

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อน
(Production of concentrated durian pulp by vacuum and hot oil treatment system)



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 119384
วัน,เดือน,ปี - 7 S.A. 2554

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2553


หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อน
(Production of concentrated durian pulp by vacuum and hot oil treatment system)

ผู้จัดทำ

- | | | | |
|-----------------|----------|--------------|----------|
| 1. นางสาวนินฐา | โอบอ้อม | รหัสนักศึกษา | 50010154 |
| 2. นางสาวปิยพร | พินันมา | รหัสนักศึกษา | 50010969 |
| 3. นางสาวพิริยา | วงษ์สกุล | รหัสนักศึกษา | 50011111 |


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รศ.ดร.ปานมนัส สิริสมบูรณ์)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร.พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อน

นางสาวชนิษฐา โอบอ้อม	50010154
นางสาวปิยพร พันนума	50010969
นางสาวพิริยา วงษ์สกุล	50011111

รศ.ดร. ปานมนัส ศิริสมบุรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร. พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อนที่อุณหภูมิ น้ำมันและความเร็วรอบของใบกวน ต่างๆกัน โดยทดลองที่อุณหภูมิของน้ำมัน 5 ระดับ (43.75, 50, 65, 80 และ 86.20 °C) ความเร็วรอบของใบกวน 5 ระดับ (88.75 125 212.50 300 และ 336.24 รอบต่อนาที) ที่ความดันสุญญากาศประมาณ 20-50 mmHg ซึ่งได้วัดสมบัติทางกายภาพเพื่อประเมินคุณภาพของเนื้อทุเรียนก่อนและหลัง(เนื้อทุเรียนเข้มข้น)การทดลอง ดังนี้คือ ค่าความชื้นฐานเปียก Water activity ความหนืดและค่า $L^* a^* b^*$ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพกับอุณหภูมิของน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวน พบว่า สภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้ได้เนื้อทุเรียนเข้มข้น คือที่อุณหภูมิของน้ำมัน 80 °C และความเร็วรอบของใบกวน 300 rpm ซึ่งให้อัตราการลดความชื้นสูงที่สุด โดยที่เวลา 90 นาที ค่า Water activity ต่ำสุดเท่ากับ 0.923 ความหนืดสูงสุด 288300 Pa s โดยสียังคงใกล้เคียงกับเนื้อทุเรียนเริ่มต้น

Production of concentrated durian pulp by vacuum and hot oil treatment system

Kanittha Aopaom 50010154

Piyaporn Phunnuma 50010969

Piriya Wongsakul 50011111

Panmanas Sirisomboon

Assist.Prof. Pimpem Pornchaloempong

2553

Abstract

The objective of this research is aimed to study the optimal condition for producing concentrated durian pulp by using vacuum and hot oil heat treatment by varying the agitator speed. The experiments were conducted at the hot oil temperature of 43.75, 50.00, 65.00, 80.00 and 86.20 °C and the speed levels of agitator were applied at 88.75, 125.00, 212.50, 300.00 and 336.24 rpm under the 20-50 mmHg in vacuum chamber. The physical properties of durian pulp after experiment were measured to compare with the initial properties. The indicators for this experiment were the moisture content (%wb), water activity, viscosity (Pa s) and the color value ($L^* a^* b^*$ scale). The results show that at the 80 °C hot oil temperature and 300 rpm of agitator was the optimal condition because giving the highest rate of moisture content decreasing, and at 90 minutes of experiment it gave the lowest level of water activity (0.923), the highest level of viscosity (288.3 Pa s) and the color was slightly changed from the initial condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ปานมนัส สิริสมบูรณ์ อาจารย์ผู้ควบคุมการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นแรงบันดาลใจในการทำโครงการเรื่องนี้ ได้ช่วยเหลือตลอดจนให้คำแนะนำต่างๆ ผลักดันให้เกิดความก้าวหน้าให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งปริญญานิพนธ์เล่มนี้มีความถูกต้องสมบูรณ์ รวมทั้งยังดูแลเอาใจใส่ในการทำโครงการเป็นอย่างดีและให้กำลังใจในการทำโครงการด้วยดีเสมอมาจนปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสิ้น

ขอขอบพระคุณดร.ประสันต์ ชุ่มใจหาญ ที่ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำในด้านต่างๆ จนโครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้ความรู้ทางวิชาการและคำแนะนำต่างๆ เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่หลักสูตรวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ ให้ความช่วยเหลือตลอดจนอำนวยความสะดวกในการทำโครงการในครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำโครงการในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยเป็นกำลังใจในวันที่ท้อแท้ให้สามารถก้าวต่อไปได้และให้การสนับสนุนในทุกเรื่องและเป็นทุกสิ่งทุกอย่างให้ข้าพเจ้ามีวันนี้

คุณประโยชน์อันพึงได้จากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ขออำนาจคุณพระศรีรัตนตรัย โปรดคลบบันดาล ปกป้องรักษาให้ทุกท่านมีสุขภาพพลานามัยสมบูรณ์แข็งแรงและมีความสุขตลอดไป

นางสาวณิษฐา โอบอ้อม

นางสาวปิยพร พันนума

นางสาวพิริยา วงษ์สกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูป	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.4 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.6 วิธีการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหย	6
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ	6
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับความร้อน	7
2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)	10
2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับความชื้น	11
2.6 การแปรรูปอาหาร	13
2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับปริมาณน้ำในอาหาร	19
2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับความหนืด (viscosity)	22
2.9 ทฤษฎีของการผสมของของเหลว (Theory of liquid mixing)	31
2.10 ทฤษฎีเกี่ยวกับค่าสี	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การทดลองทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อน	
3.1 รายละเอียดการทดลอง	47
3.2 วัสดุ	47
3.3 องค์ประกอบของเครื่อง	47
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	49
3.5 การวางแผนการทดลอง	52
3.6 วิธีการเตรียมเนื้อทุเรียน	52
3.7 วิธีการทดลอง	53
3.8 วิธีการวัดคุณสมบัติของเนื้อทุเรียนเข้มข้น	53
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นฐานเปียกของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้น	58
4.2 การเปลี่ยนแปลง Water activity และความหนืด ของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้น	60
4.3 การเปลี่ยนแปลง ค่า สี ของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้น	61
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพกับความเร็วรอบใบกวน และอุณหภูมิของน้ำมันร้อน	62
4.5 ผลกระทบ	62
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	64
ภาคผนวก ก	66
ภาคผนวก ข	71
เอกสารอ้างอิง	91

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินการ	5
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารที่ระดับ Water Activity ต่าง ๆ	22
ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างลักษณะพฤติกรรมกรไลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง	31
ตารางที่ 3.1 สภาวะในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อน ส่งผ่านจากน้ำมันร้อน	52
ตารางที่ 4.1 สภาวะในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อน ส่งผ่านจากน้ำมันร้อน	57
ตารางที่ 4.2 ตารางผลกระทบ (P-value)	63



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Saturation Vapor Pressure (mmHg) กับอุณหภูมิ (° C)	7
รูปที่ 2.2 แสดงการถ่ายเทความร้อนแบบต่าง ๆ	10
รูปที่ 2.3 แผนภาพการไหลในของไหล	23
รูปที่ 2.4 ลักษณะของพฤติกรรมกรไหล	24
รูปที่ 2.5 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนิวโตเนียน	25
รูปที่ 2.6 Rheograms of typical Newtonian Fluids	25
รูปที่ 2.7 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทโคพลาสติก	26
รูปที่ 2.8 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทโดลาแพนค์	27
รูปที่ 2.9 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทบิงแฮม	27
รูปที่ 2.10 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทพลาสติก	28
รูปที่ 2.11 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทไรโซทรอปิก	28
รูปที่ 2.12 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมกรไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทรีโอเพกซิก	29
รูปที่ 2.13 การหาค่า μ_{app} ด้วยการพลอตค่า shear stress-shear rate ลงบนกระดาษ log-log	30
รูปที่ 2.14 ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการลงจุดบนกระดาษ log-log	31
รูปที่ 2.15 ใบพัดเครื่องชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผสม	34
รูปที่ 2.16 ใบกวนแบบต่างๆ ของโดและเพสต์	35
รูปที่ 2.17 ถังผสมที่มีแผ่นกั้น และตัวกวนที่เป็นแบบ ใบพัดพัดเครื่องชนิด 3 ใบ	35
รูปที่ 2.18 ใบกวนแบบใบพาย	36
รูปที่ 2.19 ใบพัดชนิดก้านสั้นต่างๆ	36
รูปที่ 2.20 ถังผสมที่มีใบพัดก้านสั้นชนิด 6 ใบซึ่งมีงานที่แสดงการไหล	37
รูปที่ 2.21 ลักษณะการเกิดการไหลแบบหมุนวน	37
รูปที่ 2.22 ใบพัดที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากศูนย์กลาง	38
รูปที่ 2.23 ใบพัดที่เข้าทางด้านข้าง	38
รูปที่ 2.24 เครื่องนวดสำหรับเพสต์	38
รูปที่ 2.25 หม้อผสมของโดและเพสต์	39
รูปที่ 2.26 ใบกวนแบบต่างๆ ของโดและเพสต์	39
รูปที่ 2.27 รูปร่างของเครื่องผสมแบบที่ทำให้เกิดการกึ่งไปมา	39
รูปที่ 2.28 แผนภาพของเครื่องผสมริบบอน	39

สารบัญรูป (ต่อ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า
รูปที่ 2.29 Munsell color dimensions	42
รูปที่ 2.30 แผนผังแสดงสีมาตรฐานของระบบ CIE	43
รูปที่ 2.31 ตัวอย่าง chromaticity diagram	44
รูปที่ 3.1 เครื่องทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่าน จากน้ำมันร้อน	48
รูปที่ 3.2 ชุดดึงสุญญากาศ	48
รูปที่ 3.3 Clamp Meter	49
รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์	49
รูปที่ 3.5 เครื่องวัดสี	50
รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความหนืด	50
รูปที่ 3.7 เครื่องวัด Water Activity	51
รูปที่ 3.8 ตู้อบลมร้อน	51
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความชื้นฐานเปียกกับเวลาในการลดความชื้นตู้อบลมร้อน ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	58
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความชื้นฐานเปียกกับเวลาในการลดความชื้น ระบบสุญญากาศที่สภาวะต่างๆ	59
รูปที่ 4.3 ค่า Water activity และค่าความหนืดของเนื้อทุเรียนที่สภาวะต่างๆ	60
รูปที่ 4.4 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของเนื้อทุเรียนที่สภาวะต่างๆ	61

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื้อทุเรียนเข้มข้น สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้หลากหลายรูปแบบ เช่น เป็นส่วนผสมของเค้กทุเรียน ขนมปัง ไล้ครีม เป็นต้น ซึ่งเหล่านี้ล้วนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการของห้องตลาดและในอุตสาหกรรมอาหาร การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นเป็นการลดปริมาณน้ำของเนื้อทุเรียนนั้นจะช่วยลดมวลและปริมาตรของเนื้อทุเรียนลงได้ จากการที่เราลดมวลและปริมาตรได้ก็จะทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งและเป็นวิธีการถนอมอาหารอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งจะมีส่วนช่วยแก้ปัญหาทุเรียนล้นตลาดลงได้

การลดปริมาณน้ำในอาหารที่เป็นของเหลว เช่น น้ำผลไม้ (Juice) นิยมใช้วิธี Reverse Osmosis ซึ่งเป็นกระบวนการแยกตัวทำละลายออกจากตัวถูกละลาย โดยการใช้ความดันที่สูงกว่าความดันออสโมติกของสารละลายนั้น ดันให้ตัวทำละลายไหลออกจากสารละลายผ่านเยื่อบาง [1] ที่ไม่ยอมให้ตัวถูกละลายผ่าน เช่น น้ำองุ่น [2] น้ำส้ม [3] น้ำมะเขือเทศ [4] เป็นต้น แต่วิธีนี้ไม่สามารถใช้กับการทำให้เนื้อผลไม้ (pulp) ซึ่งเป็นของเหลวกึ่งของแข็งได้

การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นจะช่วยเพิ่มอายุการเก็บรักษาเนื้อทุเรียนให้เพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่จะใช้กรรมวิธีของการกวนให้ความร้อนโดยตรงกับเนื้อทุเรียน วิธีดังกล่าวนี้เป็นวิธีการที่อาศัยหลักการลดค่า Water Activity ซึ่งค่า Water Activity เป็นปัจจัยที่สำคัญในการควบคุมและป้องกันการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์อาหาร จึงมีผลโดยตรงต่อการกำหนดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากค่า Water Activity เป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่างๆ นอกจากนี้ Water Activity ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของเอ็นไซม์และวิตามินในทุเรียน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของทุเรียนได้ [5] และวิธีการดังกล่าวส่วนใหญ่ก็ต้องใช้ความร้อนสูงในการผลิต ส่งผลให้คุณค่าทางอาหารและสมบัติบางประการเนื้อทุเรียนสูญเสียด้วยเช่นกัน เนื่องจากการใช้สุญญากาศจะทำให้ของเหลวระเหยได้ที่อุณหภูมิตัวอย่างรวดเร็ว การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่ระบบปิดด้วยระบบสุญญากาศร่วมกับการให้ความร้อนจากการส่งผ่านจากน้ำมันร้อนจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่จะช่วยรักษาคุณสมบัติต่างๆ ของเนื้อทุเรียนไว้ได้ การให้ความร้อนโดยการส่งผ่านของน้ำมันร้อนเป็นการเก็บรักษาความร้อนและควบคุมอุณหภูมิของเนื้อทุเรียนภายในถึงสุญญากาศจะช่วยรักษาคุณสมบัติต่างๆ ของเนื้อทุเรียนไว้ได้ การให้ความร้อนโดยการส่งผ่านของน้ำมันร้อนเป็นการเก็บรักษาความร้อนและควบคุมอุณหภูมิของเนื้อทุเรียนภายในถึงสุญญากาศ เนื่องจากถ้าไม่มีการควบคุมความร้อนภายในถึง อุณหภูมิภายในถึงจะลดลงอย่างรวดเร็วเพราะน้ำที่ระเหยออกจากเนื้อทุเรียนจะพาความเอ็กซานีเป็นเอ็กซานีที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ร้อนออกไปด้วย ซึ่งทำให้ต้องใช้ระดับสุญญากาศที่ต่ำลงไปอีก ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานและทำให้ปั๊มสุญญากาศทำงานหนัก

โครงการนี้จึงทำการศึกษาเพื่อทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อนและศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่ผ่านสภาวะต่างๆ ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบดังกล่าวในขนาดที่ใหญ่ขึ้นในระดับ SME

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.) เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น เช่น อุณหภูมิของน้ำมัน ระดับสุญญากาศ และความเร็วรอบในการกวนผสมที่จะสามารถลดปริมาณน้ำในทุเรียนได้อย่างรวดเร็ว และรักษาคุณภาพของเนื้อทุเรียน
- 2.) เพื่อศึกษาคุณภาพของเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะต่างๆ ของระบบ เช่น ค่าความชื้น ค่าความหวาน ค่า A_w ค่า $L^* a^* b^*$ และค่าความหนืด
- 3.) เพื่อศึกษาการใช้พลังงานในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

-พันธุ์ของวัตถุดิบที่ใช้คือทุเรียนพันธุ์หมอนทอง

1.4 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุภาภรณ์ คักกลาสและคณะ [6] เป็นการพัฒนาเครื่องต้มระเหยแบบฟิล์มที่มีใบกวน (Agitated Thin Film Evaporator, ATFE) จุดเด่นของเครื่องต้มระเหยแบบฟิล์มที่มีใบกวนคือ การใช้ใบกวนปาดกวนของเหลวให้เกิดเป็นฟิล์มบางที่มีความปั่นป่วนสูงขึ้นที่ผนังท่อระเหย และผลิตภัณฑ์ที่ได้สามารถไหลออกจากเครื่องระเหยได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ระยะเวลาที่ฟิล์มของเหลวอยู่ในเครื่องต้มระเหยค่อนข้างสั้น จากสาเหตุนี้ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มของเหลวในเครื่องต้มระเหยที่มีใบกวนมีค่าสูงกว่าเครื่องต้มระเหยชนิดอื่นๆ ผลิตภัณฑ์จึงเกิดการสลายตัวเนื่องจากความร้อนน้อย ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสามารถไหลออกจากเครื่องระเหยได้ นอกจากนี้การปาดกวนของใบกวนยังช่วยลดการเกิดฟองและตะกอนเกาะที่ผิวได้อีกด้วย นอกจากนั้น การนำระบบสุญญากาศเข้าช่วยในการต้มระเหย ทำให้อุณหภูมิจุดเดือดของสารละลายในเครื่องต้มระเหยต่ำลง เป็นการช่วยถนอมสารอาหารที่ถูกทำลายโดยความร้อนได้ดีขึ้น แต่ถ้าใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันสูญญากาศมากเกินไปจะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงานจากปั๊มสูญญากาศมากขึ้น ดังนั้นจึงควรเลือกใช้ความดันสูญญากาศที่เพียงพอที่จะรักษาคุณภาพสารละลายได้

ชัยวัฒน์ เผ่าสันทัตพาณิชย์ [7] ได้ดำเนินการศึกษาจะสำรวจข้อมูลการใช้เครื่องทอดสูญญากาศที่มีใช้อยู่ในกระบวนการผลิตทุเรียนทอดสูญญากาศ จากการสำรวจในพื้นที่ภาคตะวันออกที่มีการปลูกทุเรียนมากคือ จ.จันทบุรี และ จ.ตราด พบว่า มีการใช้เครื่องทอดสูญญากาศจำนวน 4 ราย พบใน จ.จันทบุรี 3 ราย และใน จ.ตราด 1 ราย ทั้งหมดเป็นผู้ประกอบการขนาดเล็ก โดยมีขนาดกำลังผลิตสูงสุดไม่เกิน 50 กิโลกรัม/ครั้ง มีทั้งแบบสลัดน้ำมันในถังทอดและไม่มี ราคาเครื่องมีตั้งแต่ 3 แสนบาท จนถึง 5 ล้านบาท ขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิตและอุปกรณ์ในระบบ ปัญหาที่พบคือ การคักไอน้ำของน้ำและน้ำมันพืชก่อนเข้าปั๊มสูญญากาศมีประสิทธิภาพต่ำ จากนั้นมีการศึกษาพัฒนาออกแบบเครื่องทอดสูญญากาศสำหรับทอดทุเรียนสุกได้ที่อุณหภูมิต่ำ ได้เครื่องทอดสูญญากาศต้นแบบที่ออกแบบประกอบด้วย 1) ถังทอดแบบปิดสนิท ลักษณะทรงกระบอกตั้ง มีตะกร้าทอดทรงกระบอกวางแนวตั้งภายในและมีแกนหมุนปรับเร็วและช้าได้ ความสามารถในการทอด 5 กิโลกรัม/ครั้ง มีการสลัดน้ำมันในถังทอด 2) ระบบให้ความร้อนกับน้ำมันทอดแบบผ่านตัวกลางเป็นน้ำมันถ่ายเทความร้อน โดยใช้แก๊สหุงต้มเป็นเชื้อเพลิง 3) ถังพักและสำรองน้ำมันทอด 4) ระบบปั๊มหมุนเวียนน้ำมันทอดออกจากถังทอด 5) ระบบชุดคักไอน้ำและน้ำมันจากถังทอดก่อนเข้าปั๊มสูญญากาศ และ 6) เครื่องปั๊มสูญญากาศแบบ Mechanical Booster Pump ผลทดสอบและแก้ไขปรับปรุงต้นแบบเครื่องทอดสูญญากาศ พบว่า ชิ้นเนื้อทุเรียนดิบหั่น จำนวน 5 กิโลกรัม มีสภาวะการทอดเหมาะสมที่อุณหภูมิทอด 85 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทอด 35 นาที และการสลัดน้ำมันใช้เวลา 20 นาที โดยสร้างระดับสูญญากาศสูงสุดได้ 740-760 มิลลิเมตรปรอท ได้ผลิตภัณฑ์หลังทอดจำนวน 2 กิโลกรัม และชิ้นเนื้อทุเรียนสุกหั่นสี่ส่วน จำนวน 5 กิโลกรัม มีสภาวะการทอดเหมาะสมที่อุณหภูมิทอด 85 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทอด 40 นาทีและการสลัดน้ำมันใช้เวลา 30 นาที โดยสร้างระดับสูญญากาศสูงสุดได้ 740-760 มิลลิเมตรปรอท ได้ผลิตภัณฑ์หลังทอดจำนวน 2.1 กิโลกรัม ต้นแบบเครื่องทอดสูญญากาศมีการศึกษาทดสอบเครื่องปั๊มสูญญากาศ แบบ Water Jet พบว่า สามารถทดแทนการใช้เครื่องปั๊มสูญญากาศแบบ Mechanical Booster Pump ได้ โดยสร้างระดับสูญญากาศสูงสุด เพียง 720 มิลลิเมตรปรอท สามารถทอดชิ้นเนื้อทุเรียนดิบความหนา 6-8 มิลลิเมตร จำนวน 5 กิโลกรัมที่มีสภาวะการทอดเหมาะสม ที่อุณหภูมิทอด 85 องศาเซลเซียส ใช้เวลาทอด 30 นาที และการสลัดน้ำมันใช้เวลา 20 นาที ได้ผลิตภัณฑ์หลังทอดจำนวน 2.15 กิโลกรัม

ทิพย์วรรณ งามศักดิ์ และคณะ[8] ได้ทดสอบพันธุ์มะม่วงที่เหมาะสมจะนำมาทำน้ำมะม่วง พบว่ามะม่วงไทยที่เหมาะสมในการนำมาทำน้ำมะม่วงคือ มะม่วงแก้ว มะม่วงสามปี และตลับนาค แต่ว่าพันธุ์ที่เหมาะสมจะนำมาแปรรูปเพื่อทำผลิตภัณฑ์ทั้งน้ำและเนื้อคือมะม่วงแก้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายพันธุ์ สก. 007 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของกรมวิชาการเกษตร พันธุ์โชคอนันต์ น้ำดอกไม้สีทอง มหาชนก และแรด น้ำมะม่วงที่กล่าวถึงนี้มีหลายรูปแบบ อย่างแรกก็คือ น้ำมะม่วงธรรมดาที่สามารถนำมาบรรจุขวดพร้อมดื่มได้ทันที แต่ว่าที่น่าสนใจคือน้ำและเนื้อมะม่วงเข้มข้นที่พร้อมสำหรับการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการแปรรูปอย่างอื่นต่อไป ไม่ว่าจะเป็นการทำไอศกรีม ทำไส้ขนม หรือราดหน้าขนมอบต่างๆ หรือแม้กระทั่งนำไปเป็นวัตถุดิบทำมะม่วงแผ่นแทนที่จะใช้วิธีการแบบเดิม วิธีการที่ใช้ก็คือ นำเนื้อมะม่วงที่จะนำมาใช้แปรรูปมาผ่านกรรมวิธีตามขั้นตอนต่างๆ เช่น ล้าง ปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้น ผ่านเครื่องแยกกาก และใช้เอนไซม์ช่วยย่อยสลาย หลังจากนั้นจึงนำไปกรองและทำให้น้ำมะม่วงเข้มข้นขึ้น โดยใช้ความร้อนและสุญญากาศ แล้วนำมาผสมกลับไปกับเนื้อมะม่วง ก็จะกลายเป็นน้ำและเนื้อมะม่วงเข้มข้น ที่พร้อมจะนำไปบรรจุเก็บไว้ในอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสเพื่อรอการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) วิธีการที่เหมาะสมที่จะทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อนพร้อมจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้
- 2.) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผัก ผลไม้ ชนิดอื่นได้
- 3.) พัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ที่สามารถช่วยแก้ไขปัญหาทุเรียนล้นตลาดหรือช่วยให้เก็บรักษาไว้ได้นาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

1.6 วิธีการดำเนินงาน

โครงการนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย คือ ทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหย การระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ การถ่ายเทความร้อน ทฤษฎีเกี่ยวกับความหนืด หลักการแปรรูปอาหาร ทฤษฎีเกี่ยวกับปริมาณน้ำในอาหาร จากนั้นจึงทำการวางแผนการทดลอง และทดลองเพื่อทำการศึกษาเพื่อทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อนและศึกษาสมบัติทางกายภาพของเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่ผ่านสภาวะต่างๆ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หาผล สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินการ

ขั้นตอนดำเนินงาน	ปี/เดือน									
	พ.ศ. 2553					พ.ศ. 2554				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1.หาข้อมูลเกี่ยวกับหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	↔									
2.วางแผนการดำเนินงาน	↔									
3.ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของเนื้อทุเรียน, หาแหล่ง, จัดซื้อทุเรียน	↔									
4.ศึกษาการทำงานของเครื่องและทดลองเบื้องต้น			↔							
5.วัดสมบัติของเนื้อทุเรียนก่อนการทดลอง ทำการทดลองเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่างๆ วัดความชื้นระหว่างการทดลอง และวัดสมบัติของเนื้อทุเรียนเข้มข้นหลังทำการทดลอง					↔					
6.วิเคราะห์ผลและสรุปผล								↔		
7.ทำรายงาน									↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหย [9]

2.1.1 การระเหย

การที่ของเหลวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไออย่างช้าๆ และเกิดขึ้นเฉพาะผิวหน้าของของเหลวเท่านั้น นอกจากนั้นการระเหยยังสามารถเกิดได้ทุกๆ อุณหภูมิที่ยังมีของเหลวนั้นอยู่ เช่น น้ำสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิ 0-100°C ที่ความดัน 1 บรรยากาศ

2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหย

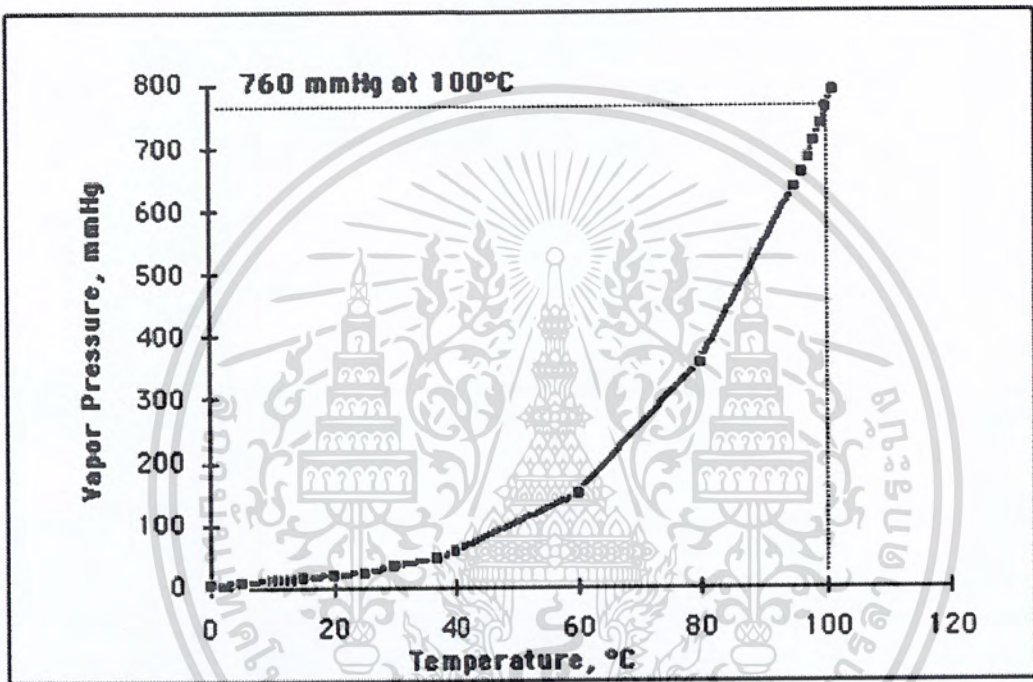
1. อุณหภูมิสูง ของเหลวจะระเหยได้มาก ที่อุณหภูมิต่ำ ของเหลวจะระเหยได้น้อย
2. ชนิดของของเหลว ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลมาก จะระเหยได้ยาก จึงระเหยได้น้อย ของเหลวที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลน้อย จะระเหยได้ง่าย จึงระเหยได้มาก
3. พื้นที่ผิวของของเหลว ของเหลวที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จะระเหยได้มาก ของเหลวที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสน้อย จะระเหยได้น้อย
4. ความดันบรรยากาศที่ความดันบรรยากาศสูง ของเหลวจะระเหยได้ยาก จึงระเหยได้น้อย ที่ความดันบรรยากาศต่ำ ของเหลวจะระเหยได้ง่าย จึงระเหยได้มาก
5. อากาศเหนือของเหลวบริเวณที่มีอากาศถ่ายเทหรือมีลมพัดตลอดเวลา ของเหลวจะระเหยได้มาก บริเวณที่ไม่มีอากาศถ่ายเทหรือไม่มีลมพัดตลอดเวลา ของเหลวจะระเหยได้น้อย
6. การคนหรือกวน เมื่อมีการคนหรือกวนของเหลวของเหลวนั้นก็ระเหยได้เร็วขึ้น ดังนั้นของเหลวหนึ่งๆ จะระเหยกลายเป็นไอได้เร็วขึ้นก็ต่อเมื่อพื้นที่ผิวของของเหลวเพิ่มขึ้นของเหลวหนึ่งมีอุณหภูมิสูงขึ้นความดันของบรรยากาศเหนือของเหลวลดลง อากาศเหนือของเหลวมีการถ่ายเทตลอดเวลา เพื่อป้องกันการอิมตัวของไอ เมื่อมีการคนหรือกวนของเหลวหนึ่ง

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหยที่ความดันต่ำกว่าบรรยากาศ [10]

ปกติของเหลวสามารถหนีหลุดออกจากผิวของของเหลวไปเป็นก๊าซได้(ระเหย) ถ้าความดันเหนือผิวเท่ากับความดันบรรยากาศปกติ โมเลกุลที่หนีจากผิวได้จะมีน้อย แต่ที่ความดันสุญญากาศ คือ ที่ที่มีความดันต่ำกว่าบรรยากาศปกติ (760 mmHg) ซึ่งเมื่ออยู่ในสภาวะที่ความดันต่ำลงจะส่งผลให้จุดเดือดของการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลายเป็นไอของของเหลวจะต่ำลง (ต่ำกว่า 100°C) (รูปที่ 2.1) โมเลกุลจะหนีหลุดออกไปได้ง่ายพร้อมกับการพาความร้อนออกไปกับไอ ซึ่งจะทำให้อุณหภูมิของของเหลวลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว เมื่อ โมเลกุลหนีหลุดออกไป (ระเหย) ปริมาณของแข็งที่หลงเหลืออยู่ในของเหลวนั้นจะมีมากขึ้น ซึ่งจะทำให้จุดเดือดของของเหลวสูงขึ้น เพราะฉะนั้นการลดความดันในถังสุญญากาศจะทำให้ของเหลวระเหยออกไปในระดับหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นจะอยู่ในสภาวะสมดุลไม่มีการระเหย



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/kinetic/imgkin/satvap.gif>

12

รูปที่ 2.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Saturation Vapor Pressure (mmHg) กับอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับความร้อน [11]

2.3.1 ความร้อน

เป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เปลี่ยนมาจากพลังงานรูปอื่น เช่น พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล (พลังงานศักย์และพลังงานจลน์) พลังงานเคมี พลังงานนิวเคลียร์ หรืองาน เป็นต้น

พลังงานความร้อนมีหน่วยเป็นจูล (Joule, J) ในระบบเอสไอ (SI) แต่บางครั้งอาจออกเป็นหน่วยอื่นได้ เช่น แคลอรี (cal) และบีทียู (BTU)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานความร้อน 1 แคลอรี คือพลังงานความร้อนที่ทำให้ให้น้ำมวล 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ในช่วง 14.5°C ถึง 15.5°C

พลังงานความร้อน 1 บีทียู คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้ให้น้ำที่มีมวล 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ ($^{\circ}\text{F}$) ในช่วง 58.1°F ถึง 59.1°F

จากการทดลองพบว่า

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$1 \text{ BTU} = 252 \text{ cal} = 1055 \text{ J}$$

นักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดว่าอุณหภูมิเป็นปริมาณที่แปรผันโดยตรงกับพลังงานจลน์เฉลี่ยของแก๊ส การที่จะบอกว่าวัตถุใดร้อนมากหรือน้อย สามารถบอกได้ด้วยอุณหภูมิของวัตถุนั้น คือ วัตถุที่มีระดับความร้อนมากจะมีอุณหภูมิสูง วัตถุที่มีระดับความร้อนน้อยจะมีอุณหภูมิต่ำ ดังนั้นถ้าเอาวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงมาสัมผัสวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายโอนจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปยังวัตถุที่มีอุณหภูมิต่ำ จนวัตถุทั้งสองมีอุณหภูมิเท่ากัน

อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ ซึ่งมีหลายชนิด เช่น

1. สเกลองศาเซลเซียส (Celsius, $^{\circ}\text{C}$) หรือบางทีเรียกว่าองศาเซนติเกรด (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 0 องศาเซลเซียสและจุดเดือดเป็น 100 องศาเซลเซียส ระหว่างจุดเยือกแข็งและจุดเดือดแบ่งเป็น 100 ส่วนเท่าๆ กัน)

2. สเกลองศาเคลวิน (Kelvin, $^{\circ}\text{K}$) เป็นหน่วยของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (ที่ความดัน 1 บรรยากาศ จุดเยือกแข็งของน้ำเป็น 273.16 เคลวินและจุดเดือดเป็น 373.16 เคลวิน ระหว่างจุดเยือกแข็งและจุดเดือดแบ่งเป็น 100 ส่วนเท่าๆ กัน) หน่วยเคลวินเป็นหน่วยมาตรฐานในระบบเอสไอ

2.3.2 ปริมาณความร้อนของวัตถุ (HEAT, Q)

เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุรับเข้ามาหรือคายออกไป จากการศึกษผลของความร้อนต่อสสารหรือวัตถุในชั้นนี้จะศึกษาเพียงสองด้าน คือ

1. ความร้อนสัมผัส (Sensible heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยสถานะยังคงรูปเดิม

2. ความร้อนแฝง (Latent Heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนสถานะโดยอุณหภูมิคงที่

2.3.3 ความจุความร้อน (Heat capacity, C)

คือความร้อนที่ทำให้สารทั้งหมดที่กำลังพิจารณามีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย โดยสถานะไม่เปลี่ยน ถ้าให้ปริมาณความร้อน ΔQ แก่วัตถุ ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนไป ΔT ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนไป 1 หน่วย จะใช้ความร้อน C คือ

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad \text{มีหน่วยเป็น จูล/เคลวิน (J/K)}$$

2.3.4 ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, c) คือความร้อนที่ทำให้สาร (วัตถุ) มวลหนึ่งหน่วย มีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศาเคลวิน คือ

$$C = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} \quad \text{ความจุความร้อนจำเพาะของสาร (J/kg-K)}$$

นั่นคือ เมื่อสารมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_2 และความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงตัว ความร้อนที่สารได้รับคือ

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

2.3.5 การเปลี่ยนสถานะของสาร

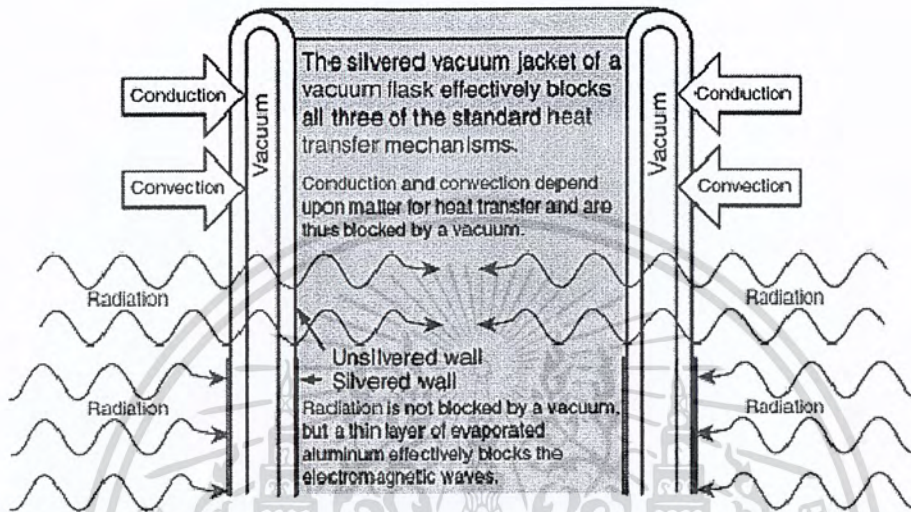
สารและสิ่งของที่อยู่รอบตัวเราจะพบว่าเมื่ออยู่ 3 สถานะ คือ ของแข็ง (น้ำแข็ง) ของเหลว (น้ำ) และแก๊ส (ไอน้ำ) ได้

1. ของแข็ง แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลมีค่ามาก ทำให้โมเลกุลอยู่ใกล้กัน จึงทำให้รูปทรงของของแข็งไม่เปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีแรงขนาดไม่มากนักกระทำ ตามคำจำกัดความนี้ เหล็ก คอนกรีต ก้อนหิน เป็นของแข็ง
2. ของเหลว แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลมีค่าน้อย โมเลกุลจึงเคลื่อนที่ไปมาได้บ้าง จึงทำให้รูปทรงของของเหลวเปลี่ยนแปลงไปตามภาชนะที่บรรจุ น้ำ น้ำมัน ปรอท เป็นของเหลว
3. แก๊ส แรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลมีค่าน้อยมาก จนโมเลกุลของแก๊สอยู่ห่างกันมากและเคลื่อนที่ได้ สะเปะสะปะ ฟูกระจายเต็มภาชนะที่บรรจุ เช่นอากาศและแก๊สชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) [11]

ความร้อนจะถ่ายเทหรือส่งผ่านจากวัตถุที่ระดับความร้อนสูง (อุณหภูมิสูง) ไปสู่วัตถุที่มีระดับความร้อนต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) การถ่ายเทความร้อนมี 3 แบบ คือ



รูปที่ 2.2 การถ่ายเทความร้อนแบบต่าง ๆ [11]

1. การนำความร้อน (conduction) เป็นการถ่ายเทความร้อนภายในวัตถุที่เป็นของแข็งจากอะตอมหนึ่งไปยังอีกอะตอม ความร้อนจะเดินทางจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำวัตถุแต่ละชนิดจะนำความร้อนได้ต่างกัน โลหะจะนำความร้อนได้ดีที่สุด
2. การพาความร้อน (convection) เป็นการถ่ายเทความร้อนในสถานะก๊าซหรือของเหลว โดยเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งกำเนิดจะมีอุณหภูมิสูงและลอยตัวขึ้น ตัวกลางจึงไหลเข้าไปแทนที่ เช่น เมื่อนำกาต้มน้ำไปวางบนเตา ความร้อนจากไฟจะค่อย ๆ เคลื่อนที่จากน้ำด้านล่าง ขึ้นมายังบริเวณผิวหน้าด้านบน
3. การแผ่รังสี (radiation) เป็นการถ่ายเทความร้อนโดยไม่อาศัยตัวกลาง เช่น พลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์เดินทางผ่านสุญญากาศมายังโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับความชื้น [12]

2.5.1 ความชื้น (moisture content)

เป็นค่าที่บอกปริมาณน้ำที่มีอยู่ในวัสดุ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของอาหาร เนื่องจาก

-ความชื้นมีผลต่อการเสื่อมเสียของอาหาร (food spoilage) โดยเฉพาะเนื่องการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ (microbial spoilage) ซึ่งกระทบต่ออายุการเก็บ (shelf life) อาหารที่มีปริมาณน้ำสูงจะเสื่อมเสียง่ายเนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียเช่น แบคทีเรีย ยีสต์ และรา ซึ่งเจริญได้ดีหากอาหารมีปริมาณน้ำสูง

-ความชื้นมีผลต่อความปลอดภัยทางอาหาร (food safety) อาหารที่มีน้ำสูงเหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรค (pathogen) และการสร้างสารพิษ (toxin) ที่ก่อให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษ รวมถึงการสร้างสารพิษของรา (mycotoxin) เช่น Aflatoxin, patulin ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

-ความชื้นมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ด้านต่างๆของอาหารของอาหาร ซึ่งมีผลต่อการยอมรับของอาหาร ได้แก่ เนื้อสัมผัส (texture) เช่น ความกรอบ ความหนืด (viscosity) การเกาะติดกันเป็นก้อน (caking)

-ความชื้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี ต่างๆ ที่มีผลกระทบทางลบต่ออาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (browning reaction) ปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิพิด (lipid oxidation)

-ความชื้นมีผลต่อการกำหนดราคาสินค้า เช่น ข้าว เมล็ดธัญพืช กำหนดราคาซื้อขายตามปริมาณความชื้น

2.5.2 การแสดงค่าความชื้น

ปริมาณความชื้น นิยมบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ มี 2 รูปแบบคือ

1.ความชื้นฐานเปียก (wet basis) หมายถึง การเทียบปริมาณความชื้นกับน้ำหนักรวมของของแข็ง เป็นค่าความชื้นที่มักใช้ในทางการค้า เป็นค่าที่ใช้บอกความชื้นโดยทั่วไปในชีวิตประจำวัน มักบอกเป็นเปอร์เซ็นต์

$$m = \frac{\text{msss of water}}{\text{mass of sample}} \times 100$$

$$m = \frac{\text{msss of water}}{\text{mass of water+solids}} \times 100$$

2.ความชื้นฐานแห้ง (dry basis) เป็นการเทียบปริมาณความชื้นกับของแข็ง เป็นค่าที่นิยมใช้กันในการวิเคราะห์กระบวนการอบแห้ง (dehydration) เพราะช่วยให้การคำนวณสะดวก เนื่องจากน้ำหนักแห้งของวัสดุ คงที่ อาจจะบอกเป็นเปอร์เซ็นต์ หรือ จำนวนกรัมของน้ำต่อจำนวนกรัมของของแข็ง ($\text{g H}_2\text{O} / \text{g solid}$)

$$m = \frac{\text{mass of water}}{\text{mass of solids}}$$

วัสดุสามารถดูดความชื้นกลับคืนได้ (Hygroscopic material) ดังนั้นในการลดความชื้น จึงต้องพิจารณาถึงความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) ของวัสดุกับสภาวะแวดล้อม ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อ "อัตราการสูญเสียความชื้นจากวัสดุสู่สิ่งแวดล้อม เท่ากับอัตราการรับความชื้นจากสิ่งแวดล้อมสู่วัสดุนั้น" ที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สมดุล (Equilibrium relative humidity) ของบรรยากาศแวดล้อมนั้นๆ

2.5.3 การวัดความชื้นของอาหาร

การวัดโดยตรง (Direct method) เป็นการวัดปริมาณที่มีอยู่ในอาหาร โดยตรง สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่การแยกเอาน้ำออกด้วยวิธีทางกายภาพ เช่น การอบแห้งทำให้น้ำระเหย การกลั่นเอาน้ำออก หรือการใช้วิธีการทางเคมีโดยใช้สารเคมีทำปฏิกิริยากับน้ำ เป็นต้น วิธีการวัดโดยตรงเป็นการวัดที่หลากหลาย ตัวอย่าง แต่ละวิธีก็มีความถูกต้องแตกต่างกัน วิธีที่มีการยอมรับทั่วไปว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูง ก็จะนิยมใช้เป็นค่าชี้มาตรฐานเพื่อใช้เปรียบเทียบค่าที่ได้การวัดด้วยวิธีการอื่นๆ ก่อนนำค่าที่ได้ไปใช้ประโยชน์ การวัดความชื้นของอาหารเป็นงานวิเคราะห์พื้นฐานที่สำคัญและจำเป็นอย่างยิ่ง อาหารแต่ละชนิด มีความชื้นแตกต่างกันมาก ตั้งแต่

อาหารที่มีความชื้นต่ำ เช่น แป้ง เมล็ดธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวสาลี นมผง วัตถุเจือปนอาหาร

อาหารที่มีความชื้นปานกลาง เช่น ขนมปัง ไข่ทอด แสม แยม นมข้นหวาน ผักผลไม้แช่แข็ง ผลไม้กวน

อาหารที่มีความชื้นสูงมาก เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์

น้ำที่มีอยู่ในอาหารแต่ละชนิดก็ยังมีกรดอินทรีย์ โครงสร้าง หรือ โมเลกุลของสารอื่นๆ ที่เป็นส่วนประกอบของอาหารในรูปแบบ และความแข็งแรงต่างกัน ทำให้ เทคนิคที่ใช้สำหรับการหาความชื้นของอาหารแต่ละชนิดแตกต่างกันไป ทั้งความยากง่าย ความซับซ้อนของอุปกรณ์ และ ความถูกต้องแม่นยำของค่าที่ได้

2.6 การแปรรูปอาหาร [13]

2.6.1 หลักการแปรรูปอาหาร

ผลิตผลทางการเกษตรที่ใช้เป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่มีอายุการเก็บสั้น จึงต้องมีการแปรรูป สาเหตุสำคัญที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากจุลินทรีย์ ดังนั้นหลักการในการยืดอายุการเก็บและการแปรรูปอาหารคือ การยับยั้งหรือชะลอการเสื่อมเสียที่เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ ปริมาณน้ำในอาหาร ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณออกซิเจน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ต้องควบคุมในกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา เพื่อให้อาหารมีอายุการเก็บหรือใช้ประโยชน์ได้นานขึ้น

โดยปกติแล้วอาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูปจะมีคุณภาพแตกต่างจากวัตถุดิบทั้งทางด้านกายภาพ เคมี จุลินทรีย์ และประสาทสัมผัส ทางด้านกายภาพ ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงขนาด น้ำหนัก รูปร่าง เนื้อสัมผัส ทางด้านเคมี เช่น มีคุณค่าทางอาหารลดลง เกิดการเปลี่ยนสีและกลิ่นรส ทางด้านจุลินทรีย์ เช่น มีจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภคลดลง หรือมีจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์จำนวนมากขึ้น ทางด้านประสาทสัมผัส เช่น มีความเหนียวเพิ่มขึ้น มีกลิ่นหอม สีสวย เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงของคุณภาพต่างๆ เหล่านี้อาจเป็นที่ต้องการหรือไม่ต้องการของผู้บริโภค การแปรรูปเพื่อยืดอายุการเก็บของอาหาร หรือการทำผลิตภัณฑ์ใหม่จำเป็นต้องควบคุมคุณภาพตั้งแต่วัตถุดิบ กระบวนการแปรรูปและบรรจุภัณฑ์ มีการขนส่งและจัดจำหน่ายอย่างเหมาะสม เพื่อให้อาหารที่ผ่านกระบวนการแปรรูปแล้วมีคุณภาพเป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภค

2.6.2 หลักการยืดอายุการเก็บอาหาร

1.การป้องกันหรือทำให้การเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ช้าลง ตามธรรมชาติมีกลไกป้องกันการเสื่อมเสียอยู่แล้ว เช่น เปลือกแข็งของเมล็ดข้าวหรือถั่ว เปลือกผลไม้ เปลือกไข่ ซึ่งสามารถป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปภายในเนื้อเยื่อได้ การแปรรูปอาหารสามารถเลียนแบบธรรมชาติโดยการเลือกใช้ภาชนะบรรจุที่เหมาะสมกับอาหาร เช่น การบรรจุในกระป๋องหรือขวดแก้วปิดสนิท หรือใช้ถุงพลาสติก หรืออาจใช้วิธีการแยกเอาจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับอาหารออก โดยการกรองผ่านเมมเบรน (membrane) หรือการขัดขวางการเจริญหรือกิจกรรมในการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์โดยใช้สารกันเสีย

2.การป้องกันหรือทำให้ปฏิกิริยาเคมีในอาหารช้าลง ทำได้โดยการควบคุมปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกิดขึ้นภายหลังการเก็บเกี่ยวพืชและการฆ่าสัตว์ และปฏิกิริยาเคมีที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา เช่น การทำลาซเอ็นไซม์ที่มีอยู่ในอาหารด้วยการลวกในน้ำร้อนหรือให้สัมผัสกับไอน้ำ การป้องกันการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น การป้องกันปฏิกิริยาเติมออกซิเจน (oxidation) ในอาหาร ที่ทำให้อาหารที่มีไขมันหืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือป้องกันผลไม่มีสีน้ำตาลภายหลังการปอกหรือหั่น (browning reaction) ทำได้โดยการเติมสารกันหืน กรดซิตริก หรือรมควันกำมะถัน เป็นต้น

3.การป้องกันความเสียหายที่จะเกิดจากปัจจัยภายนอก ทำได้โดยการเลือกใช้การบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันแสง ออกซิเจน ป้องกันแมลง สัตว์ หรือความเสียหายที่เนื่องมาจากแรงกระทบ กระแทกในระหว่างการขนส่ง การเก็บรักษา และการจัดจำหน่าย

2.6.3 สาเหตุของการเสื่อมเสียของอาหาร

อาหารเป็นแหล่งของสารอาหารต่างๆที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต อาหารจะเกิดประโยชน์ได้ก็ต่อเมื่อปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิดโรค ไม่มีสารเคมีที่เป็นอันตราย เช่น ยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช ยากำจัดเชื้อรา หรือมีสารกันเสียในปริมาณที่ไม่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา นอกจากนั้นแล้วอาหารจะต้องมีคุณภาพดี มีลักษณะปรากฏ รสชาติ สี กลิ่น รส และลักษณะเนื้อสัมผัสเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มีอายุการเก็บนานพอสมควร ตลอดจนมีราคาที่เหมาะสม

อาหารที่มาจากพืชและสัตว์จะเสื่อมคุณภาพและเน่าเสียได้ง่ายหลังจากการเก็บเกี่ยวหรือหลังการฆ่าสัตว์ เพราะเซลล์ในพืชผลที่เก็บเกี่ยวมาแล้วยังคงมีชีวิต จึงมีการหายใจและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีภายในตลอดเวลา ทำให้น้ำหนักของพืชลดลงเมื่อเก็บไว้ กลิ่นรสและสีผิวของพืชมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ผลไม้มีเนื้อนุ่ม ผักเหี่ยวเฉาและนิ่ม ส่วนอาหารที่มาจากสัตว์ แม้ว่าเซลล์สัตว์ที่ผ่านการฆ่าและชำแหละแล้วจะไม่มี การหายใจเหมือนเซลล์ของพืช แต่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเนื่องจากเอ็นไซม์ในเนื้อเยื่อจะย่อยสลาย สารอาหารต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ทำให้มีโมเลกุลสั้นลง เนื้อสัมผัสของเนื้อสัตว์จะนุ่ม ยุ่ย มีน้ำเยิ้ม สีจะคล้ำ การเสื่อมคุณภาพและการเน่าเสียของอาหารเร็วหรือช้าเป็นผลมาจากจำนวน เชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมากับอาหารตามธรรมชาติ พันธุ์พืชหรือสัตว์ สภาพและคุณภาพของดินที่ใช้เพาะปลูกหรือ สภาพที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์ การปฏิบัติในการเพาะปลูก ตลอดจนการปฏิบัติก่อนและหลังการเก็บเกี่ยวหรือ การฆ่าสัตว์

2.6.4 สาเหตุสำคัญที่ทำให้อาหารเกิดการเปลี่ยนแปลง

1.จุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่เห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ได้แก่ รา ยีสต์ และแบคทีเรีย หลายชนิดทำให้อาหารเสื่อมเสียหรือทำให้อาหารเป็นพิษ จุลินทรีย์เหล่านี้มีอยู่แล้วตามธรรมชาติโดย ปนเปื้อนมากับอาหาร น้ำ หรืออากาศ สามารถเจริญและเพิ่มจำนวนได้หากอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ถ้าสิ่งแวดล้อมไม่เหมาะสม เช่น ไม่มีอาหาร น้ำ อากาศ ฯลฯ แบคทีเรียบางชนิดจะสร้างสปอร์ (spore-forming bacteria) ทำให้ทนความร้อน ความเย็น ความแห้ง สารกันเสียได้ดี ทำให้การทำลายยากมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.เอ็นไซม์ เป็น โปรตีนในเซลล์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ การเปลี่ยนแปลงของอาหารในระหว่างการเก็บรักษาเกิดขึ้นจากเอ็นไซม์ในอาหารและเอ็นไซม์จากจุลินทรีย์ซึ่งปนเปื้อนมาพร้อมกับอาหาร ตัวอย่างเช่น การเกิดสีน้ำตาลในผลไม้เมื่อมีการชำ การเกิดกลิ่นเน่าเสีย

3.แมลงและสัตว์ ทำให้เกิดการเสียหายแก่อาหารโดยการลดปริมาณของสารอาหารลง และทำให้ อาหารไม่น่ารับประทาน ตลอดจนเป็นพาหะของโรคบางชนิด รอยที่เกิดจากการเจาะหรือกัดแทะจะเป็นจุดที่ทำให้อาหารเกิดการเสื่อมเสียได้ง่ายยิ่งขึ้น

4.ปัจจัยภายนอก เช่น แสงกระทบกระแทกจากภายนอกอาจทำให้อาหารเกิดการบอบช้ำ แดกหัก ทำให้ไม่น่ารับประทาน ส่วนอาหารสดถ้ามีการชำจะทำให้เอ็นไซม์เร่งปฏิกิริยาต่างๆให้เร็วขึ้น ปริมาณของ ออกซิเจน โลหะหนัก แสง ตลอดจนการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษาจะ เร่งให้เกิดการเสื่อมเสียเร็วขึ้น

2.6.5 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา

ในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษาจะต้องควบคุมปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการ เกิดปฏิกิริยาเคมีและการเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ดังต่อไปนี้

1.อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด เนื่องจากอุณหภูมิมิผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี การทำงานของ เอ็นไซม์ และการเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ การแปรรูปอาหารไม่ว่าจะเป็นการแช่เย็น การแช่แข็ง การฆ่า เชื้อด้วยความร้อน ล้วนแต่เป็นการแปรรูปที่เกี่ยวกับอุณหภูมิ เพราะอัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิใน ระหว่างกระบวนการแปรรูปหรือการเก็บรักษาจะมีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาเคมีและ อัตราเร็วในการทำลายจุลินทรีย์ ที่อุณหภูมิต่ำไม่สามารถทำลายจุลินทรีย์เพียงแต่ยับยั้งการเจริญ ถ้าอาหารแช่ เย็นหรือแช่แข็งมีอุณหภูมิสูงขึ้น จุลินทรีย์สามารถเจริญได้ ทำให้อาหารเน่าเสียหรือเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค อุณหภูมิสูงกว่า 60 °ซ สามารถทำลายจุลินทรีย์ที่ไม่สร้างสปอร์ได้

2.ความเป็นกรด - ด่าง (pH) ในอาหาร มีอิทธิพลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของเอ็นไซม์ ตลอดจนการเจริญของจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่าง อาจจะเร่งหรือทำให้เกิดปฏิกิริยา เคมีในอาหารช้าลง แบ่งอาหารออกเป็นสองกลุ่มใหญ่ คือ อาหารที่มีความเป็นกรด (acid foods) ซึ่งมีความ เป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 4.6 เช่น ผักและผลไม้ที่มีรสเปรี้ยว อาหารดอง เป็นต้น และอาหารที่มีความเป็นกรดต่ำ (low acid foods) ซึ่งมีความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 4.6 เช่น เนื้อ นม ไข่ ผักบางประเภท เช่น เห็ด หน่อไม้ เป็นต้น

3.ปริมาณน้ำอิสระ (water activity, a_w) จะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เช่น การเกิดออกซิเดชัน การเกิดสีน้ำตาลในอาหาร การเปลี่ยนสีเขียวของคลอโรฟิลล์และสีม่วงแดงของแอนโทไซยานินในผักและผลไม้ รวมไปถึงชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญในอาหารนั้นๆ การลดปริมาณน้ำอิสระจะช่วยยืดอายุการเก็บของอาหารได้

4.ส่วนประกอบของก๊าซในบรรยากาศระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณของออกซิเจน ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาการเคมีออกซิเจนต่าง ๆ จึงควรเลือกใช้บรรจุภัณฑ์หรือปรับบรรยากาศที่เหมาะสม เช่น อาหารที่มีไขมันสูงไม่ควรมียอกซิเจนเข้าไปสัมผัสกับอาหาร อาหารประเภทเนื้อสัตว์สด เช่น เนื้อวัว ต้องการให้มีออกซิเจนเล็กน้อยเพื่อให้เนื้อมีสีแดงสด

5.ปัจจัยอื่น ๆ เช่น แสง โลหะหนัก แรงกระแทก โดยการควบคุมด้วยวิธีการต่างๆที่เหมาะสม โดยทั่วไปการยืดอายุการเก็บหรือการแปรรูปอาหารมักจะทำการควบคุมปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นโดยใช้วิธีการผสมผสานหลักการแปรรูปต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เช่น หากอาหารมีความเป็นกรด - ด่างสูงกว่า 4.6 และ a_w สูงกว่า 0.85 จะต้องใช้อุณหภูมิสำหรับการฆ่าเชื้อในการทำอาหารกระป๋องสูงกว่า 100 °C แต่ถ้าอาหารมีความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 4.6 จะใช้อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อต่ำกว่าหรือเท่ากับ 100 °C ได้ เช่น สับปะรดกระป๋องจะใช้อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ ประมาณ 85 - 90 °C ขณะที่เห็ดกระป๋องจะใช้อุณหภูมิประมาณ 116 - 121 °C ในการฆ่าเชื้อ

หลักการในการเลือกใช้กรรมวิธีการแปรรูปอาหารจึงขึ้นกับชนิดและประเภทของอาหาร โดยเฉพาะปริมาณน้ำและความเป็นกรด-ด่างของอาหาร การควบคุมปัจจัยแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น อากาศที่ผ่านเข้าไปในภาชนะบรรจุ และอุณหภูมิในการเก็บรักษาจะช่วยทำให้การแปรรูปมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การเลือกใช้วิธีการแปรรูปใดขึ้นอยู่กับเงินทุนและตลาดของผลิตภัณฑ์เป็นสำคัญ

2.6.6 การลดปริมาณน้ำในอาหาร

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ ของเชื้อจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาเคมี ในสภาพที่มีน้ำน้อย จุลินทรีย์จะอยู่ในระยะพัก คือ สร้างสปอร์ อาหารจึงเสื่อมเสียได้ช้าลง ปริมาณน้ำที่จุลินทรีย์นำไปใช้ประโยชน์ได้ หรือปริมาณน้ำที่สามารถเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เรียกว่า ปริมาณน้ำอิสระ ซึ่งไม่ใช่ปริมาณน้ำทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหาร แต่มีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำในอาหาร การลดปริมาณน้ำอิสระที่มีอยู่ในอาหารจึงเป็นการลดการเสื่อมเสียของอาหารจากปฏิกิริยาเคมีและเชื้อจุลินทรีย์ สามารถทำได้หลายวิธี คือ

1.การระเหยน้ำที่มีอยู่ในอาหาร ทำได้โดยการตากแดด การอบแห้ง การทอด การเคี่ยวจนงวด การทำอาหารผง เช่น การทำนมผงและนมอัดเม็ดในโครงการส่วนพระองค์ สวนจิตรลดา ซึ่งใช้ลมร้อนระเหยน้ำส่วนใหญ่ออกจากอาหารทำให้อาหารเป็นผง

2.การลดสัดส่วนระหว่างปริมาณน้ำและของแข็งที่มีในอาหาร ทำได้โดยการเติมของแข็ง เช่น น้ำตาลและเกลือลงในอาหาร ตัวอย่างเช่น การแช่ส้มโดยใช้น้ำตาลความเข้มข้นสูงๆหรือการดองเค็ม (salt stock) ซึ่งเป็นการเก็บรักษาหรือถนอมอาหารโดยใช้เกลือความเข้มข้นสูงประมาณ 16% ทำให้น้ำอิสระลดลง อาหารจึงเก็บได้นาน ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการดองเค็มแบบนี้ต้องนำมาล้างเพื่อลดความเค็มและปรุงแต่งรสชาติก่อนนำมาบริโภค

3.การเปลี่ยนสถานะของน้ำให้เป็นน้ำแข็ง ทำได้โดยการแช่เยือกแข็งและเก็บรักษาอาหารที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส ตัวอย่างเช่น การแช่เยือกแข็งเนื้อสัตว์ปีกและสัตว์น้ำ การทำไอศกรีม เป็นต้น อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมสามารถแปรรูปอาหาร โดยการลดปริมาณน้ำอิสระให้น้อยลง โดยใช้วิธีการระเหยน้ำ หรือการเพิ่มสัดส่วนของของแข็งต่อของเหลวโดยการเติมเกลือหรือน้ำตาล เนื่องจากการลงทุนในระยะแรกและต้นทุนในการประกอบการต่ำกว่าการแช่เยือกแข็ง การเลือกใช้วิธีการระเหยน้ำที่แตกต่างกันจะมีผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัสของอาหาร เช่น ข้าวตอก ได้จากการคั่วและทำให้น้ำในเมล็ดข้าวระเหยอย่างรวดเร็ว คั้นโครงสร้างของเมล็ดข้าวให้แตกออก ข้าวแต่น ได้จากการตากแห้งและทอด วิธีการแปรรูปที่ต่างกันนี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสัมผัสและกลิ่นรสแตกต่างกัน การพองตัวและความกรอบของผลิตภัณฑ์จะขึ้นกับองค์ประกอบและปริมาณน้ำในอาหาร ตลอดจนวิธีการและอัตราเร็วในการระเหยน้ำ อุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อมสามารถใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมแปรรูปวัตถุดิบในท้องถิ่นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อสัมผัสแบบต่างๆ ตัวอย่างเช่น การทำผลิตภัณฑ์จากข้าว เช่น ข้าวเม่า ข้าวแต่น ข้าวตอก การทำผลิตภัณฑ์จากผักและผลไม้ เช่น การกวน การตากแดด เป็นต้น

การทำน้ำตาลปึก ด้วยการเคี่ยวระเหยน้ำออกจากน้ำตาลสด และอาหารจากสัตว์น้ำตากแห้ง เช่น ปลาหมึกแห้ง ปลาเค็ม ปัญหาส่วนใหญ่ที่พบในอาหารที่ผ่านการยืดอายุการเก็บ โดยการลดปริมาณน้ำแต่ไม่เก็บที่อุณหภูมิต่ำคือ การเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ประเภทเชื้อราและการหืนของผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันสูง ดังนั้นผู้ผลิตควรทำการบรรจุผลิตภัณฑ์ในภาชนะที่สามารถป้องกันการผ่านเข้า - ออกของอากาศ หรือลดปริมาณออกซิเจนที่มีอยู่ในภาชนะบรรจุ อาหารแห้งที่ต้องการรักษาความกรอบควรบรรจุในกล่องกระดาษหรือวัสดุกันกระแทกอีกชั้นหนึ่ง เพื่อลดปัญหาการแตกหักของผลิตภัณฑ์

4.การใช้วิธีการแปรรูปแบบผสมผสาน การแปรรูปแบบผสมผสาน (hurdle technology) เป็นกรรมวิธีการแปรรูปที่ใช้วิธีการต่าง ๆ ที่ได้กล่าวถึงข้างต้นร่วมกัน เช่น การควบคุมอุณหภูมิ ปริมาณน้ำอิสระ ความเป็นกรด - ด่าง ความเข้มข้นของออกซิเจน ให้อยู่ในระดับที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหารมากนัก ทั้งทางด้านคุณค่าทางโภชนาการ และคุณภาพของอาหารทางด้านประสาทสัมผัส ดังนั้นอาหารจะมีคุณภาพใกล้เคียงกับอาหารสดหรืออาหารที่ปรุงสุกใหม่ การควบคุมปัจจัยเหล่านี้เหมือนเป็นการสร้างอุปสรรคหรือสิ่งกีดขวาง (hurdle) ร่วมกันจนทำให้สภาพแวดล้อมในการเจริญและเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ไม่เหมาะสม ทำให้จุลินทรีย์ชะงักการเจริญหรือไม่เพิ่มจำนวน จึงมีจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ในระดับที่ไม่ทำให้อาหารเสื่อมเสียหรือเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค ดังนั้นอาหารจึงเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ช้ากว่าอาหารที่ไม่ได้ผ่านการแปรรูป อาหารที่สามารถนำมาแปรรูปแบบผสมผสานในระดับอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดย่อม โดยแบ่งเป็นกลุ่มดังนี้

อาหารพร้อมปรุง (ready-to-cook food)

อาหารในกลุ่มนี้เป็นอาหารสดที่ผ่านการทำความสะอาด ตัดแต่ง และบรรจุพร้อมที่จะให้ผู้บริโภคนำไปปรุงได้ เนื่องจากอาหารดังกล่าวเป็นอาหารสด จึงควรจำกัดชนิดของอาหารเป็นอาหารที่มีความชื้นต่ำ เช่น ถั่วเมล็ดแห้ง น้ำตาล เครื่องเทศบางชนิด หากต้องการเตรียมอาหารพร้อมปรุงที่มีความชื้นสูง ควรทำเฉพาะผักและผลไม้ ซึ่งเป็นอาหารหมู่ที่มีองค์ประกอบหลักคือ น้ำ โยอาหาร เกลือแร่ วิตามิน และคาร์โบไฮเดรต มีไขมันและโปรตีนต่ำ เชื้อจุลินทรีย์ที่ติดมากับอาหารหรือปนเปื้อนในระหว่างการแปรรูป จะเพิ่มจำนวนได้ช้ากว่าในอาหารเนื้อสัตว์ที่มีโปรตีนสูง การเติมสารเจือปนอาหาร เช่น การจุ่มลงในสารละลายกรดซิตริก เป็นการปรับความเป็นกรด-ด่างที่ผิวของอาหาร และป้องกันการเปลี่ยนสีหรือการจุ่มลงในสารละลายปอแตสเชื่อมเมตาไบซัลไฟต์ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนสีและยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิด เหล่านี้เป็นการเพิ่มอุปสรรคหรือสิ่งกีดขวางการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อใช้ร่วมกับการแช่เย็นและการจำกัดปริมาณออกซิเจนที่ผ่านเข้า - ออกโดยใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม

อาหารพร้อมปรุงในกลุ่มของเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์ประมงควรทำการบรรจุเนื้อสัตว์ซึ่งมีโปรตีนสูงแยกต่างหากจากส่วนที่เป็นผักที่เป็นส่วนประกอบ เนื่องจากอาหารในกลุ่มของเนื้อสัตว์มีสารอาหารหลักที่จำเป็นแก่การเจริญของจุลินทรีย์ครบถ้วน คือ โปรตีน ไขมัน การผสมรวมกันกับอาหารประเภทผักและผลไม้จะทำให้จุลินทรีย์หลายชนิดเจริญได้และทำให้อาหารเสียเร็วกว่าปกติ จึงควรเก็บที่อุณหภูมิ

ต่ำกว่า 8 ° ซ ดังนั้นหากจะทำการเตรียมอาหารประเภทนี้โดยให้มีส่วนประกอบครบทั้งเนื้อสัตว์หรือปลาผัก เช่น การทำมะระยัดไส้หมูสับ จะต้องเก็บที่อุณหภูมิเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการแช่เย็นเนื้อสัตว์ ไม่ควรใช้อุณหภูมิที่ใช้สำหรับผักและผลไม้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหารพร้อมบริโภค

อาหารพร้อมบริโภคที่สามารถทำการรักษาคุณภาพโดยวิธีการผสมผสานควรเป็นอาหารที่มีปริมาณน้ำอิสระประมาณ 0.6-0.9 ซึ่งจัดเป็นอาหารที่มีน้ำอิสระปานกลาง (IMF) ไม่ควรใช้วิธีการแปรรูปแบบผสมผสานกับอาหารที่มีความชื้นสูง เพราะอาหารเหล่านั้นต้องใช้การแปรรูปโดยความร้อนจึงจะยืดอายุการเก็บได้ การจำกัดปริมาณน้ำจะทำให้จุลินทรีย์น้อยชนิดที่สามารถเจริญได้ อาหารในกลุ่มนี้ได้แก่ น้ำผึ้ง ขนมอบ ขนมหวานไทย ๆ อาหารแช่แข็งหรือดองเค็ม สามารถยืดอายุการเก็บให้นานกว่าเดิมได้เพราะมีน้ำตาลหรือเกลือช่วยชะลอการเพิ่มจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ ไม่จำเป็นต้องใช้สารกันเสียหรือใช้ในปริมาณน้อย และควรใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถปรับบรรยากาศให้มีออกซิเจนต่ำเพื่อลดการเจริญของเชื้อรา

เนื่องจากอาหารที่ผ่านการแปรรูปโดยวิธีการผสมผสานเหล่านี้จะต้องใช้อุณหภูมิค่าในการเก็บรักษา หากกลุ่มเกษตรกรหรือสหกรณ์ไม่สามารถลงทุนด้านระบบทำความเย็นที่ต้องใช้จนกว่าผลิตภัณฑ์จะถึงมือผู้บริโภคก็อาจทำการผลิตและบรรจุในปริมาณมาก เพื่อขายให้อุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ในลักษณะการรับช่วงการผลิต หรือส่งให้โรงแรมและภัตตาคารในพื้นที่ที่ไม่ห่างไกลจากชุมชนของตนมากนัก หลักสำคัญของการแปรรูปแบบผสมผสานนี้คือ ความสะอาดของสถานที่ผลิต เครื่องใช้และอุปกรณ์ น้ำ และบุคลากรที่ทำการแปรรูป เพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในระหว่างการผลิต

2.7 ทฤษฎีเกี่ยวกับปริมาณน้ำในอาหาร [14]

2.7.1 น้ำในอาหาร

เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของอาหารร้อยละ 65-95 อาหารที่มีปริมาณน้ำมากจะเสื่อมเสียได้รวดเร็วกว่า น้ำในอาหารจะเป็นตัวทำละลายขององค์ประกอบต่างๆของอาหาร น้ำในอาหารมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ เช่นลักษณะเนื้อสัมผัส ความเค็ม รสชาติ น้ำที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้เรียกว่า Water Activity (a_w) หรือค่ากิจกรรมของน้ำ มักวัดในรูป free water ส่วนน้ำที่จุลินทรีย์นำไปใช้ไม่ได้เรียกว่า bound water ซึ่งเป็นน้ำที่ยึดกันด้วยพันธะทางเคมีที่แข็งแรง ค่า A_w มีค่าตั้งแต่ 0.0-1.0 เปรียบเทียบกับน้ำบริสุทธิ์

2.7.2 ค่า Water Activity (A_w)

Water Activity (A_w) เป็นปัจจัยที่สำคัญมากต่ออายุการเก็บของอาหาร ในขณะที่ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปัจจัยอื่น ๆ มีผลกระทบต่อความเร็วในการเจริญของจุลินทรีย์ในอาหาร Water Activity จะเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการควบคุมการเสี้ยวของอาหาร ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียเกือบทุกชนิดไม่สามารถเติบโตได้ที่ Water Activity ต่ำกว่า 0.91 ในขณะที่ราส่วนมากหยุดการเจริญเติบโตเมื่อ Water Activity ต่ำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่า 0.80 เราสามารถประเมินได้จากการวัดค่า Water Activity ว่าจุลินทรีย์ชนิดใดเป็นหรือไม่เป็นสาเหตุที่ทำให้อาหารเสีย Water Activity เป็นปัจจัยชี้ระดับปริมาณน้ำค่าสุดที่มีอยู่เพื่อการเจริญของจุลินทรีย์ นอกจากนั้น Water Activity ยังมีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ และวิตามินในอาหารซึ่งเป็นสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงสี รส และกลิ่นของอาหาร อย่างชัดเจน

2.7.3 การวัดค่า Water Activity

ค่า Water Activity ของผลิตภัณฑ์สามารถวัดได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์สมดุลของอากาศที่ปล่อยให้สมดุลกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นผลิตภัณฑ์จะต้องถูกวางไว้ในระบบปิด เพื่อให้เกิดความสมดุลได้ จุดที่เกิดความสมดุลคือจุดที่ Water Activity ของตัวอย่างมีค่าเท่ากับค่าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศนั่นเอง นอกจากการวัดค่า Water Activity โดยการวัดความชื้นสัมพัทธ์สมดุลแล้วยังมีเครื่องมือวัดค่า Water Activity โดยตรงเพื่อความสะดวกในการใช้งานด้วย

$$a_w \frac{P_w}{P_{ws}} \quad \text{or} \quad a_w = \phi \quad \text{since} \quad \phi = \frac{P_w}{P_{ws}}$$

ϕ = the relative humidity, decimal

P_w = the partial pressure of water vapor at the specified conditions

P_{ws} = the partial pressure of water vapor at saturation and the temperature specified

2.7.4 ความชื้นและ Water Activity

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นและ Water Activity เป็นเรื่องซับซ้อน ค่า Water Activity มักจะเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้นแต่เป็นการเพิ่มแบบไม่เป็นเส้นตรง ความสัมพันธ์ระหว่าง Water Activity กับความชื้นที่อุณหภูมิที่กำหนดเรียกว่า Moisture Sorption Isotherm กราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้สร้างได้จากการทำการทดลองเท่านั้น Moisture Sorption Isotherm สำหรับอาหารแทบทุกชนิดจะมีรูปร่างแบบ Sigmoidal แต่อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลมากหรือมีโมเลกุลที่ละลายได้น้อย

จะได้กราฟ Isotherm รูปคล้ายตัว J กราฟ Moisture Sorption Isotherm จากการทดลองซึ่งเริ่มต้นจากผลิตภัณฑ์ที่แห้งแล้วเพิ่มความชื้นมากขึ้นเรื่อย ๆ (Adsorption) ไม่จำเป็นต้องเหมือนกับกราฟ Isotherm จากการทดลองผลิตภัณฑ์เดียวกันในสภาพชื้นแล้วลดความชื้นลงเรื่อย ๆ (Desorption)

2.7.5 ผลของ Water Activity ต่อปฏิกิริยาในอาหาร

อาหารมักจะมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยา Millard Reaction ซึ่งทำให้เกิดสีน้ำตาล ที่ไม่เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากเอ็นไซม์ การเกิดสีน้ำตาล เนื่องจาก Millard Reaction มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า Water Activity สูงขึ้น โดยจะเกิดได้สูงสุดที่ช่วง Water Activity 0.6 ถึง 0.7 แต่ในผลิตภัณฑ์บางชนิดเมื่อเพิ่มค่า Water Activity ก็จะช่วยชะลอการเกิด Millard Reaction ได้ ดังนั้นการ ควบคุมค่า Water Activity ในผลิตภัณฑ์ จึงเป็นวิธีที่ดีในการควบคุมปัญหาการเกิดสีน้ำตาลจาก Millard Reaction

Water Activity มีผลกระทบต่อความคงตัวในด้านคุณสมบัติตามธรรมชาติของโปรตีนและเอ็นไซม์ อย่างชัดเจน เอ็นไซม์และโปรตีนเกือบทุกชนิดต้องรักษาสภาพตามธรรมชาติไว้เพื่อให้สามารถทำหน้าที่ได้ตามปกติ ดังนั้นการรักษาระดับของ Water Activity เพื่อป้องกันและการ เปลี่ยนแปลงสภาพของสารเหล่านี้ จึงมีความสำคัญต่อ คุณภาพของอาหารอย่างมาก ปฏิกิริยาจากเอ็นไซม์ ส่วนมากจะช้าลงที่ระดับ Water Activity 0.8 อย่างไรก็ตาม ปฏิกิริยาเหล่านี้บางปฏิกิริยาก็สามารถเกิดได้แม้ที่ระดับ Water Activity ต่ำมาก ๆ การเสียหายเหล่านี้จะมีผลให้เกิดกลิ่นและรสที่รุนแรงจนผู้บริโภคไม่ยอมรับได้ โดยทั่วไป การเสียหายเนื่องจากปฏิกิริยาของเอ็นไซม์มักไม่เกิดกับผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการใช้อุณหภูมิในการผลิต

2.7.6 ผลของ Water Activity ต่อการเสี้ยวของอาหาร

เนื่องจาก ซีสต์ รา และแบคทีเรียจำเป็นต้องใช้น้ำอิสระในการเจริญเติบโต การผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีค่า Water Activity ต่ำกว่า 0.6 จะช่วยควบคุมการเสียหายเนื่องจากจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ ตัวอย่างของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารและระดับของ Water Activity ที่จุลินทรีย์เหล่านี้สามารถเจริญเติบโตได้แสดงในตารางที่ 2.1 วิธีที่ง่ายที่สุดในการลด Water Activity ในอาหารคือการกำจัดน้ำในอาหารเช่น การทำให้สุก การอบ หรือการทำให้แห้ง กระบวนการ ที่ใช้อุณหภูมิสูง

Water Activity (A_w)	จุลินทรีย์ที่ถูกยับยั้ง	ตัวอย่างอาหาร
0.950	Pseudomonas, Escherichia, Proteus, Shigella, Bacillus, ยีสต์ บางชนิด	อาหารที่เน่าเสียง่าย เช่น ผัก ผลไม้สด นม เนื้อ ปลา
0.910	Salmonella, Vibrio parabaenolyticus, C.botulinum, ราบางชนิด	ไส้กรอก ขนมนมปั่น แยม
0.750	Halophilic bacteria, mycotoxigenic aspergilli	น้ำผลไม้เข้มข้นซึ่งมีน้ำตาล 55% โดยน้ำหนัก หรือ มีเกลือ (NaCl) 12%
0.600	Osmophilic yeasts และ ราบางชนิด	แยม มาร์มาเลด ผลไม้แห้งความชื้นประมาณ 15-20% น้ำผึ้ง ทอฟฟี่ คาราเมล

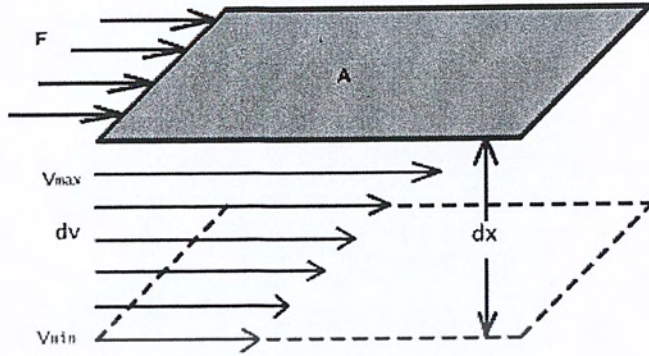
ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการเสื่อมเสียของอาหารที่ระดับ Water Activity ต่าง ๆ

2.8 ทฤษฎีเกี่ยวกับความหนืด (viscosity) [15]

ความข้นหนืด (Viscosity) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญตัวหนึ่งในด้านสมบัติของอาหารและวัสดุชีวภาพ เพื่อใช้ในการประเมินคุณภาพของอาหาร ที่มีสมบัติเป็นของเหลว หรือ กึ่งของแข็ง (semi-solid food) นอกจากนี้ยังมีส่วนสำคัญในการออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อน (heat transfer) และ ระบบถ่ายเทมวลสาร (mass transfer)

ความหนืดเป็นสมบัติของของไหลที่ต้านทานการเคลื่อนที่ของชั้นของไหล ในการศึกษาเรื่องความหนืดยึดหลักที่ว่าของไหลประกอบด้วยชั้นต่างๆซ้อนกันดังรูปที่ 1 โดยแรง F ออกแรงกระทำต่อแผ่นของไหล ชั้นของไหลมีความสูง x ความเร็วของของไหลในแต่ละชั้นไม่เท่ากัน โดยชั้นบนสุดของไหล มีความเร็วสูงสุด ขณะที่ชั้นล่างสุดมีความเร็วต่ำที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



edit by M.Suksai

รูปที่ 2.3 แผนภาพการไหลในของไหล [15]

เมื่อของไหลถูกกระทำด้วยแรงเค้น $\frac{F}{A}$ ในชั้นบนสุดมีความเร็ว V_{max} ขณะที่ชั้นล่างสุดมีความเร็ว V_{min} ดังนั้นสามารถเขียนความเร็วในแต่ละชั้นที่เกิดขึ้นในทอมลิตเฟอเรนเทียลได้เป็น $\frac{dy}{dx}$ จากกฎของนิวตันจะได้ว่า

$$\frac{F}{A} \propto \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

เมื่อ

$\frac{F}{A}$ คือ ความเค้นเฉือน (Shear stress, γ)

$\frac{dy}{dx}$ คือ อัตราการเฉือน (Shear rate, g) หรือการเปลี่ยนแปลงความเร็วต่อระยะทาง dx (velocity gradient)

ส่วนความหนืดเป็นความสามารถในการต้านการเคลื่อนที่ของของไหล จะได้

$$\frac{F}{A} \propto \mu \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

$$T = \mu \gamma \quad (3)$$

เพราะฉะนั้น เราสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

$$\mu = \text{viscosity} = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\text{shear stress}}{\text{shear rate}} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยที่นิยมใช้ในเรื่องความหนืดได้แก่ poise ซึ่งตั้งไว้ให้เป็นเกียรติให้แก่ Poiseuille อีกหน่วยที่ใช้กันได้แก่

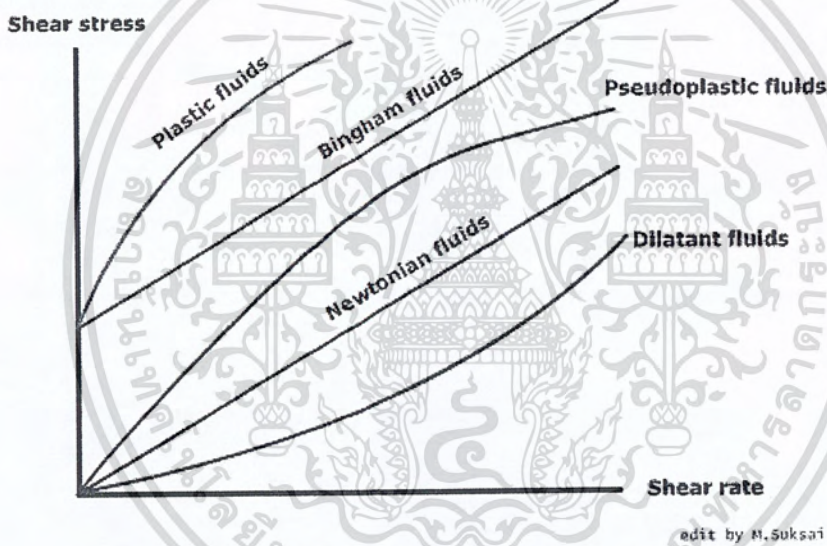
Pa^{\cdot} (1 centipoise = 1 mPa^{\cdot})

1 mPa^{\cdot} เท่ากับ 1000 cP

1 Poise เท่ากับ 100 cP

2.8.1 ลักษณะพฤติกรรมการไหลของไหล

ในการศึกษาเรื่องความหนืด เมื่อทำการพลอตกราฟระหว่างค่า Shear stress กับ Shear rate ในวัสดุชีวภาพ ใดๆจะได้กราฟตามรูปที่ 2.4



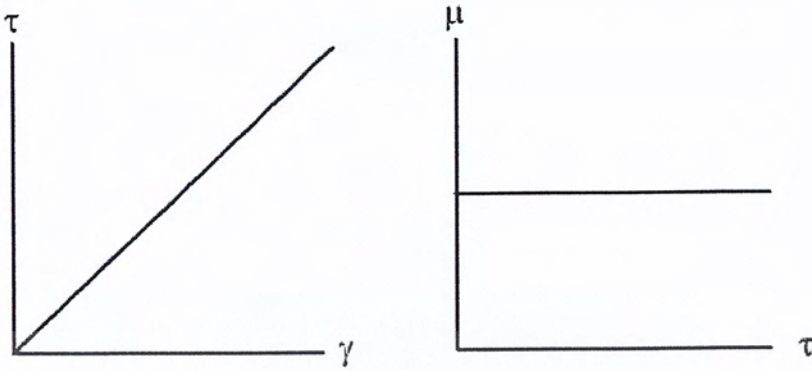
รูปที่ 2.4 ลักษณะของพฤติกรรมการไหล [15]

2.8.2 การแบ่งประเภทลักษณะพฤติกรรมการไหล

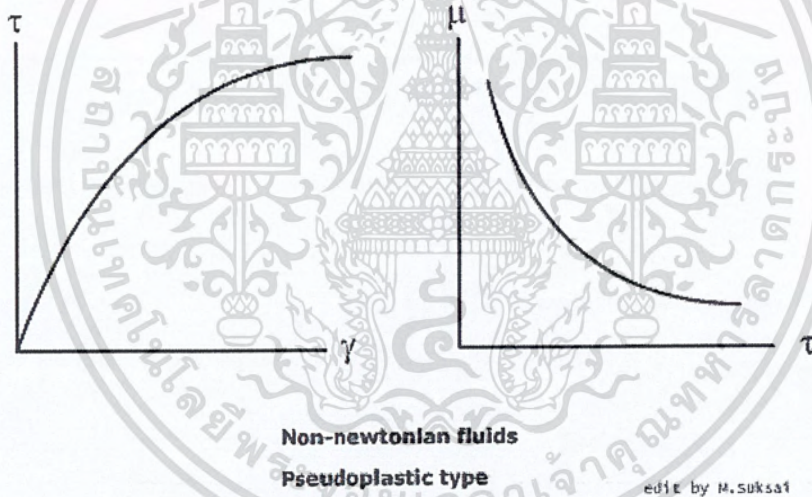
เราสามารถจำแนกลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นออกเป็น 2 กลุ่ม ใหญ่ ๆ คือ

1. **Newtonian Fluids** : น้ำ, น้ำมันเจือจาง เป็นต้น ในรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของกราฟของของไหลนิวโตเนียน ค่าความหนืดที่ได้จะมีค่าคงที่อย่างมีนัยสำคัญ ในสมการของ ค่า n ของของไหลนิวโตเนียนมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Newtonian fluids edit by M.suksat
 รูปที่ 2.5 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน [15]



รูปที่ 2.6 Rheograms of typical Newtonian Fluids [15]

2. Non-Newtonian Fluid : อาหารชั้นทั่วไป เช่น ซอสมะเขือเทศ มัสตาร์ด มายองเนส ซึ่งในอาหาร
 ทั่วไปจะพบว่า มีลักษณะการไหลเป็นแบบนอน-นิวโตเนียนเป็นส่วนใหญ่ การที่เกิดลักษณะการไหล
 ประเภทนี้เป็นเพราะภายในของไหลมีขนาดของอนุภาคที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ ซึ่งทำให้ในระหว่างช่วง
 การไหลเกิดลักษณะไม่ราบรื่น ในการไหลแบบนอน-นิวโตเนียนมีปัจจัยหลายๆอย่างที่มีผลทำต่อ Shear rate
 ของไหลนอน-นิวโตเนียนสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่

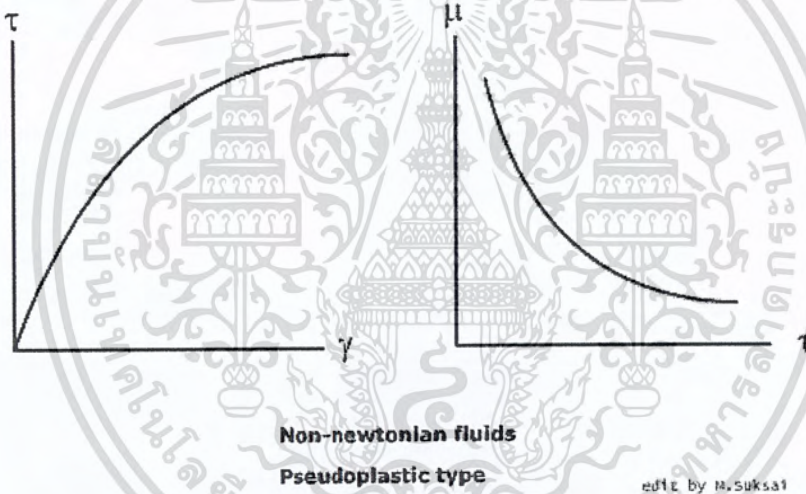
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 พวกที่ไม่ขึ้นกับเวลา(Time independent non-newtonian fluids)

ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้จะขึ้นอยู่กับ Shear stress กับ Shear rate แต่จะไม่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับความเค้นเฉือน(Shear stress) แต่อย่างใด นั่นคือความสัมพันธ์ระหว่าง Shear stress และ Shear rate จะมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา ตัวอย่างของไหลนอนนิวโตเนียนประเภทนี้ ได้แก่

2.1.1 ของไหลซูโดพลาสติก(Pseudoplastic fluids)

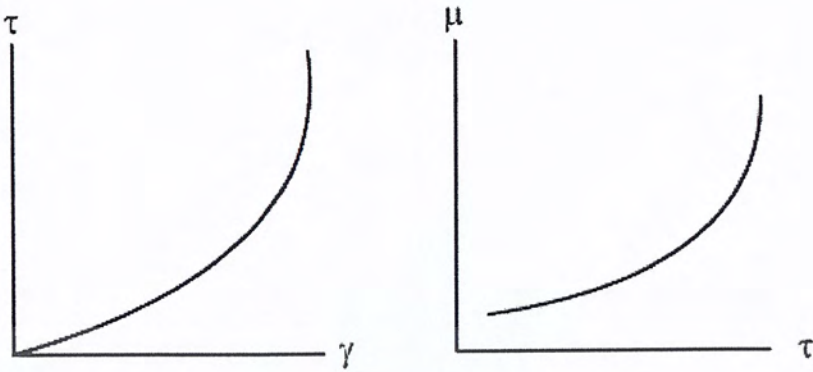
ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าลดลงเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งของไหลนอน-นิวโตเนียนโดยมากมักจะไหลในลักษณะนี้ นอกจากนี้ลักษณะการไหลประเภทนี้ยังมีชื่อเรียกอื่นๆว่า Shear-thinning และ Power law liquid ตัวอย่างทั่วไปของของไหลประเภทนี้ได้แก่ นม, fruit puree, มายองเนส, มัสตาด และ ซุปผัก



รูปที่ 2.7 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทซูโดพลาสติก [15]

2.1.2 ของไหลไดลาแทนต์ (Dilatant fluids)

ลักษณะของการไหลประเภทนี้คือ ค่าความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ดังเช่นแสดงในรูปที่ 2.8 ลักษณะของการไหลประเภทนี้พบเห็นได้ยากกว่าประเภทซูโด-พลาสติก ของไหลไดลาแทนต์จะพบเห็นได้ในของไหลหรืออาหารลักษณะมีตะกอนของแข็งนอนกัน ยกตัวอย่างเช่น candy compound , น้ำแป้งข้าวโพด นอกจากนี้ลักษณะของไหลไดลาแทนต์ยังเรียกอีกอย่างได้ว่าลักษณะการไหลแบบ Shear-thickening



Non-newtonian fluids

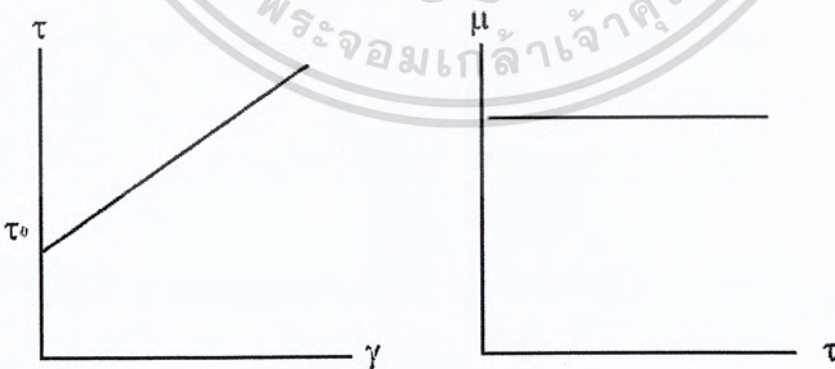
Dilatant type

edit by M.suksat

รูปที่ 2.8 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทไดลาแทนต์ [15]

2.1.3 ของไหลพลาสติก (Plastic fluids) และของไหลบิงแฮม (Bingham fluid)

ของไหลประเภทนี้ที่ค่าแรงเฉือนมีค่าต่ำๆจะ ไม่มีการเคลื่อนที่แต่อย่างใด จนกระทั่งค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นถึงค่า τ_0 ซึ่งเรียกจุดที่แรงเฉือนมีผลทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่นี้ว่า Yield value หรือ ในบางตำราเรียกว่า Yield stress ในของไหลบิงแฮม(Bingham fluids)เมื่อออกแรงเฉือนจนถึงจุด Yield stress หลังจากนั้นของไหลจะพฤติกรรมเหมือนของไหลนิวโตเนียน ดังรูปที่ 2.9 ตัวอย่างของของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ (Tomato catsup) ส่วนของไหลพลาสติกนั้นเมื่อออกแรงจนถึงจุด Yield stress ของไหลก็จะมีพฤติกรรมการไหลคล้ายกับของไหล Pseudoplastic ดังแสดงในรูปที่ 2.10



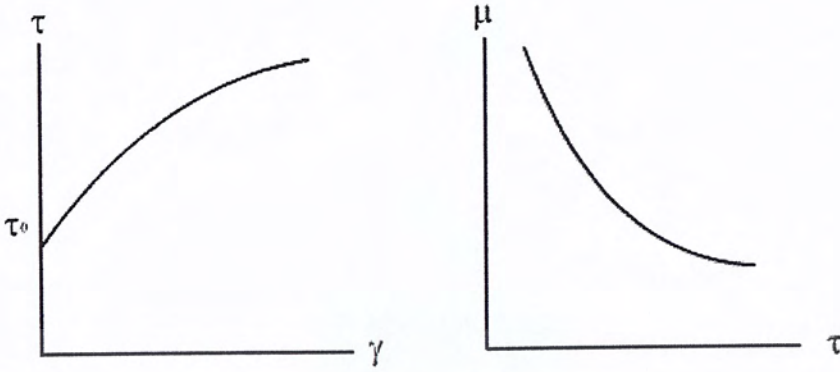
Non-newtonian fluids

Bingham type

edit by M.suksat

รูปที่ 2.9 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทบิงแฮม [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Non-newtonian fluids

Plastic type

edit by M.Suksat

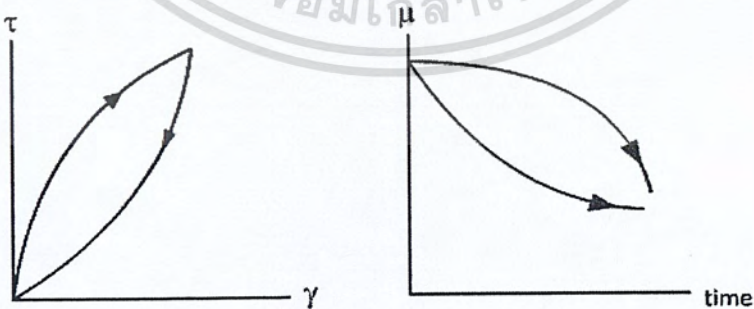
รูปที่ 2.10 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทพลาสติก [15]

2.2 พวกที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent non-newtonian fluids)

ค่าความหนืดของของไหลพวกนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับค่า Shear stress และ Shear rate แล้ว ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่ของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนได้รับ ตัวอย่างของไหลประเภทนี้ ได้แก่

2.2.1 ของไหลไซโซทรอปิก (Thixotropic fluids)

ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะลดลงตามระยะเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.11 เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลประเภทนี้พบได้น้อย แต่ก็มีพบบ้างในวัสดุประเภท grease , สีทาบ้าน และน้ำมันสำหรับเครื่องพิมพ์ขนาดใหญ่



Non-newtonian fluids

Thixotropy type

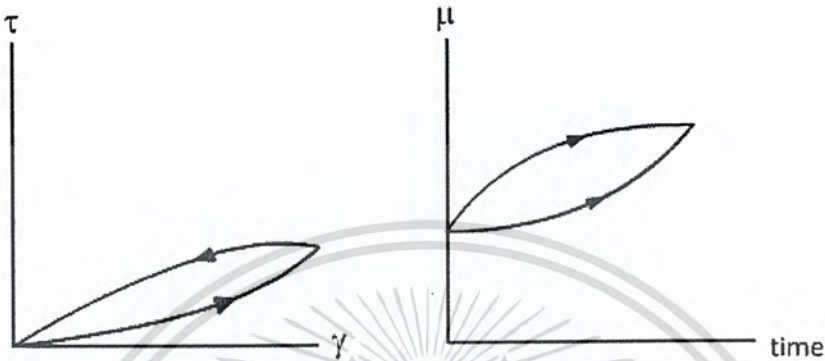
edit by M.Suksat

รูปที่ 2.11 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทไซโซทรอปิก [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ของไหลรีโอเพกซิก (Rheopectic fluids)

ของไหลประเภทนี้ค่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.12 เมื่อของไหลได้รับแรงเค้นเฉือนในอัตราคงที่ ลักษณะการไหลแบบรีโอเพกซิกนี้ค่อนข้างจะพบได้ยาก



Non-newtonian fluids
Rheopecty type

edit by M. Sukasri

รูปที่ 2.12 กราฟของไหลที่มีพฤติกรรมการไหลแบบนอน-นิวโตเนียน ประเภทรีโอเพกซิก [15]

การที่จะตัดสินว่าอาหารแสดงคุณสมบัติแบบใด และมีค่าความข้นหนืดเท่าใด นั้นขึ้นอยู่กับการวัดค่า Apparent viscosity (μ_{app}) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) ซึ่งมีหน่วยเป็น Pa.s (1,000 centipoises) และ second^{-1} ตามลำดับ เครื่องมือสำหรับวัดเรียกโดยทั่วไปว่า Rheometer หรือ Viscometer ซึ่งมีหลายแบบ แต่โดยทั่วไปสามารถแสดงค่า μ_{app} และ $\dot{\gamma}$ ได้ ที่นิยมคือ Brookfield® viscometer.

สำหรับ Rotational viscometer (ตัวอย่าง Brookfield viscometer) การเปลี่ยนความเร็วของการหมุน (rotational speed ของ spindle) เพิ่มขึ้น หมายถึงการเพิ่ม Shear rate ($\dot{\gamma}$) ซึ่งจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ Apparent viscosity (μ_{app}) ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ rotational speed ไม่ทำให้ μ_{app} เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ถือว่าอาหารนั้นมีคุณสมบัติเป็น Newtonian fluid และสามารถสรุปได้ว่าอาหารมีความข้นหนืดเท่ากับ μ_{app} แต่ถ้าการเปลี่ยนแปลงของ rotational speed ทำให้ μ_{app} เปลี่ยนแปลง ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในรูปเอกซ์โปเนนเชียล ถือว่าอาหารนั้นมีคุณสมบัติเป็น Non-newtonian fluid การสรุปความข้นหนืดของอาหารในรูป μ_{app} ต้องกำกับ $\dot{\gamma}$ ด้วยเสมอ อย่างไรก็ตามเพื่อความเป็นสากล การรายงานความหนืดของอาหาร Non-newtonian นิยมรายงานในค่าทั่วไปของความหนืดซึ่งได้แก่ Consistency index, k (Pa.sⁿ) และ Flow behavior, n (ไม่มีหน่วย)

ค่า k และ n คำนวณจากความสัมพันธ์ของ Herschel-Bulkley model ในรูปของ ค่า Apparent viscosity (μ_{app}) และ Shear rate ($\dot{\gamma}$) ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu_{app} = k\gamma^{n-1} \quad (5)$$

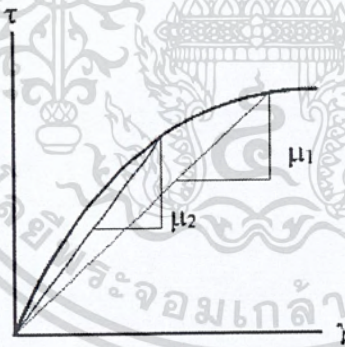
$$\log\mu_{app} = \log k + (n - 1)\log\gamma \quad (6)$$

โดยการพลอตกราฟ log-log ระหว่าง $\text{Log}(\mu_{app})$ บนแกน Y และ $\text{Log}(\gamma)$ บนแกน X ค่า slope คือ $(n-1)$ และ intercept คือ $\text{Log}(k)$ ตามตัวอย่างในรูปที่ 2.14

$$n = \text{slope} + 1 \quad (7)$$

$$k = 10^{\text{intercept}} \text{ Pa} \cdot \text{s}^n \quad (8)$$

จะสังเกตได้ว่าถ้าอาหารมีคุณสมบัติเป็น Newtonian fluid ค่า n จะเท่ากับ 1 ทำให้ μ_{app} เท่ากับ K และความหนืดของอาหารมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับ shear rate หรือ rotational speed. ส่วนของไหลชนิด Pseudoplastic จะมีค่า n มากกว่า 1 และของไหล Dilatant จะมีค่า n น้อยกว่า 1 ค่า n และ K ที่ได้จากกราฟ เป็นค่าคงที่เฉพาะตัวของอาหารซึ่งใช้ในการทำนายความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity, μ_{app}) ณ shear rate ต่างๆกัน ซึ่งในต่างประเทศมีการวิจัยค้นคว้าหาค่า n และ K ในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดกันอย่างกว้างขวาง

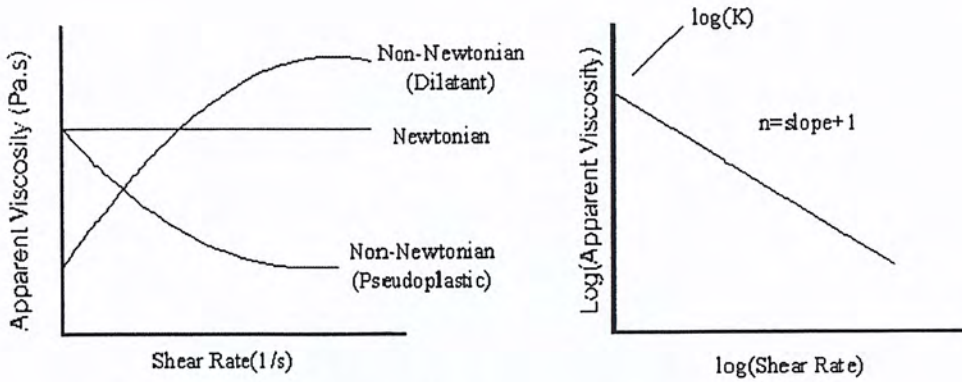


Determination of μ_{app} from shear stress-shear rate plot

edit by M.Suksai

รูปที่ 2.13 การหาค่า μ_{app} ด้วยการพลอตค่า shear stress-shear rate ลงบนกระดาษ log-log [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 ลักษณะของเส้นกราฟที่ได้จากการลงจุดบนกระดาษ log-log [15]

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างลักษณะพฤติกรรมการไหลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง [15]

ลักษณะพฤติกรรม การไหล	K	N	τ_0	ตัวอย่าง
นิวโตเนียน	> 0	$= 1$	0	น้ำ, น้ำผลไม้เจือจาง, น้ำมันพืช
ซูโดพลาสติก	> 0	$0 < n < 1$	0	Applesauce, Banana puree, concentrated juice
ไดลาแทนต์	> 0	$1 < n < \infty$	0	40% corn starch solution
บิงแฮม พลาสติก	> 0	1	> 0	ยาสีฟัน, ซอสมะเขือเทศ

2.9 ทฤษฎีของการผสมของของเหลว (Theory of liquid mixing) [16]

ในอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารหลายชนิดจะเกี่ยวข้องกับการกวนและการผสมของของไหลอย่างมาก ของผสมที่เป็นอาหารเหลวสามารถสุ่มและวิเคราะห์ในลักษณะเดียวกับของแข็ง ข้อมูลส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับกำลังงานที่ต้องใช้ในเครื่องผสม เช่น พวกเครื่องผสมชนิดใบพาย (paddle mixer) และในเครื่องผสมชนิดใบพัดเรือ (propeller mixre) ในเครื่องผสมเหล่านี้ ของเหลวที่จะนำมาผสมจะใส่ในภาชนะและตัวกวนจะหมุน

การกวนผสมสิ่งที่สำคัญที่สุดคือ การออกแบบใบกวน (Impeller) ซึ่งรวมไปถึงการเลือกชนิดของใบกวน ซึ่งแต่ละชนิดของใบกวนมีค่าไม่เท่ากันและไม่สามารถใช้ค่าแทนกันได้เช่น หากกระบวนการมีการเติมสารพวก Emulsifier แต่ใช้ใบกวนประเภท Mixing ทั่วไปเช่น Turbine, High Efficiency ก็ไม่สามารถทำงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ถึงแม้ Product จะมี Flow ที่ดี มี Reynold Number ที่สูง เนื่องจากเลือกใช้งานไม่ตรงกับ Concept ของ Product นั้นเอง ดังนั้นการออกแบบเครื่องกวนนั้นไม่ใช่จะใช้การเดา, มั่ว หรือ การคาดคะเนได้ แต่ต้องใช้หลักการทางวิศวกรรมที่ถูกต้องจึงจะทำให้เครื่องกวนสามารถทำงานได้ดี มี Mixing Time ที่รวดเร็วได้, ที่สำคัญผู้ออกแบบยังต้องเข้าใจเรื่องคุณสมบัติของใบกวนเป็นอย่างดี รวมถึงมีประสบการณ์ในการเลือกใช้งาน จึงจะได้เครื่องกวนประสิทธิภาพดีได้ เทคนิคการเลือกใบกวนและการปรับปรุงระบบการกวนอย่างง่ายที่สามารถใช้งานได้จริงนั้น ต้องเข้าใจองค์ประกอบหลักของการออกแบบระบบการกวนเสียก่อนว่าแต่ละองค์ประกอบส่งผลต่อการออกแบบระบบกวนอย่างไร

2.9.1 สารในสถานะของไหล (Rheology)

Rheology นั้นถือเป็นหัวใจหลักสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบเครื่องกวนที่ถูกต้องและสามารถใช้งานได้ตามกระบวนการที่ต้องการอย่างแท้จริง, ความเข้าใจพื้นฐานด้าน Fluid mechanic ก็มีสำคัญไม่แพ้กัน อาทิ นิยามความหนืด (viscosity) ความหนาแน่น (density) อัตราการไหล (flow rate) ค่าความปั่นป่วนของของเหลว (reynolds number) แรงเฉือนของของเหลว (fluid shear) เป็นต้น

ในหัวข้อนี้จะขออนุญาตถึงลักษณะการไหลของของเหลวที่พบเจอบ่อยในอุตสาหกรรม ซึ่งมีความจำเป็นต้องเข้าใจก่อนการออกแบบเครื่องกวน โดยการไหลที่พบจะแบ่งเป็น 5 ลักษณะ ดังนี้

- 1.) ของไหลที่มีความหนืดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วในการกวนหรืออัตราแรงเฉือน ทั้งนี้วัสดุที่อุณหภูมิต่ำที่เรียกของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ว่า Newtonian Fluid เช่น น้ำ, น้ำมัน, นม
- 2.) เมื่อเพิ่มความเร็วในการกวนและใบกวนส่งผลให้ค่าแรงเฉือนเพิ่มขึ้นแล้วนั้น ของไหลมีค่าความหนืดลดลง เรียกของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้ว่า Shear Thinning เช่น น้ำผลไม้เข้มข้น, สารละลายโพลีเมอร์
- 3.) จากข้อ 2 หากของไหลนั้นมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น เราเรียกของไหลแบบนี้ว่ามีพฤติกรรมเป็น Shear Thickening เช่น น้ำแป้ง หาดทราย กรณีหาดทรายเราจะสังเกตว่าหากเราเดินบนหาดทรายช้า ๆ จะรู้สึกนุ่ม ๆ แต่หากเราวิ่งแล้วจะรู้สึกว่ารวดทรายแข็งตบสนองต่อเท้าเราทันที
- 4.) ของไหลบางอย่างจะมีความหนืด แต่หากมีแรงกระทำสูงมากพอก็จะมีพฤติกรรมการไหลแบบ Newtonian fluid เราเรียกของไหลแบบนี้ว่า Bingham Plastic เช่น ยาสีฟัน
- 5.) Plastic ใช้เรียกกับของไหลบางชนิดจะสามารถเกิดการไหลได้ก็ต่อเมื่อมีแรงกระทำสูงพอ เช่น ซีอสมะเขือเทศ, มายองเนส (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.2 ประเภทของการกวน (Mixing Tasks)

จาก Rheology เราารู้พฤติกรรมของสารแล้ว ต้องรู้ถึงส่วนประกอบของสารว่ามีอะไรบ้าง และ แต่ละตัวมีความเกี่ยวข้องกับอย่างไร ซึ่งจะนำไปสู่การแบ่งแยกประเภทของกระบวนการกวนต่อไป

โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งประเภทของการกวนได้เป็น 5 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้ คือ

- 1.) **Miscible Liquid** เป็นการผสมระหว่างของเหลวกับของเหลวที่มีคุณสมบัติในการละลายเข้ากันได้
- 2.) **Immiscible Liquid** เป็นการผสมระหว่างของเหลวที่ไม่สามารถละลายเข้ากันได้ หากต้องการผสมให้เข้ากันต้องมีตัวประสาน (emulsifier) ผสมลงไปด้วย เช่น น้ำกับน้ำมัน มีไข่แดงเป็นตัวประสาน เราจึงอาจเรียกกระบวนการนี้ว่า Emulsion ได้เช่นกัน
- 3.) **Solid-Liquid Suspension** เป็นการผสมระหว่างของแข็งและของเหลวนั่นเอง
- 4.) **Gas-Liquid Suspension or Gassing** คือ การผสมแก๊สให้เข้ากับของเหลว
- 5.) **Solid-Liquid Dispersion** เป็นการกระจายของแข็งให้แทรกอยู่ในของเหลวอย่างสม่ำเสมอ

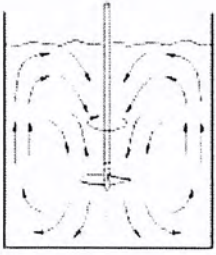
2.9.3 ประเภทเครื่องกวน

โดยทั่วไปเครื่องกวนจะแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ตามต้นกำลังหรือตัวขับเคลื่อน

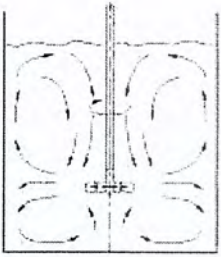
1. **Direct drive agitator or Direct drive motor (DDM)** เครื่องกวนประเภทนี้จะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนอย่างเดียว การเปลี่ยนรอบของมอเตอร์จะใช้อัตราส่วนของลูกรอก (pulley) เป็นตัวกำหนด ทำให้ไม่สามารถลดความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ต่ำมากได้เพราะสายพานจะเลื่อนหลุดจากลูกรอกตัวขับเคลื่อน (driver pulley) ได้เหมาะสำหรับถังขนาดเล็กและปานกลาง
2. **Gear drive agitator or Transmission drive agitator (TDA)** เครื่องกวนประเภทนี้ใช้เกียร์เป็นตัวขับเคลื่อนให้เพลลาหมุน สามารถกำหนดความเร็วรอบได้ตามความต้องการ เหมาะสำหรับถังขนาดปานกลางและใหญ่ รวมทั้งของเหลวซึ่งมีความหนืดปานกลางถึงสูง

2.9.4 ส่วนประกอบของเครื่องกวนและการไหลของของเหลว

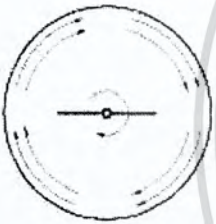
เครื่องผสมของเหลวหรือเครื่องกวน เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยตัวต้นกำลังหรือตัวขับเคลื่อน เพลลา และใบกวน (impeller) หนึ่งใบหรือมากกว่า ติดตั้งอยู่บนเพลลา โดยจำนวนใบมีความหมายถึงจำนวนชั้นของใบกวน (impeller stage) สำหรับใบกวนผสม ที่ยึดติดอยู่บนเพลลาทำหน้าที่หมุนวนของเหลวเพื่อแลกเปลี่ยนสารตามความต้องการของขบวนการผลิต ใบกวนมีด้วยกันหลายแบบ โดยหลักแล้วสามารถแบ่งประเภทใบกวนได้เป็นกลุ่มใหญ่ๆ 3 กลุ่ม ตามลักษณะการไหลของของเหลว ดังนี้



1. **Axial flow** ของเหลวถูกดูดและไหลในแนวแกนขนานกับเพลา ใบกวนกลุ่มนี้ใช้เพิ่มการไหลของของเหลว (pumping capacity) เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้าด้วยกัน (blending) และการผสมของแข็งเข้ากับของเหลว (suspension)



2. **Radial flow** ของเหลวถูกผลักออกในแนวรัศมีหรือในแนวตั้งฉากกับแกนเพลา ใบกวนกลุ่มนี้ใช้เพิ่มแรงเฉือนหรืออัตราการเฉือนให้กับของเหลว เหมาะสำหรับการผสมของเหลวที่ไม่สามารถละลายเข้าด้วยกันเป็นเนื้อเดียว (immiscible liquid) การลดขนาดของของแข็งให้แขวนลอยในของเหลวและการลดขนาดของแก๊สในของเหลว เพื่อให้เกิดการถ่ายเทมวลสาร (mass transfer) โดยขบวนการ emulsion dispersion และ aeration ตามลำดับ



รูปที่ 2.15 ลักษณะการไหลของของเหลว [16]

3. **Tangential flow** โดยปกติใบกวนที่มีขนาดใหญ่และหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำจะมี tangential flow อยู่ด้วย เป็นลักษณะการไหลของของเหลวที่หมุนรอบขอบถัง ทำให้สามารถถ่ายเทความร้อนหรือความเย็นกับภาชนะที่บรรจุได้ แต่ tangential flow ไม่ค่อยช่วยในการผสมของเหลวให้เข้ากัน ดังนั้นเราจึงใช้แผ่นกั้น ในการเปลี่ยนทิศของเหลวให้ขึ้นลงในแนวตั้ง ทำให้การผสมของเหลวให้เข้ากันกินเวลาน้อยลง ซึ่งสามารถใช้กับความเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับของเหลวที่มีความหนืดปานกลางกับสูง เรามักใช้ใบกวนที่มีขนาดใหญ่ และมีจำนวนชั้นมากในการกวนของเหลวให้เข้ากัน

2.9.5 เครื่องมือที่ใช้ในการผสม (mixing equipment)

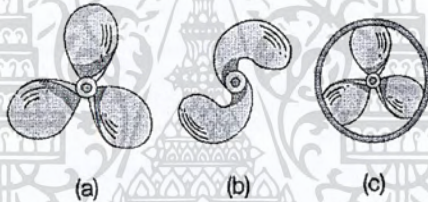
ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้มีการออกแบบและผลิตเครื่องผสมออกมาเป็นจำนวนมากการเลือกชนิดและขนาดของเครื่องผสมที่ถูกต้องขึ้นกับชนิดและปริมาณของอาหารที่จะนำมาผสมและความเร็วของการปฏิบัติงานเพื่อให้ได้ระดับของการผสมที่ต้องการ โดยใช้พลังงานน้อยที่สุด เครื่องผสมจะแบ่งออกตามลักษณะการทำงานสำหรับอาหารต่อไปนี้

- (1) ของเหลวที่มีความหนืดต่ำ
- (2) ของเหลวหรือเพสต์ที่มีความหนืดสูง
- (3) อาหารผงที่แห้งหรือของแข็งที่เป็นชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

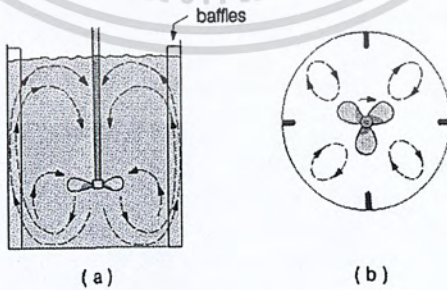
1. เครื่องผสมสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำหรือปานกลาง (mixers for low- or medium-viscosity liquids)

1. เครื่องกวนชนิดใบพัดเรือ (propeller agitator) เป็นใบพัดความเร็วสูงไหลตามแนวแกนเหมาะสมสำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ สำหรับใบพัดเรือขนาดเล็กจะหมุนด้วยความเร็วเท่ากับของมอเตอร์ (1,150 หรือ 1,750 rpm) ถ้าเป็นใบพัดเรือขนาดใหญ่จะหมุนที่ 400-800 rpm. ระยะทางที่ใบพัดหมุน 1 รอบแล้วนำของเหลวเคลื่อนไปตามความยาวจะขึ้นกับมุมความชันของใบพัดเรือ อัตราส่วนของระยะทางนี้ต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดเรียกว่า pitch ของใบพัด รูปที่ 2.16 เป็นใบพัดเรือแบบต่างๆ และลักษณะการไหลในถังผสมที่มีแผ่นกั้น โดยการติดตั้งใบพัดเรือที่ศูนย์กลางของถังผสมดังแสดงในรูปที่ 2.17 ลักษณะการไหลชนิดนี้เรียกว่า axial flow เนื่องจากของไหลไหลลงที่แกนกลางหรือเพลาของใบพัดเรือ และไหลขึ้นที่ด้านข้างของถังผสมดังแสดงในภาพ



รูปที่ 2.16 ใบพัดเรือชนิดต่างๆ ที่ใช้ในการผสม [16]

(a) ใบพัด 3 ใบชนิดมาตรฐาน (b) weedless (c) gurgled



รูปที่ 2.17 ถังผสมที่มีแผ่นกั้น และตัวกวนที่เป็นแบบใบพัดเรือชนิด 3 ใบ [16]

โดยมีลักษณะการไหลตามแนวแกน (a) side view (b) top view

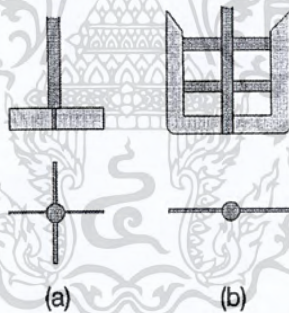
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เครื่องกวนชนิดใบพาย (paddle agitator)

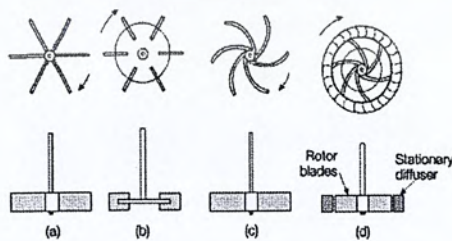
เป็นเครื่องกวนแบบง่ายๆ ประกอบด้วยใบพัดคล้ายใบพายที่แบนหมุนรอบเพลาในแกนตั้งมักนิยมใช้ใบพายแบบ 2 หรือ 4 ใบดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งหมุนด้วยความเร็วต่ำถึงปานกลางประมาณ 20-200 รอบต่อนาที ณ ศูนย์กลางของถังผสม ซึ่งจะดันของเหลวในแนวรัศมี โดยไม่มีการเคลื่อนในแนวตั้ง ยกเว้นใบพัดแบบ pitch ความยาวทั้งหมดของใบพัดชนิดนี้เป็น 50-80 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถังผสม และความกว้างของใบพายเป็น $1/6$ ถึง $1/10$ ของความยาว การกวนที่ความเร็วต่ำมักใช้ในถังผสมที่ไม่มีแผ่นกั้น แต่ที่ความเร็วสูงขึ้นต้องใช้แผ่นกั้นเนื่องจากของเหลวจะหมุนวนรอบซึ่งมีผลด้านการผสมเกิดขึ้นเล็กน้อยถ้าไม่มีแผ่นกั้น

3. เครื่องกวนชนิดใบพัดกังหัน (turbine agitator)

แสดงในรูปที่ 2.19 ประกอบด้วยใบพัดคล้ายใบพายหลายใบแต่ใบพัดสั้นกว่าและหมุนด้วยความเร็วสูงบนเพลาที่ติดตั้งอยู่ตรงกลางของถังผสม เส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัดกังหันปกติจะมีขนาดประมาณ 30-50 % ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถังผสม ใบพัดกังหันสามารถใช้กับของเหลวที่มีความหนืดในช่วงกว้าง ลักษณะการไหลของถังผสมแบบใบพัดกังหันชนิดใบแบน 6 ใบซึ่งมีจำนวนงานด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.20

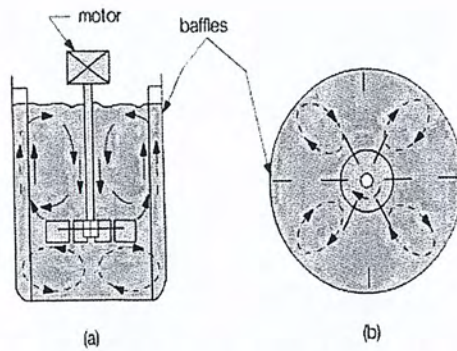


รูปที่ 2.18 ใบกวนแบบใบพาย [16]



รูปที่ 2.19 ใบพัดชนิดกังหันต่างๆ [16]

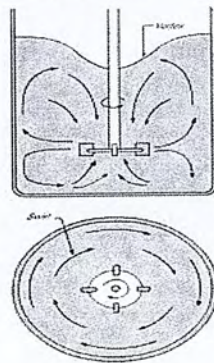
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ถังผสมที่มีใบพัดกั้นชนิด 6 ใบซึ่งมีงานที่แสดงการไหล [16]

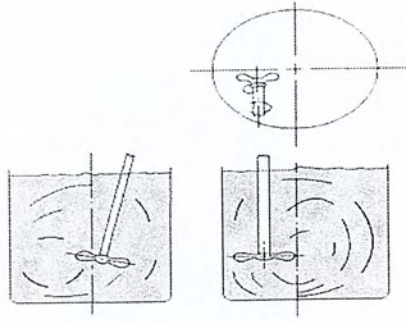
(a) side view (b) bottom view

ในการผสมของเหลว ลักษณะการไหลในถังผสมขึ้นกับชนิดของใบพัด ลักษณะเฉพาะของของไหล ขนาดและสัดส่วนของถังผสม แผ่นกั้นและตัวกวน ความเร็วของของไหลที่จุดใดๆ ในถังประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ คือ (1) ความเร็วในแนวรัศมี (radial) และกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับเพลลาของใบพัด (2) ความเร็วในแนวตามความยาว (longitudinal) และกระทำในทิศทางที่ตั้งฉากกับเพลลา และ (3) ความเร็วในแนวสัมผัสหรือหมุน (tangential or rotational) และกระทำในทิศทางที่สัมผัสกับทางเดินวงกลมรอบๆ เพลลาของใบพัด ในกรณีที่เพลลาอยู่ในแนวตั้ง องค์ประกอบของความเร็วในแนวรัศมีและในแนวตามความยาวมีประโยชน์และให้การไหลที่จำเป็นต่อการผสมเมื่อแกนของใบพัดติดตั้งที่กึ่งกลางของถังผสมในแนวตั้ง องค์ประกอบของความเร็วในแนวสัมผัสจะก่อให้เกิดข้อเสีย เนื่องจากการไหลในแนวสัมผัสตามทางเดินที่เป็นวงกลมรอบเพลลา ก่อให้เกิดน้ำวน (vortex) ขึ้นที่ผิวของของเหลวดังแสดงในรูปที่ 2.21 จึงจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงแบบการไหลในลักษณะการวนรอบๆ ถังผสมซึ่งมีผลต่อการผสมน้อยมาก ดังนั้นการทำลายการไหลลักษณะนี้กระทำได้ง่ายโดยติดตั้งใบพัดให้ห่างจากศูนย์กลางของถังผสม รูปที่ 2.22 สำหรับถังผสมขนาดเล็ก ถ้าเป็นถังผสมขนาดใหญ่ขึ้นอาจมีการติดตั้งแผ่นกั้นที่ผนังของถังผสม รูปที่ 2.17 หรือใบพัดอาจติดตั้งที่ด้านข้างของถังผสม โดยมีเพลลาในแนวนอน รูปที่ 2.23

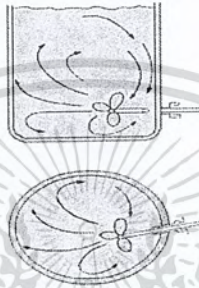


รูปที่ 2.21 ลักษณะการเกิดการไหลแบบหมุนวน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ใบพัดที่ติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่อยู่ห่างจากศูนย์กลาง [16]

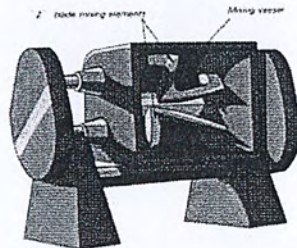


รูปที่ 2.23 ใบพัดที่เข้าทางด้านข้าง [16]

2. เครื่องผสมสำหรับของเหลวหรือเพสต์ที่มีความหนืดสูง (dough and paste mixers)

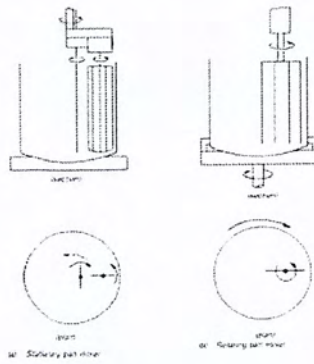
ในการผสมโด เพสต์ หรือของเหลวที่มีความหนืดสูง จำเป็นต้องผสมในเครื่องที่ต้องใช้กำลังมาก เพื่อที่สารหรืออาหารถูกแบ่ง พับ หรือรวมกลับเข้ามาใหม่ และส่วนต่างๆ เข้าแทนที่กัน โดยผิวที่เกิดขึ้นใหม่ ควรจะรวมกลับเข้ามาใหม่ให้บ่อยที่สุด เนื่องจากความต้องการในด้านกำลังงานที่ค่อนข้างมาก กำลังงานจะแผ่กระจายออกไปในรูปของความร้อนซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ร้อนขึ้นดังนั้นเครื่องชนิดนี้บางเครื่องจึงมีแจ็กเก็ตน้ำเย็นหุ้มเครื่องเพื่อกำจัดความร้อนออก เครื่องที่นิยมใช้กันมาก

สำหรับโดและเพสต์คือ เครื่องนวด (kneader) ดังแสดงในภาพที่ 10.11 ประกอบด้วยแกน 2 อัน ซึ่งอาจหมุนด้วยความเร็วแตกต่างกัน ส่วนใหญ่ในอัตราส่วนของ 3 : 2 นอกจากนี้ยังมีหม้อผสมซึ่งมี 2 ประเภทคือ แบบที่หม้ออยู่หนึ่งและใบกวนหมุน รูปที่ 2.25 (a) และแบบที่หม้อติดตั้งอยู่กับตัวหมุนและใบกวนก็หมุนด้วย รูปที่ 2.25 (b) ใบกวนอาจมีหลายลักษณะ รูปที่ 2.26 ขึ้นกับหน้าที่ในการผสมวัตถุดิบ

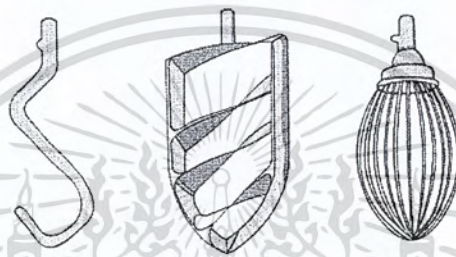


รูปที่ 2.24 เครื่องนวดสำหรับเพสต์ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



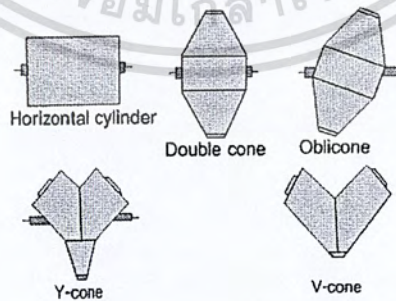
รูปที่ 2.25 หม้อผสมของโคและเพสต์ [16]



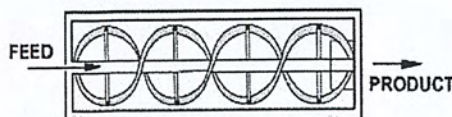
รูปที่ 2.26 ใบกวนแบบต่างๆ ของโคและเพสต์ [16]

3. เครื่องผสมสำหรับอาหารผงที่แห้งหรือของแข็งที่เป็นชิ้น (particles and powders mixers)

ลักษณะของเครื่องผสมชนิดนี้คือ การแทนที่ของผสมส่วนหนึ่งด้วยของผสมส่วนอื่นเครื่องที่ง่ายที่สุดซึ่งเหมาะสำหรับการผสมคือ การทำให้อาหารกลิ้งไปมา อย่างไม่รู้ทิศทาง เครื่องชนิดนี้ไม่ได้ใช้เพื่อทำให้อุณหภูมิที่เกาะกันเป็นกลุ่ม (agglomerates) แยกออกจากกัน แบบที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมคือ เครื่องผสมแบบดับเบิลโคลอน (double-cone blender) ดังแสดงในรูปที่ 2.27 ซึ่งประกอบด้วยกรวย 2 อันยึดให้ติดกันและทำให้หมุนเพื่อทำการผสมอาจมีการใช้แผ่นกั้นด้านในร่วมด้วย



รูปที่ 2.27 รูปร่างของเครื่องผสมแบบที่ทำให้เกิดการกลิ้งไปมา [16]



รูปที่ 2.28 แผนภาพของเครื่องผสมริบบอน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเพื่อการศึกษาค้นคว้า ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องผสมของแข็งอีกชนิดหนึ่งซึ่งภาชนะจะอยู่นิ่ง และระยะทางที่สารเคลื่อนที่เกิดจากอุปกรณ์ที่อยู่ด้านใน เช่น เครื่องผสมริบบอนดังแสดงในรูปที่ 2.28 ซึ่งมีสกรู 2 ตัวยึดอยู่ที่เพลาชั่งหมุน สกรูตัวหนึ่งอยู่ด้านซ้ายและอีกตัวอยู่ด้านขวา ขณะที่เพลาหมุน อนุภาคของอาหารก็จะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้การผสมเกิดขึ้น

2.9.6 การติดตั้งเครื่องกวน

เครื่องกวนสามารถติดตั้งได้ใน 3 ลักษณะด้วยกัน คือ

1. **Top entry** เครื่องกวนถูกติดตั้งอยู่ด้านบนของถังเปิด (open tank) หรือถังปิด (closed tank) โดยเพลางจะอยู่ในแนวตั้งและประกอบด้วยใบกวนหนึ่งชั้น หรือหลายชั้น นอกจากนี้เครื่องกวนสามารถติดตั้งที่ศูนย์กลางถึงพร้อมแผ่นกั้น (in center with baffles) หรือติดตั้งเยื้องศูนย์กลางโดยไม่มีแผ่นกั้น (off center without baffles) รวมทั้งการติดตั้งในแนวเอียงที่ขอบถังโดยไม่มีแผ่นกั้นด้วย (inclined without baffles)

2. **Side entry** เครื่องกวนถูกติดตั้งที่ข้างถัง โดยเพลางจะอยู่ในแนวนอนและใบกวนแบบ axial flow รวมทั้งต้องมี seal ซึ่งเป็นตัวป้องกันไม่ให้ของเหลวรั่วไหลออกนอกถังด้วย

3. **Bottom entry** เครื่องกวนถูกติดตั้งที่ก้นถัง โดยเพลางจะอยู่ในแนวตั้ง ใช้ใบกวนได้ทั้งแบบ axial flow และ radial flow เหมาะสำหรับการกวนของเหลวที่มีระดับค่อนข้างต่ำหรือมีพื้นที่จำกัดในการติดตั้ง ทั้งนี้ต้องมี seal ซึ่งมีตัวป้องกันไม่ให้ของเหลวรั่วไหลออกนอกถังเหมือน side entry

2.10 ทฤษฎีเกี่ยวกับค่าสี [17]

สี แสดงถึงคุณภาพของอาหารและผลิตผลทางการเกษตร โดยตรง เป็นปัจจัยที่สำคัญซึ่งส่งผลต่อคุณภาพการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภค ถ้าสีของอาหารหรือผลิตผลทางการเกษตรผิดปกติ ผู้บริโภคส่วนใหญ่จะไม่ยอมรับ และอาจจะไม่คำนึงถึงคุณภาพด้านอื่นต่อไป เช่น กลิ่น รสชาติ หรือเนื้อสัมผัส สีมีบทบาทที่สำคัญต่ออาหารทั้งในรูปของสดและแปรรูป ใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น บอกรวมแก่ – อ่อนของผักผลไม้ บอกรการเสื่อมคุณภาพเนื่องจากจุลินทรีย์ การเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น การเกิด browning reaction เนื่องจากกระบวนการแปรรูป เช่น การใช้ความร้อน ความเย็น สารเคมี การสกัด สีคล้ำของรอยชำที่เกิดจากการกระแทกระหว่างการขนส่ง เนื่องจากสีเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับประสาทสัมผัสและความนึกคิดจดจำของมนุษย์ สีจึงมีผลทางด้านจิตวิทยา โดยเฉพาะกับอาหาร สีของอาหารมีอิทธิพลทางด้านจิตวิทยากับผู้บริโภค เนื่องจากมีผลกับการยอมรับและไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์อาหารโดยตรง สีจะเป็นตัวดึงดูดให้ผู้บริโภคเกิดความสนใจความประทับใจหรือไม่ยอมรับอาหารได้ในทันที สีของอาหารมีอิทธิพลต่อความรู้สึกต่อกลิ่นรสและความเข้มข้นของรสอาหาร เช่น น้ำหวานที่มีสีแดง ผู้บริโภคคาดหวังว่าจะมีรสและกลิ่นสตอเบอร์รี่ หรือ กลิ่นสละ ในขณะที่กาแฟที่มีสีเข้มกว่าถูกคาดหวังว่าจะมีรสขมมากกว่ากาแฟที่มีสีอ่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1 คุณสมบัติทางกายภาพของสี

สีของอาหารเป็นคุณสมบัติทางกายภาพประการหนึ่งที่แตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ เช่น คุณสมบัติทางเรขาคณิต คุณสมบัติเชิงกล คุณสมบัติทางความร้อน ทั้งนี้ก็เนื่องจากสีเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการรับรู้สัญญาณ ในรูปของคลื่นแสงที่ตกกระทบตามนุษย์ และสัญญาณผ่านประสาทตาไปยังสมองและแปลงเป็นคำสีต่างๆ ตามที่แต่ละบุคคลมีอยู่ในความทรงจำ ในทางกายภาพสีมีนิยามว่า “สีเป็นพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ” ซึ่งพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนออกมาต้องอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 380 – 770 nm มนุษย์จึงจะมองเห็นสีได้

2.10.2 การมองเห็นสี

มนุษย์สามารถมองเห็นสีและแยกแยะสีที่แตกต่างกันได้มากกว่า 10 ล้านสี การเห็นสีของมนุษย์เป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อน เพราะนอกจากจะเกิดการตอบสนองถึงกระตุ้นในรูปของพลังงานแสงช่วงที่ตามองเห็นแล้ว ยังมีอิทธิพลอื่นมาร่วมด้วย เช่นสภาพจิตใจ อารมณ์ของผู้มองเห็นสี สภาพแวดล้อมของสี แสงเป็นต้น เมื่อช่วงแสงที่ตามองเห็นได้สะท้อนออกมาจากวัตถุ สัญญาณแสงจะตกกระทบที่เรตินาในตามนุษย์ ในเรตินาจะมีเซลล์ที่ไวต่อแสงอยู่ 2 ชนิดกระจายอยู่ ชนิดแรกเป็นเซลล์รูปแท่ง (rod cell) ซึ่งไวต่อการรับรู้แสงในความมืดความสว่าง อีกชนิดหนึ่งคือเซลล์รูปกรวย (cone cell) ที่ไวต่อการรับแสงสี เซลล์รูปกรวยบนเรตินามีอยู่ 3 คู่ คู่หนึ่งไวต่อการรับแสงสีแดง คู่ที่สองไวต่อการรับแสงสีเขียว คู่ที่สามไวต่อการรับแสงสีน้ำเงิน แสงที่มากกระตุ้นเซลล์รูปกรวยจะส่งไปยังสมอง แปลงสัญญาณเป็นสีต่างๆ ตามที่บุคคลมีอยู่ในความทรงจำ

2.10.3 ปัจจัยของการมองเห็นสี มี 3 ปัจจัยสำคัญ ได้แก่

1. แหล่งกำเนิดแสง สีจะเปลี่ยนเมื่อต้นกำเนิดแสงเปลี่ยน จึงจำเป็นต้องใช้ต้นกำเนิดแสงมาตรฐานที่ CIE กำหนดไว้ได้แก่

- แหล่งกำเนิดมาตรฐาน A (Standard Illuminant A) เป็น incandescent lamp หรือ Tungsten lamp มีอุณหภูมิเท่ากับ 2856 K

- แหล่งกำเนิดมาตรฐาน B (Standard Illuminant B) เป็น Mean Noon sunlight มีอุณหภูมิเท่ากับ 500 K

- แหล่งกำเนิดมาตรฐาน C (Standard Illuminant C) เป็น Average daylight หรือ Cloudy daylight โดยมีค่าใกล้เคียงกับ North – sky daylight มีอุณหภูมิเท่ากับ 6800 K

- แหล่งกำเนิดมาตรฐาน D (series Standard Illuminant D) เป็น Natural daylight มีอุณหภูมิเท่ากับ 6500 K

2. คุณลักษณะทางเคมีและทางกายภาพของวัสดุ เช่น การส่องผ่านของแสง การสะท้อนแสง

3. Spectral sensitivity properties ของตา

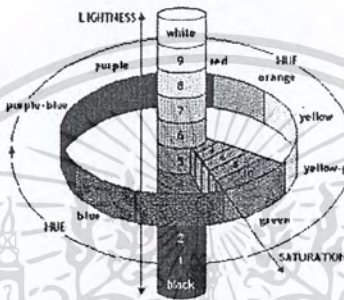
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.4 ระบบการวัดสี

การวัดค่าของสีจะระบุค่าสีของวัตถุเป็น 3 ค่า เพื่อความชัดเจนและสมบูรณ์ที่สุด ค่าของสีทั้ง 3 ค่าดังกล่าว จะมีหน่วยต่างกันตามระบบการวัดที่แตกต่างกัน ระบบการวัดสีที่นิยม แบ่งได้ 3 ระบบ ได้แก่

1. Munsell Color System

ในปี 1915 Albert Munsell สร้างระบบสีมาตรฐานเพื่อใช้ในงานด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เป็นวิธีการบอกค่าสีโดยใช้หลักจิตวิทยา การแทนค่าสีโดยใช้ระบบนี้ใช้ค่า 3 ค่า ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 Munsell color dimensions [17]

ค่าทั้ง 3 ค่า ได้แก่ Hue Value และ Chroma มีรายละเอียดดังนี้

Hue (เฉดสี) คือชื่อของสีหลัก แบ่งเป็นสีแตกต่างกันทั้งสิ้น 100 สี จัดเป็นกลุ่มดังนี้

- Principle Hues มี 5 สี คือ แดง (R) เหลือง (Y) เขียว (G) น้ำเงิน (B) ม่วง (P)

- Intermediate Hues มี 5 สี เป็นสีผสมของสีหลัก ได้แก่ สีเหลืองแดง (YR) สีเขียวเหลือง (GY)

สีน้ำเงินเขียว (BG) สีม่วงน้ำเงิน (PB) สีม่วงแดง (RP)

- Second Intermediate Hues มี 10 สี เป็นสีผสมระหว่าง Principle Hue กับ Intermediate Hue

- Special Intermediate Hues มี 80 สี เป็นสีที่อยู่ระหว่าง Second Intermediate Hues, Principle

- Hue และ Intermediate Hue โดยแบ่งเป็นช่วงละ 10 ส่วนเท่าๆ กัน

Value คือค่าแสดงความสว่างของสี (lightness) หรือปริมาณแสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุ ถ้าปริมาณ

แสงสะท้อนมีมากจะทำให้เห็นสีสว่าง (light color) ถ้าปริมาณแสงสะท้อนออกมาน้อยจะทำให้เห็นสีเข้ม

หรือมืด (dark color) Value มีค่าตั้งแต่ 0 = black (หมายถึงวัตถุดำสมบูรณ์) ถึง 10 = white

(หมายถึง วัตถุขาวสมบูรณ์)

Chroma คือค่าที่แสดงความบริสุทธิ์ (purity) ของสี สีที่บริสุทธิ์มากที่สุด คือสีที่ไม่มีแสงสีเทาผสมเลย ซึ่งได้แก่สีหลัก (Hue) ทั้ง 100 สี แบ่งสเกลเป็น 0 ถึง 18 เป็นการวัดความแตกต่างของสีหลักจากสีเทาที่ lightness เดียวกัน การแทนค่าสีในระบบ Munsell ในระบบ Munsell จะแทนค่าสีด้วยสัญลักษณ์ 3 ค่า

เรียงตามลำดับกัน คือ Hue Value/Chroma เช่น 5R 2.6/13 เป็นสีมาตรฐานของผลิตภัณฑ์มะเขือเทศกระป๋อง

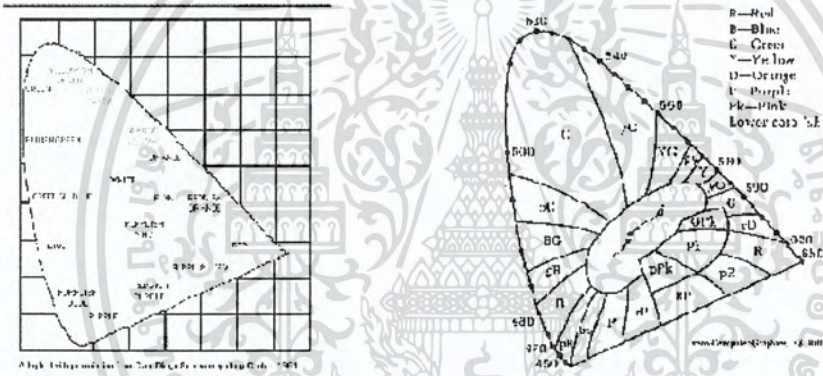
โดย 5R คือค่า Hue หมายถึง สีแดง ค่า Value เท่ากับ 2.6 ซึ่งจัดเป็น dark Value และ Chroma เท่ากับ 13

ไม่หมายถึงสีแดงนี้มีความบริสุทธิ์มาก การวัดค่าสีในระบบ Munsell ใช้วิธีเปรียบเทียบจับคู่โดยระบบ

Munsell จะมีแผ่นเทียบสีมาตรฐานซึ่งมีสีแตกต่างกัน 1225 สี การวัดค่าทำได้โดยให้ผู้วัดเทียบสีของอาหารให้เหมือนกับแผ่นสีมาตรฐาน แล้วจดค่าสัญลักษณ์ในระบบ Munsell เพื่อกำหนดค่าสีมาตรฐาน ตัวอย่างแผ่นผังแสดงสีมาตรฐานของระบบ Munsell ชนิด 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.29

2. CIE system (Commission International de l' Eclairage) หรือ (International Commission on Illumination, ICI)

เป็น Trichromatic system ที่อาศัยพื้นฐานที่ว่าสีใดๆ เกิดจากการผสมแม่สีสเปกตรัม (primary spectrum) 3 สีเข้าด้วยกัน คือ สเปกตรัมสีแดง สเปกตรัมสีเขียว และสเปกตรัมสีน้ำเงิน โดยใช้สัญลักษณ์ X,Y,Z แทนสเปกตรัมสีทั้ง 3 ตามลำดับ ค่า X,Y,Z วัดได้ด้วยเครื่องมือวัดสีระบบ Tristimulus colorimeter การแปลงค่า X,Y,Z ให้อยู่ในรูปค่าคู่ลำดับ (X,Y) เรียกว่าเป็นคู่ลำดับแสดงสี(chromaticity coordinates) ซึ่งใช้กำหนดตำแหน่งของคู่ลำดับ แสดงตำแหน่งของสีบนแผนภาพแสดงสี ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แผ่นผังแสดงสีมาตรฐานของระบบ CIE [17]

เพื่อให้การวัดสีมีความถูกต้องแม่นยำ CIE ได้กำหนดมาตรฐานของการวัด เพื่อกำจัดตัวแปรที่มีผลต่อความผิดพลาดในการวัดสี ได้แก่ กำหนด standard illuminant กำหนดสภาวะของการวัด โดยกำหนดให้มุมการมองที่ 2° กำหนดหน่วยของการวัดที่เหมาะสมในการบอกค่าสี และกำหนด standard observer

หน่วยการบอกค่าสี (Mathematical Unit in CIE)

CIE กำหนดแม่สีในอุดมคติ (imaging primaries) ขึ้นมาแทนแม่สีที่มีอยู่จริง (แดง เขียว น้ำเงิน) โดยใช้สัญลักษณ์เป็น X,Y,Z ซึ่งเรียกว่า “tristimulus values” โดยที่ X: ปริมาณสีแดงที่นำมาผสม Y: ปริมาณสีเขียวที่นำมาผสม Z: ปริมาณสีน้ำเงินที่นำมาผสม [และ Y ยังบอกถึงความสว่าง (brightness) ด้วย ซึ่งเทียบได้กับค่า Value ในระบบ Munsell]

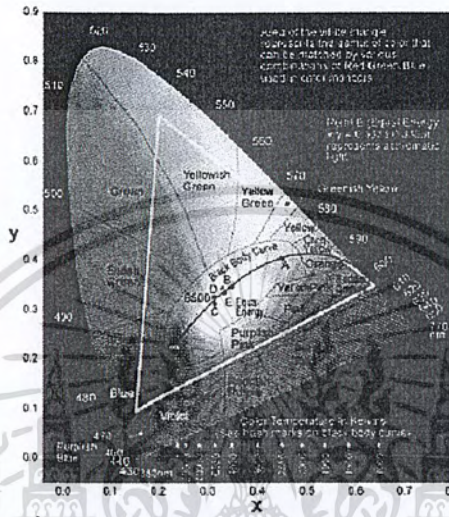
$$\text{โดยที่ } x = \frac{X}{(X+Y+Z)} \quad y = \frac{Y}{(X+Y+Z)} \quad z = 1 - (x + y)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์อื่นนอกเหนือจากนี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกค่า xyz นี้ว่า chromaticity coordinate หรือ trichromatic coefficient หรือ color coordinate

$$\text{ดังนั้น } x+y+z = 1$$

เมื่อนำค่า x และ y ในแต่ละ wavelength มา plot กราฟ โดยให้แกน Y แทนค่า y และแกน X แทนค่า x จะได้กราฟดังรูปที่ 2.30 หรือ 2.31 เรียกว่า Chromaticity diagram



รูปที่ 2.31 ตัวอย่าง chromaticity diagram [17]

โดย chromaticity diagram จะบอกถึง (1) ตำแหน่งของสเปกตรัมรอบๆ เส้นรูปเกือบม้า เริ่มจากที่ 400 nm (สีม่วง) ที่มุมล่างซ้ายวนขึ้นบนแล้วกวกลงไปจนถึง 700 nm (สีแดง) ที่ด้านขวา (2) เส้นเชื่อมที่ลากระหว่างสีม่วงและสีแดง (3) ตำแหน่งของสีขาว (illuminant points) ใกล้กึ่งกลางของ diagram

CIE LAB Color Space

ในปี 1976 ได้กำหนด uniform color space ขึ้นมาเพื่อลดปัญหาที่เกิดขึ้นกับ CIE Yxy color space เนื่องจากสีที่ต่างกันในระยะเท่ากัน ใน Yxy color space ให้ความแตกต่างของสีไม่เหมือนกัน ทั้งนี้เนื่องจาก scale ที่ใช้ไม่ uniform ระบบใหม่ที่ CIE กำหนดขึ้น คือ L*, a*, b* color space โดยที่แกน L* จะบ่งบอกถึง lightness ของสี โดยมีค่าตั้งแต่ 0 (สีดำ) ถึง 100 (สีขาว) แกน a* จะบ่งถึงสีแดงและสีเขียว โดยค่าเป็นบวกก็จะเป็นสีแดงมากขึ้น และถ้าค่าเป็นลบก็จะเป็นสีเขียวมากขึ้น ส่วนแกน b* จะบ่งถึงสีเหลืองและสีน้ำเงิน โดยค่าเป็นบวกก็จะเป็นสีเหลือง และถ้าค่าเป็นลบก็จะเป็นสีน้ำเงินมากขึ้น

โดยค่า L*, a*, b* สามารถคำนวณได้จากค่าของ X,Y,Z จากสมการดังนี้

$$L^* = 116\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16$$

$$a^* = 500\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$b^* = 200\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}}$$

โดยที่ X_n, Y_n, Z_n คือ ค่า tristimulus values ของ white point แต่มีข้อจำกัดสำหรับการใช้สมการนี้เมื่อค่า X, Y, Z ที่มีค่าน้อยมากๆ

CIE L*a*b* Color Space

ในระบบ CIE LAB นั้นไม่มีค่าในส่วนที่แสดงค่าของ tristimulus value หรือ chromaticity coordinate ตามที่ CIE ได้ตั้งไว้ในปี 1931 ดังนั้นทาง CIE จึงได้แปลงระบบ CIE LAB ให้เป็นระบบ cylindrical coordinate อันจะทำให้การอธิบายสีเหมือนกับระบบดั้งเดิม โดย L^* จะแสดงค่า lightness, C^* แสดงค่า chroma, และ h แสดงค่า hue angle โดยค่า L^* นั้นเหมือนกับ L^* ในระบบ $L^*a^*b^*$ color space สำหรับค่า C^* เริ่มจาก 0 ซึ่งเป็นค่าที่ศูนย์กลางและเพิ่มมากขึ้นตามระยะที่ห่างจากศูนย์กลางมากขึ้น สำหรับ h เป็นค่ามุมที่ทำกับแกน $+a^*$ โดยค่า 0° เท่ากับ $+a^*$ (red), ค่า 90° เท่ากับ $+b^*$ (yellow), ค่า 180° เท่ากับ $-a^*$ (green) และค่า 270° เท่ากับ $-b^*$ (blue) ซึ่งค่า C^* และ h สามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Chroma, } C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$\text{Hue angle, } h = \tan^{-1}(b^* / a^*)$$

3. Hunter system

เป็น Trichromatic system โดยมี Tristimulus values คือ ค่า L (lightness), a , b ดังแสดงในรูปที่ 4 ค่า Hunter values และค่าทั้ง 3 ใน CIE system สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ช่วยคำนวณ

L เป็นค่าความสว่าง มีค่าตั้งแต่ 0 – 100 ค่า L เท่ากับ 0 เป็นสีที่มืดที่สุด ค่า L เท่ากับ 100 เป็นสีสว่างมากที่สุด เปรียบได้กับค่า Y ในระบบ CIE หรือ ค่า Value ในระบบ Munsell

a เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีแดงหรือความเป็นสีเขียว โดยที่ค่า a เป็นบวกแสดงความเป็นสีแดง ค่า a เป็นลบแสดงความเป็นสีเขียว ค่า a เทียบได้กับค่า x, y ในระบบ CIE

b เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน ค่า b เป็นบวกแสดงความเป็นสีเหลือง ค่า b เป็นลบแสดงความเป็นสีน้ำเงิน ค่า b เทียบได้กับค่า z, y ในระบบ CIE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การที่ค่า a และ b มีทั้งค่าบวกและลบ ทำให้โครงสร้างของระบบถูกแบ่งเป็น 4 ส่วน (quadrant) ได้แก่

Quadrant 1 yellow – green -a, +b

Quadrant 2 yellow – red +a, +b

Quadrant 3 red – blue +a, -b

Quadrant 4 blue – green -a, -b

$$Y = 0.01(L^2)$$

$$X = \frac{0.1aL + 0.175(L^2)}{17.85}$$

$$Z = \frac{0.07(L^2) - 0.1(Lb)}{5.929}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลองทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่าน จากน้ำมันร้อน

3.1 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อน จะทดลอง ที่อุณหภูมิน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวนต่าง ๆ กัน โดยทดลองที่อุณหภูมิของน้ำมัน 5 ระดับ (43.75, 50, 65, 80 และ 86.2 °C) ความเร็วรอบของใบกวน 5 ระดับ (88.75, 125, 212.5, 300 และ 336.24 รอบต่อนาที) ที่ความดันสุญญากาศประมาณ 20-50 mmHg

3.2 วัสดุ

1. ทุเรียนพันธุ์หมอนทอง (*Durio zibethinus* L.CV.Mon Tong)
2. น้ำแข็งก้อน
3. น้ำมันพืช

3.3 องค์ประกอบของเครื่อง (รูปที่ 3.1)

1.) ชุดถังสุญญากาศ (ถังภายนอกใช้สำหรับบรรจุน้ำมันพืชมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 270 mm ถังภายในใช้สำหรับบรรจุเนื้อทุเรียนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 160 mm ฝาถังมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 230 mm (รูปที่ 3.2)

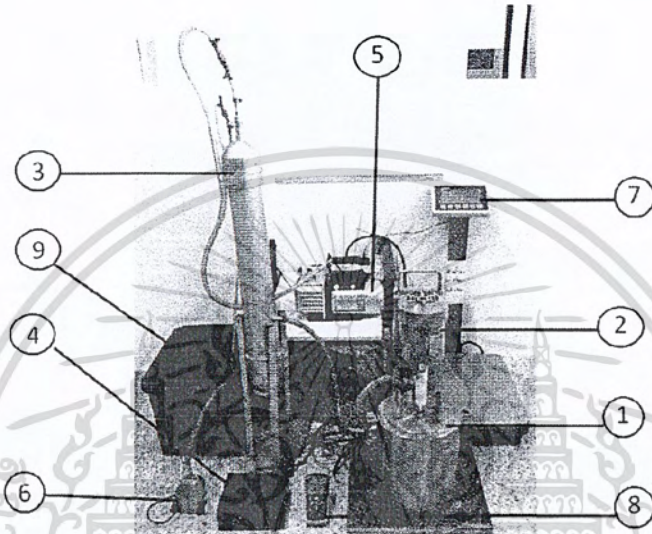
- 2.) มอเตอร์ (Super Line, Mitsubishi, Japan) 3 เฟส, ความเร็วรอบ 1400 rpm ความถี่ 50 Hz.
- 3.) Condensor
- 4.) ฮีทเตอร์ (3,000 watt)
- 5.) ปั๊มสุญญากาศ (2TW-4E, Vacuum Pump, Genvac, ¼ Hp.)
- 6.) ปั๊มน้ำ (life Tech 220 v., 50 Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (MFA, WUE, Taiwan , ความละเอียด 0.01 g)

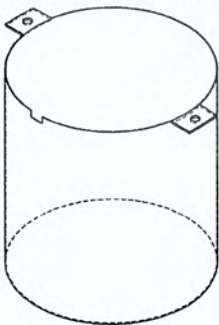
8.) Thermocouple (FLUKE-52-2, 50 HZ, China)

9.) ถังพลาสติกใส่น้ำแข็ง



รูปที่ 3.1 เครื่องทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อน

ถังภายนอก



ถังภายใน



ใบกวน



รูปที่ 3.2 ชุดถังสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- | | |
|---|-----------------|
| 1.) บีกเกอร์ขนาด 300 มิลลิลิตร | 1 บีกเกอร์ |
| 2.) petri dish | 10 ชุด/การทดลอง |
| 3.) ถังมือยาง | 3 คู่ |
| 4.) ถังมือหนัง | 1 คู่ |
| 5.) กระจกใส่น้ำแข็ง | 1 กระจก |
| 6.) ช้อน | 1 คัน |
| 7.) จาน | 1 ใบ |
| 8.) ถังชิป | 2 โหล |
| 9.) ถังเย็น | 2 โหล |
| 10.) Clamp Meter (322,FLUKE,USA.) (รูปที่3.3) | |



รูปที่ 3.3 Clamp Meter

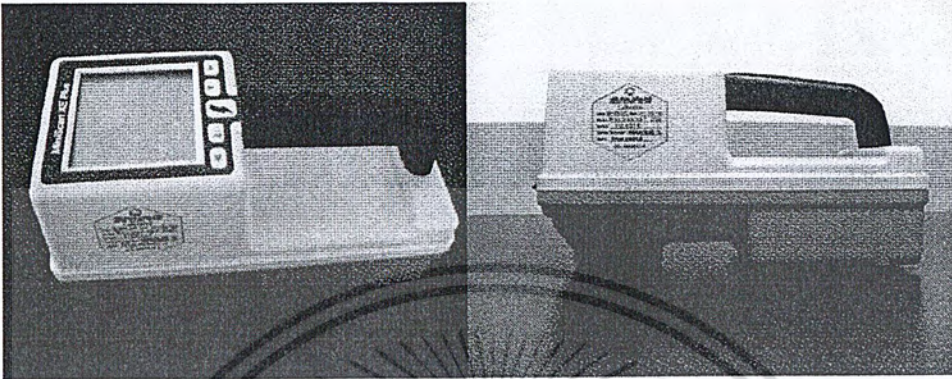
- 11.) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Shimadzu, Type Bx300, ความละเอียด 0.001 kg.) (รูปที่3.4)



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

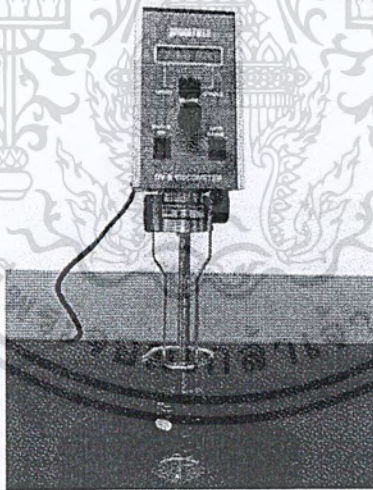
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12.) เครื่องวัดสี เครื่อง color meter รุ่น Miniscan XE Plus 45/0 LAV(Reston,USA.) (รูปที่3.5)



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดสี

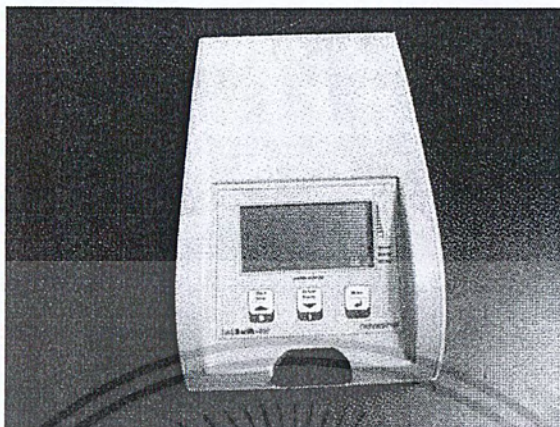
13.) เครื่องวัดความหนืด เครื่อง Rotational Viscometer รุ่น LVDV-E (Brook field ,USA.),Spindle No.s64 (รูปที่3.6)



รูปที่3.6 เครื่องวัดความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14.) เครื่องวัด Water Activity (LabSwift-aw, Novasina, Switzerland) (รูปที่ 3.7)



รูปที่ 3.7 เครื่องวัด Water Activity

15.) ตู้อบลมร้อน (Memmert, USA) (รูปที่ 3.8)



รูปที่ 3.8 ตู้อบลมร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวางแผนการทดลอง

ใช้โปรแกรม Unscrambler 9.8 (Camo, Norway) วางแผนการทดลอง แบบ Central composite โดยแบ่งได้เป็น 19 การทดลอง ซึ่งจะมีการทดลอง 9 สภาวะ สภาวะละ 2-3 ซ้ำ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 3.1 สภาวะในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อน ส่งผ่านจากน้ำมันร้อน

สภาวะที่	อุณหภูมิของน้ำมัน(°C)	ความเร็วรอบของใบกวน(rpm)
1	43.95	212.5
2	50.00	125.0
3	50.00	300.0
4	65.00	88.8
5	65.00	212.5
6	65.00	336.2
7	80.00	125.0
8	80.00	300.0
9	86.20	212.5

3.6 วิธีการเตรียมเนื้อทุเรียน

ใช้ทุเรียนพันธุ์หมอนทองที่สุกพอดีจากสวนทุเรียน อำเภอมะขาม จังหวัดจันทบุรี จำนวน 138 kg (ประมาณ 35-40 ผล) หลังเก็บเกี่ยว 1 วัน ถูกส่งมายังห้องปฏิบัติการสมบัติทางกายภาพ และวิศวกรรมของชีววัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร โดยใช้รถกระบะ

สำหรับการเตรียมเนื้อทุเรียนก่อนการทดลองทำโดยแกะเนื้อทุเรียนออกจากผลของทุเรียนและนำเมล็ดออก จากนั้นนำเนื้อทุเรียนปั่นให้ละเอียดแล้วนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ -8.5°C ก่อนที่จะนำไปทำการทดลอง

3.7 วิธีการทดลอง

1. ให้ความร้อนกับน้ำมันร้อน โดยตั้งอุณหภูมิของฮีทเตอร์ตามที่ต้องการ และรอจนกว่าจะได้ อุณหภูมิที่ต้องการ
2. เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการแล้ว ให้ใส่น้ำแข็งลงไปในถังที่เตรียมไว้เพื่อที่จะใช้ความเย็นแลกเปลี่ยน ความร้อนที่ Condenser
3. นำเนื้อทุเรียนใส่ไปในถังสุญญากาศแล้วติดตั้ง Thermocouple โดยให้ T_1 แสดงอุณหภูมิของ น้ำมันร้อน และ T_2 แสดงอุณหภูมิภายในถังสุญญากาศ
4. จากนั้นติดตั้งมอเตอร์กับ ไบควอน ปรับความเร็วรอบตามต้องการ แล้วนำชุดถังสุญญากาศวางบน เครื่องชั่งตลอดการทดลอง เพื่อติดตามการระเหยของน้ำที่เวลาต่างๆ
5. เปิดปั๊มสุญญากาศให้ได้ความดันสัมพัทธ์ประมาณ -720 ถึง -740 mmHg และปั้มน้ำ เพื่อให้ระบบ สุญญากาศทำงาน
6. ในระหว่างการทดลอง จะบันทึกค่าน้ำหนักของระบบ อุณหภูมิของน้ำมันร้อน และอุณหภูมิ ภายในถังสุญญากาศ ทุกๆ 1 นาที ตลอดการทดลองเพื่อติดตามการระเหยของน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป

3.8 วิธีการวัดคุณสมบัติของเนื้อทุเรียนเข้มข้น

3.8.1 การวัดค่าความชื้น (moisture content)

วัสดุและอุปกรณ์

1.) บีกเกอร์ขนาด 300 มิลลิลิตร	1	ใบ
2.) เนื้อทุเรียน(ก่อนและหลังการทดลอง)	20	กรัม
3.) เทอร์โมมิเตอร์	1	เครื่อง
4.) ตู้อบลมร้อน	1	เครื่อง
5.) petri dish	10	ชุด
6.) ถังมือหิ้ว	1	คู่
7.) เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ (Shimadzu, Type Bx300, ความละเอียด 0.001 kg.)	1	เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.) ชั่งน้ำหนัก petri dish
- 2.) นำเนื้อทุเรียน(ก่อนและหลังการทดลอง) ประมาณ 3 กรัม มาใส่ใน petri dish แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก
- 3.) นำ petri dish ที่ชั่งเสร็จแล้วไปใส่ในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C แล้วนำออกมาชั่งทุกๆ 6 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่แล้วนำไปหา moisture content
- 4.) บันทึกผล

3.8.2 การวัดค่า water Activity

วัสดุและอุปกรณ์

- | | | |
|--|---|---------|
| 1.) เครื่องวัด Water activity (LabSwift-aw, Novasina, Switzerland) | 1 | เครื่อง |
| 2.) ตลับใส่ทุเรียนสำหรับวัด Aw | 2 | อัน |
| 3.) เนื้อทุเรียน(ก่อนและหลังการทดลอง) | 5 | กรัม |

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.) นำเนื้อทุเรียนใส่ตลับสำหรับวัด Aw
- 2.) นำตลับที่ใส่เนื้อทุเรียนแล้ว มาใส่ในเครื่องวัด Water activity (LabSwift-aw, Novasina, Switzerland) เพื่อวัดค่า Aw
- 3.) บันทึกผลในตารางที่ 2 (ภาคผนวก ก.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกฏนำไปใช้

3.8.3 การวัดค่าความหนืด

วัสดุ และ อุปกรณ์

1.) บีกเกอร์ขนาด 300 มิลลิลิตร	2	ใบ
2.) เนื้อทุเรียน(ก่อนและหลังการทดลอง)	250	มิลลิลิตร
3.) เทอร์โมมิเตอร์	2	ชุด
4.) ขาดังเทอร์โมมิเตอร์	2	ชุด
5.) เครื่อง Viscometer (Brookfield รุ่น LV-DV-III PROGRAMMABLE RHEOMETER) 1 เครื่อง		
6.) หัวเข็มวัดค่าความหนืดเบอร์ s64	1	หัว
7.) นาฬิกาจับเวลา	1	เรือน

ขั้นตอนการทดลอง

- นำเนื้อทุเรียน (ก่อนและหลังการทดลอง) ที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส คนให้เข้ากันมาวัดค่าความหนืดด้วยเครื่อง Viscometer รุ่น Brookfield รุ่น LV-DV-III PROGRAMMABLE RHEOMETER
- โดยนำเนื้อทุเรียน (ก่อนและหลังการทดลอง) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 300 มิลลิลิตร ประมาณ 250 มิลลิลิตร
- เตรียมเครื่อง Viscometer โดยใช้หัววัดหมายเลข S64 ที่ความเร็วรอบ 1, 2, 3, 4, 5 rpm ตามลำดับ ใช้ตัวอย่างเพียงตัวอย่างเดียววัดซ้ำกัน 5 ซ้ำ
- อ่านค่า Viscosity (cp) โดยวัดความหนืดต่อเนื่องกัน 5 ค่า
- คำนวณหา flow behavior index (n) และ consistency index (k)
- บันทึกผลในตารางที่ 3 (ภาคผนวก ก)

3.8.4 การวัดค่าสี $L^*a^*b^*$

วัสดุ และ อุปกรณ์

- 1.) เครื่องวัดสี (Mini Scan XE Plus, Hunter Lab, USA) 1 เครื่อง

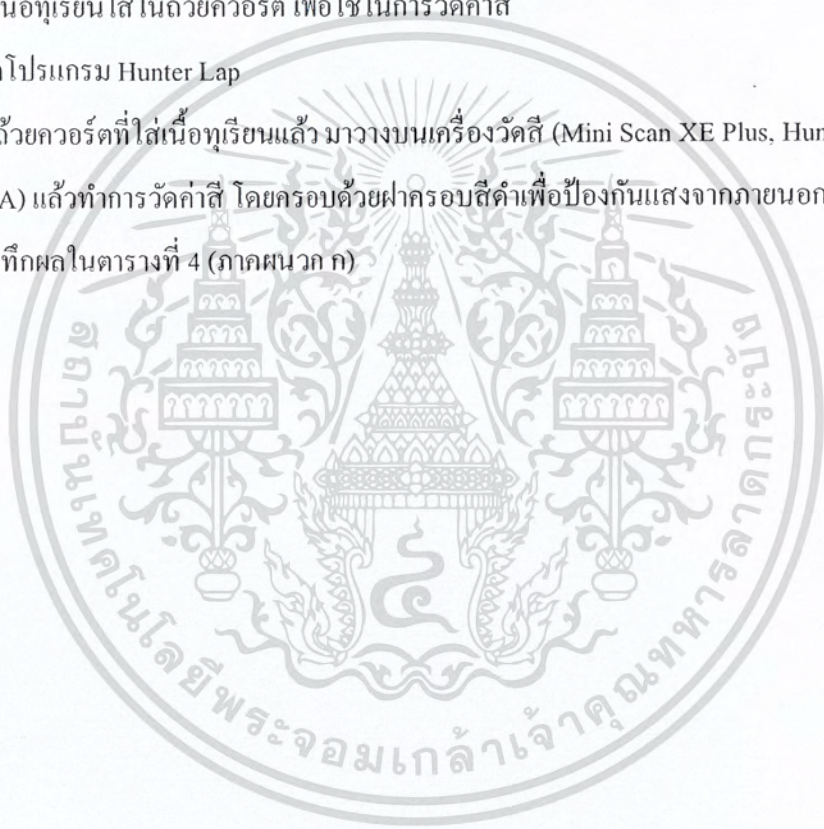
- 2.) เนื้อทุเรียน(ก่อนและหลังการทดลอง) 20 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.) Computer	1	ชุด
4.) ถ้วยควอร์ต	1	อัน

ขั้นตอนการทดลอง

- 1.) ติดตั้งเครื่องวัดสี (Mini Scan XE Plus, Hunter Lab, USA) เข้ากับ Computer
- 2.) นำเนื้อทุเรียนใส่ในถ้วยควอร์ต เพื่อใช้ในการวัดค่าสี
- 3.) เปิดโปรแกรม Hunter Lap
- 4.) นำถ้วยควอร์ตที่ใส่เนื้อทุเรียนแล้ว มาวางบนเครื่องวัดสี (Mini Scan XE Plus, Hunter Lab, USA) แล้วทำการวัดค่าสี โดยครอบด้วยฝาครอบสีดำเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกรบกวน
- 5.) บันทึกผลในตารางที่ 4 (ภาคผนวก ก)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

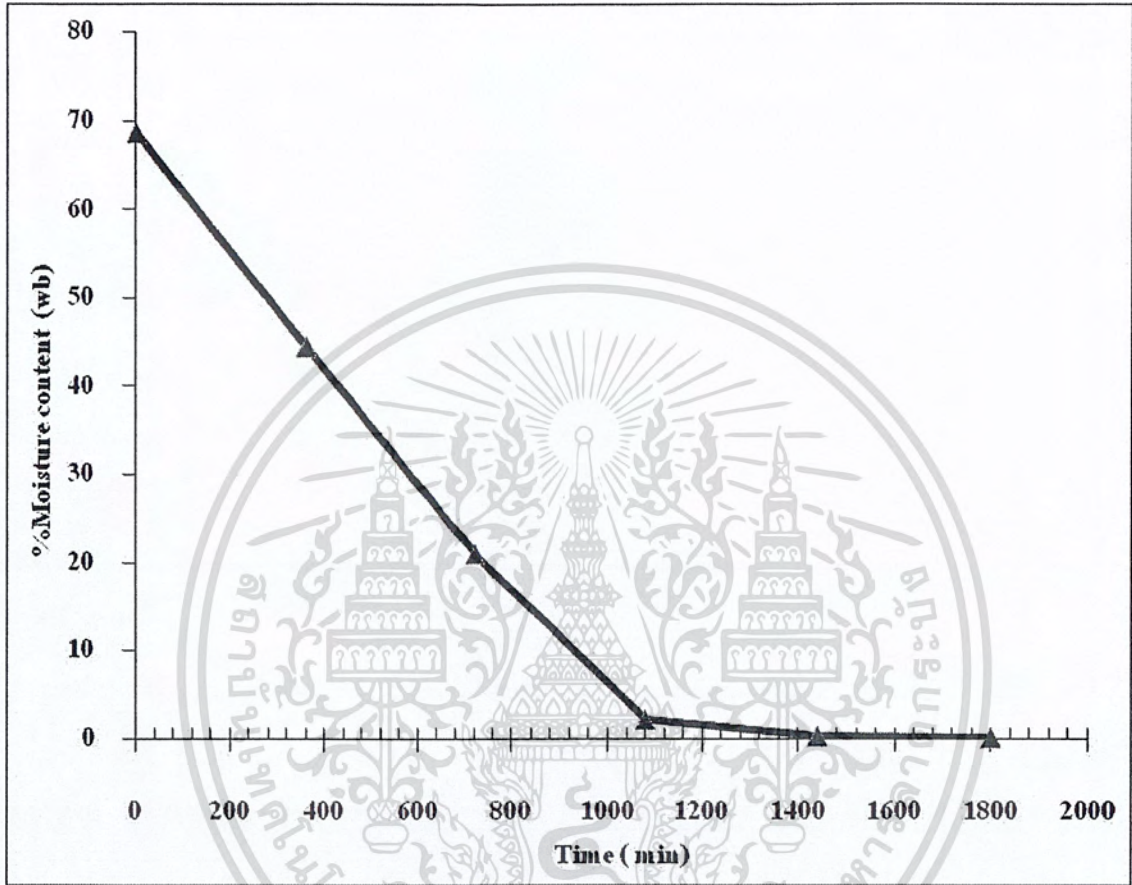
จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อนส่งผ่านจากน้ำมันร้อนที่อุณหภูมิน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวนต่างๆกัน โดยทดลองที่อุณหภูมิของน้ำมัน 5 ระดับ (43.75, 50, 65, 80 และ 86.20 °C) ความเร็วรอบของใบกวน 5 ระดับ (88.75, 125, 212.5, 300 และ 336.24 รอบต่อนาที) ที่ความดันสุญญากาศประมาณ 20-50 mmHg ดังตารางที่ 4.1 ซึ่งได้วัดสมบัติทางกายภาพเพื่อประเมินคุณภาพของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังการทดลอง (เนื้อทุเรียนเข้มข้น) ดังนี้คือ

ตารางที่ 4.1 สภาวะในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้น โดยใช้ระบบสุญญากาศและการให้ความร้อน ส่งผ่านจากน้ำมันร้อน

สภาวะที่	อุณหภูมิของน้ำมัน(°C)	ความเร็วรอบของใบกวน(rpm)
1	43.95	212.5
2	50.00	125.0
3	50.00	300.0
4	65.00	88.8
5	65.00	212.5
6	65.00	336.2
7	80.00	125.0
8	80.00	300.0
9	86.20	212.5

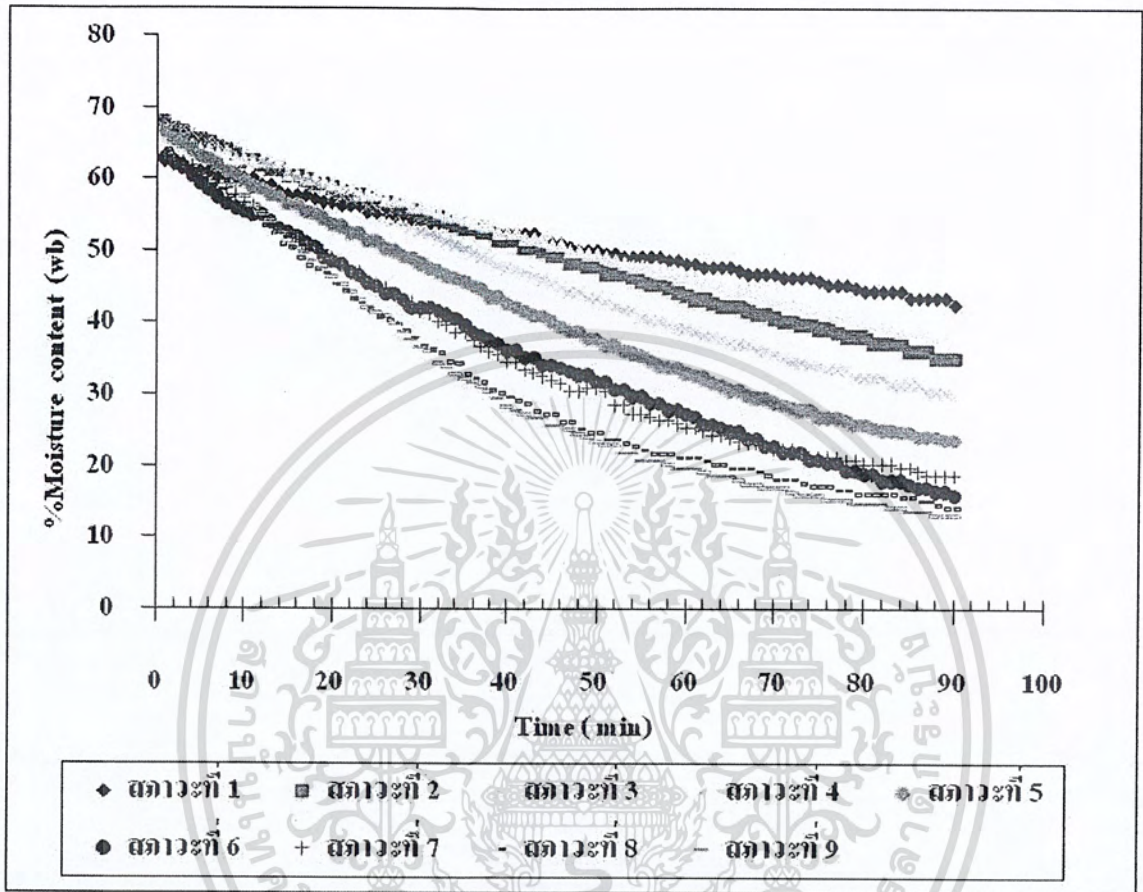
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การเปลี่ยนแปลงความชื้นฐานเปียกของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้น



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นฐานเปียกกับเวลาในการลดความชื้นตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

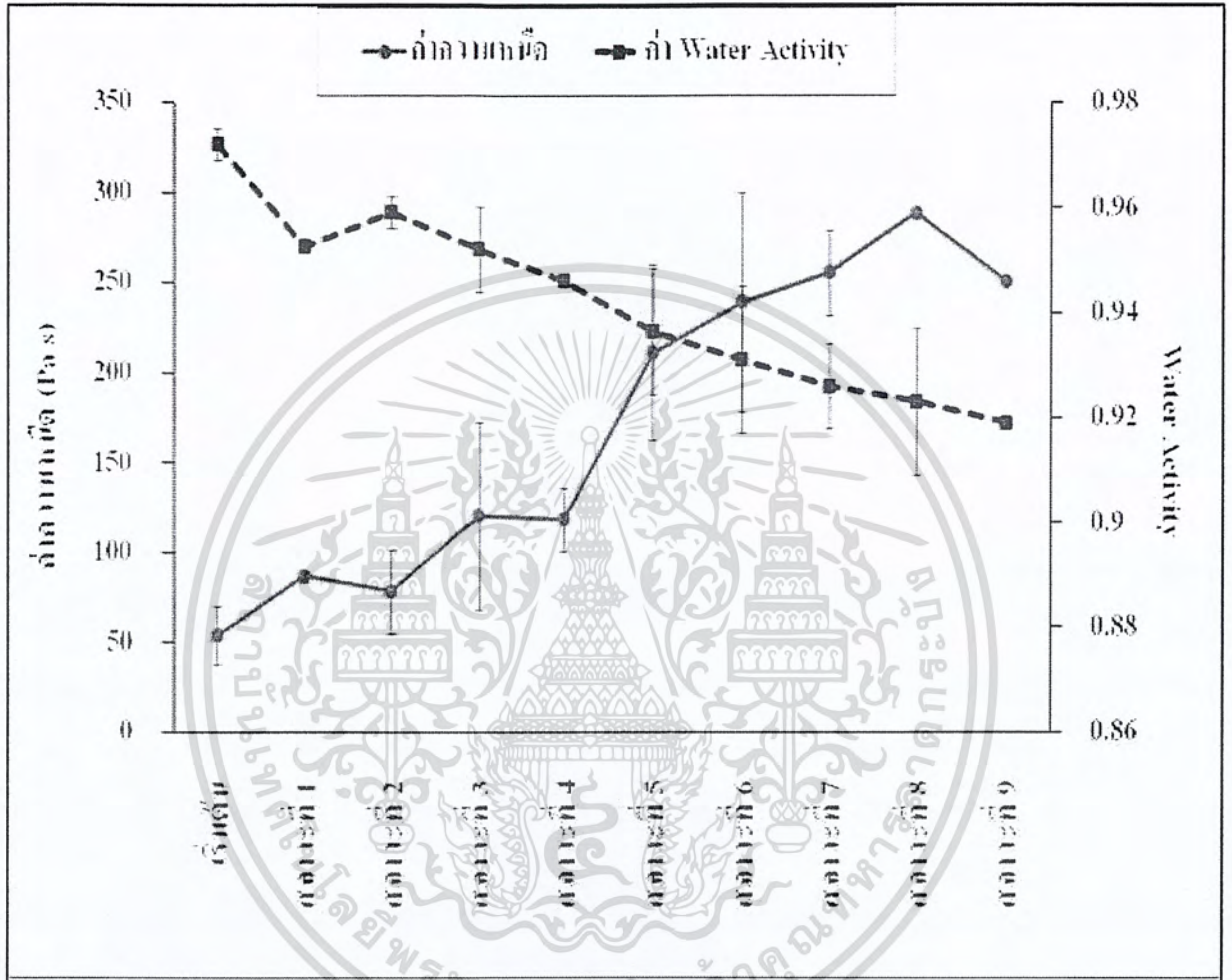
จากรูปที่ 4.1 ในช่วง 19 ชั่วโมง (1140 นาที) แรกค่าความชื้นฐานเปียกลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะลดลงไปอย่างช้าๆ



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นฐานเปียกกับเวลาในการลดความชื้นระบบสุญญากาศ
ที่สภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.2 พบว่าค่าความชื้นฐานเปียกมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วตามสภาวะความรุนแรงของอุณหภูมิน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวน และสังเกตได้ว่าใช้เวลาในการลดความชื้นน้อยกว่า การลดความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (รูปที่ 3.8)

4.2 การเปลี่ยนแปลง Water activity และความหนืดของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้น

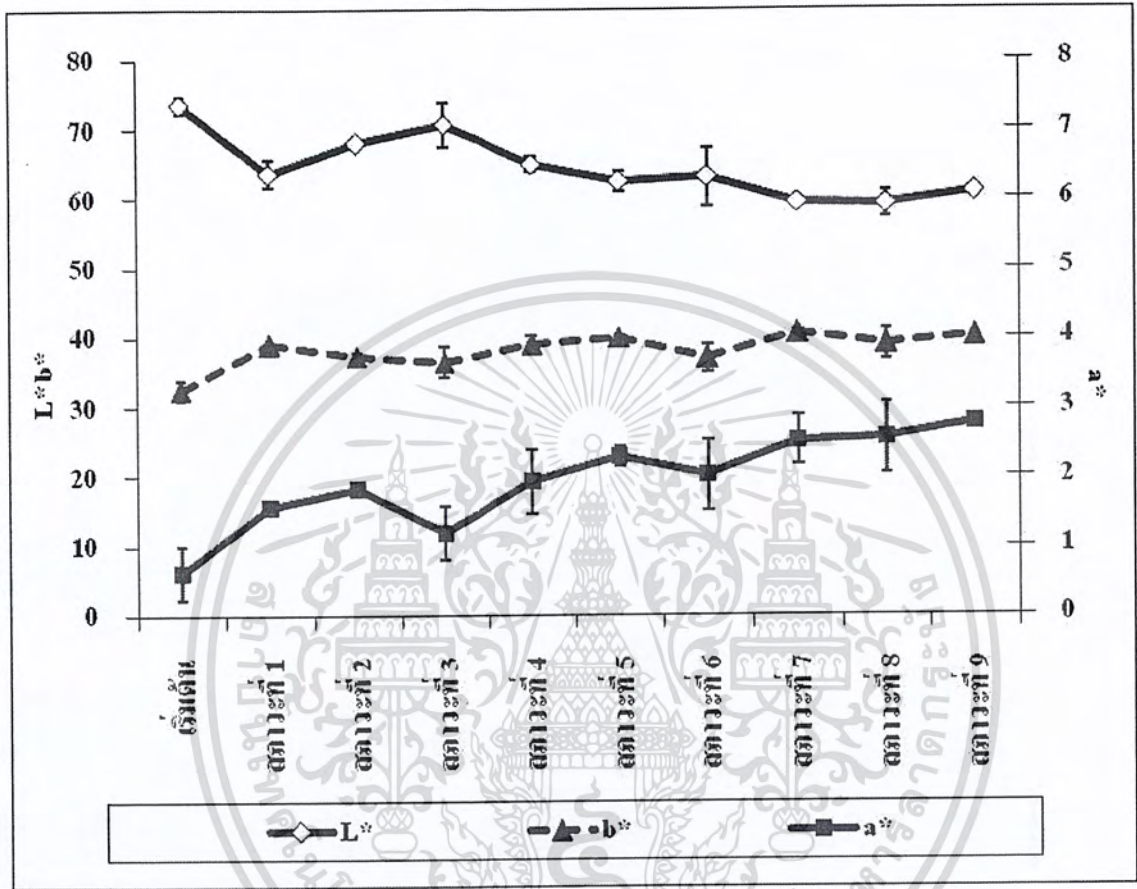


รูปที่ 4.3 ค่า Water activity และค่าความหนืดของเนื้อทุเรียนที่สภาวะต่างๆ

จากรูปที่ 4.3 แสดงค่า Water activity และค่าความหนืดของเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ เมื่อใช้ เวลา 90 นาที เทียบกับเนื้อทุเรียนก่อนการทดลองมีค่าเริ่มต้น เท่ากับ 0.972 พบว่า ค่า Water activity ของเนื้อ ทุเรียนเข้มข้น อยู่ในช่วง 0.919-0.959 มีแนวโน้มลดลง เมื่อสภาวะของอุณหภูมิของน้ำมันและความเร็วรอบ ของใบกวนรุนแรงขึ้น ส่วนค่าความหนืดจะให้ผลตรงข้ามกับ Water activity โดยความหนืดเริ่มต้นมีค่า เท่ากับ 53.609 Pa s ส่วนค่าความหนืดของเนื้อทุเรียนเข้มข้นจะอยู่ระหว่าง 78.120- 288.300 Pa s ซึ่งจะมีค่า เพิ่มขึ้น ตามความรุนแรงของอุณหภูมิน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวนและพบว่า ลักษณะพฤติกรรม การไหลของทุเรียนเป็นของไหลแบบ ซูโดพลาสติก(Pseudoplastic fluids) ลักษณะของการไหลประเภทนี้ ค่า ความหนืดมีค่าลดลงเมื่อแรงเฉือนเพิ่มสูงขึ้น ของไหลประเภทเดียวกันกับ fruit puree, มายองเนส, มัสตาด และ ซุปผัก

เอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การเปลี่ยนแปลง ค่า สี ของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้น



รูปที่ 4.4 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของเนื้อทุเรียนที่สถานะต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 แสดงค่าสี (L^* , a^* , b^*) ที่สถานะต่างๆ จะเห็นว่าค่า L^* ซึ่งบ่งบอกถึงค่าความสว่าง L^* ของเนื้อทุเรียนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 73.66 ส่วนค่าของเนื้อทุเรียนเข้มข้นอยู่ระหว่าง 62.55-70.70 พบว่า L^* มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อสถานะการทดลองรุนแรงขึ้น โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น ส่วน ค่า a^* ซึ่งค่าที่เป็นบวกจะบ่งบอกความเข้มของสีแดง ค่าลบแสดงถึงสีเขียว ซึ่งค่า a^* ที่มีค่าเป็นบวกจะเปลี่ยนแปลงไปมาก (ช่วง 1.19-2.79) เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น เท่ากับ 0.62 และค่า b^* ค่าที่เป็นบวกแสดงถึงสีเหลือง ค่าลบแสดงถึงสีน้ำเงิน ซึ่งค่า b^* ของเนื้อทุเรียนเริ่มต้น เท่ากับ 32.52 ส่วนของเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สถานะการทดลองต่างๆ อยู่ในช่วง 36.54-40.57 ซึ่งเป็นค่าสีเหลือง ค่า b^* มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศ ทำให้ค่าความสว่างและค่าสีเหลืองของเนื้อทุเรียนเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพกับความเร็วยรอบใบกวนและอุณหภูมิของน้ำมันร้อน

การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้สมการความสำคัญแบบ Multiple linear equation ซึ่งมีตัวแปรต้น 2 ตัว คือ ความเร็วยรอบของใบกวนและอุณหภูมิของน้ำมันร้อน จะได้สมการดังนี้

$$\text{Time} = 28.848 - 3.25 \times 10^{-2} \text{rpm} - 0.828T \quad (R=0.91) \quad (1)$$

$$\%MC = 25.525 - 3.16 \times 10^{-2} \text{rpm} - 0.675T \quad (R=0.946) \quad (2)$$

$$A_w = 0.938 - 4.53 \times 10^{-5} \text{rpm} - 9.215 \times 10^{-4}T \quad (R=0.903) \quad (3)$$

$$\text{Viscosity} = 1.844 \times 10^5 + 350.57 \text{rpm} + 4.831 \times 10^3 T \quad (R=0.916) \quad (4)$$

$$L' = 63.896 - 1.957 \times 10^{-4} \text{rpm} - 0.235T \quad (R=0.827) \quad (5)$$

$$a^* = 2.085 - 6.825 \times 10^{-4} \text{rpm} + 3.15 \times 10^{-2} T \quad (R=0.825) \quad (6)$$

$$b^* = 38.792 - 7.47 \times 10^{-3} \text{rpm} + 5.991 \times 10^{-2} T \quad (R=0.627) \quad (7)$$

จะเห็นได้ว่า สมการสำหรับทำนาย เวลาในการทำเนื้อทุเรียน ให้มีความชื้น 50.5 % wb (Time) ความชื้น (%MC) Water activity (A_w) และ ความหนืด (Viscosity) มีค่า R สูงกว่า 0.9 แสดงถึงว่า สามารถใช้ทำนายค่า ตัวแปรต้นดังกล่าวได้แม่นยำ แต่สมการสำหรับทำนายค่าสี ($L^*a^*b^*$) ค่า R ต่ำกว่า 0.9 แสดงว่าทำนายตัวแปรต้นดังกล่าวได้แม่นยำน้อยกว่า

4.5 ผลกระทบ

		ตัวแปรตาม (ผลกระทบ(P-value))						
ตัวแปรต้น	Variable	time	L*	a*	b*	aw	viscosity	%MC
	RPM(A)	NS (0.0679)	NS (0.9776)	NS (0.4747)	NS (0.0764)	- (0.0337)	0.0026	-- (0.0073)
	TEMP(B)	--- (0.000)	--- (0.000)	0	0.0192	--- (0.000)	0	--- (0.000)

P-value	Negative effect	Positive effect
≥ 0.05	NS	NS
[0.01 - 0.05]	-	+
[0.005 - 0.01]	---	++
<0.005	----	+++

ตารางที่ 4.2 ตารางผลกระทบ (P-value)

จากการวิเคราะห์หาผลกระทบระหว่างตัวแปรต้น(อุณหภูมิของน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวน) กับตัวแปรตาม (ค่าความชื้นฐานเปียก ค่า Water activity ค่าความหนืด ค่าสี L* a* b*) พบว่า

เมื่อความเร็วรอบของใบกวนเพิ่มขึ้นที่สภาวะต่างๆ จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสี L* a* b* แต่จะส่งผลทำให้ค่า Water activity ลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ P-value เท่ากับ 0.03 ส่งผลทำให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ P-value เท่ากับ 0.005 และส่งผลทำให้ค่าความชื้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่ P-value เท่ากับ 0.007

เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้นที่สภาวะต่างๆ จะส่งผลทำให้ค่าสี L* ค่า Water activity และค่าความชื้นลดลงมากอย่างมีนัยสำคัญที่ P-value เท่ากับ 0.005 จะส่งผลทำให้ค่าสี a* b*และค่าความหนืดเพิ่มขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญที่ P-value น้อยกว่า 0.005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. จากความสัมพันธ์ของค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นฐานเปียกของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้นพบว่า อัตราการลดความชื้นฐานเปียกมีแนวโน้มสูงขึ้น ตามสภาวะความรุนแรงของอุณหภูมิ น้ำมันและความเร็วรอบของใบกวน ซึ่งใช้เวลาลดความชื้นน้อยกว่าการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นด้วยตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 °C เช่น กรณีต้องการลดความชื้นฐานเปียกให้เหลือ 30 % (wb) พบว่าในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นด้วยระบบสุญญากาศที่ความเร็วรอบใบกวน 212.5 rpm และอุณหภูมิของน้ำมัน 65 °C ใช้เวลาประมาณ 68 นาที แต่การทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นด้วยตู้อบลมร้อนจะใช้เวลา ประมาณ 600 นาที จะเห็นได้ว่าการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นด้วยระบบสุญญากาศใช้เวลาน้อยกว่าการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นด้วยตู้อบลมร้อนถึง 8.8 เท่า

2. จากความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของค่า Water activity ของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ ในเวลา 90 นาที เทียบกับเนื้อทุเรียนก่อนทำการทดลองมีค่าเริ่มต้น เท่ากับ 0.972 พบว่า ค่า Water activity ของเนื้อทุเรียนเข้มข้น อยู่ในช่วง 0.919-0.959 มีแนวโน้มลดลง เมื่อสภาวะของอุณหภูมิของน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวนรุนแรงขึ้น

3. จากการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ ในเวลา 90 นาทีซึ่งจะให้ผลตรงข้ามกับค่า Water activity โดยค่าความหนืดเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 53.609 Pa s ส่วนค่าความหนืดของเนื้อทุเรียนเข้มข้นจะอยู่ระหว่าง 78.120- 288.300 Pa s ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้น ตามความรุนแรงของอุณหภูมิ น้ำมันและความเร็วรอบของใบกวน

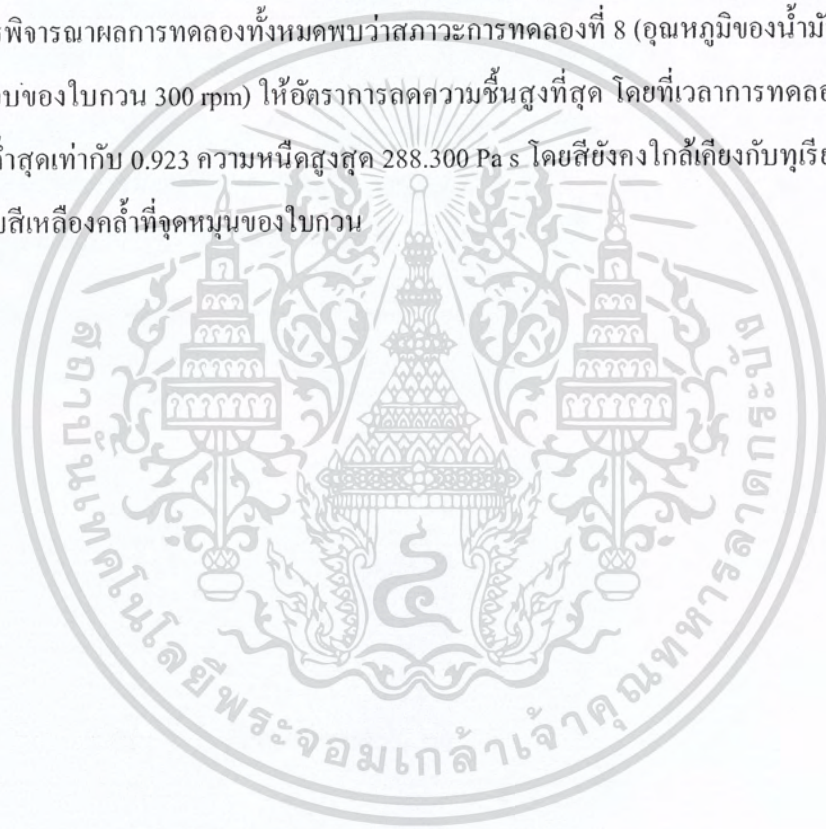
4. จากการเปลี่ยนแปลงค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของเนื้อทุเรียนก่อนและหลังทำเข้มข้นที่สภาวะต่างๆจะเห็นว่าค่า L^* ซึ่งบ่งบอกถึงความสว่าง L^* ของเนื้อทุเรียนเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 73.66 ส่วนค่าของเนื้อทุเรียนเข้มข้นอยู่ระหว่าง 62.55-70.70 พบว่า L^* มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อสภาวะของอุณหภูมิของน้ำมันและความเร็วรอบของใบกวนรุนแรงขึ้น โดยมีค่าใกล้เคียงกับค่าเริ่มต้น ส่วน ค่า a^* ซึ่งค่าที่เป็นบวกจะบ่งบอกความเข้มของสีแดง ค่าลบแสดงถึงสีเขียว ซึ่งค่า a^* ที่มีค่าเป็นบวกจะเปลี่ยนแปลงไปมาก (ช่วง 1.19-2.79) เมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น เท่ากับ 0.62 และค่า b^* ค่าที่เป็นบวกแสดงถึงสีเหลือง ค่าลบแสดงถึงสีน้ำเงิน ซึ่งค่า b^* ของเนื้อทุเรียนเริ่มต้น เท่ากับ 32.52 ส่วนของเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สภาวะการทดลองต่างๆอยู่ในช่วง 36.54-40.57 ซึ่งเป็นค่าสีเหลือง ค่า b^* มีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยเมื่อเทียบกับค่าเริ่มต้น ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า

ในการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นโดยใช้ระบบสุญญากาศ ทำให้ค่าความสว่างและค่าสีเหลืองของเนื้อทุเรียนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเท่านั้น

ไมวารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพกับความเร็วยอบใบกวนและอุณหภูมิของน้ำมันร้อนได้สมการความสำคัญแบบ Multiple linear equation ซึ่งมีตัวแปรต้น 2 ตัวคือ T (อุณหภูมิน้ำมัน) และ rpm (ความเร็วยอบของใบกวน) จากสมการสำหรับทำนายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกายภาพกับความเร็วยอบใบกวนและอุณหภูมิของน้ำมันร้อน ความชื้น (%MC) Water activity (A_w) และ ความหนืด (Viscosity) มีค่า R สูงกว่า 0.9 แสดงถึงว่า สามารถใช้ทำนายค่า ตัวแปรต้นดังกล่าวได้แม่นยำ แต่สมการสำหรับทำนายค่า $(L^*a^*b^*)$ ค่า R ต่ำกว่า 0.9 แสดงว่า ทำนายตัวแปรดังกล่าวได้แม่นยำน้อยกว่า

6. จากการพิจารณาผลการทดลองทั้งหมดพบว่าสภาวะการทดลองที่ 8 (อุณหภูมิของน้ำมัน 80 °C และความเร็วยอบของใบกวน 300 rpm) ให้อัตราการลดความชื้นสูงที่สุด โดยที่เวลาการทดลอง 90 นาที ค่า Water activity ต่ำสุดเท่ากับ 0.923 ความหนืดสูงสุด 288.300 Pa s โดยที่ยังคงใกล้เคียงกับทุเรียนเริ่มต้นและไม่มีปัญหาการบดสีเหลืองคล้ำที่จุดหมุนของใบกวน



ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 1 ผลการทดลองของค่าความชื้นที่สภาวะต่างๆ ที่การทดลอง 90 นาที

เวลา(นาที)	สภาวะที่ 1	สภาวะที่ 2	สภาวะที่ 3	สภาวะที่ 4	สภาวะที่ 5	สภาวะที่ 6	สภาวะที่ 7	สภาวะที่ 8	สภาวะที่ 9
0	62.450	68.150	65.250	68.100	66.567	62.800	63.250	63.950	68.800
1	62.450	68.150	65.250	68.100	66.567	62.800	63.250	63.950	68.800
2	61.974	67.119	64.844	67.568	65.537	62.300	62.740	62.454	67.188
3	61.974	66.604	64.437	67.036	64.834	61.315	62.230	61.448	66.091
4	61.030	65.573	64.437	66.521	64.147	60.329	61.720	60.958	64.479
5	61.030	65.573	63.974	65.989	63.105	59.344	60.699	59.953	63.448
6	61.030	65.057	63.974	65.457	62.754	58.359	59.679	58.947	62.351
7	60.087	64.542	63.568	64.942	62.070	57.373	59.679	58.457	61.254
8	60.087	64.026	63.568	64.410	61.032	56.388	58.658	57.451	59.576
9	60.087	63.511	62.698	64.410	60.688	55.902	57.638	56.445	59.060
10	60.087	62.480	62.698	63.362	59.994	55.402	56.618	55.440	57.582
11	60.087	62.480	62.292	63.362	58.956	54.917	56.107	54.434	56.285
12	59.143	61.965	62.422	62.315	58.613	54.917	55.087	53.428	55.198
13	59.143	61.454	62.422	61.783	57.918	53.931	54.066	52.423	54.092
14	58.200	61.454	62.422	61.267	57.574	52.946	53.046	50.902	52.497
15	57.733	60.419	60.553	60.736	56.536	52.446	52.536	50.411	51.382
16	57.733	60.419	60.553	60.220	56.536	51.960	52.026	48.916	50.285
17	57.733	59.903	60.090	59.705	55.498	50.975	51.005	47.910	49.770
18	57.257	59.388	60.090	59.173	55.147	50.475	50.495	47.420	48.673
19	56.790	59.388	59.638	58.658	54.460	49.004	49.985	46.904	47.577
20	56.790	58.872	59.220	57.610	53.772	48.504	48.964	45.408	46.480
21	56.313	58.357	58.814	57.610	53.421	48.019	47.944	44.403	45.383
22	56.313	57.841	58.814	57.078	52.383	47.033	46.923	43.397	44.286
23	56.313	57.841	57.945	57.078	52.383	46.533	46.923	42.882	43.189
24	55.370	57.326	57.945	56.031	51.345	45.548	45.903	41.876	42.092
25	55.370	56.810	57.945	56.031	51.345	45.062	45.393	40.896	41.508
26	55.370	56.810	57.075	54.983	50.307	44.077	44.883	40.380	40.993
27	54.902	56.295	57.075	54.452	49.963	44.077	43.862	39.890	39.898
28	54.902	55.779	57.075	53.936	49.269	43.092	42.842	38.884	38.801
29	54.426	55.779	56.206	53.404	48.925	42.060	42.842	37.879	37.704
30	54.426	54.748	56.206	52.889	48.230	42.106	41.794	36.873	36.608

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

31	53.959	54.748	55.799	52.357	47.543	42.106	41.311	36.383	36.092
32	53.959	54.748	55.336	51.841	47.192	41.621	40.291	35.867	34.414
33	53.959	54.233	54.930	51.309	46.505	41.121	39.781	34.662	33.899
34	53.483	53.717	54.930	50.794	46.154	40.635	38.760	34.346	32.802
35	53.483	53.202	54.467	50.262	45.811	39.650	38.760	32.850	32.220
36	53.015	53.202	54.004	49.746	45.116	38.664	37.740	32.360	31.705
37	53.015	52.686	53.597	49.214	44.772	38.179	36.719	31.845	31.124
38	52.539	52.686	53.597	48.699	43.735	37.679	36.209	30.839	30.542
39	52.539	51.655	52.728	48.167	43.735	37.193	35.699	30.349	29.511
40	52.539	51.655	52.728	47.652	42.696	36.208	34.679	29.833	28.414
41	52.539	51.655	52.728	47.652	42.353	36.208	34.679	29.343	27.833
42	52.539	50.624	51.858	47.120	41.665	35.223	33.658	28.828	27.317
43	52.539	50.624	51.858	46.604	40.971	35.223	33.148	27.822	26.736
44	51.128	50.109	51.452	46.072	40.971	34.237	32.638	27.307	26.736
45	51.128	49.593	50.989	45.557	40.276	34.237	32.128	27.307	25.639
46	51.128	49.593	50.989	45.025	39.589	33.737	31.617	26.302	25.639
47	50.652	48.562	50.119	44.510	38.894	33.252	30.597	26.302	25.124
48	50.185	48.562	50.119	44.510	38.894	32.752	30.597	25.295	24.542
49	50.185	48.047	49.713	43.462	37.856	32.752	31.077	24.805	24.027
50	50.185	48.047	49.713	43.462	37.856	31.766	31.077	24.805	23.445
51	49.709	47.016	49.250	42.930	36.818	31.766	30.567	23.799	22.930
52	49.709	47.016	48.843	42.415	36.818	30.781	28.556	23.799	22.930
53	49.242	47.016	48.380	41.883	36.123	30.781	28.556	23.309	21.833
54	49.242	46.501	47.974	41.883	35.780	29.795	27.477	22.819	21.833
55	49.242	45.986	47.974	40.836	35.436	29.795	27.477	22.304	20.736
56	49.242	45.470	47.511	40.320	34.742	28.810	26.967	21.813	20.736
57	49.242	45.470	47.104	40.320	34.054	28.810	26.515	21.813	20.736
58	48.765	44.955	47.104	39.788	33.703	27.825	26.515	21.813	20.221
59	48.765	44.439	46.235	39.273	33.703	27.825	26.005	21.298	19.639
60	48.298	43.924	46.235	39.273	33.009	27.325	25.495	21.298	19.639

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

61	48.298	43.408	46.235	38.741	32.665	26.839	25.495	21.298	19.639
62	47.822	43.408	45.366	38.225	32.322	25.854	24.985	20.808	19.124
63	47.822	42.893	45.366	38.225	31.627	25.854	24.474	20.292	18.543
64	47.822	42.375	45.366	37.693	31.284	25.368	24.474	20.292	18.543
65	47.822	42.375	44.496	37.178	30.589	24.868	23.964	19.802	18.543
66	47.355	42.375	44.496	37.178	30.589	24.868	23.454	19.802	18.027
67	46.879	41.859	44.496	37.178	29.902	23.883	23.454	19.802	17.446
68	46.879	41.346	43.627	36.130	29.511	23.883	23.454	19.312	17.446
69	46.879	41.346	43.627	36.130	29.511	22.897	22.944	18.796	16.930
70	46.879	40.831	43.220	35.599	28.864	22.897	22.434	18.306	16.930
71	46.402	40.315	42.757	35.083	28.513	21.912	22.434	18.306	16.930
72	46.402	40.315	42.757	34.551	28.169	21.912	22.434	18.306	16.349
73	46.402	39.800	42.351	34.551	27.826	21.912	21.924	17.791	15.833
74	46.402	39.800	41.888	34.036	27.826	20.926	21.413	17.301	15.833
75	45.935	39.284	41.888	34.036	26.780	20.926	21.413	17.301	15.833
76	45.359	39.284	41.481	33.504	26.780	20.441	21.413	17.301	15.252
77	45.359	38.769	41.018	33.504	26.780	20.441	21.413	16.810	15.252
78	45.359	38.253	41.018	33.504	26.444	19.456	20.903	16.810	15.252
79	44.982	38.253	40.612	32.456	25.749	19.456	20.903	16.295	14.737
80	44.515	38.253	40.149	32.456	25.749	18.970	20.393	16.295	14.737
81	44.515	37.222	39.742	32.456	25.406	18.970	20.393	16.295	14.737
82	44.515	37.222	39.742	32.456	25.062	17.985	20.393	16.295	14.737
83	44.515	37.222	39.279	31.409	25.062	17.985	20.393	16.295	14.155
84	44.515	37.222	38.873	31.409	24.711	17.985	19.883	15.805	14.155
85	43.572	36.191	38.873	31.409	24.711	17.485	19.883	15.805	13.640
86	43.572	36.191	38.873	31.409	24.020	16.999	19.372	15.289	13.640
87	43.572	36.191	38.003	30.348	24.020	16.999	18.862	15.289	13.640
88	43.572	35.160	38.003	30.348	24.020	16.514	18.862	14.799	13.058
89	43.572	35.160	37.540	30.348	23.669	16.514	18.862	14.284	13.058
90	42.628	35.160	37.134	29.830	23.669	16.028	18.862	14.284	13.058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2 Water activity (A_w) ก่อนและหลังการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิของน้ำมัน(°C)	ความเร็วรอบของใบกวน(rpm)	A_w	
		ก่อนทดลอง	หลังทดลอง
43.95	212.50	0.971±0.004	0.936±0.012
50.00	125.00	0.97±0.000	0.952±0.001
50.00	300.00	0.973±0.000	0.931±0.014
65.00	88.75	0.973±0.001	0.946±0.001
65.00	212.50	0.974±0.006	0.952±0.008
65.00	336.24	0.974±0.003	0.959±0.003
80.00	125.00	0.967±0.001	0.917±0.008
80.00	300.00	0.972±0.001	0.912±0.014
86.20	212.50	0.972±0.002	0.931±0.001

ตารางที่ 3 ค่าความหนืด (Viscosity) ก่อนและหลังการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิของน้ำมัน(°C)	ความเร็วรอบของใบกวน(rpm)	ค่าความหนืดที่ 2 rpm (Pa.s)	flow behavior index (n)		consistency index (k)	
			ก่อนทดลอง	หลังทดลอง	ก่อนทดลอง	หลังทดลอง
43.95	212.50	86.49±3.450	0.244±0.005	0.246±0.066	27.604±1.006	44.927±0.390
50.00	125.00	78.12±23.249	0.310±0.047	0.424±0.115	31.600±8.133	46.797±10.206
50.00	300.00	120.09±52.226	0.171±0.026	0.312±0.057	33.911±13.389	68.394±29.094
65.00	88.75	118.26±17.734	0.375±0.015	0.330±0.164	22.994±0.231	69.136±19.702
65.00	212.50	210.98±48.578	0.336±0.085	0.257±0.065	26.172±5.214	111.047±14.796
65.00	336.24	238.92±61.009	0.231±0.051	0.189±0.056	30.850±0.354	117.785±23.342
80.00	125.00	255.51±23.461	0.285±0.036	0.027±0.08	29.36±1.696	108.765±0.742
80.00	300.00	288.3±0	0.227±0.139	0.040±0.028	31.046±5.928	98.096±69.364
86.20	212.50	250.62±0	0.401±0.018	0.396±0.078	19.441±0.244	148.475±8.195

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

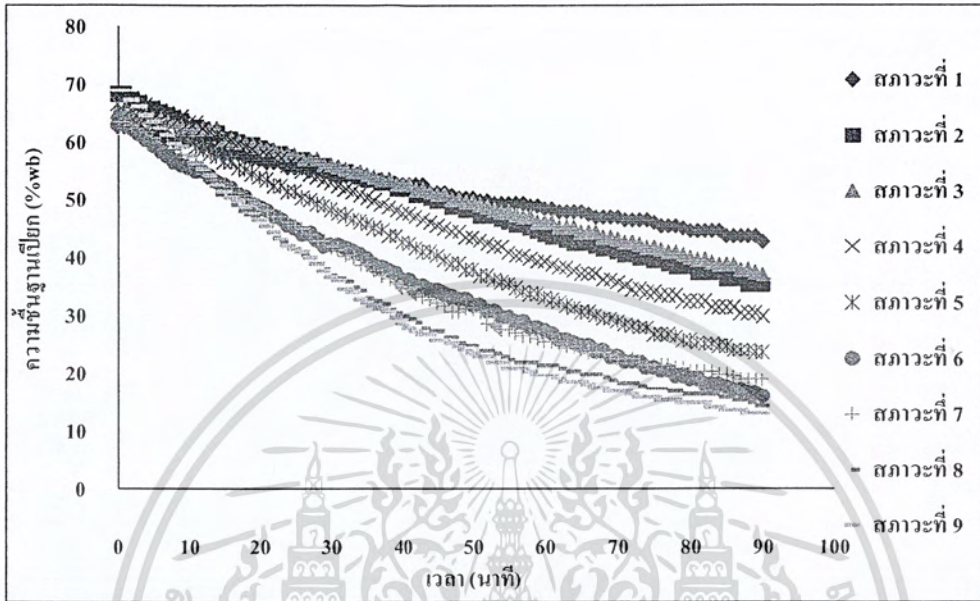
ตารางที่ 4 ค่าสี L* a* b* ก่อนและหลังการทำเนื้อทุเรียนเข้มข้นที่สภาวะต่างๆ

อุณหภูมิ ของน้ำมัน (°C)	ความเร็วรอบของ ใบกวน(rpm)	ค่าสี					
		ก่อนทดลอง			หลังทดลอง		
		L*	a*	b*	L*	a*	b*
43.95	212.50	73.15±0.454	0.53±0.419	32.78±0.637	62.55±1.398	2.3±0.142	39.94±0.403
50.00	125.00	73.365±0.898	0.81±0.778	34.605±0.021	67.899±0.455	1.79±0.283	38.86±0.339
50.00	300.00	75.305±2.312	0.605±0.163	29.755±2.185	63.16±4.2	2.015±0.502	37.02±1.966
65.00	88.75	73.67±0.75	0.605±0.502	33.305±0.417	65.06±1.202	1.925±0.474	38.985±1.237
65.00	212.50	75.27±0.877	0.205±0.035	32.09±0.141	70.695±3.288	1.19±0.396	36.535±2.185
65.00	336.24	72.805±0.12	0.865±0.035	32.94±0.438	67.95±0.311	1.82±0.071	37.415±0.346
80.00	125.00	73.33±0.41	0.305±0.163	31.76±0.396	59.45±0.453	2.52±0.354	40.57±0.453
80.00	300.00	73.98±0.226	0.67±0.566	31.785±0.106	59.255±1.93	2.545±0.516	39.00±2.277
86.20	212.50	72.29±0.085	0.99±0.099	33.575±0.078	60.875±0.728	2.785±0.035	40.095±0.12

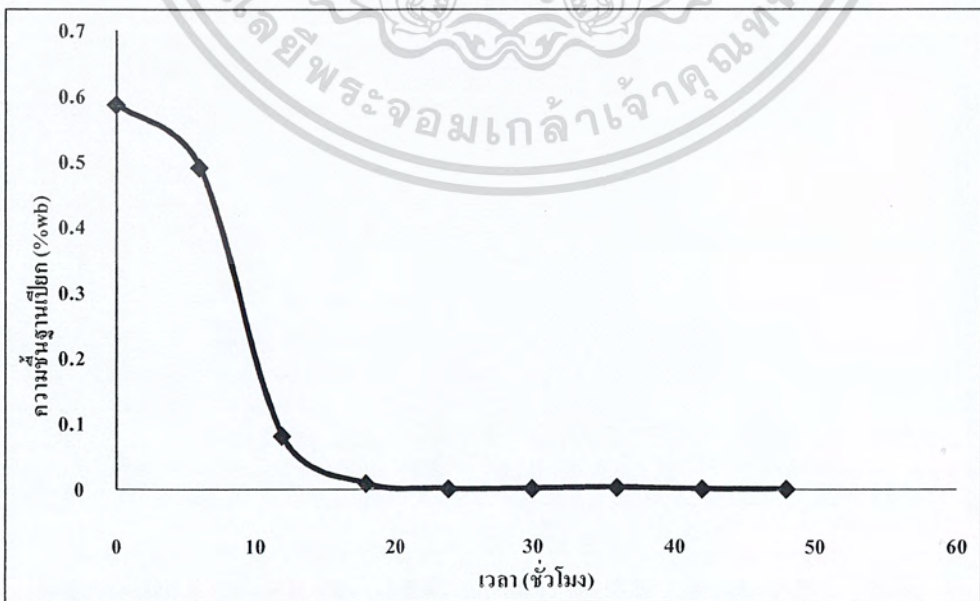
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

1. ความชื้นฐานเปียก

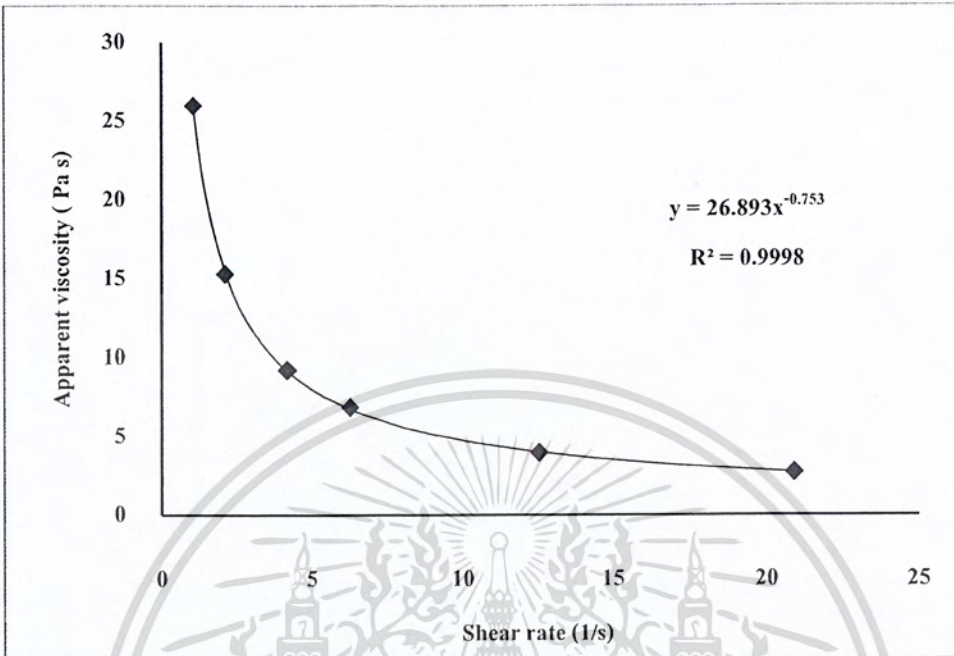


รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ของค่าความชื้นฐานเปียกด้วยระบบสุญญากาศของเนื้อทุเรียน ที่สภาวะต่างๆที่เวลาการทดลอง 90 นาที

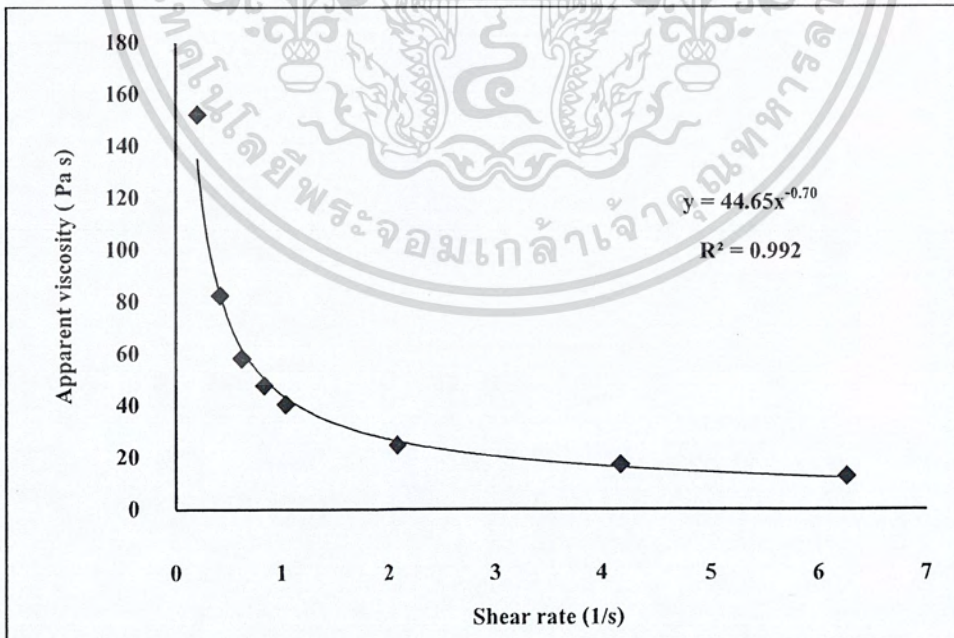


รูปที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ของค่าความชื้นฐานเปียกด้วยตู้อบลมร้อนของเนื้อทุเรียนที่อุณหภูมิ 60 °C เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความหนืด



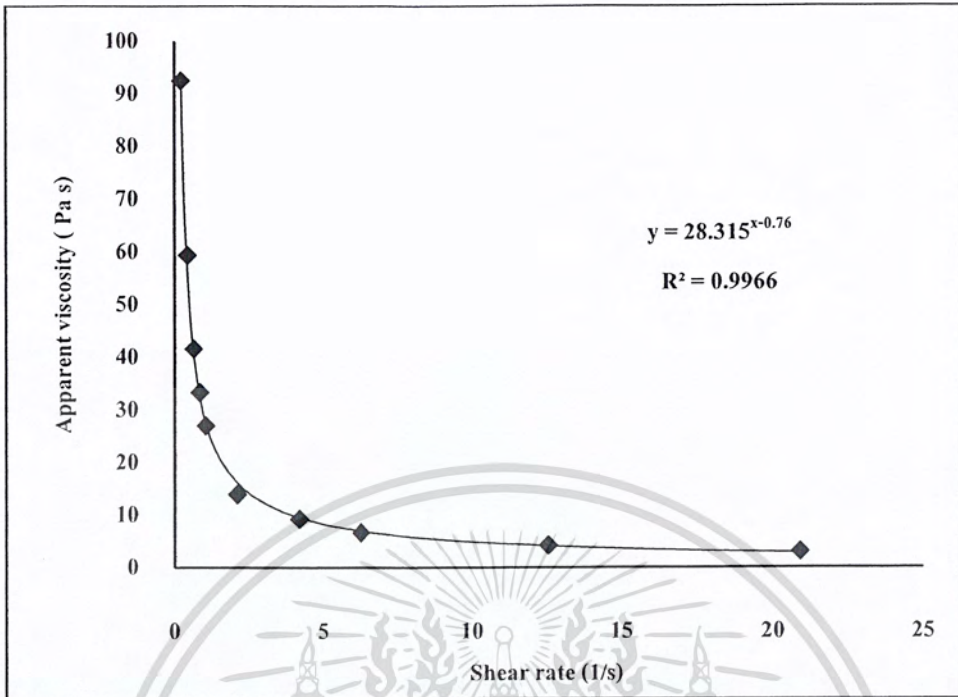
รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s) ที่ $T=43.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 5)



รูปที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

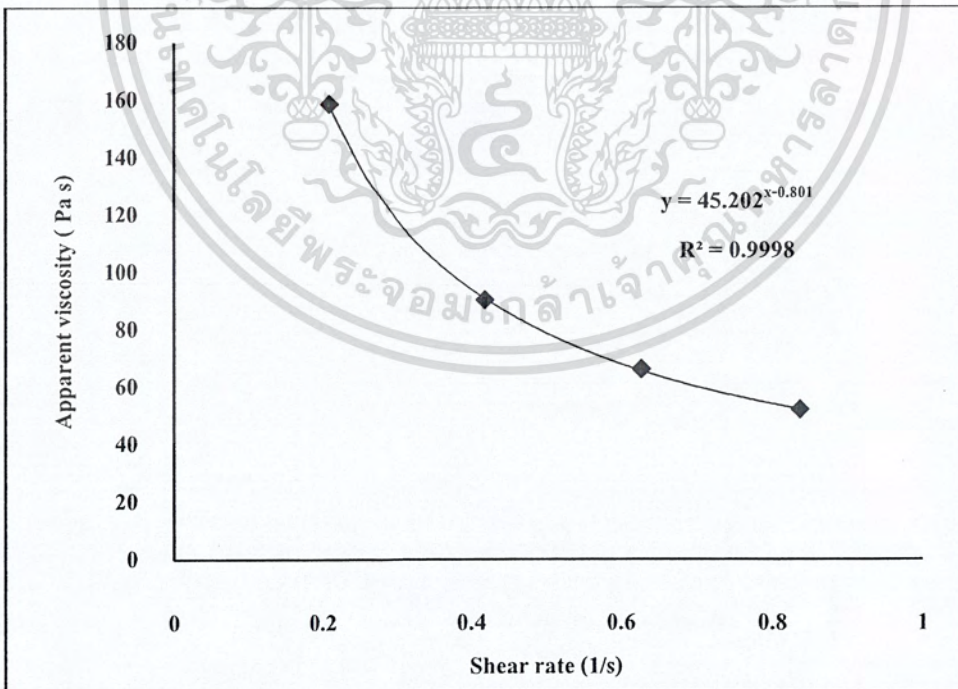
สภาวะที่ 1 ที่ $T=43.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

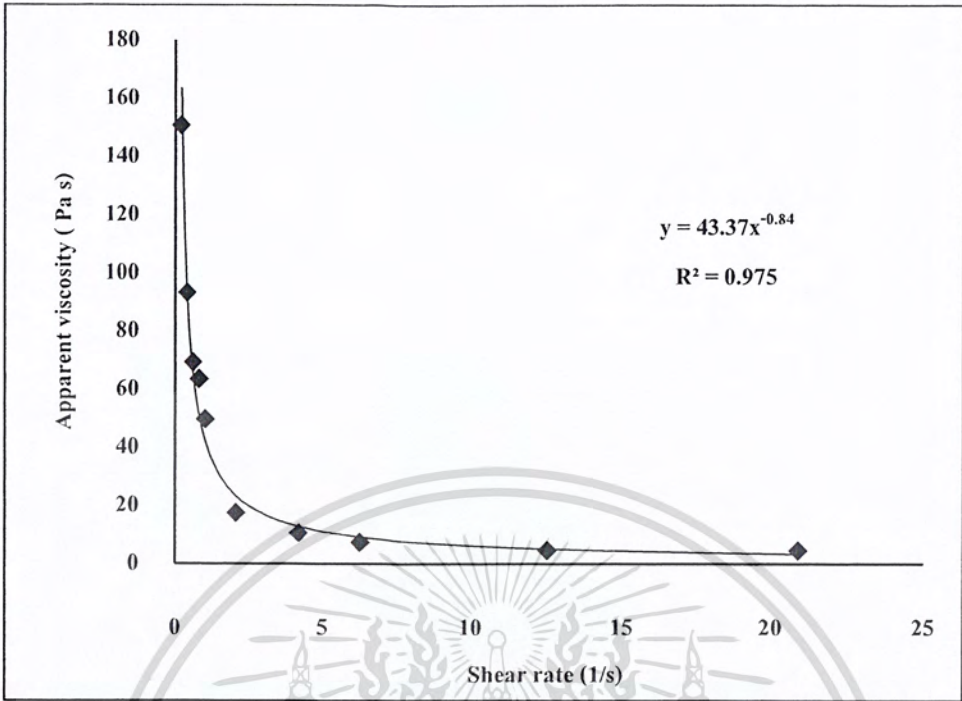
สภาวะที่ 1 ที่ $T=43.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 9)



รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

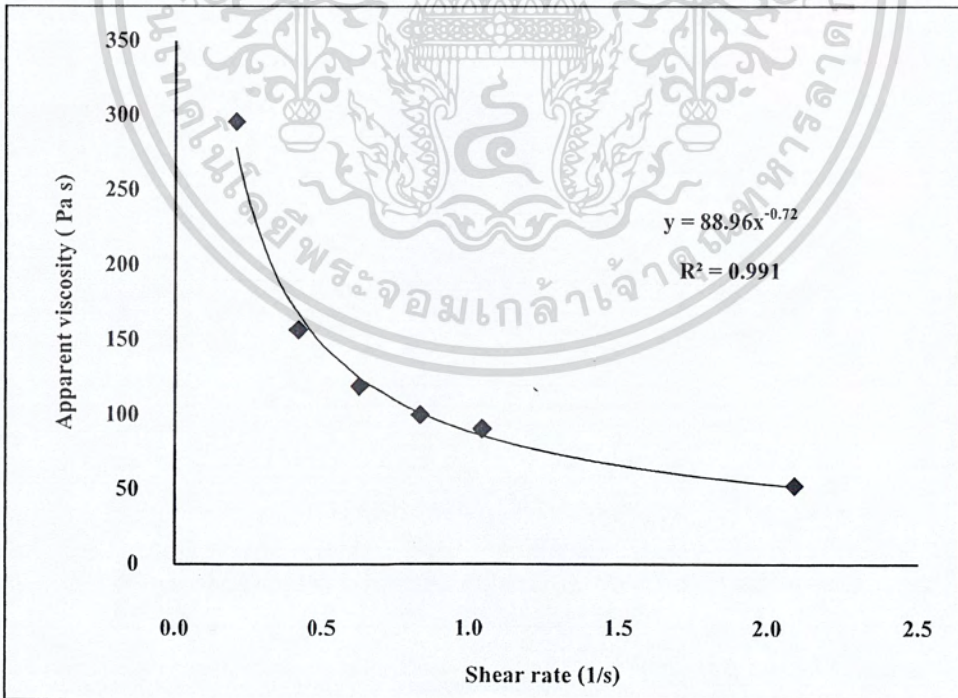
สภาวะที่ 1 ที่ $T=43.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 9)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

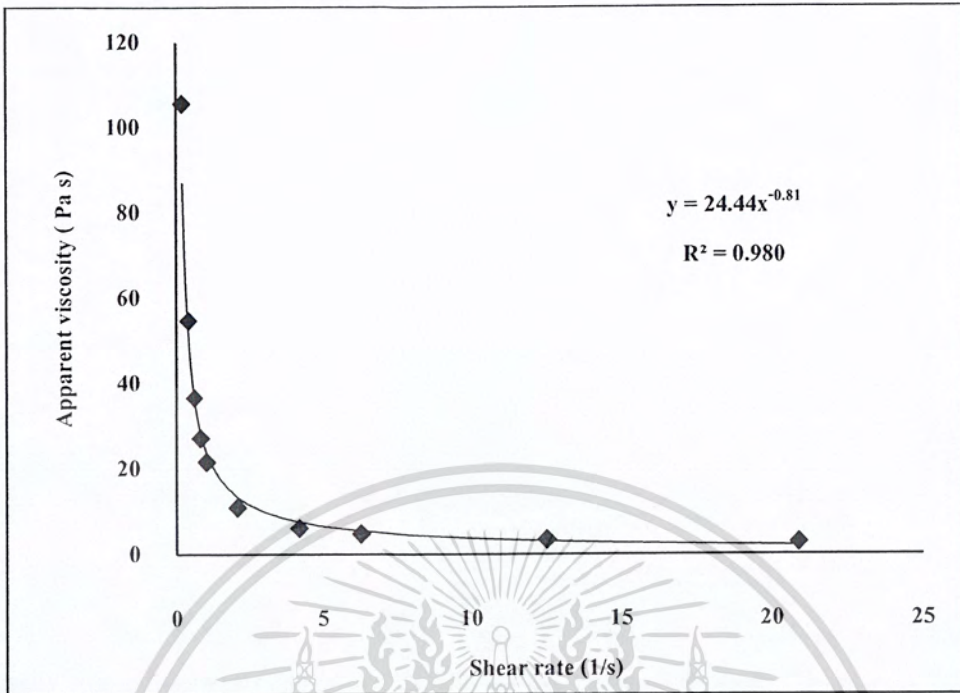
สภาวะที่ 2 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 12)



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

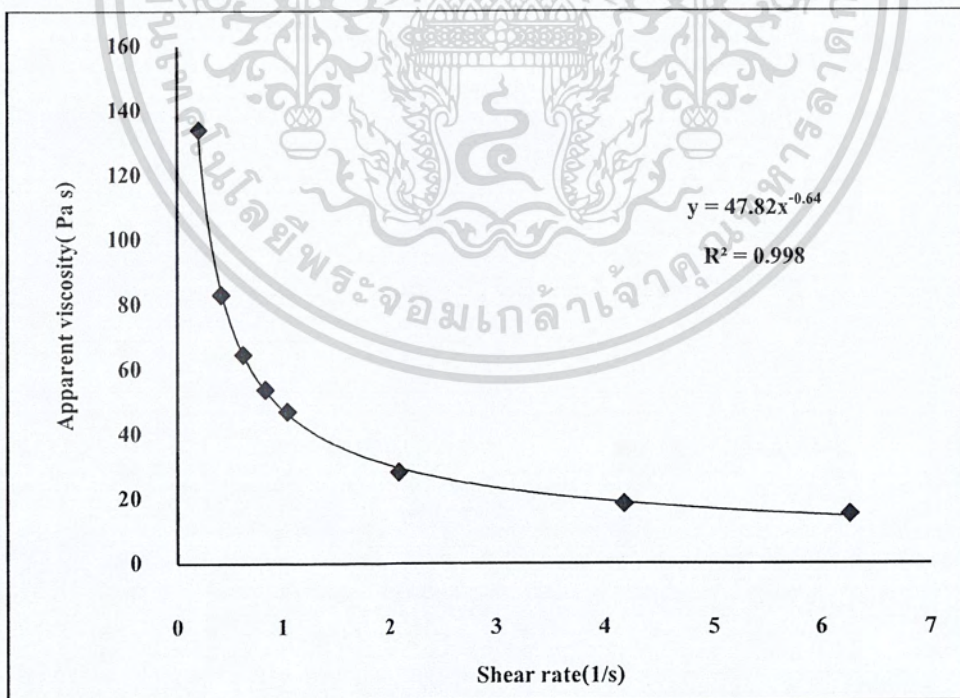
สภาวะที่ 2 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

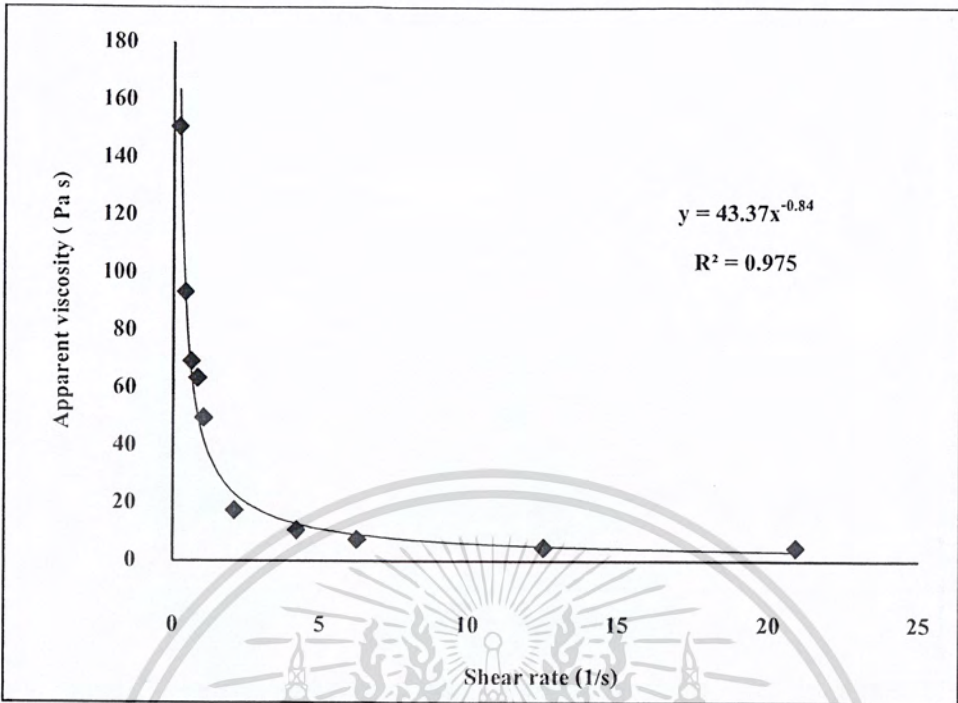
สภาวะที่ 2 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 15)



รูปที่ 10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

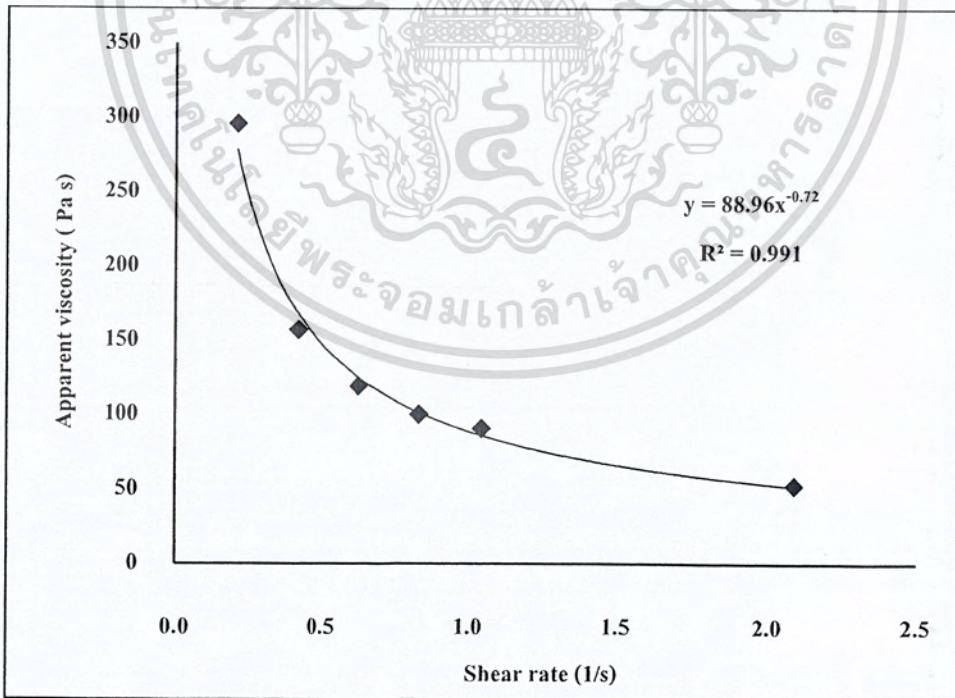
สภาวะที่ 2 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

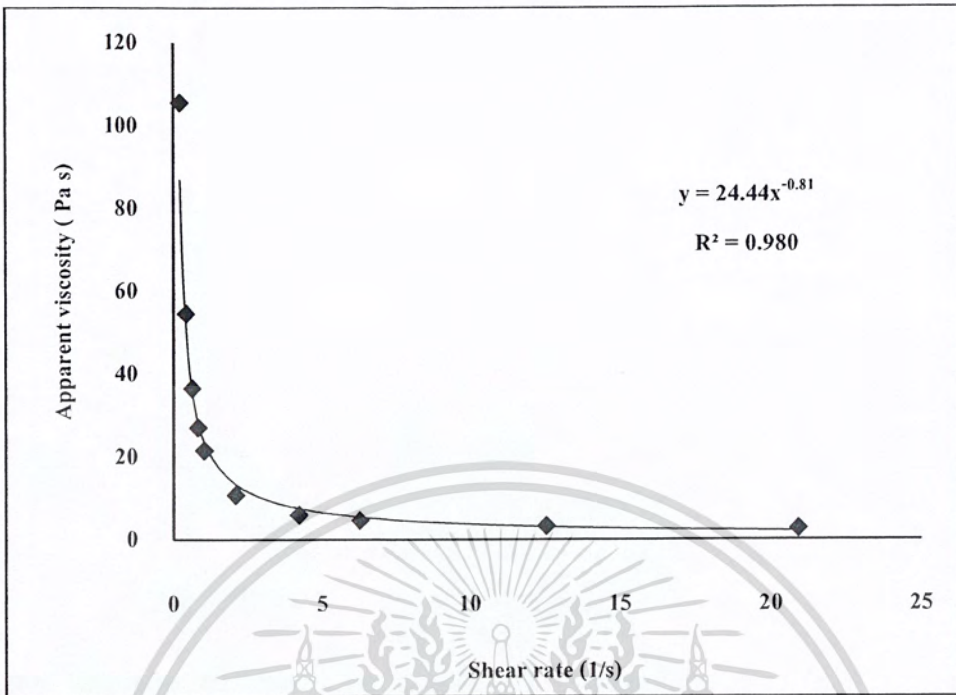
สภาวะที่ 3 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 10)



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

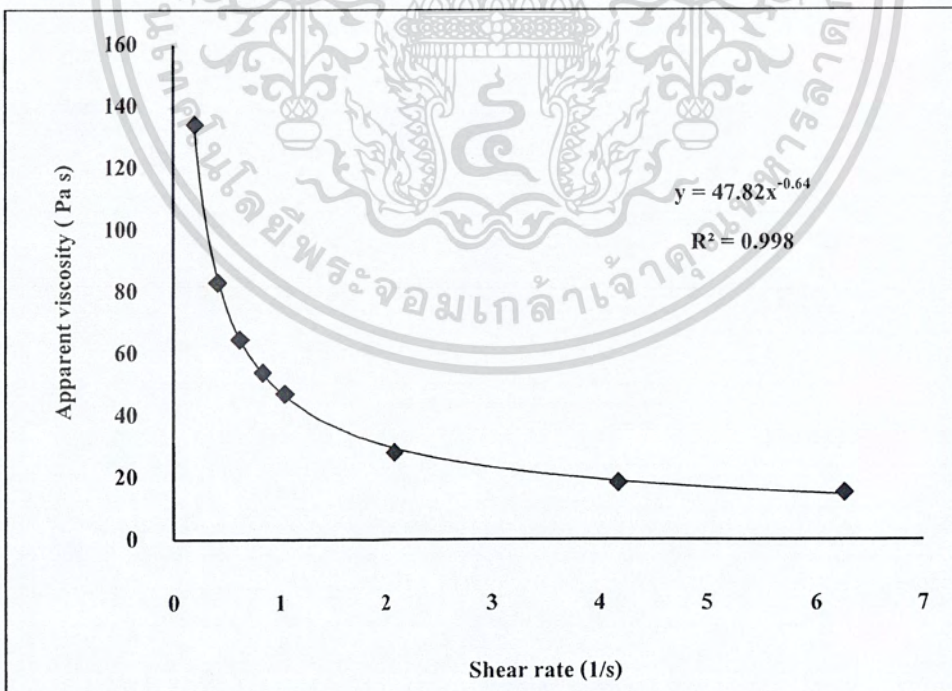
สภาวะที่ 3 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

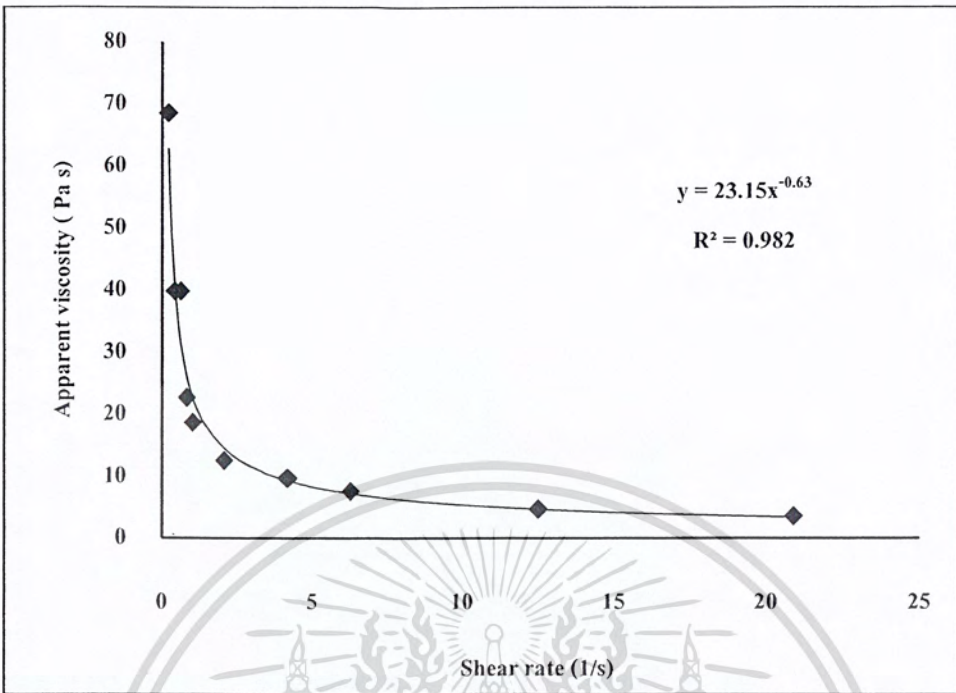
สภาวะที่ 3 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 11)



รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

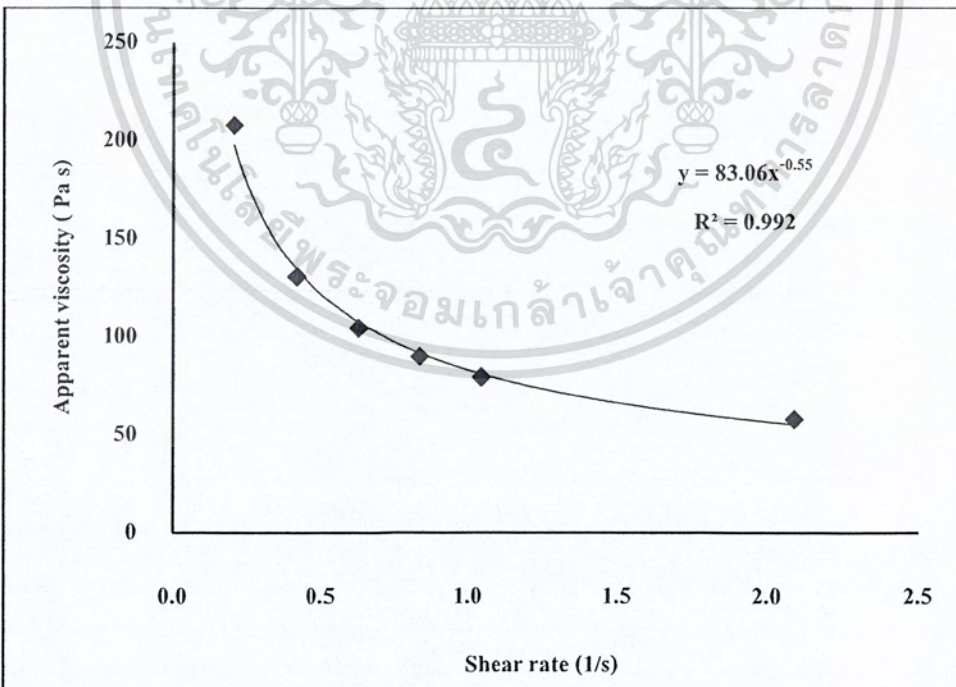
สภาวะที่ 3 ที่ $T=50\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภารกิจงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

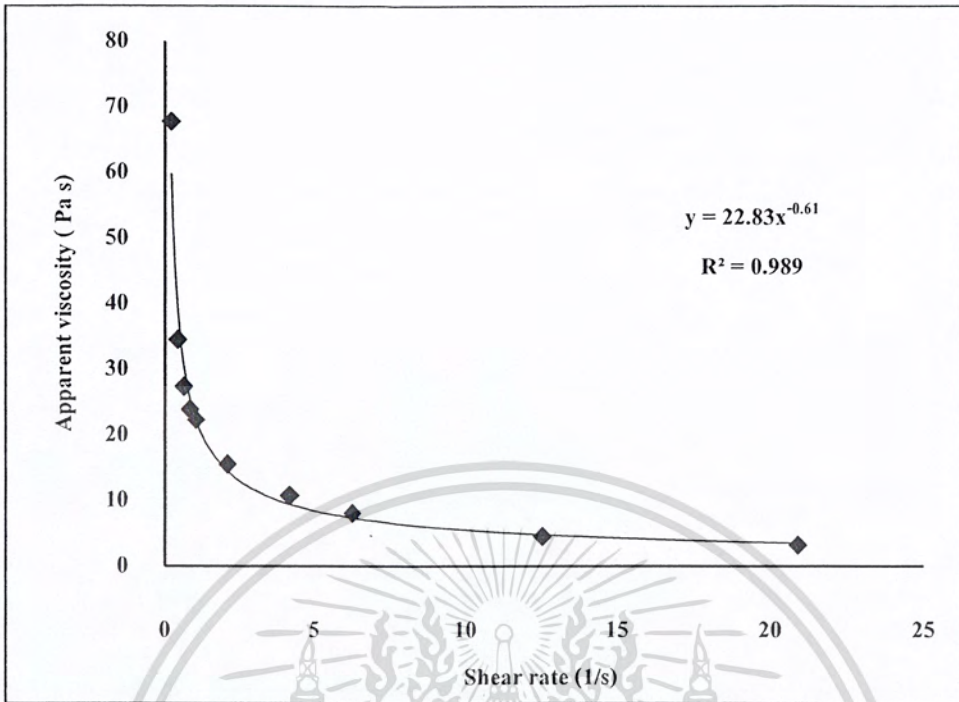
สถานะที่ 4 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 88.75 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 7)



รูปที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

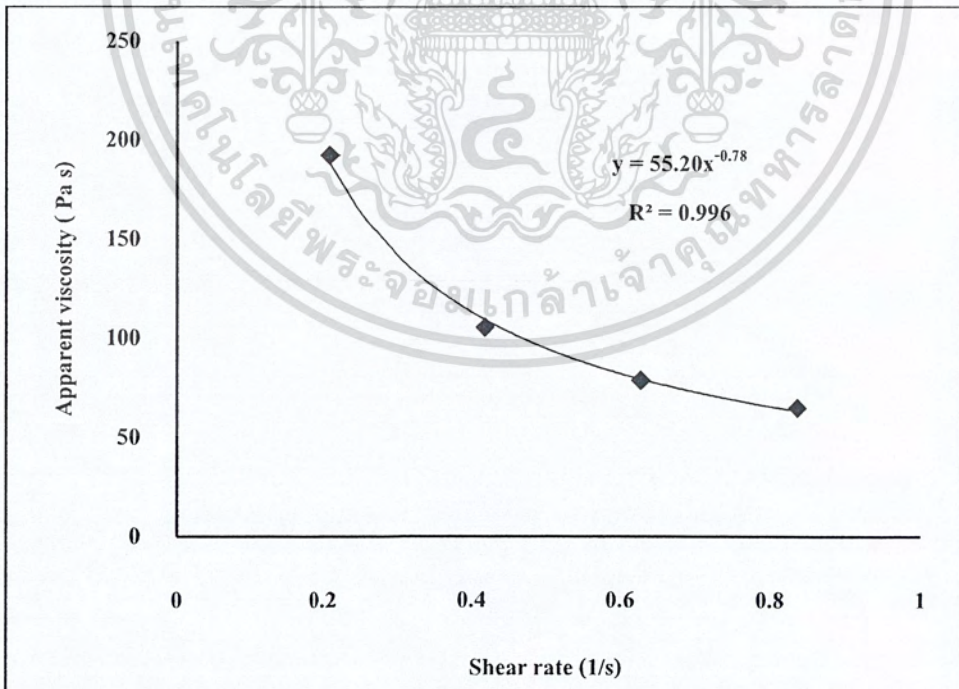
สถานะที่ 4 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 88.75 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

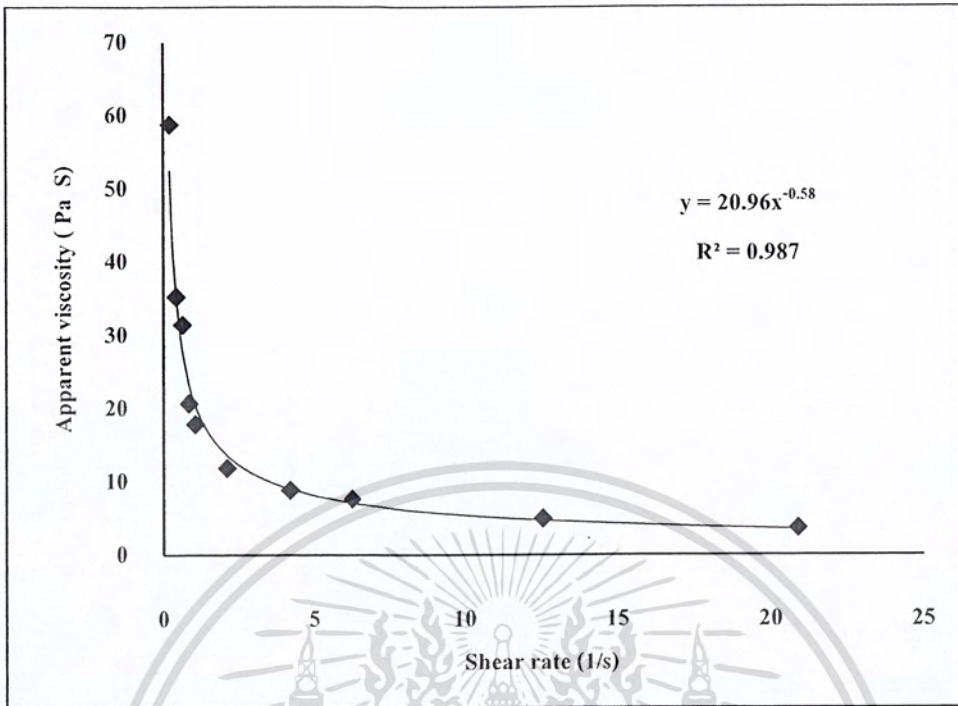
สภาวะที่ 4 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 88.75 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 8)



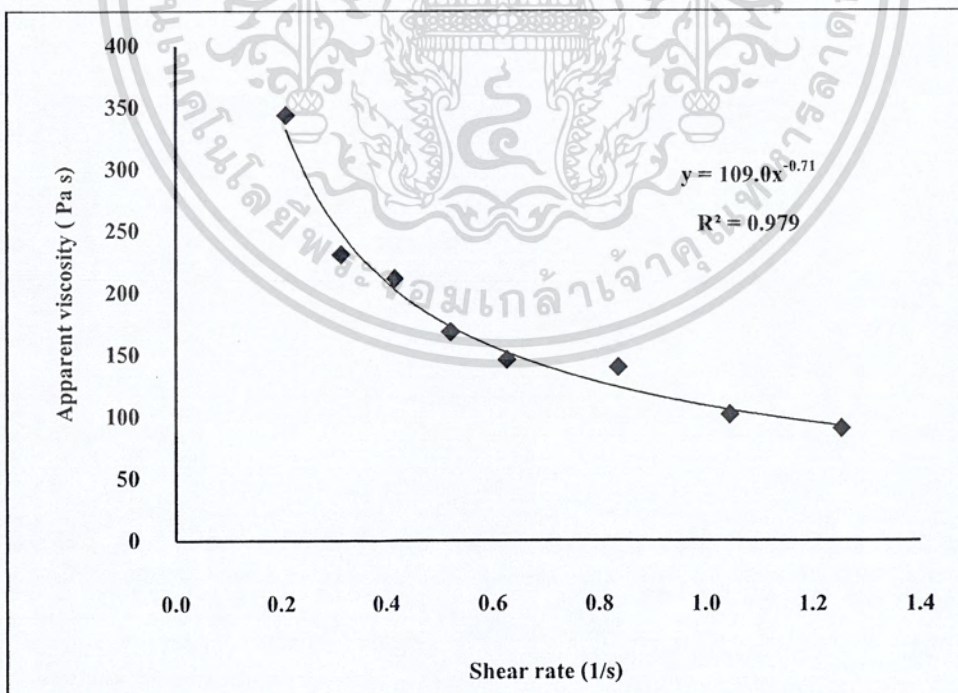
รูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

สภาวะที่ 4 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 88.75 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

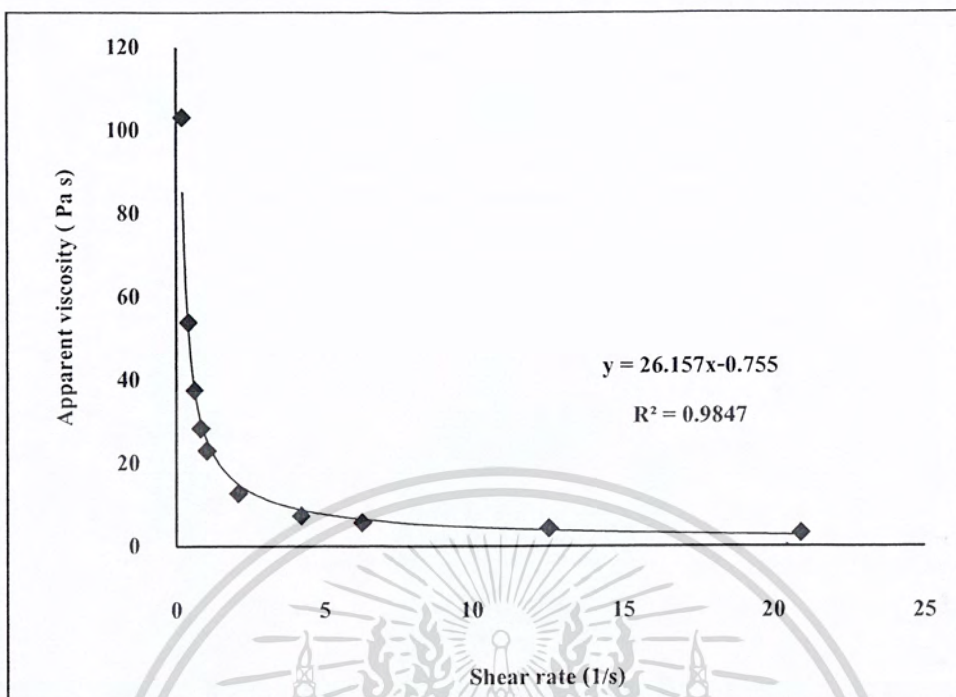


รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s) สภาวะที่ 5 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 2)



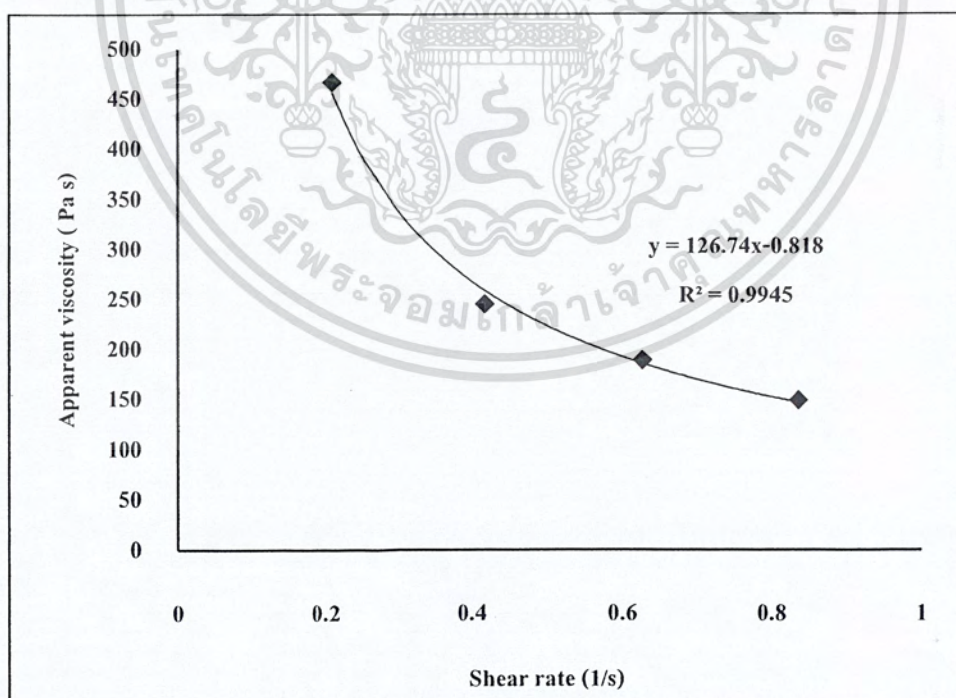
รูปที่ 20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s) สภาวะที่ 5 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

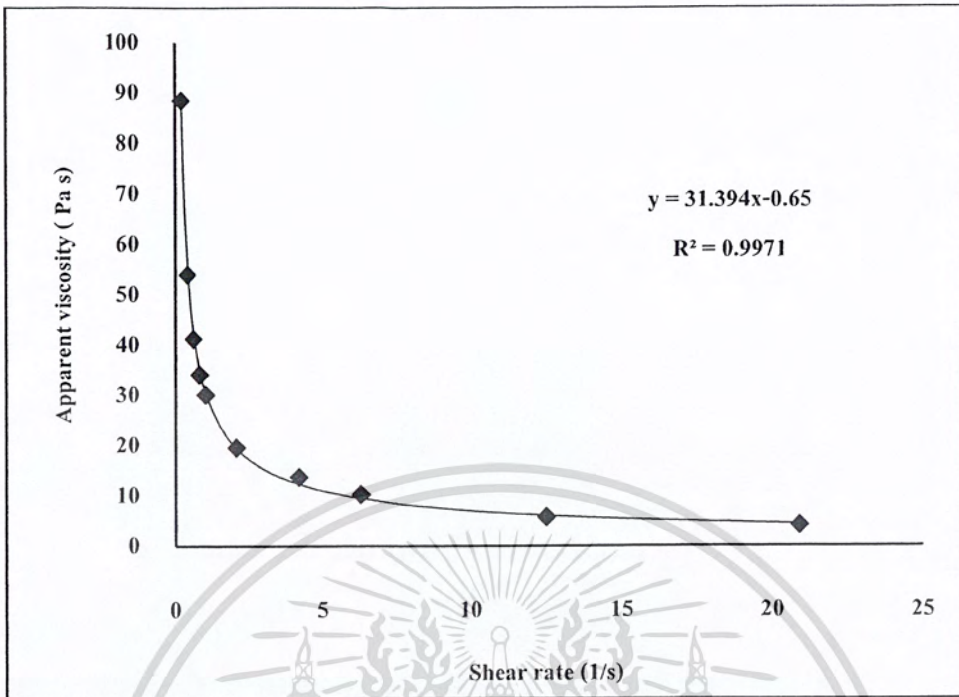
สภาวะที่ 5 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 4)



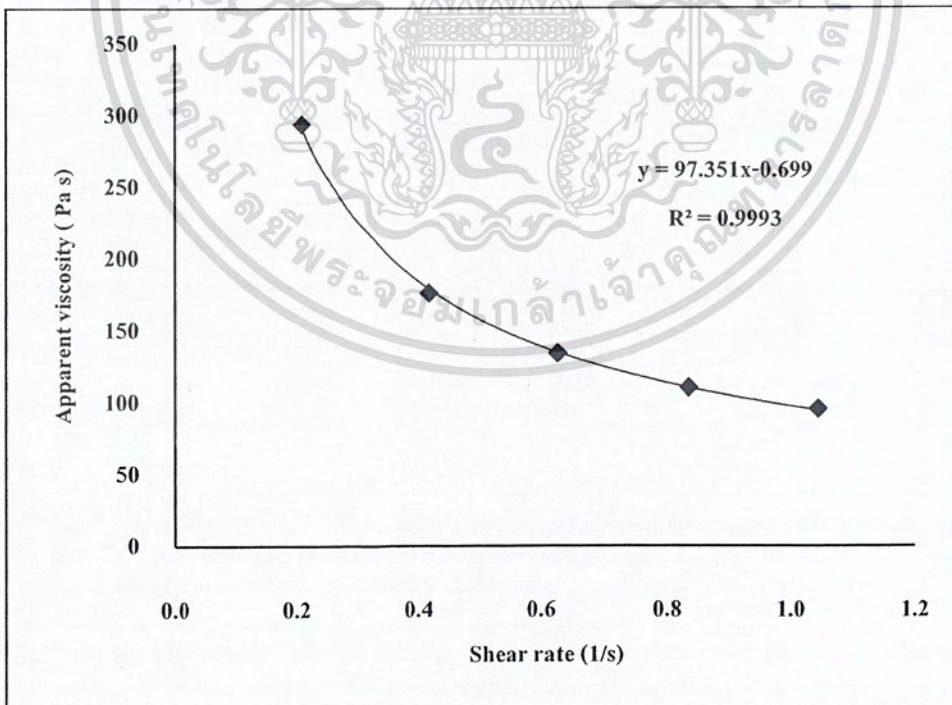
รูปที่ 22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

สภาวะที่ 5 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

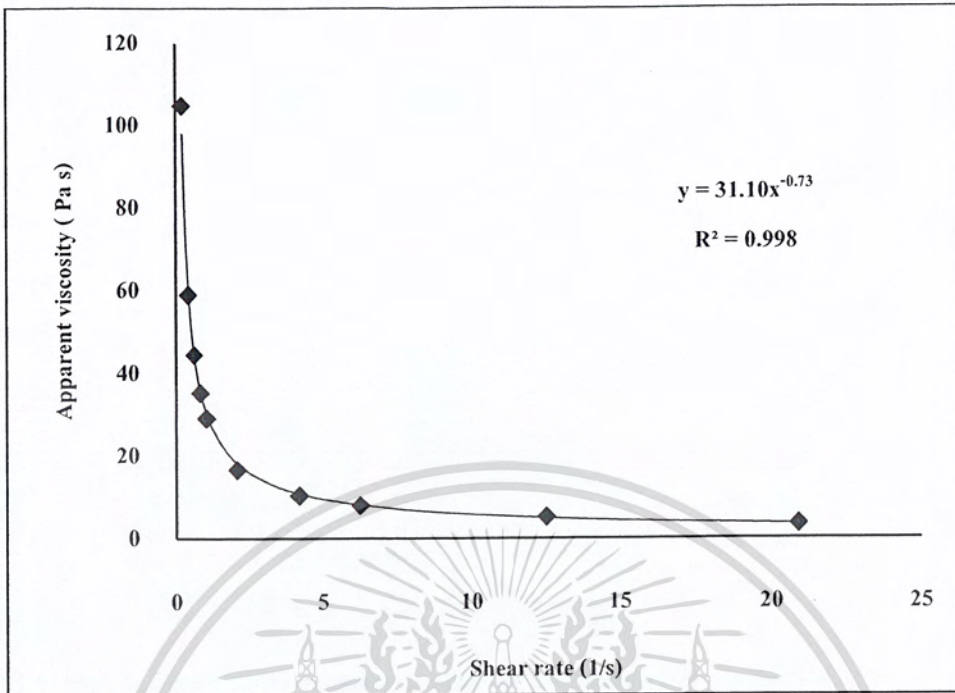


รูปที่ 23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s) สภาวะที่ 5 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 16)



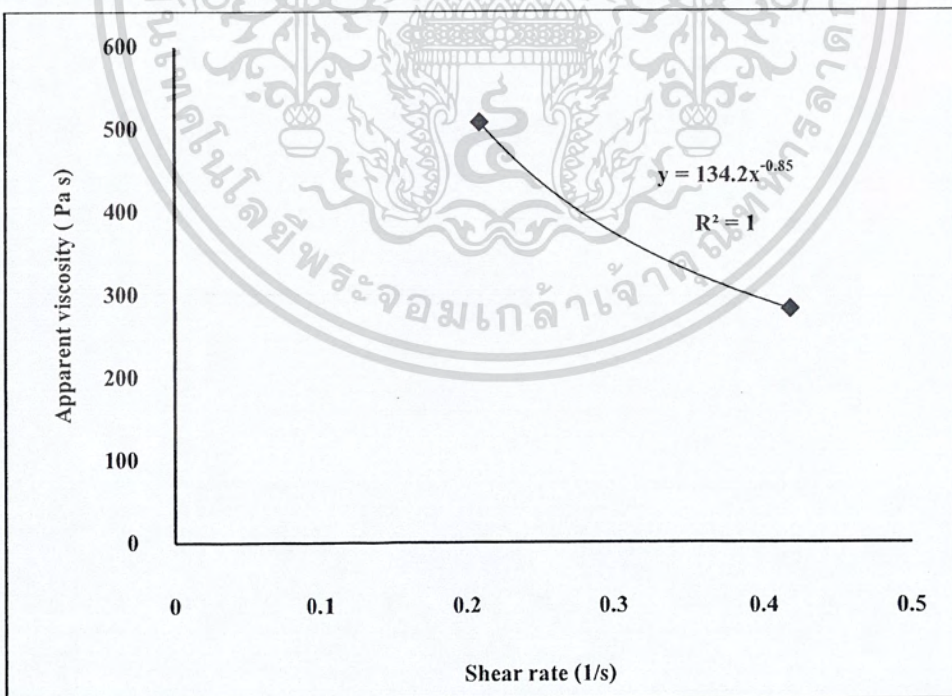
รูปที่ 24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s) สภาวะที่ 5 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

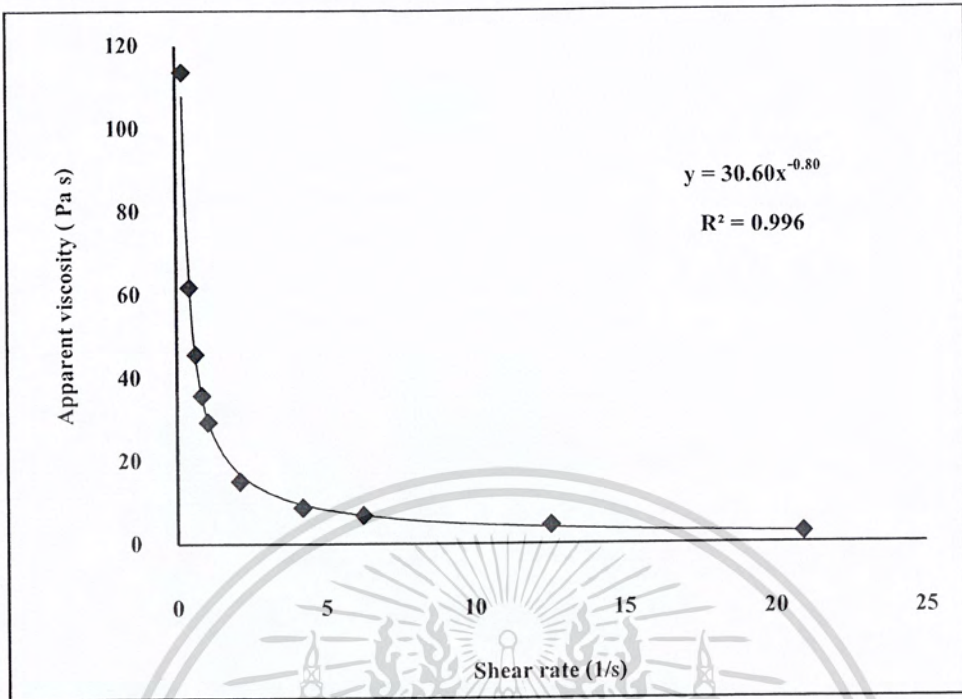
สภาวะที่ 6 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 336.24 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 6)



รูปที่ 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

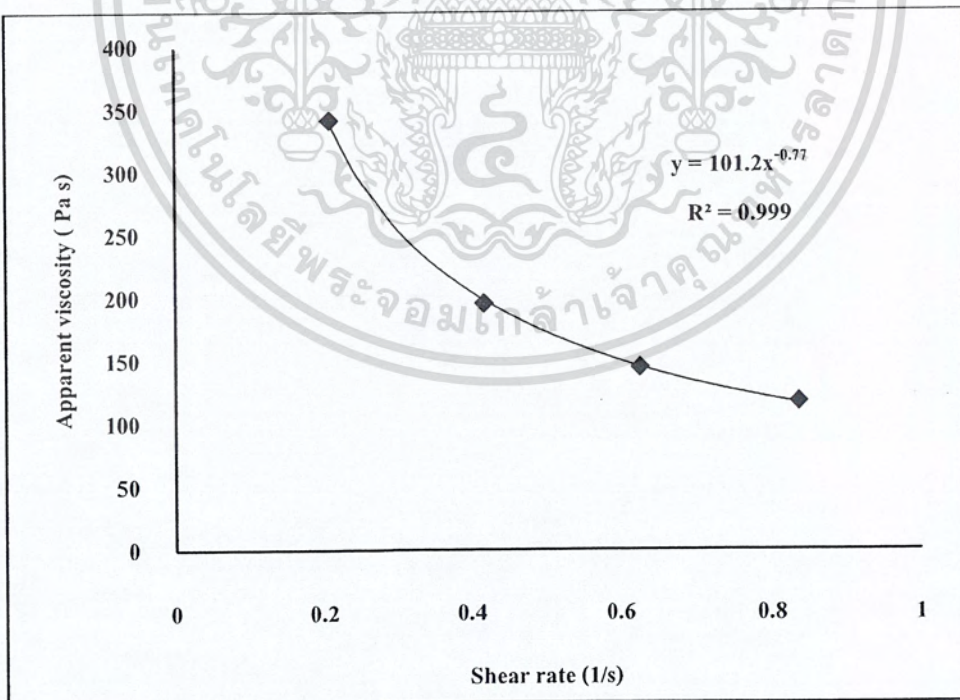
สภาวะที่ 6 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 336.24 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

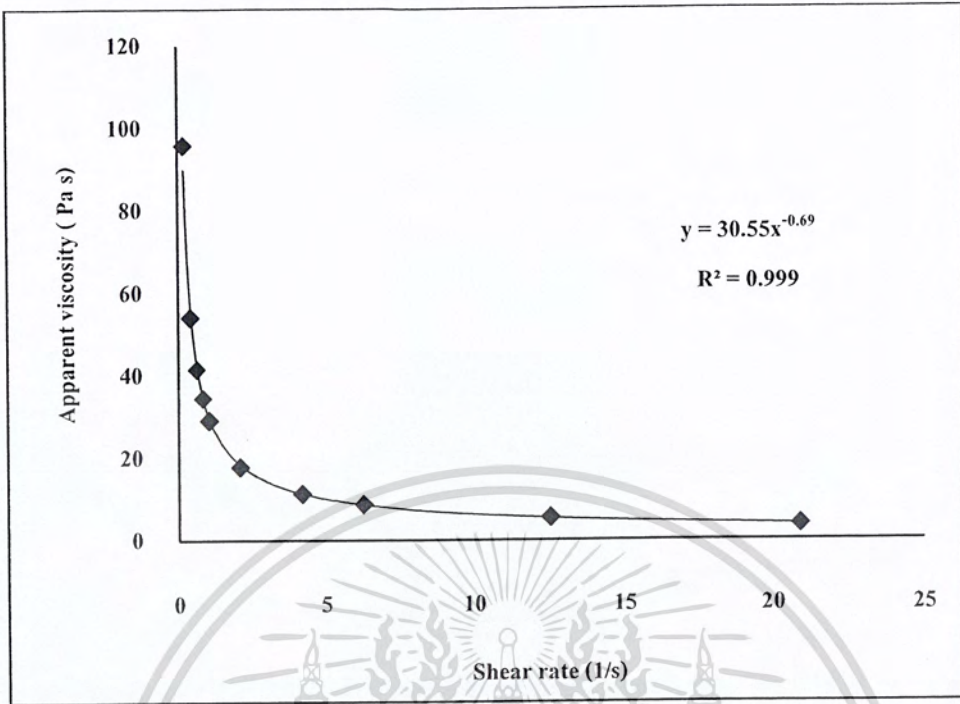
สภาวะที่ 6 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 336.24 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 14)



รูปที่ 28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

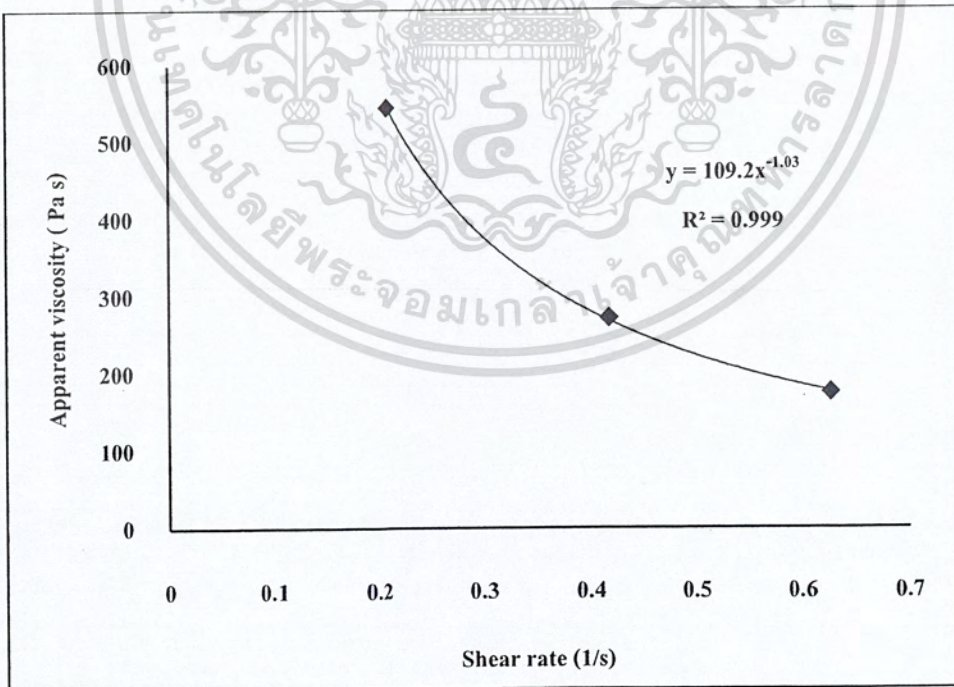
สภาวะที่ 6 ที่ $T=65\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 336.24 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 14)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

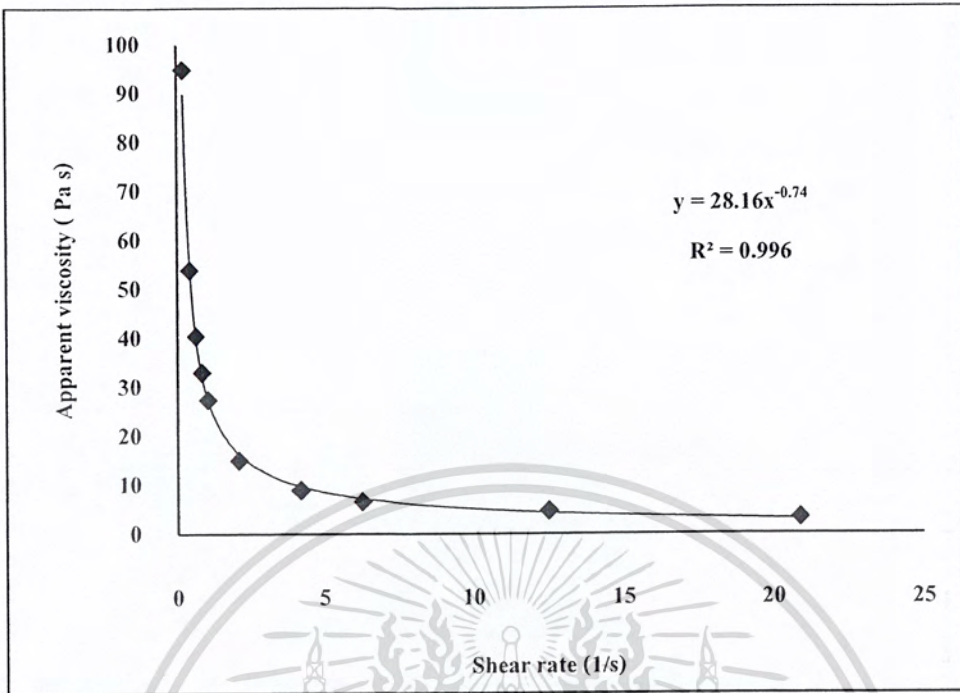
สภาวะที่ 7 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 13)



รูปที่ 30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

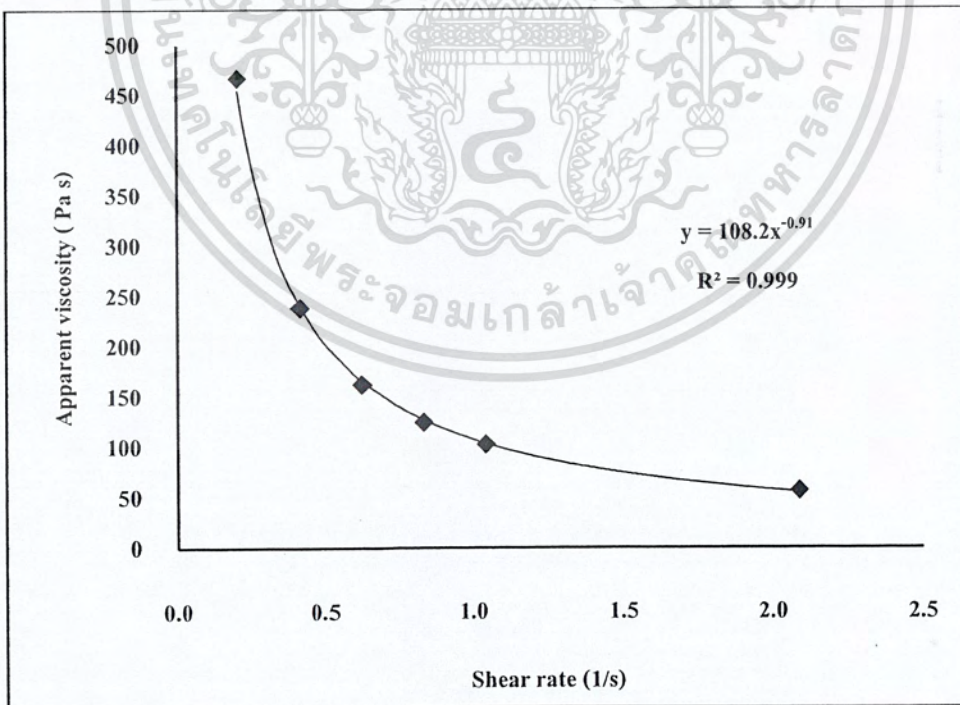
สภาวะที่ 7 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 13)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

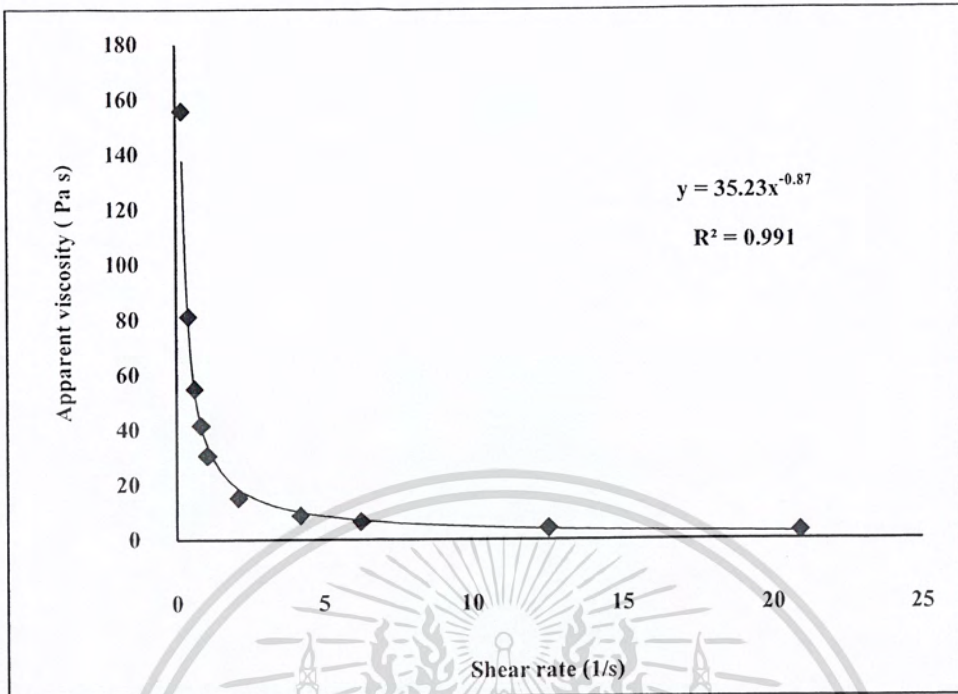
สถานะที่ 7 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 18)



รูปที่ 32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

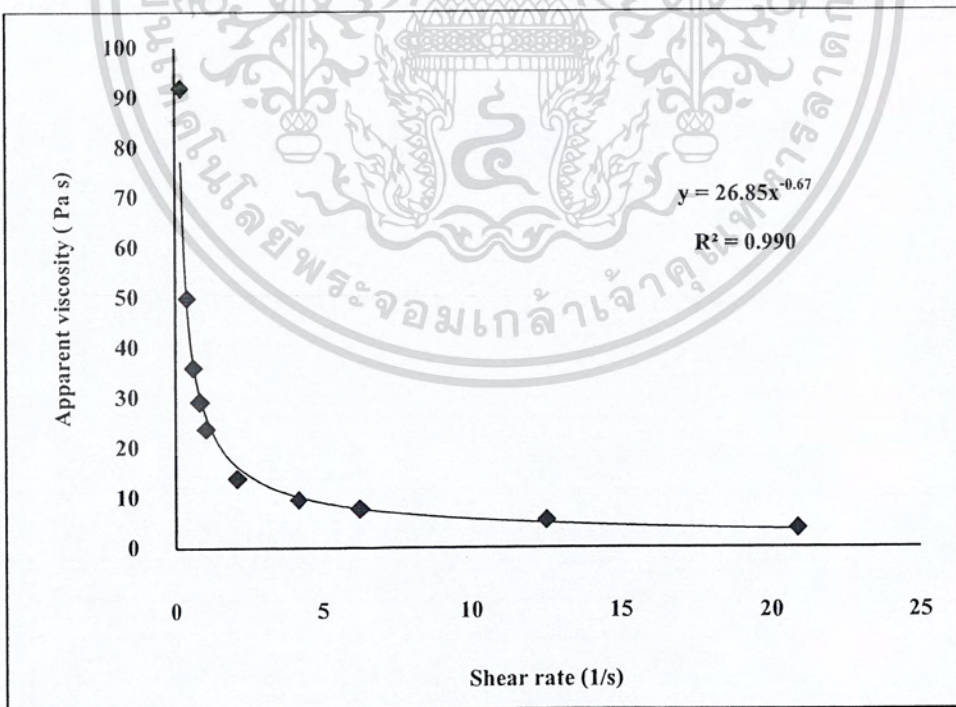
สถานะที่ 7 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 125 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 18)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

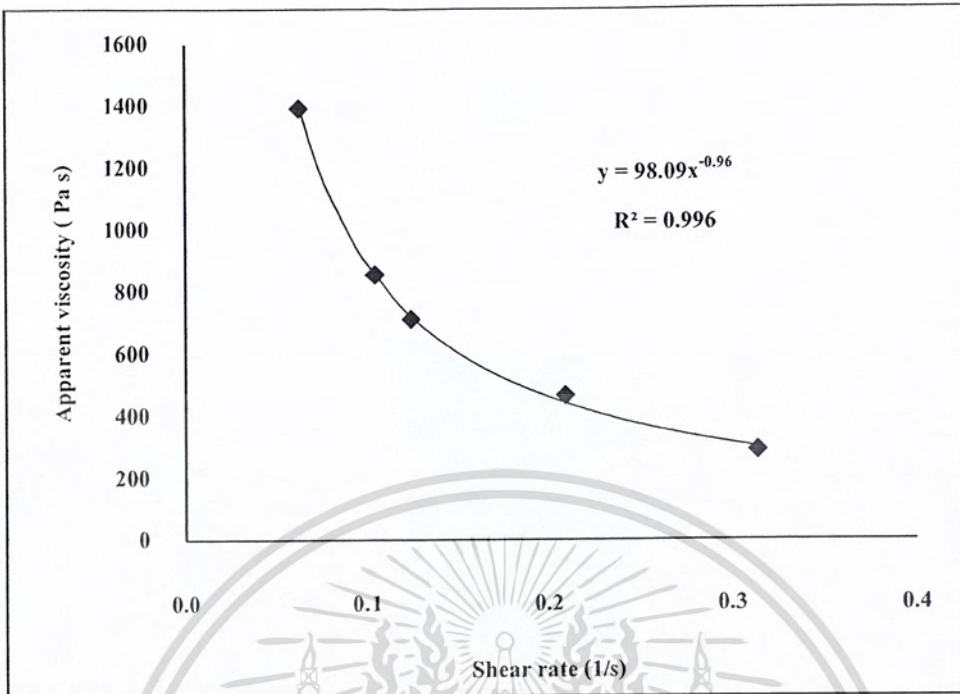
สภาวะที่ 8 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 1)



รูปที่ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

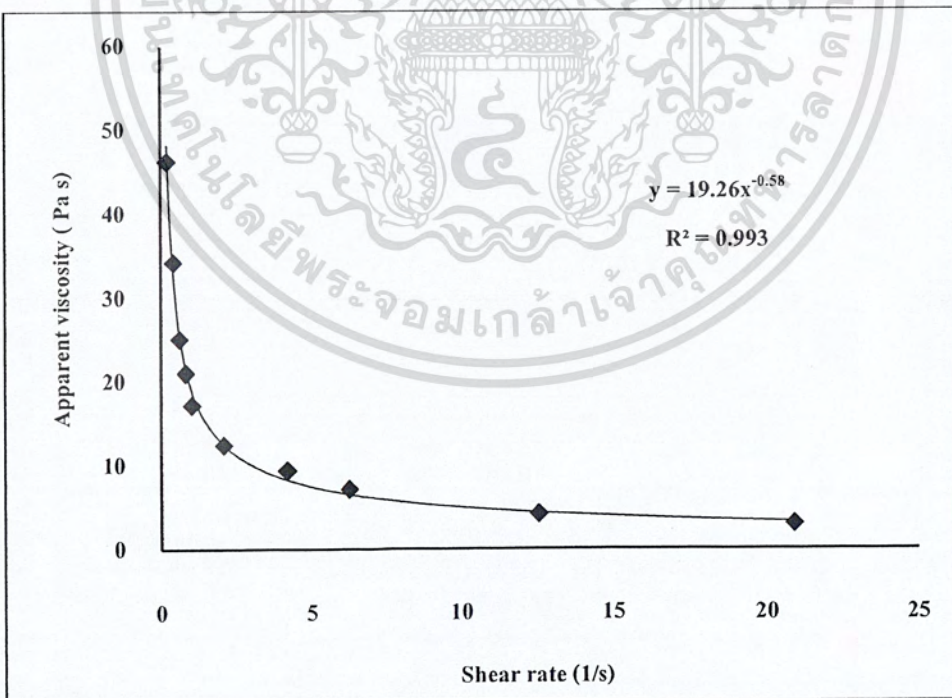
สภาวะที่ 8 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 19)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

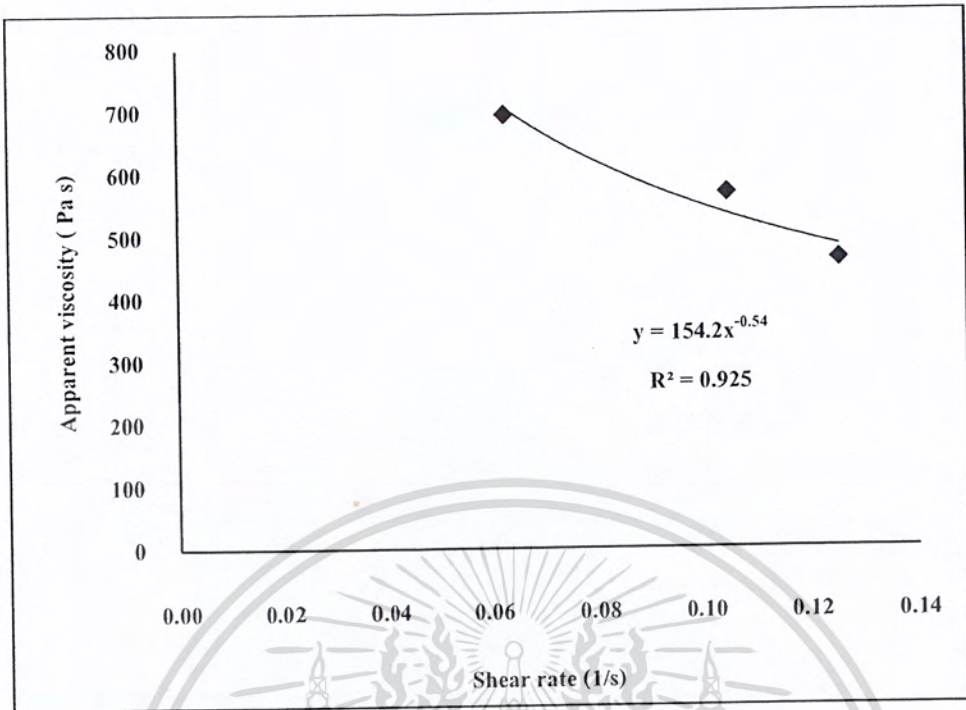
สภาวะที่ 8 ที่ $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 300 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 19)



รูปที่ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

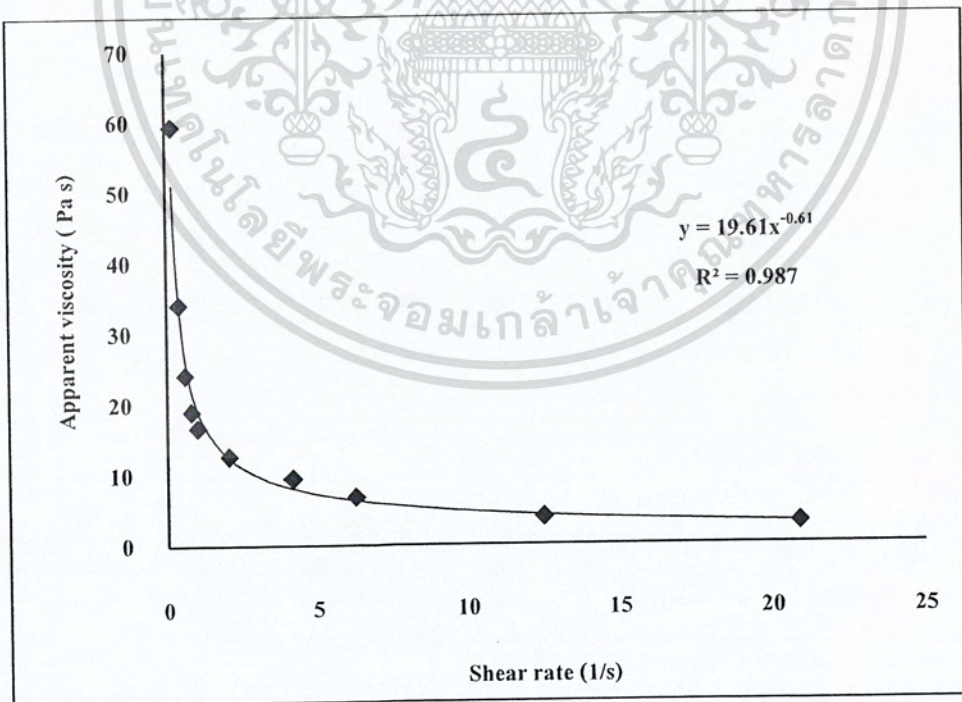
สภาวะที่ 9 ที่ $T=86.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 37 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

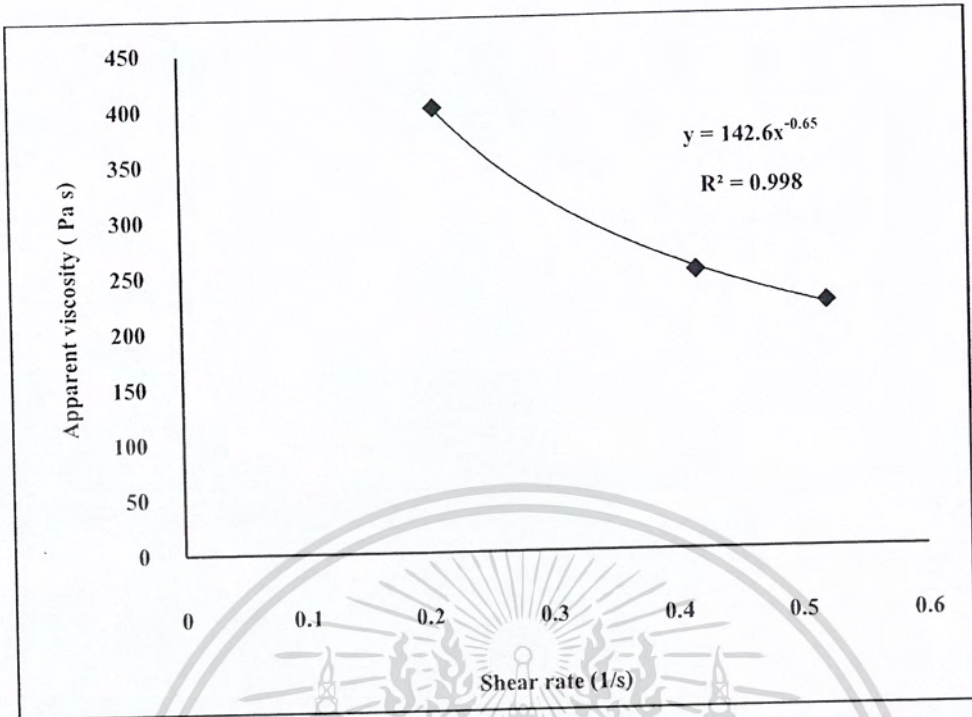
สภาวะที่ 9 ที่ $T=86.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 3)



รูปที่ 38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

สภาวะที่ 9 ที่ $T=86.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (ก่อนการทดลองตัวอย่างที่ 17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 39 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Apparent viscosity (Pa s) และ Shear rate (1/s)

สภาวะที่ 9 ที่ $T=86.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ 212.5 rpm (หลังการทดลองตัวอย่างที่ 17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Al-Asheh S., Jumah R., Banat F., Al-Zou'Bi K., 2004. Direct current electroosmosis dewatering of tomato paste suspension. **Food and Bioproducts Processing**, 82 (3), 193-200.
- [2] Gurak P. D., Cabral. L. M.C., Rocha-Leão M. H. M., Matta V. M., Freitas S. P., 2010. Quality evaluation of grape juice concentrated by reverse osmosis. **Journal of Food Engineering**, 96(3), 421-426.
- [3] Jesus D.F., Leite M.F., Silva L.F.M., Modesta R.D., Matta V.M., Cabral L.M.C., 2007. Orange (*Citrus sinensis*) juice concentration by reverse osmosis. **Journal of Food Engineering**, 81(2), 287-291.
- [4] Yildiz F., Bozkurt M., Wiley R. C., 1993. Comparison of reverse osmosis and evaporation processing on the quality characteristics of tomato concentrates. **Food Control**, Volume 4(3), 155-158.
- [5] ศูนย์นวัตกรรมเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2545) .**Water Activity** กับกรควบคุมอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร. **วารสารจารย์พา** ปีที่ 9 ฉบับที่ 68 เดือนกันยายน/ตุลาคม
- [6] สุภารณ์ ด็กกลาส, 2547, การแปรรูปและการศึกษาคุณสมบัติของน้ำส้มเข้มข้น, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี , คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, Available: <http://www.kmutt.ac.th/rippc/orangjui.htm>
- [7] ชัยวัฒน์ เผ่าสันทัตพาณิชย์, ออกแบบพัฒนาเครื่องทอดสุญญากาศ (สำหรับทุเรียน)
- [8] ทิพย์วรรณางามศักดิ์ และคณะ, การทดสอบและศึกษามะม่วงแปรรูป, ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร, คณะเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- [9] Chemistry Online
Available: <http://www.ponglearning.com/420>
- [10] ชาญณรงค์ กาญจนะและคณะ. 2550, การออกแบบและพัฒนาเครื่องทำไอศกรีมโดยใช้ระบบการทำ ความเย็นเบื้องต้นที่ความดันสุญญากาศ

- [11] Available: http://www.sa.ac.th/winyoo/thermo_gas/Thermal/thermal.htm
- [12] เอกสารประกอบการสอน เรื่อง น้ำ .บทเรียนออนไลน์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
Available: <http://courseware.rmutl.ac.th/courses/49/unit501.htm#head1>
- [13] รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และ ดร.ไพศาล วุฒิจำนงค์, 2545, การประเมินอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร, เอกสารประกอบการสัมมนา-อบรมวิชาการด้านอุตสาหกรรมอาหาร
Available: <http://www.phtnet.org/article/view-article.asp?aID=12>
- [14] รัตนันทน์ พรธรรมาโรทัย, **Water Activity Theory**
Available: www.decagon.com/
- [15] Available: <http://www.thaifoodscience.com>
- [16] มโน สุวรรณคำ, วิศวกรรมการผลิตผลเกษตร, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Available: <http://203.158.184.2/elearning/AgriEngineer1/unit000.htm>
- [17] Properties of Bio Material and Food by Wasan Kanthamoon
Available: http://202.44.47.77/tam/SubjectsbyWASAN/673349%20Properties%20of%20Bio%20Material%20and%20Food/lesson5_Optical%20Property.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้