสูงของเยลลี่ ณ อุณหภูมิใด ๆ มีหน่วยเป็นเมตร

h_0 เป็นระดับความสูงเริ่มต้นของเยลลี่ มีหน่วยเป็นเมตร

7. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของเยลลี่ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ จาก

$$\rho = \frac{m}{V_T} \qquad \text{----------(20)}$$

เมื่อ

ρ เป็นความหนาแน่นของเยลลี่ มีหน่วยเป็น กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

m เป็นมวลของเยลลี่ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม

V_T เป็นปริมาตรของเยลลี่ที่อุณหภูมิ T มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร

8. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 - 7 บันทึกค่า

9. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีมกัมในเยลลี่ พร้อมหาสมการเชิงตัวเลขระหว่าง 2 ปริมาณ

10. เปลี่ยนเยลลี่ที่ใช้เป็น J2 – J5 ที่ได้จากการเตรียม ในหัวข้อ 3.1 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 – 9 บันทึกค่า

3.4 การวัดความหนืดและหามอดุลัสเฉือนของเยลลี่

การวัดความหนืดและการหามอดุลัสเฉือนของเยลลี่ มีอุปกรณ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

1. เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer
2. บีกเกอร์ขนาด 600 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. เยลลี่ที่ได้จากการเตรียมได้จากหัวข้อ 3.1

ภาพประกอบ 16 เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer

ส่วนขั้นตอนการวัดความหนืดและหามอดุลัสเฉือนของเยลลี่ มีดังนี้

1. ปรับระดับลูกน้ำ ของเครื่องให้เครื่องอยู่ในสมดุลพร้อมใช้งานได้
2. วางบีกเกอร์เปล่าอยู่ระหว่างขาตั้งของเครื่องวัดความหนืด
3. เปิดเครื่องและรอหน้าจอเครื่องแสดงผลดังภาพ

BROOKFIELD DV11+
LV VISCOMETER

STEP 1

BROOKFIELD DV11+
VERSION : 2

STEP 2

REMOVE SPINDLE
PRESS ANY KEY

STEP 3

4. เมื่อเครื่องปรากฏข้อความใน STEP ที่ 3 ให้นำหัวเข็มออกและกดปุ่มใดก็ได้ 1 ครั้ง เครื่องจะทำการ Autozero และปรากฏหน้าจอคือ

AUTOZEROING
VISCOMETER

STEP 4

5. เมื่อเครื่องทำการ Autozero เสร็จ จะปรากฏข้อความ

REPLACE SPINDLE
PRESS ANY KEY

STEP 4

6. นำหัวเข็ม RV6 ต่อกับตัวเครื่อง แล้วกดปุ่มใดปุ่มหนึ่ง ที่หน้าจอจะปรากฏข้อความ

%_____ S_____
_____RPM _____$^{\circ}$C

STEP 5

เมื่อ

% เป็นความน่าเชื่อถือของข้อมูลควรมีค่าอยู่ที่ 20 - 90 %

S เป็นเบอร์หัววัด สามารถปรับเปลี่ยนได้โดยปุ่ม Select Spindle โดยใช้เข็ม RV6

RPM เป็นความเร็วรอบที่ใช้ (รอบ / นาที) ตั้งไว้ที่ 50 รอบต่อนาที

$^{\circ}$C เป็นอุณหภูมิของสารตัวอย่างที่หัววัดอ่านได้ หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

7. เทเยลลี่ J1 ในรูปของโซล ที่ได้จากการเตรียมในหัวข้อ 3.1 ที่มีอุณหภูมิมากกว่า 70 องศาเซลเซียสลงในบีกเกอร์

8. ให้หัวเข็มหมุนอยู่ในเยลลี่ เมื่ออุณหภูมิลดลงเหลือ 70 องศาเซสเซียส บันทึกค่าความหนืดที่อ่านได้จากเครื่อง และเมื่ออุณหภูมิลดลงทุก ๆ 5 องศา ให้บันทึกค่าความหนืดที่อ่านได้จากเครื่องโดยความหนืดที่อ่านได้จากเครื่องมีหน่วยเป็นเซนติพอยส์

9. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีมกัมในเยลลี่

10. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเยลลี่เทียบกับอุณหภูมิของเยลลี่

11. คำนวณเปลี่ยนหน่วยของความหนืด โดยตามนิยามของความหนืด ค่าความหนืด 1 พอยส์ มีค่าเท่ากับ 0.1 พาสคัลวินาที บันทึกค่าความหนืดในหน่วยของพาสคัลวินาที

12. คำนวณหามอดุลัสเฉือนจาก

$$G = \frac{\eta}{\tau}$$

เมื่อ

G เป็นมอดุลัสเฉือนของเยลลี่ มีหน่วยเป็น พาสคัล

η เป็นความหนืดของเยลลี่ มีหน่วยเป็น พาสคัลวินาที

τ เป็นเวลาที่เข็มใช้ในการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ ซึ่งเท่ากับ 1.2 วินาที

13. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีมกัมในเยลลี่ พร้อมทั้งหาสมการเชิงตัวเลขระหว่างมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่

14. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2 - 12 บันทึกค่า

15. เปลี่ยนเยลลี่ที่ใช้เป็น J2 – J5 ที่ได้จากการเตรียม ในหัวข้อ 3.1 ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2 – 13 บันทึกค่า

3.5 การคำนวณหาบัลค์มอดุลัสของเยลลี่

การหาคำนวณหาบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ มีดังนี้

1. นำค่า ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ที่ได้จากหัวข้อ 3.2 ความหนาแน่นของเยลลี่ที่ได้จากหัวข้อ 3.3 และมอดุลัสเฉือนของเยลลี่ที่ได้จากหัวข้อ 3.4 มาคำนวณตามสมการ

$$v_L = \sqrt{\frac{B + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

หรือ

$$B = \rho v_L^2 - \frac{4}{3}G \qquad \text{----------(22)}$$

เมื่อ

V_L เป็นความเร็วของคลื่นตามยาวในตัวกลาง หน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

B เป็นบัลค์มอดุลัสของตัวกลาง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

G เป็นมอดุลัสเฉือนของตัวกลาง หน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร

ρ เป็นความหนาแน่นของตัวกลาง หน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

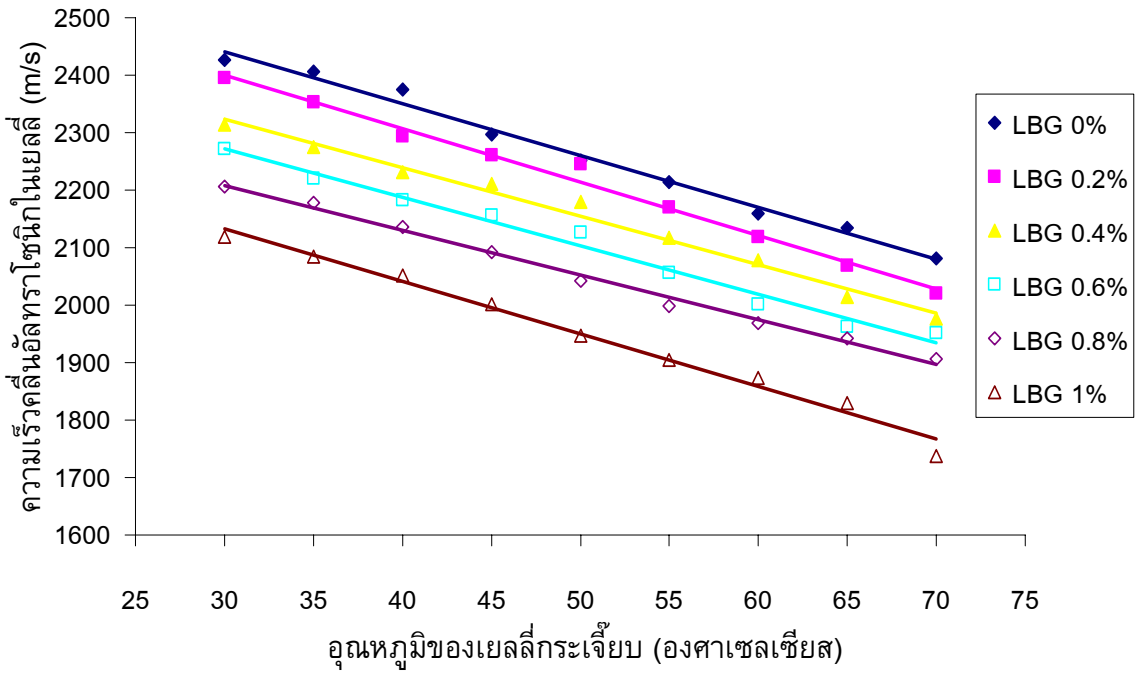
2. เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีมกัมในเยลลี่ พร้อมหาสมการเชิงตัวเลขระหว่าง 2 ปริมาณ

บทที่ 4
ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงจากโซลเป็นเจลของเยลลี่ด้วยวิธีการทางอัลทราโซนิก จะศึกษาผลของอุณหภูมิของเยลลี่ และร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ที่มีต่อ ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ ความหนาแน่น ความหนืด มอดุลัสเฉือน และบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ ซึ่งได้ผลดังนี้

4.1 ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่

ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีผลต่อความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ (ภาพประกอบ 16) พร้อมทั้งหาสมการเชิงตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ ดังนี้



ภาพประกอบ 17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม เป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน

ตาราง 10 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน

ชนิดของเยลลี่		สมการแสดงความสัมพันธ์	ค่า R^2
KC (%)	LBG (%)		
1	0	y = -9.018x + 2712	0.989
0.8	0.2	y = -9.310x + 2679	0.990
0.6	0.4	y = -8.443x + 2577	0.987
0.4	0.6	y = -8.403x + 2523	0.986
0.2	0.8	y = -7.783x + 2442	0.993
0	1	y = -9.145x + 2407	0.986

เมื่อ

y เป็นความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กระเจี๊ยบ มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

x เป็นอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

KC คือแคปปา-คาร์ราจีแนน

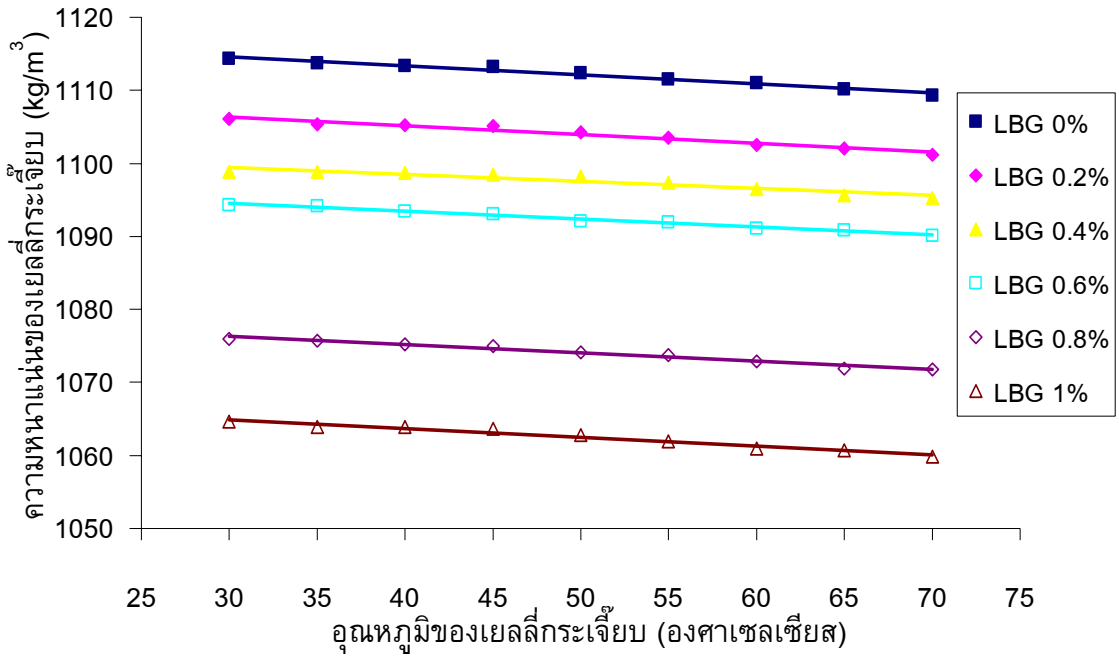
LBG คือโลคัสต์บีนกัม

ค่า R-Squared (R^2) เป็นค่าทางสถิติ ที่แสดงถึงสัดส่วนหรือร้อยละของความผิดพลาด ที่แบบจำลองสามารถอธิบายได้จากสมการที่ประมาณการ

จากภาพประกอบ 17 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของเยลลี่ต่ำลง ความเร็วของคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ทุกชนิดจะค่อย ๆ สูงขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นดังตาราง 10 เนื่องจากความเร็วของคลื่นเสียงที่ผ่านของแข็ง มีค่าสูงกว่าความเร็วคลื่นเสียงของเหลว และพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน เยลลี่ที่มีปริมาณของโลคัสต์บีนกัมมากกว่า จะมีความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ที่ลดลง

4.2 ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อความหนาแน่นของเยลลี่

ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีผลต่อความหนาแน่นของเยลลี่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ พร้อมทั้งหาสมการเชิงตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ ดังนี้



ภาพประกอบ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน

ตาราง 11 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน

ชนิดของเยลลี่		สมการแสดงความสัมพันธ์	ค่า R^2
KC (%)	LBG (%)		
1	0	y = -0.1230x + 1118	0.975
0.8	0.2	y = -0.1222x + 1110	0.965
0.6	0.4	y = -0.0980x + 1103	0.896
0.4	0.6	y = -0.1077x + 1098	0.986
0.2	0.8	y = -0.1130x + 1080	0.973
0	1	y = -0.1205x + 1069	0.968

เมื่อ

y เป็นความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

x เป็นอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

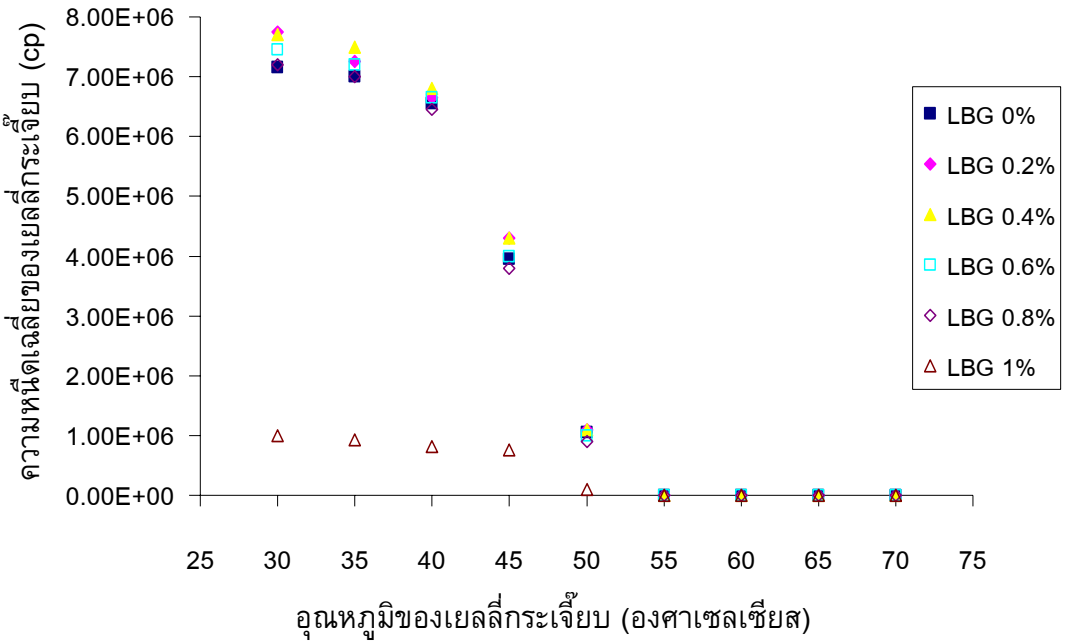
KC คือแคปปา-คาร์ราจีแนน

LBG คือโลคัสต์บีนกัม

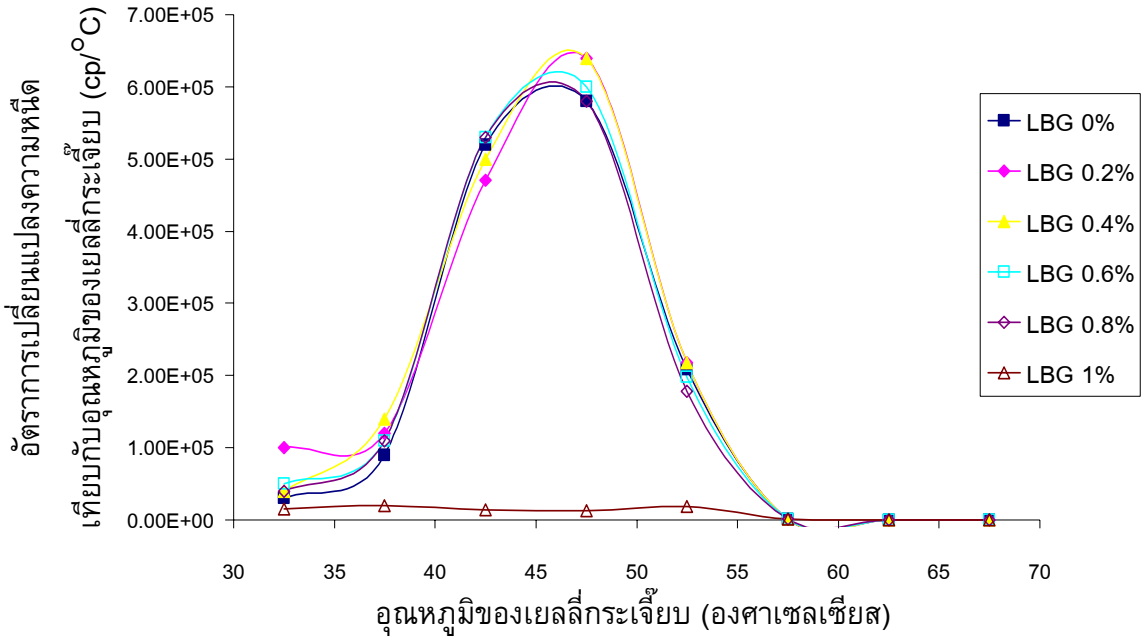
จากภาพประกอบที่ 18 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของเยลลี่ต่ำลง ความความหนาแน่นของเยลลี่ทุกชนิดจะค่อย ๆ สูงขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นดังตาราง 11 เนื่องจากความหนาแน่นของของแข็ง มีค่าสูงกว่าความหนาแน่นของเหลว และพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน เยลลี่ที่มีปริมาณของโลคัสต์บีนกัมมากกว่า จะมีความหนาแน่นของเยลลี่ที่ลดลง

4.3 ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อความหนืดของเยลลี่

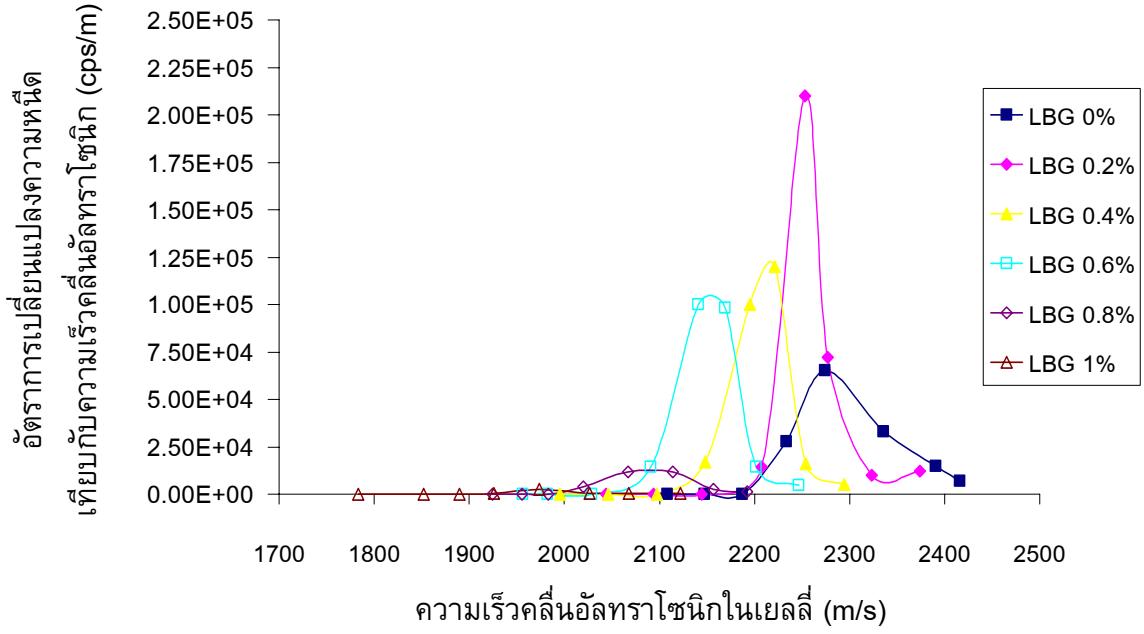
ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีผลต่อความหนืดของเยลลี่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเยลลี่เทียบกับอุณหภูมิ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเยลลี่กับความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ ดังนี้



ภาพประกอบ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความหนืดเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเทียบกับอุณหภูมิเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่ที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเทียบกับความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนกัม เป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน

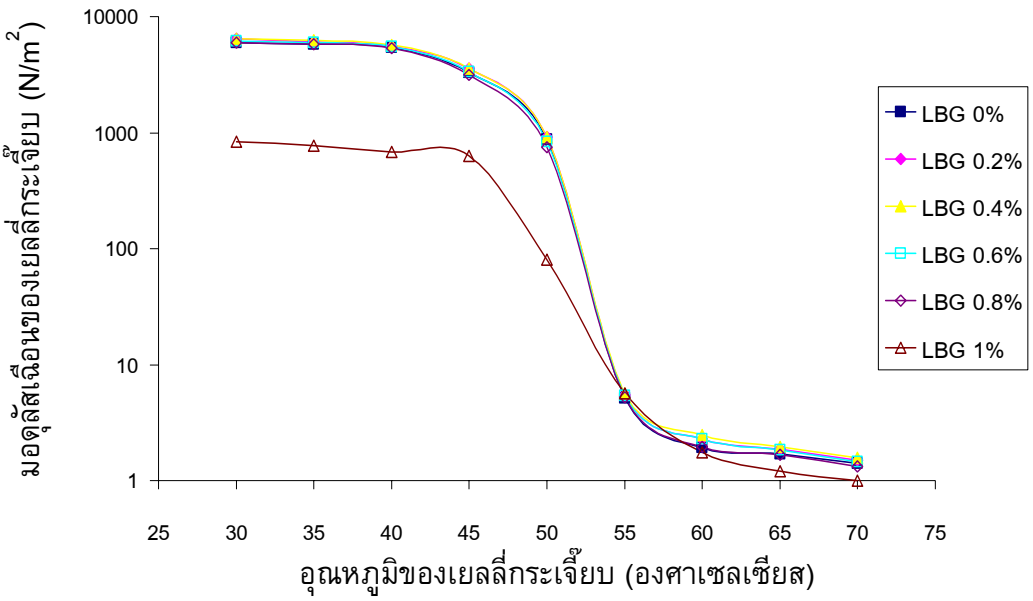
จากภาพประกอบที่ 19 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของเยลลี่ค่อย ๆ ลดลงจาก 70 องศาเซลเซียส ความหนืดของเยลลี่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย จนเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงถึงประมาณ 50 องศาเซลเซียส พบว่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากโซลเป็นเจล จนเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงค่าหนึ่ง ประมาณ 35 องศาเซลเซียส ความหนืดเริ่มคงที่ เนื่องจากเยลลี่เปลี่ยนจากโซลเป็นเจลทั้งหมด

เมื่อจากภาพประกอบที่ 20 พบว่า อุณหภูมิที่เยลลี่เริ่มการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจล ซึ่งพบว่า เยลลี่ที่มีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมระหว่าง 0 – 0.8 ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน คืออยู่ระหว่าง 44 - 48 องศาเซลเซียส ส่วนเยลลี่ที่มีส่วนผสมโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเป็นเยลลี่เพียงชนิดเดียว ที่ไม่สามารถเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลได้

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเทียบกับความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก พบว่า ความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก ที่เป็นตำแหน่งของการเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลของเยลลี่ไม่เท่ากันในแต่ละชนิดของเยลลี่ ซึ่งจะต้องนำค่าความเร็วมาเปรียบเทียบว่าคืออุณหภูมิเท่าใด

4.4 ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อมอดุลัสเฉือนของเยลลี่

ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีผลต่อมอดุลัสเฉือนของเยลลี่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ ดังนี้

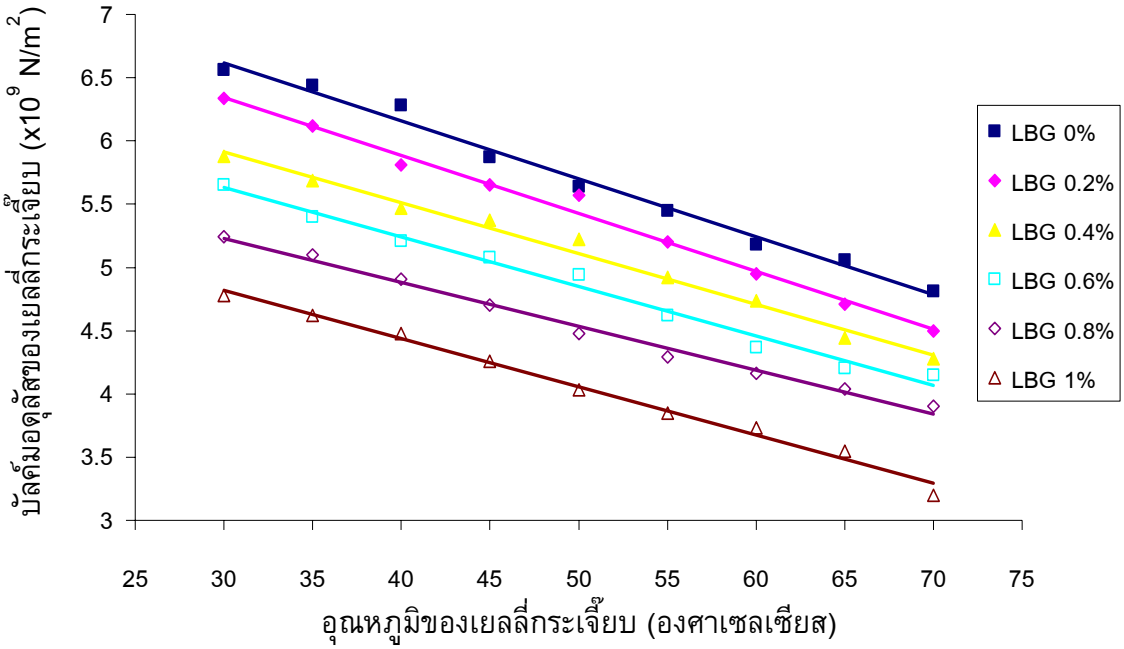


ภาพประกอบ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบที่แตกต่างกัน

จากภาพประกอบที่ 22 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของเยลลี่ค่อย ๆ ลดลงจาก 70 องศาเซลเซียส มอดุลัสเฉือนของเยลลี่จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทีละน้อย จนเมื่ออุณหภูมิลดต่ำลงถึงประมาณ 52-53 องศาเซลเซียส พบว่ามอดุลัสเฉือนมีค่าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงสถานะจากโซลเป็นเจล จนเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงค่าหนึ่ง ประมาณ 40 องศาเซลเซียส ความหนืดเริ่มคงที่ เนื่องจากเยลลี่เปลี่ยนจากโซลเป็นเจลทั้งหมด

4.5 ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีต่อบัลค์มอดุลัสของเยลลี่

ผลของอุณหภูมิและร้อยละของโลคัสต์บีนกัมที่มีผลต่อบัลค์มอดุลัสของเยลลี่แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ พร้อมทั้งหาสมการเชิงตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับอุณหภูมิของเยลลี่ และสมการเชิงตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ดังนี้



ภาพประกอบ 23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน

ตาราง 12 แสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่างบัลค์มอดุลัสเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน

ชนิดของเยลลี่		สมการแสดงความสัมพันธ์	ค่า R^2
KC (%)	LBG (%)		
1	0	y = -0.0459x + 7.992	0.989
0.8	0.2	y = -0.0459x + 7.721	0.991
0.6	0.4	y = -0.0402x + 7.122	0.990
0.4	0.6	y = -0.0391x + 6.803	0.986
0.2	0.8	y = -0.0348x + 6.277	0.991
0	1	y = -0.0348x + 6.277	0.991

เมื่อ

y เป็นความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบ มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

x เป็นอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบ มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

KC คือแคปปา-คาร์ราจีแนน

LBG คือโลคัสต์บีนกัม

จากภาพประกอบที่ 23 พบว่า เมื่ออุณหภูมิของเยลลี่ต่ำลง บัลค์มอดุลัสของเยลลี่ทุกชนิดจะค่อย ๆ สูงขึ้นแบบเป็นเชิงเส้นดังตาราง 12 เนื่องจากบัลค์มอดุลัสมีความสัมพันธ์กันอุณหภูมิและความหนาแน่นของเยลลี่ด้วยสมการที่ 22 ซึ่งเป็นและพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน เยลลี่ที่มีปริมาณของโลคัสต์บีนกัมมากกว่า จะมีบัลค์มอดุลัสที่น้อยกว่า

บทที่ 5
สรุป อภิปราย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิของเยลลี่ และร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ที่มีต่อความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ ความหนาแน่น ความหนืด มอดุลัสเฉือน และบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ สรุปได้ดังนี้

ผลที่มีต่อความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ พบว่า ทั้งอุณหภูมิของเยลลี่และร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ต่างก็ทำให้ความเร็วของคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่มีการเปลี่ยนแปลง คือจะลดลงเมื่อ อุณหภูมิของเยลลี่ต่ำลง หรือร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่มากขึ้น

ผลที่มีต่อความหนาแน่นของเยลลี่ พบว่า ทั้งอุณหภูมิของเยลลี่และร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ต่างก็ทำให้ความหนาแน่นของเยลลี่มีการเปลี่ยนแปลง คือจะลดลงเมื่อ อุณหภูมิของเยลลี่ต่ำลง หรือร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่มากขึ้น

ผลที่มีต่อความหนืดและมอดุลัสเฉือนของเยลลี่ พบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดและมอดุลัสเฉือน คือจะมีค่าอุณหภูมิอยู่ตำแหน่งหนึ่ง ที่เป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืด และมอดุลัสเฉือน เรียกอุณหภูมินั้นว่า อุณหภูมิที่เริ่มเกิดเจล ($T_{gelation}$) ซึ่งพบว่าอยู่ที่ 44 - 48 องศาเซลเซียส

ผลที่มีต่อบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ พบว่า ทั้งอุณหภูมิของเยลลี่และร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ต่างก็ทำให้บัลค์มอดุลัสของเยลลี่มีการเปลี่ยนแปลง คือจะเพิ่มขึ้นเมื่อ อุณหภูมิของเยลลี่ต่ำลง และลดลงเมื่อร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่มากขึ้น

อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองในส่วนของ ผลของอุณหภูมิของเยลลี่ ที่มีต่อความหนืดของเยลลี่ โดยการเขียนกราฟระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิ โดยให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดของเยลลี่ อยู่ในแกนตั้ง และอุณหภูมิของเยลลี่อยู่ในแกนนอน (ภาพประกอบ 20) พบว่าได้ค่า $T_{gelation}$ ที่ 44 - 48 องศาเซลเซียส สำหรับเยลลี่ที่มีร้อยละของโลคัสต์บีนกัมอยู่ระหว่าง 0 – 0.8 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของซิเมโอเนที่พบว่าอุณหภูมิที่เยลลี่ที่มีตัวทำเจลคือแคปปา-คาร์ราจีแนน เริ่มเปลี่ยนจากโซลเป็นเจลอยู่ที่ 44 องศาเซลเซียส ดังภาพประกอบ 13

จากผลทดลองในส่วนของ ผลของร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ที่มีต่อบัลค์มอดุลัส ที่พบว่า ค่าบัลค์มอดุลัสจะลดลงเมื่อร้อยละของโลคัสต์บีนกัมมากขึ้น สำหรับเยลลี่ที่มีส่วนผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมเป็น 1 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนัก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเชนที่พบว่าเมื่อเพิ่มร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในเยลลี่ ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นจะลดลงแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังภาพประกอบ 12 และ 13

การที่ร้อยละของโลคัสต์บีนกัม ไม่มีผลต่อ $T_{gelation}$ เนื่องจากความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์มีความสำคัญต่อการเกิดเจล มีความเข้มข้นสูงจะเกิดเจลได้ง่ายกว่า แต่ในกรณีของการวิจัยในครั้งนี้ ความเข้มข้นของอนุภาคคอลลอยด์ มีค่าเท่ากันทุกชนิด คือ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ร้อยละของโลคัสต์บีนกัมจึงมีผลค่อนข้างน้อยกับอุณหภูมิที่เยลลี่เริ่มเปลี่ยนจากโซลเป็นเจล

ข้อเสนอแนะ

วิธีการทางอัลทราโซนิกนั้นสามารถที่นำมาประยุกต์ใช้ในวงการวิทยาศาสตร์การอาหารได้ แต่การทดลองด้วยวิธีการอัลทราโซนิกนี้ ผลที่ออกมาจะเป็นเพียงความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกเท่านั้น ต้องมีการนำค่าความเร็วอัลทราโซนิกนี้ไปวิเคราะห์กับปริมาณอื่น ๆ ทางวิทยาศาสตร์การอาหาร จึงจะสามารถแปลผลการทดลองได้

นอกจากนั้นการใช้เทคนิคทางอัลทราโซนิก สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในขั้นตอนการผลิตในระบบอุตสาหกรรม เช่น ขณะที่เยลลี่ในรูปของโซลที่กำลังไหลผ่านท่อส่ง จะสามารถตรวจสอบความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่ที่กำลังผ่านท่อ เมื่อทราบอุณหภูมิและความหนืดของเยลลี่ ก็สามารถที่จะทราบได้ว่า การผสมของตัวทำเจล มีอัตราการผสมที่เหมาะสมหรือไม่ โดยไม่จำเป็นที่ต้องรอจนกระบวนการผลิตนั้นจบลงโดยสมบูรณ์เสียก่อน

การทดลองทางอัลทราโซนิกในครั้งนี้ ใช้ผลที่ได้ อาจจะยังไม่ชัดเจนในบางกรณี เนื่องจากใช้ช่วงห่างของการลดอุณหภูมิกว้าง คือ 5 องศาเซลเซียส จะเป็นผลดีหากได้ทำการทดลองที่ใช้ช่วงห่างของการลดอุณหภูมิอยู่ที่ 1 – 2 องศาเซลเซียส

สำหรับการวัดหรือหาค่าต่าง ๆ ในการวิจัยนี้ แสดงในภาคผนวก ก เป็นผลเฉลี่ยที่เกิดจากการทำการทดลอง 2 ครั้ง ซึ่งตามจริง ควรทำการทดลองให้มากกว่านี้ เพื่อมีข้อมูลมาวิเคราะห์เพิ่มเติมในทางสถิติได้ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และ ธนกาญจน์ ภัทรากาญจน์. (2530). *ฟิสิกส์ มหาวิทยาลัย 2.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

จรัส บุณยธรรมา. (2545). *ฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย ภาคกลศาสตร์ของไหล ความร้อน และคลื่น.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ชมรมเด็ก.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. คณะวิทยาศาสตร์. (2543). *ฟิสิกส์ 1.* พิมพ์ครั้งที่ 11. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชัยวิทย์ ศิลาวัชนาไนย. (2527). *ฟิสิกส์วิทยาศาสตร์ชีวภาพ.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

เชษฐา ใจใส. (2546). *เคล็ดลับการแปรรูปน้ำผลไม้-สมุนไพร ให้มีคุณภาพ.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : มติชน.

นิธิยา รัตนาปนนท์. (2545). *เคมีอาหาร.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.

บริษัท เอส อี เอ เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด. (2540). *ชุดทดลองการหาความเร็วของเสียงในของเหลว.* (คู่มือประกอบการทดลอง). กรุงเทพฯ.

ประภาษ มูลนา. (2547). *การวัดค่าความต้านทานเชิงซ้อนจำเพาะและบัลค์มอดุลัสของคอลลอยด์นมโดยเทคนิคอัลทราโซนิก.* ปริญญานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัยมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. (ถ่ายเอกสาร).

ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2547). *ฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย เล่ม 1.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชัน.

ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี. (2543). *กลศาสตร์ของแข็ง.* พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : ส.ส.ท.

Asmani, M.; et al. (2000). “Influence of Porosity on Young’s Modulus and Poisson’s Ratio in Alumina Ceramics,” *European Ceramic Society.* 21. : 1081-1086.

Bamberger, J.A. and Greenwood, M.S. (2004). “Non Invasive Characterization of Fluid Foodstuffs Based on Ultrasonic Measurements,” *Food Research International.* 37 : 621-625.

Bee, R.D. , Richmond, P. and Mingins, J. (1988). *Food Colloids*. Unilever Research, Colworth, UK.

Benedito, J.; et al. (2002). “Application of Low Intensity Ultrasonics to Cheese Manufacturing Processes,” *Ultrasonics.* 40. : 19-23.

Blitz, J. (2000). *Ultrasonics Method and Applications.* 1st edition. London : Butterworth & Co.

Brunn, P.O.; et al. (2004). "Ultrasonic Rheological Studies of A Body Lotion," *Flow Measurement and Instrumentation.* 15. : 139-144.

Camacho, M.M.; Martinez, N.; & Chiralt A. (1998). "Influence of Locust Bean Gum/ λ-Carrageenan Mixtures on Whipping and Mechanical Properties and Stability of Dairy Creams," *Food Research International*. 31(9). : 653-658.

Chen, Y.; et al. (2001). "Rheological Characterisation of κ-Carrageenan/Locust Bean Gum Mixtures," *Carbohydrate Polymers*. 46. : 117-124.

Dickinson, E. and McClements, D.J. (1995). *Advances in Food Colloids*. Glasgow: Blackie Academic & Professional.

Frey Austin R. et al. (1982). *Fundamentals of Acoustics.* 3rd ed. California: John Wiley & Son.

Greenwood, M.S.; Bamberger, J.A. (2002). "Measurement of Viscosity and shear wave velocity of liquid or slurry for on-line process control," *Ultrasonics*. 39. : 623-630.

Hua, Y.; Stave, W.; & Wang, Q. (2003). "Gelling Property of Soy Protein-Gum Mixtures," *Food Hydrocolloids*. 17. : 889-894.

Malinsky, K. (1996). "Ultrasonic Investigations in a Coal Mine," *Ultrasonics*. 34. : 421-423.

McClement, D.J. (1995). "Advances in The Application of Ultrasound in Food Analysis And Processing," *Trend in Food Science & Technology*. (6) : 293 – 299.

Nishinari, K. and Takahashi, R. (2003). "Interaction In Polysaccharide Solutions and Gels," *Current Opinion in Colloid and Interface Science.* (8) : 396-400.

Ramirez, J.A.; et al. (2002). "Effect of Xanthan and Locust Bean Gum on The Gelling Properties of Myofibrillar Protein," *Food Hydrocolloids*. 16. : 11 – 16.

Rosenthal, A.J. (1999). *Food Texture Measurement and Perception.* 1st edition. Maryland: An Aspen.

Serway, A.R. (2000). *Physics For Scientists and Engineers with Modern Physics.* 5th edition. Florida : Saunders College.

Simeone, M.; et al. (2005) "Effect of Sol-Gel Transition on Shear-Induced Drop Deformation in Aqueous Mixtures of Gellan and κ-Carrageenan," *Colloid and Interface Science.* 281. : 488-494.

Vogelsberger, W.; Seidel, A.; & Fuchs, R. (2000). “Contribution to the Determination of Kinetic Parameters of the Sol-Gel Transformation by Rheological Measurements,” *Colloid and Interface Science.* 230. : 268-271.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตาราง 13 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ (เมตรต่อวินาที)					
	J1	J2	J3	J4	J5	J6
70	2082	2020.5	1976.5	1951	1907	1737.5
65	2135	2068	2014	1962	1942.5	1829.5
60	2159.5	2119	2078.5	2002	1968.5	1874
55	2214.5	2170	2116.5	2056	1998	1905
50	2252	2245.5	2180	2126	2042	1946.5
45	2296.5	2260.5	2211	2156	2092	2001
40	2375.5	2293	2231.5	2183	2136.5	2052
35	2405.5	2353.5	2275.5	2221	2177.5	2084
30	2427	2395	2313.5	2271.5	2207	2119.5

ตาราง 14 แสดงค่าเฉลี่ยของความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ร้อยละ	ค่าเฉลี่ยความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในเยลลี่กระเจี๊ยบ (เมตรต่อวินาที)								
ของ LBG	70°C	65°C	60°C	55°C	50°C	45°C	40°C	35°C	30°C
0	2082	2135	2159.5	2214.5	2252	2296.5	2375.5	2405.5	2427
0.2	2020.5	2068	2119	2170.5	2245.5	2260.5	2293	2353.5	2395
0.4	1976.5	2014	2078.5	2116.5	2180	2211	2231.5	2275.5	2313.5
0.6	1951	1962	2002	2056	2126	2156	2183	2221	2271.5
0.8	1907	1942.5	1968.5	1998	2042	2092	2136.5	2177.5	2207
1.0	1737.5	1829.5	1874	1905	1946.5	2001	2052	2084	2119.5

ตาราง 15 แสดงความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ความหนาแน่นเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)					
	J1	J2	J3	J4	J5	J6
70	1109.35	1101.2	1095.3	1090.1	1071.75	1059.9
65	1110.15	1102.05	1095.6	1090.85	1071.95	1060.65
60	1111.05	1102.55	1096.5	1091.15	1072.9	1061
55	1111.5	1103.5	1097.4	1091.95	1073.7	1061.9
50	1112.35	1104.3	1098.25	1092.1	1074.15	1062.75
45	1113.25	1105.1	1098.5	1093	1075	1063.65
40	1113.3	1105.25	1098.75	1093.45	1075.2	1063.85
35	1113.7	1105.4	1098.8	1094.2	1075.75	1063.95
30	1114.35	1106.1	1098.85	1094.25	1075.9	1064.6

ตาราง 16 แสดงความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบเฉลี่ยกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ร้อยละ	ความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)								
ของ LBG	70°C	65°C	60°C	55°C	50°C	45°C	40°C	35°C	30°C
0	1109.35	1110.15	1111.05	1111.50	1112.35	1113.25	1113.30	1113.70	1114.35
0.2	1101.20	1102.05	1102.55	1103.50	1104.30	1105.10	1105.25	1105.40	1106.10
0.4	1095.30	1095.60	1096.50	1097.40	1098.25	1098.50	1098.75	1098.80	1098.85
0.6	1090.10	1090.85	1091.15	1091.95	1092.10	1093.00	1093.45	1094.20	1094.25
0.8	1071.75	1071.95	1072.90	1073.70	1074.15	1075.00	1075.20	1075.75	1075.90
1.0	1059.90	1060.65	1061.00	1061.90	1062.75	1063.65	1063.85	1063.95	1064.60

ตาราง 17 แสดงความหนืดเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	ความหนืดเฉลี่ยของเยลลี่กระเจี๊ยบ (เซนติพอยส์)					
	J1	J2	J3	J4	J5	J6
70	1.70×10^{3}	1.80×10^{3}	1.90×10^{3}	1.75×10^{3}	1.60×10^{3}	1.20×10^{3}
65	2.05×10^{3}	2.25×10^{3}	2.35×10^{3}	2.20×10^{3}	2.00×10^{3}	1.45×10^{3}
60	2.30×10^{3}	2.75×10^{3}	2.95×10^{3}	2.75×10^{3}	2.35×10^{3}	2.10×10^{3}
55	6.15×10^{3}	6.60×10^{3}	6.80×10^{3}	6.50×10^{3}	6.30×10^{3}	6.75×10^{3}
50	1.05×10^{6}	1.10×10^{6}	1.10×10^{6}	1.00×10^{6}	0.90×10^{6}	96.0×10^{3}
45	3.95×10^{6}	4.30×10^{6}	4.30×10^{6}	4.00×10^{6}	3.80×10^{6}	755×10^{3}
40	6.55×10^{6}	6.65×10^{6}	6.80×10^{6}	6.65×10^{6}	6.45×10^{6}	822×10^{3}
35	7.00×10^{6}	7.25×10^{6}	7.50×10^{6}	7.20×10^{6}	7.00×10^{6}	921.5×10^{3}
30	7.15×10^{6}	7.75×10^{6}	7.70×10^{6}	7.45×10^{6}	7.20×10^{6}	1.00×10^{6}

ตาราง 18 แสดงมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กระเจี๊ยบกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม ที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ ($^{\circ}$C)	มอดุลัสเฉือนของเยลลี่กระเจี๊ยบ (นิวตันต่อตารางเมตร)					
	J1	J2	J3	J4	J5	J6
70	1.42	1.50	1.58	1.46	1.33	1.00
65	1.71	1.88	1.96	1.83	1.67	1.21
60	1.92	2.29	2.46	2.29	1.96	1.75
55	5.13	5.50	5.67	5.42	5.25	5.63
50	875	916.67	916.67	833.33	750.00	80.00
45	3291.67	3583.33	3583.33	3333.33	3166.67	629.17
40	5458.33	5541.66	5666.67	5541.66	5375.00	685.00
35	5833.33	6041.67	6250.00	6000.00	5833.33	767.92
30	5958.33	6458.33	6416.67	6208.33	6000.00	833.33

ตาราง 19 แสดงมอดุลัสเฉือนของเยลลี่กระเจี๊ยบกับร้อยละของโลคัสต์บีนกัมในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ร้อยละ	มอดุลัสเฉือนของเยลลี่กระเจี๊ยบ (นิวตันต่อตารางเมตร)								
ของ LBG	70°C	65°C	60°C	55°C	50°C	45°C	40°C	35°C	30°C
0	1.42	1.71	1.92	5.13	875.00	3291.67	5458.33	5833.33	5958.33
0.2	1.5	1.88	2.29	5.50	916.67	3583.33	5541.66	6041.67	6458.33
0.4	1.58	1.96	2.46	5.67	916.67	3583.33	5666.67	6250.00	6416.67
0.6	1.46	1.83	2.29	5.42	833.33	3333.33	5541.66	6000.00	6208.33
0.8	1.33	1.67	1.96	5.25	750.00	3166.67	5375.00	5833.33	6000.00
1.0	1.00	1.21	1.75	5.63	80.00	629.17	685.00	767.92	833.33

ตาราง 20 แสดงบัลค์มอดุลัสกับอุณหภูมิของเยลลี่กระเจี๊ยบที่มีส่วนผสมของตัวทำเจลเป็น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งมีอัตราการผสมระหว่างแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัมที่แตกต่างกัน

อุณหภูมิ (°C)	บัลค์มอดุลัส (x 10^9 N/m^2)					
	J1	J2	J3	J4	J5	J6
70	4.81	4.50	4.28	4.15	3.90	3.20
65	5.06	4.71	4.44	4.20	4.04	3.55
60	5.18	4.95	4.74	4.37	4.16	3.73
55	5.45	5.20	4.92	4.62	4.29	3.85
50	5.64	5.57	5.22	4.94	4.48	4.03
45	5.87	5.65	5.37	5.08	4.70	4.26
40	6.28	5.81	5.47	5.21	4.91	4.48
35	6.44	6.12	5.69	5.40	5.10	4.62
30	6.56	6.34	5.88	5.65	5.24	4.78

ตาราง 21 แสดงบัลค์มอดุลัสกับปริมาณโลคัสต์บีนกัมเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก ในตัวกลางเยลลี่กระเจี๊ยบ ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

ร้อยละโดยน้ำหนักของโลคัสต์บีนกัม	บัลค์มอดุลัส (x 10^9 N/m^2)								
	70°C	65°C	60°C	55°C	50°C	45°C	40°C	35°C	30°C
0	4.81	5.06	5.18	5.45	5.64	5.87	6.28	6.44	6.56
0.2	4.5	4.71	4.95	5.2	5.57	5.65	5.81	6.12	6.34
0.4	4.28	4.44	4.74	4.92	5.22	5.37	5.47	5.69	5.88
0.6	4.15	4.2	4.37	4.62	4.94	5.08	5.21	5.4	5.65
0.8	3.9	4.04	4.16	4.29	4.48	4.7	4.91	5.1	5.24
1.0	3.2	3.55	3.73	3.85	4.03	4.26	4.48	4.62	4.78

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่

วิธีการทดลองหาค่าความยาวคลื่นอัลทราโซนิกเพื่อนำมาคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกในตัวกลางเยลลี่ที่อุณหภูมิ และอัตราการผสมต่าง ๆ ของแคปปา-คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บีนกัม (รายละเอียดการทดลองหน้า 28 – 29)

1. หมุนเวอร์เนียร์เพื่อปรับทรานสดิวเซอร์ตัวรับ เพื่อที่จะได้ระยะที่คลื่นทั้งสองขบวนมีเฟสตรงกัน โดยหมุนเวอร์เนียร์จำนวน 4 ครั้ง (ระยะนี้คือ L) ระยะห่างระหว่างเฟสที่ตรงกันแต่ละครั้งคือ ระยะ ΔL ซึ่งก็คือความยาวคลื่น λ

2. นำค่าความยาวคลื่นมาคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิกจากสมการ $v = \lambda f$ (เมื่อ f เป็นความถี่ของคลื่น มีค่าอยู่ระหว่าง 811.5 – 812.5 กิโลเฮิรตซ์)

ตาราง 22 แสดงค่าระยะที่เฟสของคลื่นสองขบวนตรงกัน (L_0, L_1, L_2, L_3) และค่าผลต่างระยะ (ΔL_1, ΔL_2, ΔL_3) ซึ่งคือค่าความยาวคลื่น λ ที่วัดในตัวกลางเยลลี่ J1 โดยใช้ความถี่คลื่น 812.5 กิโลเฮิรตซ์

อุณหภูมิ ($^{\circ}C$)	L_0 (mm)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	ΔL_1 (mm)	ΔL_2 (mm)	ΔL_3 (mm)	$\lambda_{เฉลี่ย}$ (mm)	v (m/s)
70	0.386	2.967	5.500	8.074	2.581	2.533	2.574	2.562	2082
65	0.922	3.515	6.129	8.790	2.593	2.614	2.611	2.623	2131
60	0.843	3.496	6.162	8.805	2.653	2.666	2.643	2.654	2156
55	0.651	3.359	6.084	8.821	2.708	2.725	2.737	2.723	2212
50	0.533	3.299	6.068	8.876	2.746	2.769	2.808	2.774	2254
45	0.404	3.240	6.084	8.905	2.836	2.844	2.821	2.834	2303
40	0.501	3.412	6.332	9.270	2.911	2.920	2.938	2.923	2375
35	0.622	3.566	6.524	9.486	2.944	2.958	2.962	2.954	2400
30	0.732	3.703	6.687	9.678	2.971	2.984	2.991	2.982	2423

ภาคผนวก ค
ตัวอย่างการคำนวณหาค่าความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบ

วิธีการทดลองหาค่าความหนาแน่นของเยลลี่กระเจี๊ยบ (รายละเอียดวิธีการทดลองหน้า 30-31) สรุปได้ดังนี้

1. บันทึกค่าอุณหภูมิขณะใด ๆ กับความสูงของเยลลี่ในขวดแก้วก้นกลม เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากอุณหภูมิจนถึงค่าสูงสุดที่ต้องการจะวัด จะได้ระยะ Δh ซึ่งก็คือระยะที่ความสูงของเยลลี่สูงขึ้นจากอุณหภูมิห้องนั่นคือระยะ $h_T - h_0$

2. คำนวณ V_T ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จาก

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

โดย

V_T เป็นปริมาตรของเยลลี่ที่อุณหภูมิ T

V_0 เป็นปริมาตรของเยลลี่ที่อุณหภูมิห้องซึ่งเท่ากับ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

h_0 เป็นระดับความสูงเริ่มต้นของเยลลี่

h_T เป็นระดับความสูงของเยลลี่ที่อุณหภูมิ T

A เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางด้านในของคอขวดแก้วรูปชมพู่ ซึ่งเท่ากับ 1.539×10^{-4} ตารางเมตร

a เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของเทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งเท่ากับ 2.272×10^{-5} ตารางเมตร

3. คำนวณหาค่าความหนาแน่นของเยลลี่ที่ค่าอุณหภูมิต่าง ๆ จากสมการ

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

เมื่อ

ρ_T เป็นความหนาแน่นของเยลลี่ที่อุณหภูมิ T

m เป็นมวลของเยลลี่

V_T เป็นปริมาตรของเยลลี่ที่อุณหภูมิ T

ตาราง 23 แสดงผลต่างความสูงของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ (^{o}C)	$\Delta h = (h_T - h_0)$ (m)
30	0.0126
35	0.0120
40	0.0107
45	0.0105
50	0.0092
55	0.0080
60	0.0065
65	0.0050
70	0.0040

ตัวอย่างการคำนวณหาความหนาแน่นของเยลลี่โดยใช้สมการ $V_T = V_0 - (A - a)(h_T - h_0)$ จะได้ปริมาตรของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมินั้น เช่นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

$$V_T = V_0 - (A - a)(h_T - h_0)$$
$$V_T = (250 \times 10^{-6}\ m^3) - ((1.539 \times 10^{-4} - 2.272 \times 10^{-5})m^2)(0.0040\ m)$$
$$= 249.48 \times 10^{-6}\ m^3$$

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

$$\rho_T = \frac{m}{V_T} = \frac{0.2771 kg}{249.48 \times 10^{-6} m^3} = 1110.7\ kg/m^3$$

ภาคผนวก ง
ค่ามอดุลัสเฉือนที่หาได้จากความหนืดของเยลลี่กระเจี๊ยบ

จากผลการวัดความหนืดของเยลลี่ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer รุ่น RDVT II และใช้หัวเข็ม RV6 ความเร็วรอบการหมุน 50 รอบต่อนาที ซึ่งให้ผลการทดลองให้หน่วยของ เซนติพอยส์ ดังตาราง 17 กำหนดให้ 1 พอยส์ มีค่าเท่ากับ 0.1 นิวตันวินาทีต่อตารางเมตร หรือ 0.1 พาสคัลวินาที

สามารถคำนวณหาค่ามอดุลัสเฉือนได้จากสมการ

$$G = \frac{\eta}{\tau}$$

เมื่อ

G เป็นมอดุลัสเฉือนของเยลลี่มีหน่วยเป็นพาสคัส

η เป็นความหนืดของเยลลี่มีหน่วยเป็นนิวตัน·วินาทีต่อตารางเมตร

t เป็นเวลาที่เข็มหมุนครบ 1 รอบ นั่นคือ $\frac{60 \text{ วินาที}}{50 \text{ รอบ}} = 1.20$ วินาที

ตัวอย่างการหามอดุลัสเฉือนของเยลลี่ ที่ได้จากเครื่องวัดความหนืด ทำการวัดความหนืดของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จากข้อมูลในตารางที่ 17 พบว่าได้ค่า 6.15×10^3 เซนติพอยส์ ทำการแปลงให้ความหนืดนี้อยู่ในหน่วยของ พาสคัล·วินาที ได้คือ 6.15 พาสคัสวินาที ดังนั้นพบว่า

$$G = \frac{\eta}{\tau}$$

$$G = \frac{6.15 \text{ พาสคัลวินาที}}{1.20 \text{ วินาที}}$$

$$= 5.13 \text{ พาสคัล}$$

แสดงให้เห็นว่า ค่ามอดุลัสเฉือนของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 5.13 พาสคัล

ภาคผนวก จ
การหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิ

ตารางด้านล่างนี้ เป็นการคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงความหนืดเทียบกับอุณหภูมิของเยลลี่ J1 ซึ่งจากผลการวัดความหนืดในตาราง 17 สามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดได้ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ดังนี้

ตาราง 24 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิ

ช่วงอุณหภูมิ	ผลต่างของความหนืด $\Delta\eta$ (cP)	ผลต่างของอุณหภูมิ ΔT ($^{\circ}C$)	อัตราการเปลี่ยนแปลงของความหนืดเทียบกับอุณหภูมิ $\frac{\Delta\eta}{\Delta T}$ (cP/$^{\circ}C$)
70 – 65	3.50×10^{2}	5	70.00
65 – 60	2.50×10^{2}	5	50.00
60 – 55	3.85×10^{3}	5	770.00
55 – 50	1.04×10^{6}	5	2.08×10^{5}
50 – 45	2.90×10^{6}	5	5.80×10^{5}
45 – 40	2.60×10^{6}	5	5.20×10^{5}
40 – 35	0.45×10^{6}	5	9.00×10^{4}
35 – 30	0.15×10^{6}	5	3.00×10^{4}

เมื่อนำค่า $\frac{\Delta\eta}{\Delta T}$ มาเขียนกราฟกับอุณหภูมิ โดยให้แกนตั้งเป็นค่าของ $\frac{\Delta\eta}{\Delta T}$ ส่วนแกนนอนให้เป็นค่าอุณหภูมิ จะได้กราฟดังภาพประกอบ 20

ภาคผนวก ฉ
ตัวอย่างการคำนวณหาค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่กระเจี๊ยบ

จากความสัมพันธ์

$$v_L = \sqrt{\frac{B + \frac{4}{3}G}{\rho}}$$

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้คือ

$$B = \rho v_L^2 - \frac{4}{3}G$$

แต่เนื่องจาก ค่ามอดุลัสเฉือนของเยลลี่มีค่าสูงสุดอยู่ในระดับ 10^3 เมื่อเปรียบเทียบกับค่า ρv^2 ที่อยู่ในระดับ 10^9 ค่ามอดุลัสเฉือนนี้ จึงสามารถละทิ้งได้ ดังนั้น สมการด้านบน จึงสามารถลดรูปเหลือเพียง

$$B = \rho v_L^2$$

ตัวอย่างการหาบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จากข้อมูลในตารางที่ 15 พบว่าได้ค่าความหนาแน่น ρ = 1111.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และจากข้อมูลในตารางที่ 13 พบว่าได้ค่าความเร็วคลื่นอัลทราโซนิก v_L = 2214.5 เมตรต่อวินาที ดังนั้นสามารถคำนวณค่าบัลค์มอดุลัสได้คือ

$$B = \rho v_L^2$$
$$B = (1111.5\ kg/m^3)(2214.5\ m/s)^2$$
$$= 5.45 \times 10^9 \text{ พาสคัล}$$

แสดงให้เห็นว่า ค่าบัลค์มอดุลัสของเยลลี่ J1 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 5.45×10^9 พาสคัล

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นาย สุรเชษฐ์ กฤชแสงโชติ
วันเดือนปีเกิด	14 สิงหาคม 2522
สถานที่เกิด	เขตธนบุรี กรุงเทพมหานคร
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	47/532 หมู่ 5 หมู่บ้านสหพร ซอยสหพร 26 ถนนศาลายา – นครชัยศรี ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ครูวิชาการฟิสิกส์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาวิชาฟิสิกส์ กลุ่มวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โรงเรียนมหิดลวิทยานุสรณ์ โรงเรียนวิทยาศาสตร์ของรัฐ (องค์การมหาชน) ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2540	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนธนบุรีวรเทพีพลารักษ์
พ.ศ. 2544	วท.บ. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2549	วท.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ