

การศึกษาความหนาแน่นและความหนืดของน้ำสับประดและน้ำเสาวรส  
ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

DENSITY AND VISCOSITY IN PINEAPPLE JUICE AND PASSION FRUIT JUICE  
AS A FUNCTION OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE



โดย

น.ส. ณีฎฐากร เตชวิทย์วัฒน์

นาย ธวัชชัย ตู้อับทอง

น.ส. พีริดา รัตนวารชร

น.ส. หนึ่งฤทัย สุพฤกษ์ทวีชัย

เลขหน้.....  
เลขทะเบียน.....42385  
วัน, เดือน, ปี.....20 พ.ศ. 2545

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

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้ 35

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2543

ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาค่าความหนาแน่นและความหนืดของน้ำสับประรดและน้ำเสาวรสที่  
ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

ผู้จัดทำ

น.ส. ณิชฎากร เตชวิทย์วัฒน์

นาย รัชชชัย ตู๊ทับทอง

น.ส. พีริดา รัตนวราจร

น.ส. หนึ่งฤทัย สุพฤกษ์ทวีชัย



..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาทิป รัตนภาสกร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาความหนาแน่นและความหนืดของน้ำสับประรดและน้ำเสาวรศ  
ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ

น.ส. ณัฐฐา กูร      เศวทวิทย์วัฒน์

นาย ธวัชชัย      ผู้ทับทอง

น.ส. พีริดา      รัตนวารชร

น.ส. หนึ่งฤทัย      สุพถกษ์ทวีชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาทิพย์ รัตนภาสกร      อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2543

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาและทดลองหาความหนืดและความหนาแน่นของน้ำสับประรดและน้ำเสาวรศที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์ในการผลิตน้ำผลไม้สำเร็จรูป ซึ่งทำการวัดความหนาแน่นโดย Pycnometer และ ทำการวัดความหนืดโดยวิธี Empirical Measurement ด้วยเครื่องมือ Brookfield Rotating Spindle ซึ่งทำการศึกษาคุณสมบัติดังกล่าวของน้ำสับประรดในช่วงความเข้มข้น 10 - 60.8 องศาบริกซ์ และ น้ำเสาวรศในช่วงความเข้มข้น 7 - 13.8 องศาบริกซ์ ภายในช่วงอุณหภูมิ 5 - 72 องศาเซลเซียส ในการศึกษาคุณสมบัติความหนืดของน้ำผลไม้ทั้ง 2 ชนิด พบว่าน้ำสับประรดเป็นของไหลประเภท Newtonian แต่น้ำเสาวรศเป็นของไหลประเภท Non-Newtonian

นอกจากนี้ยังได้มีการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด, ความเข้มข้น กับอุณหภูมิของน้ำสับประรดในรูปแบบสมการคณิตศาสตร์ โดยศึกษาจากสมการของ Arrhenius และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนียกกำลัง, ดัชนีความหนืด, ความเข้มข้น กับอุณหภูมิของน้ำเสาวรศ โดยศึกษาจากสมการยกกำลัง (Power Law Model) รวมทั้งสมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น, ความเข้มข้น กับอุณหภูมิของน้ำผลไม้ทั้ง 2 ชนิด โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยสมการความหนาแน่นของน้ำสับประรดคือ  $\rho = 1030.7912 - 0.4643T + 2.8199C + 0.0284C^2$ ,  $R^2 = 0.9971$  สมการความหนาแน่นของน้ำเสาวรศคือ  $\rho = 1040.2378 - 0.4606T - 2.1939C + 0.2962C^2$ ,  $R^2 = 0.9855$  สมการความหนืดของน้ำสับประรดคือ  $\eta = 0.7981 \exp(6.8942T - 0.0293C + 0.00187C^2)$ ,  $R^2 = 0.9396$  สมการดัชนียกกำลังของน้ำเสาวรศคือ  $n = -0.1352 + 0.0473C + 0.0083T - 0.00002T^2$ ,  $R^2 = 0.9363$  และสมการดัชนีความหนืดของน้ำเสาวรศคือ  $k = 2.5437 + 0.0019T - 0.6870C + 0.0485C^2$ ,  $R^2 = 0.9669$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**DENSITY AND VISCOSITY IN PINEAPPLE JUICE AND PASSION FRUIT JUICE  
AS A FUNCTION OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE**

Nuttarkul	Techawitwat
Thawatchai	Tuthaptong
Peerida	Thanvarachorn
Neungruthai	Supareoktaweechai

Asst.Prof. Satip Ratanapasakorn Adviser  
2000

**Abstract**

This research aims to study the effects of temperature and concentration on the density and viscosity of pineapple juice and passion fruit juice. Pineapple juice and passion fruit juice were experimentally evaluated for viscosity (using Brookfield Rotating Spindle) and density (using Pycnometer). The viscosities and densities of pineapple juice were determined at concentrations of between 10 – 60.8 °Brix and temperature of between 5 and 72 °C. The viscosities and densities of passion fruit juice were determined at concentrations of between 7 – 13.8 °Brix and same range of temperature. Pineapple juice behave as Newtonian liquids. But passion fruit juice behave as Non-Newtonian liquids.

In addition , the results were analyzed to obtain this property as functions of temperature and concentrate in mathematics models. Viscosity's equation of pineapple juice was refer from Arrhenius relationship. Viscosity's equation of passion fruit juice was refer from Power Law Model And Densities' equation was refer from least-squares method. The density of pine apple juice's equation was  $\rho = 1030.7912 - 0.4643T + 2.8199C + 0.0284C^2, R^2 = 0.9971$ . The density of passion fruit juice's equation was  $\rho = 1040.2378 - 0.4606T - 2.1939C + 0.2962C^2, R^2 = 0.9855$ . The viscosity of pineapple juice's equation was  $\eta = 0.7981 \exp(6.8942T - 0.0293C + 0.00187C^2), R^2 = 0.9396$ . The Power law index of passion fruit's equation was  $n = -0.1352 + 0.0473C + 0.0083T - 0.00002T^2, R^2 = 0.9363$ . The consistency index of passion fruit's equation was  $k = 2.5437 + 0.0019T - 0.6870C + 0.0485C^2, R^2 = 0.9669$ .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	ก
สารบัญรูปภาพ	ค
สารบัญตาราง	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น	3
2.2 น้ำผลไม้เข้มข้น โดยการปรุงแต่ง	7
2.3 ความเข้มข้น	8
2.4 ความหนาแน่น	11
2.5 ความหนืด	14
2.6 ผลกระทบของค่าความหนาแน่น และ ความหนืด ต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ในกระบวนการผลิต	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	31
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	33
3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำผลไม้	33
3.2 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ	34
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.4 วิธีการทดลอง	37
บทที่ 4 ผลการทดลอง	42
4.1 ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของน้ำสับปะรดและน้ำเสาวรส	42
4.2 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำสับปะรด	44
4.3 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรส	46
4.4 การหาค่าพารามิเตอร์ $a$ , $b_1$ , $b_2$ และ $b_3$ ของสมการความสัมพันธ์	49
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	68
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก.	71
ภาคผนวก ข.	73
ภาคผนวก ค.	84
กิตติกรรมประกาศ	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ลักษณะขาคความหนาแน่น	12
รูปที่ 2.2 ไฮโดรมิเตอร์	12
รูปที่ 2.3 Rheograms สำหรับของไหลแบบ Newtonian 2 ชนิด (A และ B) และ ของไหลแบบ Non-Newtonian (C)	15
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับอัตราการเฉือนในรูปแบบปกติและ ในรูปแบบ log-log	16
รูปที่ 2.5 หลอดแก้วทดลองรูปถ้วย (Ostwald Viscometer)	18
รูปที่ 2.6 วิธีการหาค่าความหนืดโดยวิธีของสโต็ค	19
รูปที่ 2.7 เครื่องวัดความหนืดรูปทรงกระบอกหมุน	21
รูปที่ 2.8 เครื่องวัดความหนืดแบบเอมไพริคัล (Empirical Cup Viscometer)	23
รูปที่ 2.9 เครื่องปรับค่าความหนืดแบบต่อเนื่องโดยใช้ระบบอัตโนมัติ	24
รูปที่ 2.10 เซคสติดิย์	27
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง	39
รูปที่ 3.2 การหาความหนืดของตัวอย่างน้ำผลไม้	40
รูปที่ 3.3 การหาความหนาแน่นของตัวอย่างน้ำผลไม้ (1)	40
รูปที่ 3.4 การหาความหนาแน่นของตัวอย่างน้ำผลไม้ (2)	41
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของน้ำสับประคที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	42
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของน้ำสับประคที่อุณหภูมิต่าง ๆ	43
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	43
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรสที่อุณหภูมิต่าง ๆ	44
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของน้ำสับประคที่ความเข้มข้น 10, 15, 25 และ 35 °Brix	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของน้ำสับประรดที่ความเข้มข้น 45 และ 60.8 °Brix	45
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างlnของความหนืดกับความเข้มข้นของน้ำสับประรดที่อุณหภูมิต่าง ๆ	46
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับอุณหภูมิของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรสที่อุณหภูมิต่าง ๆ	47
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืดกับอุณหภูมิของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	48
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืดกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรสที่อุณหภูมิต่าง ๆ	49
รูปที่ ก.1 Calibration Curve ของเครื่องวัดความหนืดรูคฟีลด์ รุ่น RVTDVI	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

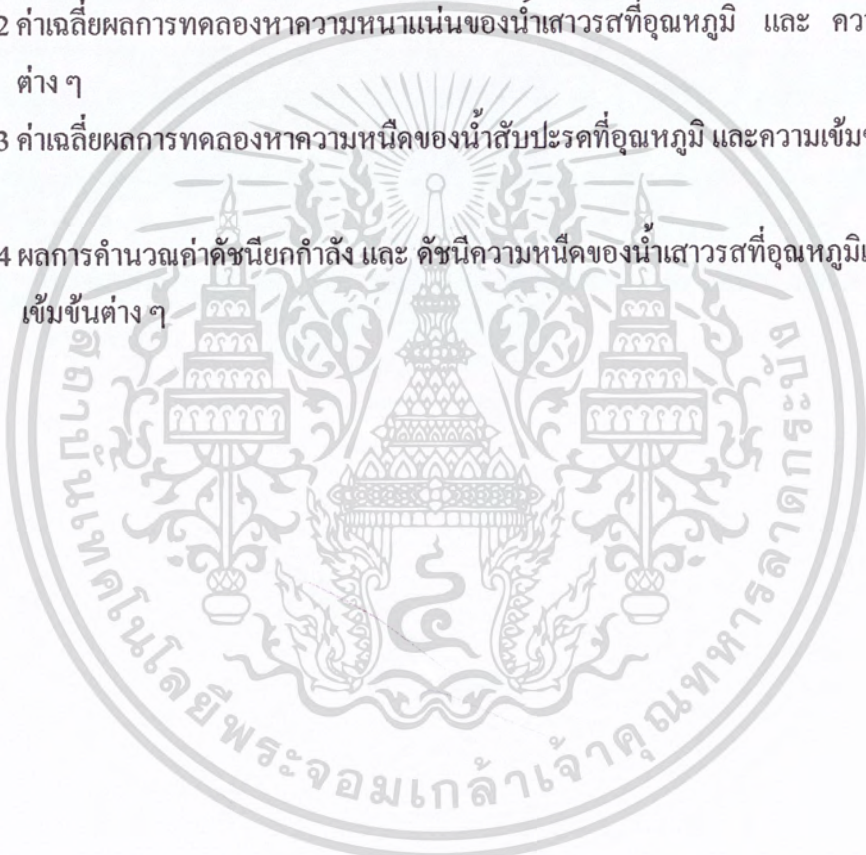
## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 ปริมาณน้ำเสาวรสเข้มข้นและน้ำกลั่นในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสาวรส	34
ตารางที่ 3.2 ปริมาณน้ำสับปะรดเข้มข้นและน้ำกลั่นในการเตรียมตัวอย่างน้ำสับปะรด	34
ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ $a$ , $b_1$ , $b_2$ และ $b_3$ ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น, ความเข้มข้น และ อุณหภูมิของน้ำสับปะรด	52
ตารางที่ 4.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ $a$ , $b_1$ , $b_2$ และ $b_3$ ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น, ความเข้มข้น และ อุณหภูมิของน้ำเสาวรส	56
ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ $a$ , $b_1$ , $b_2$ และ $b_3$ ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด, ความเข้มข้น และ อุณหภูมิของน้ำสับปะรด	58
ตารางที่ 4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ $a$ , $b_1$ , $b_2$ และ $b_3$ ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห, ความเข้มข้น และ อุณหภูมิของน้ำเสาวรส	62
ตารางที่ 4.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ $a$ , $b_1$ , $b_2$ และ $b_3$ ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีหักเห, ความเข้มข้น และ อุณหภูมิของน้ำเสาวรส	64
ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อสร้าง Calibration Curve	72
ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และ ความหนืดของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้น $10^{\circ}\text{Brix}$	74
ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และ ความหนืดของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้น $15^{\circ}\text{Brix}$	74
ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และ ความหนืดของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้น $25^{\circ}\text{Brix}$	75
ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และ ความหนืดของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้น $35^{\circ}\text{Brix}$	75
ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และ ความหนืดของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้น $45^{\circ}\text{Brix}$	76
ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และ ความหนืดของน้ำสับปะรดที่ความเข้มข้น $60.8^{\circ}\text{Brix}$	76
ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้น $7^{\circ}\text{Brix}$	77
ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้น $10^{\circ}\text{Brix}$	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรสถี่ความเข้มข้น13.8 °Brix	81
ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนักของน้ำเสาวรสถี่ความเข้มข้นต่าง ๆ	83
ตารางที่ ค.1 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความหนาแน่นของน้ำสับประคที่อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นต่าง ๆ	85
ตารางที่ ค.2 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความหนาแน่นของน้ำเสาวรสถี่อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นต่าง ๆ	85
ตารางที่ ค.3 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความหนืดของน้ำสับประคที่อุณหภูมิ และความเข้มข้นต่าง ๆ	86
ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณค่าดัชนียกกำลัง และ ดัชนีความหนืดของน้ำเสาวรสถี่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง ๆ	86



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

น้ำผลไม้เข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารในประเทศไทย เนื่องจากสามารถนำน้ำผลไม้เข้มข้นไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิด เช่น ไอศกรีม, น้ำเชื่อมผลไม้, เจลลี่ และ น้ำผลไม้พร้อมดื่ม เป็นต้น นอกจากนี้ น้ำผลไม้เข้มข้นยังสามารถเก็บรักษาได้เป็นเวลานาน เนื่องจากสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ การมีปริมาณน้ำตาลเข้มข้นเกินร้อยละ 65 ทำให้เพิ่มแรงดันออสโมติก ปริมาณน้ำน้อยลง มีน้ำอยู่ในรูปอิสระน้อย ค่า  $a_w$  ต่ำ และ มีความเข้มข้นของกรดสูงทำให้ไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

การถนอมและแปรรูปอาหารด้วยการทำให้เข้มข้น เป็นวิธีการหนึ่งที่นักวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารได้ประยุกต์หลักการเพิ่มของแข็งที่ละลายน้ำได้ ( Soluble Solids ) ในอาหาร โดยผ่านกระบวนการแยกน้ำออกจากอาหาร การเพิ่มสารละลายกรดอินทรีย์และสารอื่น ๆ ให้อาหารนั้น มีความเข้มข้นสูงพอที่จะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพและการเน่าเสียของอาหาร การคืนสภาพอาหารเข้มข้นสามารถทำได้ง่ายโดยการเติมน้ำในปริมาณที่เหมาะสม

การถนอมและแปรรูปอาหารด้วยการทำให้เข้มข้น สามารถทำได้หลายวิธีเช่น การทำให้เข้มข้นโดยการระเหยน้ำหรือแยกน้ำออก การทำให้เข้มข้นด้วยความเย็น การทำให้เข้มข้นด้วยการเพิ่มส่วนที่เป็นของแข็ง การเก็บรักษาอาหารเข้มข้นระยะยาวควรเก็บรักษาในห้องเย็น

การศึกษาค่าความหนืด และ ความหนาแน่นของน้ำผลไม้เข้มข้นทำให้สามารถวิเคราะห์และพัฒนากระบวนการผลิต และควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ เนื่องจากข้อมูลของค่าความหนืด และ ความหนาแน่นที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ ใช้ในการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์การผลิตได้อย่างเหมาะสม เช่น ในระบบเครื่องสูบ, ท่อลำเลียง และ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วัตถุประสงค์ทั่วไปเพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบและเลือกใช้อุปกรณ์การผลิตน้ำผลไม้ที่เหมาะสม โดยมีวัตถุประสงค์หลักดังนี้

1. เพื่อหาค่าความหนาแน่น และ ความหนืดของน้ำเสาวรสที่ค่าความเข้มข้น 7 – 13.8 องศาบริกซ์ และ น้ำสับปะรดที่ค่าความเข้มข้น 10 – 60.8 องศาบริกซ์ และ ที่อุณหภูมิ 5 – 72 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หาความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่น และ ความหนืดที่เปลี่ยนแปลง เมื่อความเข้มข้นและอุณหภูมิเปลี่ยนไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากเครื่องคั้นที่สามารถบริโภคน้ำผลไม้ที่ยังมีความไม่สะดวกต่อการเก็บรักษา และขนส่ง จึงมีการผลิตเครื่องคั้นเข้มข้นขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว โดยนำผลไม้เข้มข้นทั่วไปไปนิยมนำให้ความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 4 เท่า คือ ต้องเติมน้ำ 3 ส่วนลงในเครื่องคั้น 1 ส่วนก่อนบริโภค น้ำผลไม้เข้มข้นได้จากการเอาน้ำผลไม้สกัดหรือคั้นจากผลไม้ มาทำให้น้ำระเหยออกไปบางส่วน อาจจะได้เติมน้ำตาลหรือไม่ก็ได้ ความเข้มข้นจากการระเหยน้ำออกและการเติมน้ำตาลจะทำให้น้ำผลไม้เข้มข้นที่มีความดันออสโมติกสูงขึ้น เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญได้ยาก ผลไม้ที่จะนำมาทำน้ำผลไม้เข้มข้น ควรสุกเต็มที่เพื่อให้ได้ผลไม้ที่มีรสชาติและกลิ่นหอม (ศิริลักษณ์, 2520) ในปัจจุบันเครื่องมือที่ช่วยในการระเหยน้ำออกจากเครื่องคั้นสามารถทำให้เข้มข้นได้ประมาณ 55 – 65 องศาบริกซ์ (Degree of Brix) แต่ในทางปฏิบัติต้องการความเข้มข้นเพียง 42 องศาบริกซ์ ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสม ไม่มีความหนืดมาก สะดวกในการปฏิบัติ (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540)

#### 2.1 การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540) มีขั้นตอนดังนี้

1. การคัดเลือกและล้าง การคัดเลือกเพื่อให้ได้ผลไม้ที่มีระยะเวลาการสุกเท่ากันสีของน้ำผลไม้จะได้คงที่ ส่วนการล้างมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณจุลินทรีย์ สิ่งเจือปน และ ยาฆ่าแมลงที่ติดมากับผลไม้ อาจทำได้โดยการล้างน้ำ การแช่น้ำ การจืดด้วยน้ำที่มีแรงดันสูง และอาจใช้สารเคมีบางชนิดช่วยในการล้างด้วย เช่น กรดเกลือจะช่วยลดปริมาณจุลินทรีย์ได้ ใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกประมาณ 5% จะช่วยล้างยาฆ่าแมลงได้ แล้วจึงล้างน้ำสะอาดอีกครั้ง

2. การเตรียมผักผลไม้ ทำการแยกส่วนที่บริโภคไม่ได้ ออก เช่น ปอกเปลือกสับปะรด แยกเมล็ดผลไม้ ออก เป็นต้น ใช้เฉพาะส่วนที่บริโภคได้ ผลไม้บางชนิดอาจต้องทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ ตามความเหมาะสม เช่น สับปะรดหลังจากปอกเปลือก หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อช่วยในการสกัดน้ำต่อไป

3. การสกัดน้ำผลไม้ ส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การตีปั่น และการคั้นน้ำผลไม้ แต่ผลไม้บางชนิดสามารถนำไปคั้นน้ำได้เลย โดยไม่ต้องผ่านการตีปั่น เช่น องุ่น ส้ม กรรมวิธีที่ใช้ในการสกัดน้ำผลไม้แต่ละชนิดจะมีรายละเอียดต่างกัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเนื้อเยื่อของผลไม้ และลักษณะของน้ำผลไม้ที่ต้องการ เช่น ขุ่น หรือใส

- การตีป่น เป็นขั้นตอนการเพิ่มพื้นที่ผิวของผลไม้ให้มากขึ้น เพื่อช่วยต่อการคั้นน้ำผลไม้ นิยมใช้เครื่องสับทำให้ผลไม้มีขนาดเล็กกลง ผลไม้บางชนิดอาจต้องปอกเปลือกออกก่อน เช่น สับปะรด ในขั้นนี้ต้องระวังไม่ให้อากาศสัมผัสกับผลไม้มากเพราะจะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงจากเอนไซม์ในผลไม้ และจากโลหะที่ปนอยู่ เครื่องมือที่ใช้ในการทำน้ำผลไม้ จะต้องทำจากโลหะที่ไม่ทำให้น้ำผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงไป เช่น การเปลี่ยนสี เกิดสีคล้ำ เครื่องมือต่าง ๆ จึงควรทำจากเหล็กปลอดสนิม หรือโลหะเคลือบอลูมิเนียม ไม่ควรทำจากโลหะเหล็ก ทองแดง และดีบุก เพราะจะทำให้สีและรสชาติของผลไม้เปลี่ยนแปลงไป

- การคั้นน้ำผลไม้ เป็นขั้นตอนการสกัดของเหลวออกจากชิ้นส่วนของผลไม้โดยการคั้นซึ่งทำได้หลายวิธีตั้งแต่ที่ง่ายที่สุด คือ การใช้ผ้าขาวบางห่อแล้วใช้ไม้กดทับไว้หรือใช้มือบีบ วิธีนี้เหมาะที่จะทำในระดับครัวเรือนส่วนในทางอุตสาหกรรมนิยมใช้เครื่องกดแบบตะแกรง (Basket press) หรือ เครื่องอัดไฮดรอลิก การสกัดน้ำผลไม้บางชนิด เช่น องุ่น อาจมีการให้ความร้อนประมาณ 60 – 65 องศาเซลเซียส ก่อนการสกัด จะช่วยสกัดสีจากน้ำองุ่นได้ดีขึ้น ส่วนในน้ำมะเขือเทศการให้ความร้อนก่อนการสกัดจะทำให้ความข้นคงตัวดี นอกจากนี้อาจเติมเอนไซม์พวกที่ย่อยสลายเพคตินก่อนให้ความร้อนที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งไว้ 2 – 3 ชั่วโมง หรือข้ามคืน ลงไปเพื่อเพิ่มปริมาณของเหลวที่สกัดได้ ช่วยทำให้ใสและช่วยสกัดสีด้วย

4. การไล่อากาศ มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณออกซิเจนในผลไม้ที่เกิดจากการตีป่น และการกรอง เพราะออกซิเจนจะทำให้น้ำผลไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่เรียกว่า ออกซิเดชัน (oxidation) การไล่อากาศสามารถทำได้โดยให้น้ำผลไม้ผ่านเข้าไปในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งมีเครื่องดูดอากาศออกไปด้วย

5. การกรอง เป็นกระบวนการแยกเนื้อผลไม้ เมล็ด หรือเปลือกของผลไม้ที่อาจติดอยู่ในน้ำผลไม้ออกเพื่อให้น้ำผลไม้ใส

6. บรรจุรสชาติ เป็นขั้นตอนที่ทำการเติมน้ำตาลทราย กรด และอาจเติมสีและกลิ่นอีกด้วย

- กรดเป็นสารประกอบสำคัญอีกชนิดหนึ่งซึ่งให้รสเปรี้ยวในเครื่องดื่ม ช่วยกระตุ้นให้เกิดความพอใจในรส ระวังความกระหาย ช่วยเพิ่มความหวานของน้ำตาล และช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของเครื่องดื่ม กรดที่นิยมใช้เติมในน้ำผลไม้ ได้แก่

- กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) ช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้สีกลิ่น รสของเครื่องดื่มคงตัวในสภาพเป็นกรดพบว่ากรดแอสคอร์บิกจะคงตัวได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กรดซิตริก (Citric acid) ให้รสเปรี้ยวที่เข้ากับกลิ่นผลไม้ได้ดี สามารถสกัดได้จากมะนาว สับปะรด หรือการหมักจากเชื้อรา
- กรดทาร์ทาริก (Tartaric acid) ใช้มากในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มจากองุ่นและมะขาม
- กรดฟูมาริก (Fumaric acid) มีรสเปรี้ยวมากกว่ากรดอื่น ๆ ราคาถูก และดูดความชื้นได้น้อย จึงเหมาะกับผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชนิดผง
- กรดมาลิก (Malic acid) ในธรรมชาติพบมากในแอปเปิล ลูกท้อ แครนเบอร์รี่ และมะม่วง เป็นต้น

การเลือกใช้กรดในเครื่องดื่มจะต้องพิจารณาถึง ชนิด ปริมาณ และ คุณสมบัติของกรดให้เหมาะสมกับลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ นิยมใช้กรดหลายชนิดรวมกัน

- สี เป็นสิ่งที่ช่วยดึงดูดใจของผู้บริโภค สีที่ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแบ่งเป็น 3 ชนิดคือ
  - สีธรรมชาติ ไม่นิยมใช้ในเครื่องดื่มเพราะเป็นสีที่มีความคงตัวน้อย เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ส่วนใหญ่จะมียอยู่ในผลไม้ที่ใช้ผลิตเครื่องดื่ม เช่น carotinoid และ annatto ให้สีเหลือง chlorophyll ให้สีเขียว anthocyanin ให้สีน้ำเงิน ม่วง และแดง
  - สีเทียม ได้จากการแปรรูปสารที่มีอยู่ในธรรมชาติด้วยกรรมวิธีที่เหมาะสม เช่น สีคาราเมล หรือ สีน้ำตาลไหม้ ซึ่งได้จากการให้ความร้อนน้ำตาลอย่างเดียว หรือ ได้จากการต้มน้ำเชื่อมกับแอมโมเนียและแอมโมเนียมคาร์ไบเนต ส่วนมากใช้กับเครื่องดื่มกลิ่นครีม โชดา รูทเบียร์ หรือ โคล่า
  - สีสังเคราะห์ เป็นสีที่มีความคงตัวสูง และต้องเป็นสีชนิดที่กฎหมายอนุญาตให้ใช้ ผ่านการทดสอบแล้วว่ามีโทษต่อผู้บริโภคน้อย เช่น Brilliant Blue FCF, Fast Green FCF, Sunset Yellow FCF

7. การทำให้เข้มข้น ขั้นตอนในการทำให้เข้มข้นสามารถแบ่งได้หลายวิธี โดยแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

1. การทำให้เข้มข้นโดยการแช่แข็งและเครื่องเหวี่ยง วิธีนี้ใช้อุณหภูมิทำให้ น้ำบางส่วนในน้ำผลไม้กลายเป็นน้ำแข็ง แล้วแยกน้ำแข็งเหล่านี้ออกไป ข้อดีของการทำให้เข้มข้นโดยการแช่แข็งคือ สามารถรักษากลิ่นของผลไม้ได้มากกว่าวิธีอื่นและไม่ทำให้สารที่ไม่ทนต่อความร้อนสูญเสีย ส่วนข้อเสียถ้าทำให้น้ำเกิดการแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ของแข็งบางส่วนจะติดไปกับน้ำแข็งและหายไปเมื่อแยกน้ำแข็งออก จึงทำให้สีและกลิ่นของผลไม้เจือจางลง แม้ว่าวิธีการนี้จะได้น้ำผลไม้ที่มีความเข้มข้นที่มีรสชาติใกล้เคียงกับผลไม้สดที่สุด หลังเจือจางแล้วเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น ๆ แต่ก็ยังไม่เป็นที่นิยมเพราะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย และทำให้เข้มข้นได้เพียงระดับหนึ่งเท่านั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเยือกติด (Eutectic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

temperature) ของน้ำผลไม้ คือ อุณหภูมิที่น้ำตาลและสารอื่นจะแยกตัวออกมาที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งน้ำแข็งจะแยกตัวออกมาเมื่ออุณหภูมิใกล้ถึงจุดเยือกแข็ง นอกจากนี้สำหรับผลไม้ที่จุ่มไม่นิยมใช้วิธีแช่แข็งทำให้เข้มข้น เพราะสารอื่นจะแยกออกจากน้ำผลไม้พร้อมน้ำแข็ง

2. การทำให้เข้มข้นภายใต้สุญญากาศ เป็นการระเหยน้ำภายใต้สุญญากาศ ทำให้อุณหภูมิที่ใช้ระเหยน้ำต่ำกว่าการใช้บรรยากาศปกติ จึงไม่ทำให้น้ำผลไม้มีคุณภาพเสียไปเนื่องจากความร้อน วิธีนี้ช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาล รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงรสชาติและสี เพราะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนน้อยมาก ปกติจุดเดือดของน้ำจะต่ำลงภายใต้สุญญากาศมากกว่า 28 นิ้วปรอท เช่น ที่ภายใต้สุญญากาศ 29 นิ้วปรอท น้ำจะเดือดที่ 24 องศาเซลเซียส เครื่องมือที่ใช้ระเหยน้ำภายใต้สุญญากาศที่รู้จักกัน คือ หม้อระเหยสุญญากาศ (Vacuum pan) ซึ่งมีลักษณะเป็นหม้อต้มที่มีฝาปิดสนิทและมีส่วนที่ต่อกับปั๊มสุญญากาศดูดเอาอากาศออกไป ทำให้น้ำระเหยได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าสภาพปกติ

3. การระเหยโดยใช้อุณหภูมิสูงและเวลาสั้น วิธีนี้ใช้ความร้อนสูงประมาณ 40 – 96 องศาเซลเซียส เช่น เครื่อง TASTE ประกอบด้วย 7 ชั้นคอน และมีระบบการทำมาเย้นด้วยสุญญากาศ การทำน้ำผลไม้เข้มข้นโดยวิธีต่าง ๆ กลิ่นรสส่วนหนึ่งจะหายไปในการระเหยน้ำ จึงจำเป็นต้องมีการเติมแต่งกลิ่นรสของผลไม้ลงไปด้วย ซึ่งกลิ่นรสนี้อาจได้จากการเติมในรูปน้ำมันหอมระเหย (Essential oil) หรือกลิ่นรสที่ระเหยออกมาระหว่างทำให้เข้มข้น แล้วกลั่นกลับมาเก็บไว้หรือเติมน้ำผลไม้สดลงไป (Cut back)

8. การบรรจุ ทำการบรรจุลงขวดที่แห้ง สะอาด และ ทำการฆ่าเชื้อแล้ว ทำการปิดผนึกปิดฉลาก

9. การเก็บรักษา เพื่อให้ผลไม้เข้มข้นมีความคงตัวมากที่สุดเป็นระยะเวลานานโดยไม่เสื่อมเสียจากปฏิกิริยาเคมี จุลินทรีย์ เอนไซม์ และ โลหะ สามารถทำได้หลายวิธี คือ

- การพาสเจอร์ไรซ์ โดยปกติใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที เพื่อทำลายจุลินทรีย์ที่เป็นอันตรายต่อผู้บริโภค แต่สำหรับน้ำผลไม้ทั่วไปจะมี pH ต่ำกว่า 4.5 ซึ่งเป็นสภาพที่สปอร์ของจุลินทรีย์อันตรายนี้ไม่สามารถเจริญได้ การใช้อุณหภูมิ 71 – 74 องศาเซลเซียส ก็เพียงพอต่อการทำลายเชื้อแบคทีเรีย รา และยีสต์ในน้ำผลไม้ ในโรงงานผลิตน้ำผลไม้แบบใหม่ จะใช้การพาสเจอร์ไรซ์แบบต่อเนื่อง เรียกว่า Flash pasteurization ใช้ความร้อนสูง 82 – 90 องศาเซลเซียส นาน 2 – 3 วินาที แล้วทำให้เย็นลงทันที วิธีนี้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงกลิ่นรสของน้ำผลไม้น้อยมาก

- การใช้ความเย็น ในสภาพอุณหภูมิต่ำจะเกิดการเปลี่ยนแปลง หรือ เสื่อมเสียจากปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์ลดลง จึงช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ การแช่เย็นที่อุณหภูมิ 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาเซลเซียสก็อาจมีเชื้อราเจริญได้ ถ้าลดอุณหภูมิให้ต่ำลงในระดับแช่แข็งจะทำให้เก็บรักษาได้นานขึ้น เช่น น้ำองุ่นสามารถเก็บได้นาน 2 ปี โดยสีและกลิ่นรสไม่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิ -9 ถึง -12 องศาเซลเซียส

- การใช้สารเคมี นิยมใช้วิธีนี้กับเครื่องคั้นผสมเข้มข้น สารเคมีที่ช่วยในการเก็บรักษาได้แก่

- เบนโซเอต (Benzoate) เป็นเกลือของกรดเบนโซอิก ในรูปเกลือละลายน้ำได้ดีกว่าในรูปของกรด ปริมาณที่อนุญาตให้ใช้ในอาหารคือ 0.1 % หรือ 1000 ppm ประสิทธิภาพการทำลายจุลินทรีย์ในสภาวะเป็นกรดจะสูงกว่าเป็นกลาง นิยมใช้在水ผลไม้หรือน้ำผลไม้ที่มีสีและเข้มข้น เช่น สควอชไซรัป เป็นต้น
- ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) สารนี้มีประสิทธิภาพการทำลายราและแบคทีเรียได้ดีกว่ายีสต์ ปริมาณที่อนุญาต คือ 0.1 % เช่นเดียวกับเบนโซเอต แต่ถ้าใช้ปริมาณมากเกินไปจะทำให้มีกลิ่นในน้ำผลไม้ซึ่งไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค นอกจากนี้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ยังช่วยป้องกันการเกิดสีน้ำตาลหรือการเปลี่ยนแปลงสีของน้ำผลไม้ด้วย อาจใช้สารนี้ในรูปก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ กรดซัลฟูริก หรือ เกลือโซเดียม หรือ โพแทสเซียม สารนี้อาจจะทำให้สีแดงหรือม่วงขององุ่นหายไป แต่ถ้านำไปต้มไล่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สีจะกลับคืนมา
- วิธีอื่น ๆ เนื่องจากน้ำผลไม้ส่วนใหญ่มีสภาพเป็นกรด ยีสต์จึงเป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมเสีย พบว่าการใช้ความดันสูง เช่น  $517.106 \times 10^6$  ปาสคาล นาน 30 นาที ทำลายยีสต์ได้ การอัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งเพราะช่วยเพิ่มความดัน และลดปริมาณออกซิเจนในน้ำผลไม้

## 2.2 น้ำผลไม้เข้มข้นโดยการปรุงแต่ง (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540)

เป็นเครื่องคั้นประเภทที่เกิดจากการแต่งเติมกลิ่นรสลงในน้ำผลไม้เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการบริโภค ซึ่งแบ่งได้เป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1. เนกต้า (Nectar) คือเครื่องคั้นที่อาจจะประกอบด้วยผลไม้ชนิดเดียว หรือหลายชนิด มีความข้นของเนื้อสูงประมาณ 40 % จึงต้องทำจากผลไม้ที่มีเนื้อมาก เช่น กล้วย ฝรั่ง สับปะรด มะละกอ ลูกท้อ ฯลฯ

2. สควอช (Squash) มีลักษณะขุ่นน้อยกว่าเนกต้า ประกอบด้วยน้ำผลไม้ที่ขุ่นไม่น้อยกว่า 25 % และมีปริมาณสารที่ละลายได้ในน้ำไม่น้อยกว่า 40 % ความเป็นกรดอยู่ในช่วง 1.2 – 1.5 % เก็บรักษาโดยใช้สารเคมี เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือเบนโซเอต

3. คอร์ดียาล (Cordial) มีลักษณะคล้ายสควอชแต่ต้องใสและส่วนประกอบจากน้ำผลไม้ไม่ต่ำกว่า 25 % มีสารที่ละลายน้ำได้มากกว่า 30 % ความเป็นกรดค่อนข้างสูง คือ 2.0 – 2.5 จึงมีรสออกเปรี้ยวมาก นิยมทำจากผลไม้พวกมะนาว เก็บรักษาโดยใช้ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ หรือเบนโซเอต

4. น้ำเชื่อม (Syrup) อาจมีลักษณะขุ่นหรือใสก็ได้ แต่ต้องมีส่วนของน้ำผลไม้ไม่น้อยกว่า 25 % และมีปริมาณสารที่ละลายน้ำได้อย่างน้อย 65 % แต่ต้องมีความเป็นกรดต่ำ ถ้ามีน้ำตาลน้อยกว่า 68 % ต้องใช้สารเคมีในการเก็บรักษา เครื่องดื่มประเภทนี้ต้องทำการเจือจางก่อนดื่มซึ่งควรมีสารที่ละลายน้ำ 10-20 % และมีความเป็นกรด 0.5-0.6 %

5. น้ำหวานอื่น ๆ เกิดจากการเติมสารให้กลิ่นรส กรด และสีลงในน้ำเชื่อมเข้มข้น 70-75 องศาบริกซ์

### 2.3 ความเข้มข้น

ความเข้มข้น หมายถึง ปริมาณของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย โดยการบอกหน่วยของความเข้มข้นมีหลายวิธี ดังนี้

- ร้อยละของตัวถูกละลาย การบอกความเข้มข้นโดยวิธีนี้มี 3 แบบดังนี้
  - ร้อยละโดยมวล หมายถึง มวลของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 100 หน่วยมวลเดียวกัน (โศภณ และคณะ, 2535) การบอกความเข้มข้นโดยวิธีนี้ใช้กันมากถ้าตัวถูกละลายเป็นของแข็ง สัญลักษณ์คือ % w/w

$$\text{ร้อยละ โดยมวล} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลทั้งหมดของสารละลาย}} \times 100$$

- ร้อยละโดยปริมาตร หมายถึง ปริมาตรของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 100 หน่วยปริมาตร (โศภณ และคณะ, 2535) ใช้กับตัวถูกละลายที่เป็นของเหลว สัญลักษณ์คือ % v/v

$$\text{ร้อยละ โดยปริมาตร} = \frac{\text{ปริมาตรของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดของสารละลาย}} \times 100$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ร้อยละโดยน้ำหนักต่อปริมาตร หมายถึง น้ำหนักของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 100 หน่วยปริมาตร (คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมี ตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย, 2536) สัญลักษณ์คือ % w/v

$$\text{ร้อยละโดยมวลต่อปริมาตร} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดของสารละลาย}} \times 100$$

- ส่วนในล้านส่วน หมายถึง ส่วนของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 1,000,000 ส่วน (โสภณ และคณะ, 2535) สัญลักษณ์คือ ppm

$$\text{ppm} = \frac{\text{มวลของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลทั้งหมดของสารละลาย}} \times 1,000,000$$

$$\text{หรือ} = \frac{\text{ปริมาตรของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรทั้งหมดของสารละลาย}} \times 1,000,000$$

- โมลาริตี (Molarity) หมายถึง จำนวนโมลของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร (โสภณ และคณะ, 2535) ใช้หน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร โมลต่อลิตรหรือ โมลาร์ (Molar) สัญลักษณ์คือ M

$$M = \frac{\text{มวลเป็นกรัมของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย} \times \text{ปริมาตรในลิตรของสารละลาย}}$$

- โมแลลิตี หมายถึง จำนวนโมลของตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในตัวทำละลายหนัก 1 กิโลกรัม (โสภณ และคณะ, 2535) ใช้หน่วยเป็นโมลต่อกิโลกรัม หรือ โมแลล (molal) การบอกความเข้มข้นโดยวิธีนี้ใช้กับพวกที่มีสมบัติที่ขึ้นกับจำนวนของอนุภาคของตัวถูกละลาย สัญลักษณ์คือ m

$$m = \frac{\text{มวลเป็นกรัมของตัวถูกละลาย}}{\text{มวลโมเลกุลของตัวถูกละลาย} \times \text{มวลเป็นกิโลกรัมของสารละลาย}}$$

ถ้าเป็นตัวทำละลาย ค่าของโมลาริตีและโมแลลิตีของสารละลายจะใกล้เคียงกัน เพราะความหนาแน่นของน้ำมีค่าประมาณ 1 ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ฟอร์มาลิตี (Formality)** หมายถึง จำนวนกรัมสูตรของตัวถูกละลายที่ละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร (คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์สาขาเคมี ตามโครงการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย, 2536) ใช้หน่วยเป็นฟอร์มาล (formal) ฟอร์มาลิตีและโมลาริตีคล้ายกันมาก เพียงแต่โมลาริตีใช้กับสารประกอบที่มีสูตรโมเลกุล สำหรับสารประกอบที่มีสูตรโมเลกุลนั้น น้ำหนักโมเลกุลก็คือน้ำหนักสูตรนั่นเอง ส่วนฟอร์มาลิตีนิยมใช้กับสารประกอบไอออนิกซึ่งไม่มีสูตรโมเลกุล สัญลักษณ์คือ  $f$

$$f = \frac{\text{มวลเป็นกรัมของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรเป็นลูกบาศก์เดซิเมตรของสารละลาย}}$$

- **นอร์มาลิตี (Normality)** หมายถึง จำนวนกรัมสมมูลของของตัวถูกละลายที่ละลายที่ละลายอยู่ในสารละลาย 1 ลูกบาศก์เดซิเมตร (โสภณ และคณะ, 2535) ใช้หน่วยเป็นนอร์มาล (normal) สัญลักษณ์คือ  $N$

$$N = \frac{\text{มวลเป็นกรัมของตัวถูกละลาย}}{\text{ปริมาตรเป็นลูกบาศก์เดซิเมตรของสารละลาย}}$$

- **เศษส่วนโมล (mole fraction)** หมายถึง จำนวนโมลของสารองค์ประกอบนั้นหารด้วยจำนวนโมลของสารองค์ประกอบทั้งหมดในสารละลาย (โสภณ และคณะ, 2535)

$$x_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i}$$

$$x_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_i}$$

โดยที่  $x_i$  = เศษส่วน โมลของสารองค์ประกอบที่  $i$

$n_i$  = จำนวน โมลของสารองค์ประกอบที่  $i$

ผลบวกของเศษส่วน โมลของสารองค์ประกอบทั้งหมดเท่ากับ 1 เสมอ คือ

$$x_1 + x_2 + x_3 + \dots = 1$$

ถ้าต้องการทราบ โมลเปอร์เซ็นต์ (mole percent) ก็ทำได้โดยนำ 100 คูณเข้ากับเศษส่วน โมล

$$\text{โมลเปอร์เซ็นต์} = 100 \times \text{เศษส่วน โมล}$$

ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำผลไม้ นิยมบอกค่าความเข้มข้นของน้ำผลไม้ที่อยู่ในรูปองศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริกซ์ ซึ่งเป็นหน่วยของการวัดความเข้มข้นแบบร้อยละโดยมวล ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือ เครื่องวัดดัชนีหักเหของแสง

### 2.4 ความหนาแน่น

ความหนาแน่น หมายถึง อัตราส่วนระหว่างมวลต่อปริมาตรของวัสดุ สัญลักษณ์คือ ρ (rho) หน่วยของความหนาแน่นในระบบ SI คือ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg / m<sup>3</sup>) ดังสมการ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

- โดยที่ ρ = ความหนาแน่น (Kg / m<sup>3</sup>)
- m = มวล (kg)
- v = ปริมาตร (m<sup>3</sup>)

#### 2.4.1 ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะของของเหลว (Liquid density and Specific Gravity)

ของเหลวนั้นมีความหนาแน่นเนื้อ และความหนาแน่นรวมเป็นค่าเดียวกัน ค่าความหนาแน่นของของเหลวเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนาแน่นจะลดลง เมื่อมีของแข็งเพิ่มเข้ามาในของเหลว (ยกเว้นไขมัน) เข้าไปในน้ำจะทำให้ความหนาแน่นของน้ำเพิ่มขึ้น

ค่าความถ่วงจำเพาะของของเหลว มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น โดยค่าความถ่วงจำเพาะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \text{ค่าความถ่วงจำเพาะ(SG)} &= \frac{\text{มวลของของเหลว}}{\text{มวลของน้ำที่มีปริมาตรเท่าของเหลว}} \\ \text{และค่าความถ่วงจำเพาะ} &= \frac{\text{ความหนาแน่นของของเหลว}(\rho_L)}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}(\rho_w)} \end{aligned}$$

ค่าความถ่วงจำเพาะของของเหลว เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าค่าความหนาแน่นเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ดังนั้นการแสดงค่าความถ่วงจำเพาะจะมีการระบุอุณหภูมิด้วย ถ้าทราบความถ่วงจำเพาะจะสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของของเหลว ที่อุณหภูมินั้นๆได้จากสมการ

$$\rho_L = (SG)_T \times \rho_w$$

- เมื่อ ρ<sub>L</sub> คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส (Kg / m<sup>3</sup>)
- (SG)<sub>T</sub> คือ ความถ่วงจำเพาะของของเหลวที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส (m<sup>3</sup> / Kg)
- ρ<sub>w</sub> คือ ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ T องศาเซลเซียส (Kg / m<sup>3</sup>)

#### 2.4.2 วิธีการหาค่าความถ่วงจำเพาะ หรือ ความหนาแน่นของของเหลว มีดังนี้

- ขวดความหนาแน่น (Density bottles)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ลักษณะขวดความหนาแน่น

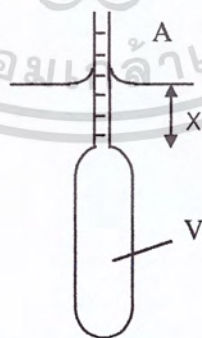
ขวดความหนาแน่น (รูป 2.1) ใช้หาค่าความหนาแน่นของของเหลวซึ่งเมื่อเติมของเหลวลงไปจนเต็มอากาศภายในขวดจะถูกไล่ออกจากขวด โดยใช้หลักการเปรียบเทียบน้ำหนักและคำนวณหาค่าความหนาแน่นได้จาก

$$\rho = \frac{w_2 - w_1}{v}$$

เมื่อ  $\rho$  = ความหนาแน่นของของเหลว ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )  
 $w_1$  = น้ำหนักของขวดเปล่า (kg)  
 $w_2$  = น้ำหนักของขวดเมื่อของเหลวอยู่เต็ม (kg)  
 $v$  = ปริมาตรของขวดความหนาแน่น ( $\text{m}^3$ )

- ไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer)

การหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ อาศัยหลักการลอยตัวของวัตถุที่มีน้ำหนักคงที่ในของเหลว ไฮโดรมิเตอร์จะจมลงในของเหลวที่ความลึกต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะของของเหลว ซึ่งจะอ่านได้จากสเกลที่ก้านของไฮโดรมิเตอร์ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไฮโดรมิเตอร์

หากพิจารณาว่าปริมาตรที่กระเปาะของไฮโดรมิเตอร์เป็น  $v$  หน้าตัดของก้านไฮโดรมิเตอร์เป็น  $A$  น้ำหนักของไฮโดรมิเตอร์เป็น  $w$  และก้านไฮโดรมิเตอร์จมลงไปเป็นระยะ  $x$  จะเห็นว่าปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่คือ  $Ax + v$  และน้ำหนักของของเหลวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกแทนที่คือ  $\rho(Ax + v)$  เมื่อ  $\rho$  เป็นความหนาแน่นของของเหลว และจากกฎการลอยตัวจะ  
ได้ว่า

$$\rho = \frac{w}{Ax + v}$$

เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับความหนาแน่นของน้ำจะให้ความถ่วงจำเพาะ  
ไฮโดรมิเตอร์นั้นใช้ง่ายและมีหลายขนาด สามารถวัดความถ่วงจำเพาะได้หลายช่วง

- ไฮโดรมิเตอร์สเกล (Hydrometer scale)

ตัวอย่างต่อไปนี้เป็นไฮโดรมิเตอร์พิเศษ ที่ใช้วัดของเหลวเฉพาะอย่าง

1. แอลกอฮอล์โวลูมิเตอร์ (Alcoholometer) ใช้สำหรับสารละลายแอลกอฮอล์ ซึ่งโดยทั่วไป  
จะแสดงปริมาณแอลกอฮอล์โดยปริมาตร (0 – 100 %)
2. บริกซ์แซคคาโรมิเตอร์ (Brix Saccharometer) แสดงร้อยละของน้ำตาลซูโครส โดยน้ำ  
หนักในสารละลายที่ระบุไว้ในไฮโดรมิเตอร์ หรือแสดงเป็นองศาบริกซ์ (Degree brix)  
ซึ่งก็คือร้อยละของน้ำตาลโดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก
3. เดนซิตีไฮโดรมิเตอร์ (Density Hydrometer) หรือเรียกว่า แล็กโตมิเตอร์ (Lactometer)  
ใช้หาค่าความหนาแน่นของนม ไฮโดรมิเตอร์ชนิดนี้แบ่งสเกลช่วง 25 ( $1025 \text{ kg.m}^{-3}$ )  
ถึง 35 ( $1035 \text{ kg.m}^{-3}$ ) ถ้ารู้ปริมาณไขมัน และค่าจากไฮโดรมิเตอร์จะสามารถใช้หา  
ปริมาณของแข็งที่ไม่มีไขมันได้ (Milk Solid Non Fat , MSNF) ไฮโดรมิเตอร์ชนิดนี้มี  
ช่วงการวัดแคบ และมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นสร้างขึ้น โดยมี  
กระเปาะใหญ่และก้านเล็ก
4. ทวอดเดนไฮโดรมิเตอร์ (Twadden hydrometer) ใช้หาค่าความถ่วงจำเพาะของของ  
เหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ สเกลของไฮโดรมิเตอร์ แสดงเป็นองศาทวอดเดน  
(Degree Twadden) ซึ่งเมื่อคูณ 5 แล้วบวกด้วย 1000 จะให้ความหนาแน่นเทียบกับน้ำ  
(ความหนาแน่นน้ำ  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ )
5. บูเมสเกล (Baume scale) เป็นไฮโดรมิเตอร์ที่มี 2 สเกล คือ สเกลหนึ่งใช้สำหรับวัดค่า  
ความถ่วงจำเพาะของของเหลว ที่หนักกว่าน้ำ และอีกสเกลหนึ่งใช้สำหรับของเหลวที่มี  
ความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำแบบแรก  $0^\circ\text{C}$  เทียบได้กับความถ่วงจำเพาะ 1.00 และ  $66^\circ\text{C}$   
เทียบได้กับความถ่วงจำเพาะ 1.842 โดยใช้สมการต่อไปนี้เปลี่ยนสเกล

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{m_B}{m_B - d}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$m_B$	เป็นค่าคงที่	=	145	(ใช้ในสหรัฐฯ)
และ	$m_B$	เป็นค่าคงที่	=	146.78	(ใช้สำหรับสเกลรุ่นใหม่)
		$d$	=	องศาเบอเม (Baume Degree)	

6. โอเลโอมิเตอร์ (Oleometer) ใช้หาค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำมันพืช และน้ำมันจากปลา วาฟ สเกลมีค่าตั้งแต่ 50 ถึง 0 แสดงค่าความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 0.870 ถึง 0.970

## 2.5 ความหนืด

ความหนืด คือ แรงเสียดทานภายในของการไหลซึ่งต้านทานการไหลของของไหล ซึ่งจากความสัมพันธ์ของแรงเฉือนและอัตราการเฉือน สามารถจำแนกประเภทของไหลได้ 2 ประเภท คือ ของไหลแบบ Newtonian และ ของไหลแบบ Non-Newtonian

### 2.5.1 แรงเฉือนและอัตราการเฉือน ( Shear Stress and Shear Rate )

เมื่อของไหลถูกกระทำโดยแรงเฉือน จะเกิดการเสียรูป ถ้าแรงเฉือน (F) เกิดในพื้นที่ (A) บนพื้นผิวของไหลที่เชื่อมกับระนาบหนึ่งแนวราบจะทำให้ชั้นบนของของไหลเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $v$  ในขณะที่ชั้นที่ติดกับระนาบจะยังคงเดิม ระนาบชั้นบนจะลากผ่านของชั้นล่างไปด้วย และจะเป็นเช่นนี้ไปเป็นทอด ๆ โดยความเร็วจะลดลงในแต่ละชั้น ดังนั้น Velocity Gradient ( Slope ของความเร็ว ) จะถูกกำหนดโดยของไหล ธรรมชาติของความชันของความเร็วจะขึ้นกับความหนืดของของไหลนั่นเอง แรงเฉือน ( $\tau$ ) ของของไหลเป็นไปตามสมการ

$$\text{แรงเฉือน} = \frac{\text{แรงกระทำ}}{\text{พื้นที่}}$$

โดยหน่วยของแรงเฉือนในระบบ SI คือ นิวตัน / ตารางเมตร

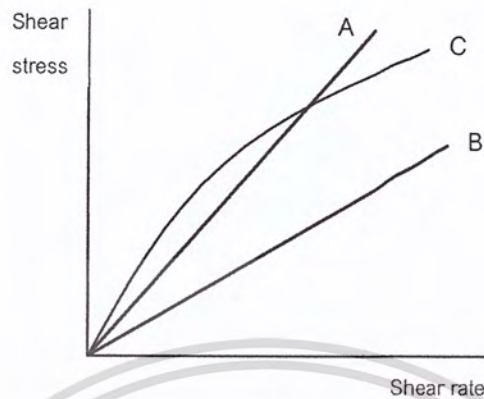
### 2.5.2 ของไหลแบบ Newtonian

ความสัมพันธ์ของแรงเฉือนและอัตราการเฉือน เป็นความสัมพันธ์ที่แบ่งประเภทของของไหล โดยความหนืดเคลื่อนที่ (Dynamic Viscosity) สามารถกำหนดได้จาก สัดส่วนของแรงเฉือนและอัตราการเฉือน โดยหน่วยของความหนืดเคลื่อนที่ในระบบ SI คือ นิวตัน.วินาที / ตารางเมตร

$$\text{Dynamic Viscosity} = \frac{\text{Shear Stress}}{\text{Shear Rate}}$$

ข้อมูลของของไหลสามารถแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนและอัตราการเฉือนซึ่งทำการสร้างกราฟแบบเส้นตรงหรือ log-log ซึ่งกราฟที่สร้างขึ้นนี้เรียกว่า Rheograms

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 Rheograms สำหรับของไหลแบบ Newtonian 2 ชนิด (A และ B) และของไหลแบบ Non-Newtonian (C)

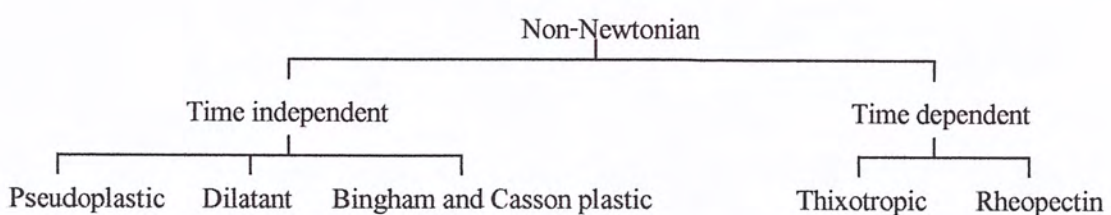
จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงของไหล 3 ชนิดที่แตกต่างกัน ของไหล A และ B เป็นของไหลแบบ Newtonian จากกราฟจะพบว่ามีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง โดยของไหล A มีค่าความหนืดเคลื่อนที่มากกว่าของไหล B และของไหล C เป็นของไหลแบบ Non-Newtonian โดยมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเส้นตรง

### 2.5.3 ของไหลแบบ Non-Newtonian

ตัวอย่างของของไหลที่เป็นของไหลแบบ Non-Newtonian สารละลายเข้มข้นของ โมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น กัม, สตาร์ช และ โปรตีน และ สารคอลลอยด์ที่คล้ายอิมัลชัน ความหนืดและการเฉือนจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้

1. ธรรมชาติของช่วงที่ดำเนินต่อเนื่องกันและแยกเฟสกัน
2. การกระทบกันระหว่าง โมเลกุลกับ โมเลกุลและ โมเลกุลกับสารละลาย
3. ความเข้มข้นของ โมเลกุล, รูปร่าง, ขนาด และ องค์ประกอบทางเคมี

ประเภทของของไหลแบบ Non-Newtonian สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ประเภทที่ขึ้นกับเวลา (Time dependent) และ ไม่ขึ้นกับเวลา (Time independent) และยังมีประเภทย่อย ๆ ได้อีกหลายประเภทดังเช่นแผนภูมิดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 สมการยกกำลัง ( Power Law Equation)

ของไหลหลาย ๆ ประเภท เมื่อนำมาทำการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับอัตราการเฉือนในรูป log แล้วได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง สมการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์เช่นนี้คือ สมการยกกำลัง (Power Law Equation) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$\tau = k \left( \frac{dv}{dy} \right)^n$$

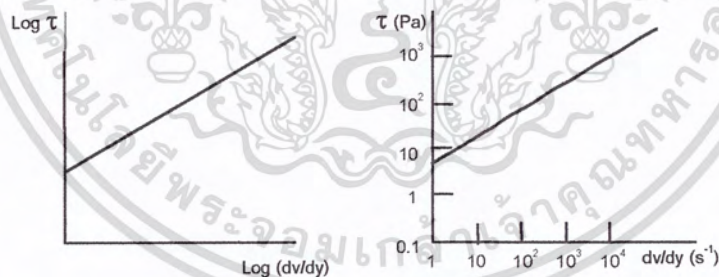
- โดยที่  $\tau$  = แรงเฉือน (  $N.m^{-2}$  )
- $k$  = ดัชนีความหนืด (  $N.s^n.m^{-2}$  )
- $\frac{dv}{dy}$  = อัตราการเฉือน (  $s^{-1}$  )
- $n$  = ดัชนียกกำลัง ( Power Law Index )

เมื่อทำการ take log แล้วจะได้สมการ

$$\log \tau = \log k + n \log \left( \frac{dv}{dy} \right)$$

สำหรับ ดัชนียกกำลัง และ ดัชนีความหนืดสามารถหาได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์

ผังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเฉือนกับอัตราการเฉือนในรูปแบบปกติ และ ในรูปแบบ log-log

ดัชนียกกำลัง (Power Law Index) สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟ และ ดัชนีความหนืดสามารถหาได้จากจุดตัดแกน y ของกราฟความสัมพันธ์ที่  $\frac{dv}{dy} = 1$  หรือ  $\log \frac{dv}{dy} = 0$

สำหรับของไหลแบบ Newtonian จะมีค่า  $n = 1$ , ของไหลแบบ Non-Newtonian ชนิด Dilatant จะมีค่า  $n > 1$  และ ชนิด Pseudoplastic จะมีค่า  $n < 1$

สมการยกกำลัง (Power Law Equation) มีรูปแบบสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\mu = k \left( \frac{dv}{dy} \right)^{n-1}$$

โดยที่	$\mu$	=	ความหนืด (cps)
	$\frac{dv}{dy}$	=	อัตราการเฉือน ( $s^{-1}$ )
	$k$	=	ดัชนีความหนืด ( $N.s^n.m^{-2}$ )
	$n$	=	ดัชนียกกำลัง ( Power Law Index )

2.5.5 วิธีการหาค่าความหนืด (Muller, 1973)

วิธีพื้นฐานในการหาค่าความหนืดมีหลายวิธี ดังนี้

1. วัดการไหลของของไหลในหลอดแก้ว

การวัดการไหลวิธีนี้ทำตามกฎของ Poiseuille's law ซึ่ง Poiseuille เป็นนักฟิสิกส์ฝรั่งเศส (1797-1869) เป็นคนแรกที่คำนวณค่าแน่นอนของแรงต้านของไหล (Viscous Resistance) โดยใช้สมการดังนี้

$$Q = \frac{\pi p r^4}{8 \eta l}$$

โดย	$Q$	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลที่ไหลไปตามหลอดคาพิลลารี ( $m^3/s$ )
	$p$	=	ความต่างของแรงอัดที่ปลายหลอดสองด้าน ( $N/m^2$ )
	$r$	=	รัศมีของหลอดคาพิลลารี (m)
	$l$	=	ความยาวของหลอดคาพิลลารี (m)
	$\eta$	=	สัมประสิทธิ์ความหนืด

การหาค่าความหนืดให้แน่นอนทำได้ยากเพราะต้องรู้ความยาวและขนาดของหลอดที่แน่นอน ส่วนใหญ่ในการทดลองจะใช้น้ำ หรือ ซูโครส น้ำจึงเป็นมาตรฐานหลักที่ใช้ในการคำนวณหาค่าอื่นๆ โดยใช้สมการดังนี้

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \times \frac{t_1}{t_2}$$

โดย	$\eta_1$	=	ความหนืดของของไหล (Pa.s)
	$\eta_2$	=	ความหนืดที่ได้จากการทดลอง (Pa.s)
	$\rho_1$	=	ความหนาแน่นของของไหล ( $Kg / m^3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \rho_2 &= \text{ความหนาแน่นจากการทดลอง (Kg / m}^3\text{)} \\ t_1 &= \text{เวลาที่ใช้ในการไหล (s)} \\ t_2 &= \text{เวลาที่ได้จากการทดลอง (s)} \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ของค่าที่ได้เป็นเพียงค่าโดยประมาณเพราะไม่ได้คำนึงความถูกต้องของพลังงานจลน์ ซึ่งถือเป็นเรื่องจำเป็นเพราะน้ำที่ไหลจากหลอดจะต้องมีพลังงานจลน์ แต่ไม่ใช่เพียงความแตกต่างจากแรงอัดเป็นตัวที่ทำให้เกิดการไหลมาใช้เพื่อทำให้แรงเสียดทานความหนืด หดไปสำหรับอาหารที่เป็นของเหลว มักจะไม่คำนึงความถูกต้องของพลังงานจลน์เพราะค่าที่คำนวณได้มีความผิดพลาดในอัตราที่ยอมรับได้

หลอดทดลองรูปตัวยูที่ใช้ในห้องทดลองเป็นแบบ Ostwald (รูปที่ 2.5) ซึ่งมีหลายขนาดและอาจใช้วัดค่าของความหนืดได้ในช่วง 0.001-0.35 Po



รูปที่ 2.5 หลอดแก้วทดลองรูปตัวยู (Ostwald Viscometer)

## 2. วิธีการวัดค่าความหนืดโดยการตกของของแข็งในของเหลว

วิธีการวัดใช้กฎของสโตคส์ (Stokes' Law) โดยกฎของสโตคส์สามารถแสดงได้จากสมการ

$$\frac{4}{3}\pi R^3(\rho_s - \rho)g = 6\pi\eta Rv$$

หรือ

$$\frac{4}{3}R^2(\rho_s - \rho)g = 6\eta v$$

โดยที่  $R$  = รัศมีของทรงกลม (m)

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของวัสดุทรงกลม ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho$  = ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\eta$  = สัมประสิทธิ์ความหนืด (PI)

$v$  = ความเร็วของทรงกลม (m/s)

ความสัมพันธ์ของความหนืดสามารถหาได้จากสมการ

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{(\rho_s - \rho_1)}{(\rho_s - \rho_2)} \times \frac{t_1}{t_2}$$

โดย  $\eta_1$  = สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหลชนิดที่ 1 (PI)

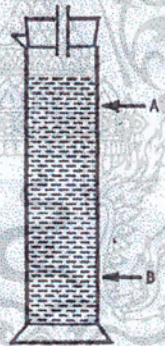
$\eta_2$  = สัมประสิทธิ์ความหนืดของของไหลชนิดที่ 2 (PI)

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของวัสดุทรงกลม ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_1$  = ความหนาแน่นของของไหลชนิดที่ 1 ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_2$  = ความหนาแน่นของของไหลชนิดที่ 2 ( $\text{kg/m}^3$ )

$t_1, t_2$  = เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ตกของทรงกลมในระยะทางที่เท่ากันในของเหลวทั้ง 2 ชนิด (s)



รูปที่ 2.6 วิธีการหาค่าความหนืดโดยวิธีของสโตค

รูปที่ 2.6 แสดงภาพอุปกรณ์ที่เหมาะสม ซึ่งทำขึ้นง่ายๆ จากกระบอก (measuring cylinder) เส้นผ่าศูนย์กลางและระยะที่ทำเครื่องหมายไว้ที่ปลายทั้งสองด้านมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกบอล

วิธีนี้เหมาะสมกับของเหลวที่มีความหนืดสูงกว่าของเหลวที่ใช้ใน เครื่องวัดความหนืดที่เป็นหลอดรูปตัวยู ( $1-3 \times 10^5$  PI) ส่วนใหญ่ทรงกลมที่ใช้ทำการทดลองมักจะเป็น ควบลูกปืนที่เป็นเหล็ก (Steel ball bearing) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 มิลลิเมตร ถ้าของเหลวที่ข้นเหนียวมากอาจใช้เป็นแพลทินัมแทนเหล็ก ถ้าของเหลวข้นขึ้นใช้ metal detector แทน บางครั้งอาจเลือกใช้ทรงกลมที่ทำด้วยแก้วหรือไม้ ตามความเหมาะสม

### 3. เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนเหวี่ยง (Rotational viscometers)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดความหนืดแบบหมุนเหวี่ยงมี 3 แบบ คือแบบที่เป็นกระบอกลอยอยู่ด้านนอก แบบที่มีกระบอกลอยอยู่ภายใน และ แบบที่เป็นรูปกรวยหรือจาน

แบบที่มีกระบอกลอยอยู่ด้านนอก คือแบบที่เรียกว่า Couette-Hatcheck คำนวณจากสมการดังนี้

$$\eta = \frac{ked}{2\pi h \omega R}$$

โดย  $k$  = ค่าคงที่การบิดของลวด (torsional constant of wire)  
 $e$  = มุมเอียงภายในทรงกระบอกลอย (angular deflection of the inner cylinder) (rad)  
 $d$  = ช่องว่างภายในกระบอกลอย (m)  
 $h$  = ความสูงของของเหลวภายในกระบอกลอย (m)  
 $\omega$  = ความเร็วเชิงมุมของกระบอกลอยด้านนอกที่หมุน (rad/s)  
 $R$  = รัศมีเฉลี่ยของกระบอกลอย (m)

สมการจะใช้ได้ เมื่อ  $d$  เล็กกว่า  $R$

สำหรับเครื่องมือเดียวกัน อาจใช้สมการ

$$\eta = \frac{Ke}{\omega h}$$

โดยที่  $K$  = ค่าคงที่สำหรับการวัด

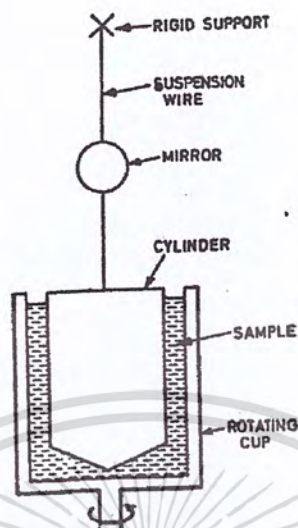
ถ้าเติมของเหลวลงในถ้วยให้ถึงระดับเดียวกันตลอดเวลา ( $h$ ) และถ้าความเร็วเชิงมุมของกระบอกลอยด้านนอก ( $\omega$ ) ไม่เปลี่ยนแปลง ทั้งระดับของของเหลว ( $h$ ) และ ความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ ) จะอยู่ในรูปค่าคงที่ ( $K$ ) ดังนั้นสมการจะอยู่ในรูป

$$\eta = Ke$$

ถ้ารู้ความหนืดของของเหลวที่ใช้ทดลอง ซึ่งให้การหมุนของกระบอกลอยเป็น  $e_1$  จะได้สมการ

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{e_1}{e_2}$$

โดย  $\eta_2, e_2$  = ของเหลวที่ทำการทดลอง



รูปที่ 2.7 เครื่องวัดความหนืดรูปทรงกระบอกหมุน

เครื่องวัดความหนืดจะเป็นมาตรฐานสำเร็จรูปมาจากโรงงาน และการหาค่าความหนืดก็ทำได้ง่ายมาก ค่า  $c_2$  ถูกกำหนดไว้แล้ว และค่า  $\eta_2$  มีตารางหรือแผนภูมิให้เสร็จ รูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นแผนผังของเครื่องวัดความหนืดรูปทรงกระบอกหมุน

กระบอกด้านข้างในจะถูกยึดไว้ด้วยลวดซึ่งติดกระบอกเอาไว้ เมื่อลวดบิดตัวก็จะสะท้อนแสงในกระบอก และวัดการหมุนของแสงตามสเกลที่อยู่ไม่ห่างจากเครื่องมือได้

สมการข้างต้นคิดเพียงช่องว่างแคบ ๆ ทางขนานระหว่างกระบอกสองอัน ไม่รวมด้านบนและข้างใต้ ตามทฤษฎี (theoretical rheology) การใช้เครื่องวัดความหนืดรูปทรงกระบอกหมุนที่ไม่มีกั้นช่วยได้มาก ทำให้ไม่ต้องยุ่งกับปัญหาทางเทคนิคหลาย ๆ อย่างในทางปฏิบัติ ด้วยเหตุนี้เองจึงมีวิธี End Correction ขึ้นหลายวิธี เช่น ใส่ของเหลวระดับต่าง ๆ กันลงในถ้วยวัดความหนืด หรือใส่ปรอทลงในก้นถ้วย โดยมาก จะออกแบบให้ทรงกระบอกตัวในของเครื่องวัดความหนืด เป็นรูปทรงกรวยมากกว่าเป็นทรงแบนเรียบตรงกัน ซึ่งช่วยลด End Correction ลงได้มาก อีกวิธีหนึ่งคือใช้ Coaxial Cone End ที่มีอัตราการผลิตเท่ากับใน cylinder annulus เป็นการป้องกันส่วนปลายของกระบอกและกักฟองอากาศที่เกิดขึ้นที่ก้นกระบอกด้วย

ตัวอย่างของ เครื่องวัดความหนืดรูปทรงกระบอกหมุน แบบที่มีกระบอกหมุนอยู่ภายใน คือแบบของ Scarle and Stormer กระบอกสูบตัวในถูกขับเคลื่อนด้วยเชือกที่ถ่วงน้ำหนักไว้ (weighted string) ซึ่งร้อยตามขวางไว้กับ pulley ที่ติดไว้กับตัวกระบอกสูบตัวใน ความเร็วในการหมุนเป็นสัดส่วนกลับกัน (inversely proportion) กับความหนืดของของไหล ถ้าเครื่องมือที่ใช้เป็นเครื่องวัดความหนืดรูปกรวยและจาน ที่มีราคาแพง จะมีประสิทธิภาพมาก ระยะแรก ๆ เครื่องมือที่ใช้เป็นแบบจาน (parallel plate) วัดความหนืดที่เกิดขึ้นระหว่างจานที่อยู่ขนานกัน แต่วิธีนี้อัตราการผลิตที่บริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบ ๆ งานจะมากกว่า เพราะความเร็วของการหมุนจะเพิ่มขึ้นจากจุดศูนย์กลาง ไปสู่วงกลมชั้นที่อยู่ห่างออกไป ( เช่นเดียวกับ การหมุนของ driving shaft ขอบของวงล้อใหญ่จะหมุนเร็วกว่าวงล้อเล็ก ) ปรัชญาการนี้ มีผลให้สร้างเครื่องวัดความหนืดแบบทรงกรวยและจานขึ้นมา

#### 4. เครื่องวัดความหนืดแบบสั่น (Vibrational viscometer)

การแกว่งของทรงกลม (oscillations of a sphere) แผ่นจานหมุนหรือกระบอกล (disc or cylinder) ที่แขวนอยู่กับลวด แล้วจุ่มลงในของไหล ทำให้เกิดความถี่ oscillations อาจนำไปใช้กับกระบอกลตัวนอกของเครื่องวัดความหนืดทรงกระบอกล (concentric cylinder viscometer) ความถี่ขึ้นขึ้นอยู่กับความหนืดของของเหลว วิธีนี้ไม่นิยมใช้เนื่องจากสมการหาได้ยาก

#### 5. เครื่องวัดความหนืดแบบแรงอัด (Compression of cylinders)

วิธีนี้นิยมใช้กันเมื่อต้องการหาค่าความหนืดในของไหลที่มีความหนืดสูง (เช่น น้ำตาลที่ละลายแล้ว) ที่ค่าประมาณ  $1 \times 10^5 - 10^6$  PI นำสารที่จะใช้มาทำให้ร้อน และ เอาทรงกระบอกลอันเล็กหล่อเป็นแม่พิมพ์ ปกติจะให้ความร้อนอ่อน ๆ ตลอดระยะเวลาขณะที่ตัวแม่พิมพ์ได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลาหลายชั่วโมง เมื่อสารที่ใช้เย็นลงทำให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ถูกต้องและรู้อัตราความหนืด ตามสมการดังนี้

$$\eta = \frac{\left( \frac{Wg}{3\pi r^2} \right) \left( \frac{1 - 1/l_0}{2} \right) t}{2.3 \log \frac{l_0}{l}}$$

โดยที่	W	=	น้ำหนักที่ใช้อัดกระบอกล (kg)
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s <sup>2</sup> )
	$\pi$	=	3.1416
	r	=	รัศมีของกระบอกล (m)
	$l_0$	=	ความยาวเริ่มต้นของกระบอกล (m)
	l	=	ความยาวสุดท้ายของกระบอกล (m)
	t	=	เวลา (s)

#### 6. การวัดความหนืดแบบเอมไพริคัล (Empirical Measurement)

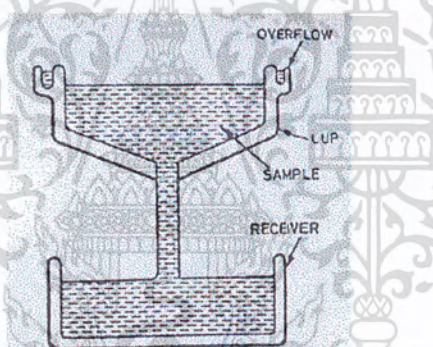
การวัดความหนืดแบบเอมไพริคัล มีวิธีการวัดหลายวิธี ซึ่งค่าความหนืดที่วัดได้ของแต่ละวิธีการนั้นไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ เนื่องจากเทคนิคและวิธีการที่ต่างกัน อย่างไรก็ตาม ค่าความหนืดที่วัดได้ในแต่ละวิธี ก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งสิ้น วิธีการวัดความหนืดแบบเอมไพริคัลที่นิยมใช้กันก็คือ การวัดค่าการเปลี่ยนแปลงทอร์คบนก้านหมุนในของเหลวโดยวิธีการนี้จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องระมัดระวังเรื่องแรงเสียดทานภายในเบริง และเกียร์ของมอเตอร์ เพราะจะทำให้ค่าที่วัดได้คลาดเคลื่อนมาก โดยส่วนใหญ่จะต้องเปิดเครื่องให้มอเตอร์ทำงานประมาณ 0.5 – 1 ชั่วโมง ก่อนที่จะอ่านค่าได้ เนื่องจากช่วงแรกของการทำงานจะทำให้เกิดการไหลแบบ turbulence ได้ ซึ่งเครื่องมือที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ Brookfield Rotating Spindle โดยจุ่มใบกวนลงในของเหลวที่ต้องการวัดความหนืด แล้วมอเตอร์จะขับใบกวนให้หมุนของเหลว ค่าที่ได้จากการวัดจะเป็นสัมประสิทธิ์ของความหนืด ซึ่งใช้คำนวณหาค่าความหนืดต่อไป

วิธีการหาค่าความหนืดแบบเอมไพริคัลอีกวิธีหนึ่งก็คือ การใช้ Rolling Ball Viscometer ของ Hoppler ซึ่งใช้วัดค่าความหนืดของของเหลวแบบ Newtonian เท่านั้น โดยอาศัยหลักการวิธีของสโตค

เครื่องมืออีกอย่างหนึ่ง คือ ถ้วยวัดความหนืด (cup) หรือ เครื่องวัดความหนืดแบบ Orifice แบบของ ฟอร์ด, อิงค์เลอร์ หรือ เรดวูดดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เครื่องวัดความหนืดแบบเอมไพริคัล ( Empirical cup viscometer)

ช่องทางออกกว้างไม่เป็นหลอด เพราะไม่มีการไหลไปในทางเดียวกัน ความดันจะต่างระดับกัน ระหว่างการทดสอบ มีการใช้พลังงานมากเพื่อให้เกิดพลังงานจลน์ ดังนั้นความหนืดจะเป็นตัวแปรต่อผลของการทดสอบที่จะได้

#### 7. เครื่องมือวัดแบบต่อเนื่องและควบคุมโดยระบบอัตโนมัติ

ตามปกติในโรงงานจะควบคุมความหนืดด้วยการเก็บตัวอย่างและค่าความหนืดจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ แต่อาจมีการล่าช้ากว่ากำหนดได้บ้าง จึงต้องมีการพัฒนาการวัดค่าต่อไปอีกอย่างอย่างไม่หยุดยั้ง ดังนั้นเครื่องมือที่กล่าวมาแล้วทุกอย่างจะถูกนำมาใช้เพื่อวัตถุประสงค์นี้ทั้งสิ้น เมื่อจุ่มใบกวน (Disc) หรือกระบอกกวน (Cylinder) ลงในภาชนะบรรจุของไหล ผลิตผลจะเอื้อลื่นขึ้นมาเรื่อย ๆ จนถึงขอบ แต่เมื่อใช้เครื่องวัดความหนืดแบบคาพิลลารี ส่วนหนึ่งของผลิตผลจะแยกจากสายหลักผ่านไปยังเครื่องสูบ ซึ่งจะแยกส่งผ่านไปตามหลอดคาพิลลารีในปริมาณที่พอดี

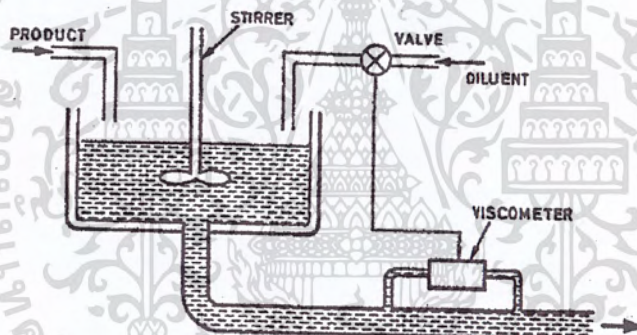
และแน่นอน สามารถวัดความแตกต่างของแรงอัดที่ปลายหลอดคาพิลลารีได้ การทำเช่นนี้ตรงกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้ามกับการปฏิบัติงานตามปกติ ที่รักษาความแตกต่างของแรงอัดไว้คงที่ และวัดค่าจากปริมาตรที่ส่งออกไป

จากหลักการใช้แบบการตกของทรงกลม การจมจะเกิดขึ้นในสภาวะที่มีแรงดึงดูด และจะมีสภาพคงที่ หรือไม่ขึ้นอยู่กับความหนืดของผลิตภัณฑ์ แต่ต้องควบคุมความเร็วของการไหลอย่างเคร่งครัด

เทคนิค Oscillating ถูกนำมาใช้เมื่อมีแผ่นโลหะชิ้นบาง ๆ แกว่งอยู่ในของเหลว ของเหลวจะทำให้ตัวแกว่งขึ้นและสามารถรักษาช่วงกว้างในการแกว่งเหมือนเดิมได้ ค่าเริ่มต้นจะเป็นสัดส่วนกับความหนืดของของเหลว

อาจจะใช้เครื่องวัดความหนืดแบบต่อเนื่อง เพื่อปรับค่าความเข้มข้นของสารละลายและเพื่อปรับความหนืดโดยไม่เสียเวลามากนัก ถ้าเอาสารนั้นไปทดสอบที่ห้องทดลอง รูปที่ 2.9 แสดงกระบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 2.9 เครื่องปรับค่าความหนืดแบบต่อเนื่องโดยใช้ระบบอัตโนมัติ

#### 2.5.6 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความหนืด (Rao, 1994)

ของไหลมักจะมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปเมื่อผ่านกระบวนการผลิต, การขนส่ง และ การเก็บรักษาซึ่งผลกระทบส่วนใหญ่มักขึ้นกับอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีผลกับความหนืด ซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ของ Arrhenius ( Arrhenius Relationship )

$$\eta = k \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$

โดยที่	$E_a$	=	พลังงานกระตุ้น (kcal / (gmol))
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊ส ( 1.9873 kcal / (gmol.K) )
	T	=	อุณหภูมิ (K)
	$\eta$	=	ความหนืด (N.s / m <sup>2</sup> )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$k = \text{ค่าคงที่ (N.s / m}^2\text{)}$$

จากความสัมพันธ์ของ Arrhenius จะพบว่าความหนืดของของไหลจะลดลงอย่างชัดเจนเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

### 2.5.7 ผลกระทบของความเข้มข้นต่อความหนืด

ของไหลจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยความหนืดกับความเข้มข้นมีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โปเนนเชียล ( Cervone and Harper, 1987; Vitali and Lao, 1984b ) หรือมีความสัมพันธ์แบบยกกำลัง ( Harper and Sahrigi, 1965; Rao et al., 1981a ) ผลกระทบของความเข้มข้นสามารถอธิบายได้จากสมการ (Ibarz et al., 1989)

$$\eta = k \exp(AC + BC^2)$$

โดยที่	$E_a$	=	พลังงานกระตุ้น (kcal / (gmol))
	$c$	=	ความเข้มข้นของของไหล ( $^{\circ}$ Brix)
	$\eta$	=	ความหนืด (N.s / m <sup>2</sup> )
	$A$	=	ค่าคงที่ ( $^{\circ}$ Brix <sup>-1</sup> )
	$B$	=	ค่าคงที่ ( $^{\circ}$ Brix <sup>-2</sup> )
	$k$	=	ค่าคงที่ (N.s / m <sup>2</sup> )

## 2.6 ผลกระทบของความหนาแน่น ความหนืด และ ความเป็นกรด-ด่างต่อการเลือกใช้อุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

### 2.6.1 เครื่องสูบล (Pump) (ซำรง และคำรงศักดิ์, 2534)

เป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานมากในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำ ใช้ในการสูบของเหลวจากจุดที่มีเสดความดันต่ำ (Low Pressure Head) โดยส่งออกไปตามระบบท่อด้วยเสดความดันสูงกว่าเดิม (High Pressure Head) การที่จะให้ของไหลไหลจากจุดที่มีเสดความดันต่ำกว่าไปยังจุดที่มีเสดความดันสูงกว่า จะต้องใช้เครื่องสูบลป้อนพลังงานกลให้แก่ของไหลนั้น ๆ เพื่อให้ของไหลนั้นมีพลังงานในการเคลื่อนที่โดยสามารถชนะความต้านทานในการเคลื่อนที่ได้ ค่าความหนาแน่นและความหนืดมีผลต่อการคำนวณกำลังงานที่ต้องการ

#### 1. กำลังงานที่ต้องการ

กำลังงาน หมายถึง อัตราการทำงานในหนึ่งหน่วยเวลา หน่วยกำลังงานที่นิยมใช้คือ แรงม้า (Horse Power,HP) กำลังงานที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับเครื่องสูบลมี 2 อย่างคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แรงม้าทางทฤษฎี (Theoretical Horse Power) หรือ Horsepower, Hp เป็นจำนวนแรงม้าที่เครื่องสูบจะต้องให้แก่ของเหลว เพื่อให้ของเหลวไหลผ่านระบบด้วยอัตราที่กำหนด

$$Hp = \frac{Q \times \gamma \times TDH}{\eta \times 746}$$

- เมื่อ Hp = แรงม้าทางทฤษฎี (แรงม้า)
- $\gamma$  = น้ำหนักจำเพาะ (N/m<sup>3</sup>)
- Q = อัตราการไหลของเครื่องสูบ (m<sup>3</sup>/sec)
- TDH = เศรษฐรวมของเครื่องสูบ (m)
- $\eta$  = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบ

2. แรงม้าของต้นกำลัง (Break Horsepower , Bhp) เป็นกำลังที่มอเตอร์หรือเครื่องยนต์ต้นกำลังใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องสูบเพื่อให้เครื่องสูบเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวเท่ากับแรงม้าทางทฤษฎี

$$Bhp = \frac{Hp}{\text{PumpEff.}}$$

กรณีต้นกำลังเป็นมอเตอร์ พลังงานไฟฟ้าที่มอเตอร์ต้องการเป็นกิโลวัตต์คือ

$$KW = \frac{0.746 \text{ Bhp}}{\text{MotorEff.}}$$

ประสิทธิภาพโดยรวมหาได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพ} = \text{ประสิทธิภาพปั๊ม} \times \text{ประสิทธิภาพมอเตอร์}$$

2. เศรษฐรวมของปั๊ม ( Total Dynamic Head or Total Discharge Head , TDH)

เศรษฐรวมของปั๊ม คือ พลังงานทั้งหมดที่บอกในรูปของเศรษฐปั๊ม ที่จะต้องเพิ่มให้แก่ของเหลวเพื่อให้ของเหลวไหลผ่านระบบท่อด้วยอัตราที่กำหนด

$$\text{เศรษฐรวมของปั๊ม} = \text{เศรษฐสถิตย์รวม} + \text{เศรษฐความฝืด}$$

โดยที่เศรษฐสถิตย์จะมีค่าคงที่ ขึ้นอยู่กับการติดตั้งของระบบปั๊มส่วนเศรษฐความฝืดจะแปรผันตามอัตราการไหลของของไหลนั้น

เศรษฐสถิตย์ (Static Head , Hs)

การทำงานของปั๊มโดยทั่วไป ของเหลวจะถูกเพิ่มพลังงานเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งอยู่สูงกว่า ความดันซึ่งเกิดเป็นแท่งความสูงของของเหลวที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระทำต่อศูนย์กลางของปั๊มทั้งทางด้านดูดและด้านจ่าย ในขณะที่ความเร็วของการไหลผ่านระบบเป็นศูนย์เรียกว่า เฮดสถิตย์



รูปที่ 2.10 เฮดสถิตย์

เฮดความฝืด (Friction Head ,  $H_f$ )

ขณะที่ของเหลวไหลผ่านระบบท่อบริเวณด้านท่อดูดและท่อด้านจ่าย พลังงานหรือเฮดในการไหลส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปเนื่องจากความฝืดระหว่างของเหลวกับผนังท่อ และส่วนประกอบท่อต่างๆซึ่งรวมเรียกว่า เฮดความฝืด

โดยที่ เฮดความฝืด = ความสูญเสียเฮดในระบบท่อ

การสูญเสียกำลังงานในท่อ

การสูญเสียกำลังงานในท่อเนื่องจากความต้านทาน สามารถแบ่งออกเป็น 2

ประเภท คือ

1. การสูญเสียหลัก (Major Loss)

เกิดจากความเสียดทานของผิวท่อ ขนาดท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลท่อที่มีผิวขรุขระ ความยาวท่อมาก และมีความเร็วในการไหลของของไหลสูง กำลังงานจะเกิดการสูญเสียสูงตามไปด้วย แต่การสูญเสียกำลังงานจะลดลงถ้าท่อมีขนาดใหญ่ขึ้น

2. การสูญเสียรอง (Minor Loss)

เกิดจากการสูญเสียกำลังงานเนื่องจากการไหลของของไหลในท่อไหลผ่าน ข้อต่อ ข้ออ วาล์วต่าง ๆ ค่าการสูญเสียรองเมื่อเทียบกับการสูญเสียหลักแล้วจะมีค่าน้อยมากในกรณีที่มีท่มีความยาวมาก ๆ แต่ถ้าท่อมีความยาวน้อยและมีการเปลี่ยนทิศทางการไหลหลายจุด หรือมีการลดขนาดหลายแห่ง ค่าการสูญเสียรองจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการสูญเสียหลัก

Reynold Number ,  $R_e$

เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ หาได้จากอัตราส่วนของแรงเนื่องจากความเฉื่อย และแรงเนื่องจากความหนืดของของไหล ค่า Reynold Number จะบอกให้ทราบว่า การไหลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลเป็นแบบใด อาทิแบบราบเรียบ หรือแบบปั่นป่วน และยังใช้ในการหาค่าแฟคเตอร์ของความเสียดทาน

ถ้าค่า  $R_e$  มีค่าน้อยกว่า 2000 การไหลของของไหลเป็นแบบราบเรียบถ้ามากกว่าเป็นแบบปั่นป่วน

#### กรณีท่อกลม

$$R_e = \frac{DV\rho}{\mu} \quad \text{or} \quad \frac{VD}{\nu}$$

เมื่อ	$R_e$	=	Reynold Number
	$D$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (m)
	$V$	=	ความเร็วในการไหลของของไหล (m/s)
	$\rho$	=	ความหนาแน่นของของไหล ( $\text{Kg/m}^3$ )
	$\mu$	=	Dynamic Viscosity ของของไหล (Pa.s)
	$\nu$	=	Kinematic Viscosity ของของไหล ( $\text{s/m}^2$ )

#### กรณีท่อไม่กลม

$$R_e = \frac{4RV\rho}{\mu} \quad \text{or} \quad \frac{4RV}{\nu}$$

เมื่อ	$R$	=	Hydrolic Radius = $A/P$ (m)
	$A$	=	พื้นที่หน้าตัดของของไหล ( $\text{m}^2$ )
	$P$	=	เส้นรอบรูปพื้นที่หน้าตัดของของไหล (m)

แฟคเตอร์ความเสียดทาน ( $f$ ) เป็นแฟคเตอร์ไม่มีหน่วยใช้สำหรับหาการสูญเสียหลัก

1. แฟคเตอร์ความเสียดทานกรณีการไหลแบบราบเรียบ ค่า  $R_e$  กรณีการไหลแบบราบเรียบจะมีค่าน้อยกว่า 2000

$$f = \frac{16\mu}{\rho v D} = \frac{16}{N_{Re}}$$

2. แฟคเตอร์ความเสียดทานกรณีไหลแบบปั่นป่วน ค่า  $R_e$  กรณีการไหลแบบปั่นป่วนจะมีค่ามากกว่า 2000 มาก ๆ การไหลแบบปั่นป่วนจะไม่มีสูตรการหาค่า  $f$  ที่แน่นอน แต่ค่า  $f$  จะเป็นฟังก์ชันของ Reynold number ( $R_e$ ) และความขรุขระของท่อ ( $\epsilon$ ) ดังนั้นค่า  $f$  ที่ใช้จึงต้องหาจากกราฟที่ได้จากการทดลอง ซึ่งจะต้องทราบค่า Reynold number และอัตราส่วนของความขรุขระต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ( $\epsilon/D$ )

#### การหาค่าการสูญเสียหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1. กรณีท่อกลม

$$E_f = \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{fU^2L}{R}$$

เมื่อ	$E_f$	=	การสูญเสียหลัก (m)
	$f$	=	แฟคเตอร์ของความเสียดทาน
	$R$	=	ขนาดรัศมีของท่อ (m)
	$U$	=	ความเร็วในการไหลของของไหล (m/s)

## 2. กรณีท่อไม่กลม

การหาค่าการสูญเสียรอง

$$h_L = K \frac{V^2}{2g}$$

เมื่อ	$h_L$	=	การสูญเสียรอง (m)
	$K$	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสียของข้อต่อ ข้องอ และวาล์วต่างๆ

## 2.6.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Incropera, Frank and David, 1990)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสของไหลที่แตกต่างกัน 2 ชนิด โดยไม่มีการผสมกันทางกายภาพ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งที่สำคัญมากและพบได้บ่อย ๆ ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้ในการพาสเจอร์ไรซ์ สเตอริไลส์ และการทำเย็น

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด โดยขึ้นอยู่กับการจัดวางทิศทางสัมพัทธ์ของกระแสการไหลของของไหลทั้ง 2 ชนิด ได้ดังนี้

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตัดกันหรือตั้งฉากกัน (Cross-Flow Heat Exchanger) ซึ่งจะมีทิศทางการไหลของกระแสของไหลทั้ง 2 ชนิดไหลตัดซึ่งกันและกันในช่องว่างที่เป็นมุมฉาก
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell and Tube Heat Exchanger) หรือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อซ้อนกัน (Concentric Pipe) ซึ่งจะมีกระแสของไหลของกระแสของไหลทั้ง 2 ชนิดไหลขนานกัน ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้จะพบบ่อยที่สุด

ค่าความหนาแน่นและความหนืดมีผลต่อการคำนวณหาค่าปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สามารถหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = UA\Delta T_{lm}$$

โดยที่ $q$	=	ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (W)
$U$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทั้งหมด ( $W/m^2\text{ }^{\circ}C$ )
$A$	=	พื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
$\Delta T_{lm}$	=	ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่เหมาะสมผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ( $^{\circ}C$ )

2. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer coefficient) คือ ความต้านทานความร้อนรวมต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด สัมประสิทธิ์นี้หาได้โดยการรวมความต้านทานการนำความร้อนและการพาความร้อนระหว่างของไหลที่ถูกแยกและรวมผลของครีปและความสกปรกของผิว ในระหว่างการใช้งานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พื้นผิวจะเกิดความสกปรก เนื่องจากสิ่งที่ไม่เจือปนอยู่ในของไหลหรือในปฏิกิริยาต่าง ๆ และวัสดุผนัง ส่งผลให้เกิดตะกรันหรือคราบสกปรกบาง ๆ บนผิว ซึ่งจะเพิ่มความต้านทานต่อการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองเพิ่มขึ้น ค่าความต้านทานที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า เฟอร์ลิ่ง แฟคเตอร์ (Fouling Factor) ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมหาได้จากสมการ

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{(\eta_o hA)_c} + \frac{R''_{f,c}}{(\eta_o A)_c} + \frac{R_w}{A} + \frac{R''_{f,h}}{(\eta_o A)_h} + \frac{1}{(\eta_o hA)_h}$$

โดยที่ $U$	=	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ( $W/m^2\text{ }^{\circ}C$ )
$A$	=	พื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายเทความร้อน ( $m^2$ )
$h$	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $W/m^2\text{ }^{\circ}C$ )
$R''$	=	ค่าความต้านทานของคราบตะกรัน ( $m^2\text{ }^{\circ}C / W$ )
$\eta_o$	=	ประสิทธิภาพของผิวรวมหรือ Temperature Effectiveness ของผิวที่มีครีป
ตัวห้อย $c$	=	ของไหลเย็น
$h$	=	ของไหลร้อน

### 3. สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat Transfer Coefficient ; h)

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจะมีค่าแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของการไหล ความเร็วของของไหล รูปทรงของวัตถุ พื้นที่ที่ของเหลวไหลผ่าน คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหล อุณหภูมิเฉลี่ยและตำแหน่งต่าง ๆ ตามพื้นผิวของวัตถุ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนหาได้จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h = \frac{Nu k}{D}$$

- โดยที่ Nu = Nusselt Number  
 k = ค่าการนำความร้อนของของเหลวร้อนหรือของเหลวเย็น (W/m.<sup>0</sup>C)  
 D = ระยะห่างระหว่างชั้นแลกเปลี่ยนความร้อน (m)

Nu สามารถหาได้จากสมการ

$$Nu = C(R_e)^m (Pr)^n$$

- โดยที่ R<sub>e</sub> = Reynold Number  
 Pr = Prandtl Number

ซึ่ง Renold Number สามารถหาได้จากสมการ

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu}$$

- โดยที่ ρ = ความหนาแน่นของของเหลวร้อนหรือของเหลวเย็น (kg/m<sup>3</sup>)  
 v = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวร้อนหรือเย็นในช่องว่างระหว่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (m/s)  
 D = ระยะห่างระหว่างชั้นแลกเปลี่ยนความร้อน (m)  
 μ = ความหนืดของของเหลวร้อนหรือเย็น (Pa.s)

ซึ่ง Prandtl Number สามารถหาได้จากสมการ

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$$

- โดยที่ C<sub>p</sub> = ความร้อนจำเพาะของของเหลวร้อนหรือเย็น (J/kg<sup>0</sup>C)  
 μ = ความหนืดของของเหลวร้อนหรือเย็น (Pa.s)  
 k = ค่าการนำความร้อนของของเหลวร้อนหรือของเหลวเย็น (W/m<sup>2</sup><sup>0</sup>C)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีนักวิจัยหลายท่านได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับความหนาแน่น และความหนืดของน้ำ ผลไม่ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Manohar ,Ramakrishna และ Udayasankar, (1991) ได้ศึกษาและทดลองหาค่าสมบัติทางกายภาพของน้ำมะขามเข้มข้น โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 7 – 62 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิ 15 – 70 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำผลไม้เพิ่มขึ้นการไหลของน้ำผลไม้จะเปลี่ยนจาก Newtonian flow เป็นแบบ Newtonian flow โดยที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 19 องศาบริกซ์ น้ำมะขามมีชนิดการไหลเป็นแบบ Newtonian flow และที่ความเข้มข้นมากกว่า 23 องศาบริกซ์ น้ำมะขามมีชนิดการไหลเป็นแบบ Non-Newtonian flow ชนิด Pseudoplastic ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการยกกำลัง (Power law relationship)
- Ramos และ Ibarz (1997) ได้ศึกษาและทดลองหาค่าความหนาแน่นของน้ำผลไม้และซูปผลไม้ต่างๆ ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้และอุณหภูมิเปลี่ยน โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 10 - 60 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิ 0 – 80 องศาเซลเซียส โดยใช้พิคโคโนมิเตอร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของน้ำผลไม้จะเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบโพลิโนเมียล และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนาแน่นของน้ำผลไม้จะลดลง โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบโพลิโนเมียล
- Hernandez (1989) ได้ศึกษาและทดลองหาค่า Rheological Property ของน้ำลูกแพร์เข้มข้น ซึ่งน้ำลูกแพร์นั้นเมื่อไม่มีเพคตินและเนื้อแล้วถือได้ว่าเป็นของไหลแบบ Newtonian โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 40 – 71 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิ 5 – 60 องศาเซลเซียสพบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำผลไม้จะเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของน้ำผลไม้จะลดลง โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล
- Gonzalez และ Esplugas (1994) ได้ศึกษาและทดลองหา Rheological Property ของน้ำส้มโดยใช้เครื่องวัดความหนืดรูปทรงกระบอก (Concentric cylinder viscometer) ซึ่งน้ำส้มนั้นเมื่อไม่มีเพคตินและเนื้อแล้วถือได้ว่าเป็นของไหลแบบ Newtonian ทำการทดลองที่ความเข้มข้น 30.7 – 63.5 องศาบริกซ์ และอุณหภูมิ 5 – 70 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ความหนืดของน้ำผลไม้จะเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนืดของน้ำผลไม้จะลดลง โดยมีความสัมพันธ์เป็นรูปแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

#### การออกแบบและวิธีการทดลอง

ในการศึกษาค่าความหนาแน่น และความหนืดของน้ำสับประรดและน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ จะต้องเตรียมวัสดุ และอุปกรณ์ รวมทั้งวิธีการทดลองที่เหมาะสมดังนี้

#### 3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำผลไม้

3.1.1 ตัวอย่างน้ำผลไม้ คือ น้ำสับประรดและ น้ำเสาวรสเข้มข้น ซึ่งนำมาจากบริษัท นูบูน จำกัด ซึ่งน้ำสับประรดเข้มข้นมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 60.8 องศาบริกซ์ และ น้ำเสาวรสเข้มข้นมีความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 13.8 องศาบริกซ์

3.1.2 ทำการเจือจางตัวอย่างน้ำผลไม้เข้มข้นด้วยน้ำกลั่น ซึ่งปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในการเจือจางขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำผลไม้เข้มข้น ความเข้มข้นของตัวอย่างน้ำผลไม้ที่ต้องการและปริมาตรของตัวอย่างน้ำผลไม้ที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณปริมาตรน้ำกลั่นและน้ำผลไม้ที่จำเป็นต้องใช้ในแต่ละกลุ่มตัวอย่าง ได้จากสมการ

$$\frac{BX}{X+Y} = A \quad (3.1)$$

$$X+Y = Z \quad (3.2)$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นของน้ำผลไม้ที่ต้องการ ( องศาบริกซ์ )

B = ความเข้มข้นของน้ำผลไม้เริ่มต้น ( องศาบริกซ์ )

X = ปริมาตรของน้ำผลไม้ที่ใช้ในแต่ละตัวอย่าง ( มิลลิลิตร )

Y = ปริมาตรของน้ำกลั่นที่ใช้ในแต่ละตัวอย่าง ( มิลลิลิตร )

Z = ปริมาตรของตัวอย่างน้ำผลไม้ที่ต้องการ ( มิลลิลิตร )

ซึ่งจากสมการที่ (3.1) และ (3.2) นำมาทำการคำนวณหาปริมาตรของน้ำผลไม้เข้มข้นและน้ำกลั่นที่ต้องใช้ในแต่ละตัวอย่างความเข้มข้นของน้ำผลไม้ได้ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2

3.1.3 เก็บรักษาตัวอย่างน้ำผลไม้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3.1 ปริมาณน้ำเสาวรตเข้มข้น และ น้ำกลั่น ในการเตรียมตัวอย่างน้ำเสาวรต

ความเข้มข้นของตัวอย่าง น้ำเสาวรต ( องศาบริกซ์ )	ปริมาณของน้ำเสาวรต ( มิลลิลิตร )	ปริมาณของน้ำกลั่น ( มิลลิลิตร )
13.8	650.00	0.00
10.0	471.01	178.99
7.0	329.71	320.29

ตารางที่ 3.2 ปริมาณน้ำดับประดเข้มข้น และ น้ำกลั่น ในการเตรียมตัวอย่างน้ำดับประด

ความเข้มข้นของตัวอย่าง น้ำดับประด ( องศาบริกซ์ )	ปริมาณของน้ำดับประด ( มิลลิลิตร )	ปริมาณของน้ำกลั่น ( มิลลิลิตร )
60.8	650.00	0.00
45.0	481.09	168.91
35.0	374.18	275.82
25.0	267.27	382.73
15.0	160.36	489.64
10.0	106.91	543.09

### 3.2 การเตรียมอุปกรณ์และเครื่องมือ

#### 3.2.1 วิธีการปรับค่าเครื่องวัดความหนืด ( Viscometer )

เครื่องวัดความหนืดทำการปรับค่าโดยการเปลี่ยน Pivot Shaft และ ทำการวัดค่าเทียบกับของเหลวมาตรฐาน Standard Oil / S2000 Code CAL-SR2-08-01 แล้วทำการปรับค่าโดยปรับ Calibrated Spiral Spring ซึ่งได้ทำการปรับค่าโดย บริษัท ไชแอนติฟิค โพรโมชัน จำกัด ทำการปรับค่าโดยวิธีของบรุคฟิลด์ ( Brookfield Manufacturer Method ) และทำการทดลองเพื่อสร้าง Calibration Curve ของเครื่องวัดความหนืดอีกครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

#### 3.2.2 การสร้าง Calibration Curve

เนื่องจากค่าความหนืดที่อ่านและคำนวณได้จากการวัดโดยเครื่องวัดความหนืดโดยตรง อาจไม่ตรงกับค่าความหนืดจริงของของเหลวนั้น ดังนั้นจึงต้องทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนืดกับความหนืดจริงของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ( Calibration Curve )

1. จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องวัดความหนืด ( Viscometer )
2. เทน้ำกลั่นในบีกเกอร์ปริมาตร 600 มิลลิลิตร นำไปตั้งในอ่างควบคุมความร้อน โดยควบคุมอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียสและค่อย ๆ เพิ่มอุณหภูมิขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึง 72 องศาเซลเซียส
3. ทำการบันทึกค่าความหนืดของน้ำกลั่นที่สภาวะคงที่ ( steady state )
4. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
5. สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดที่อ่านได้กับค่าความหนืดจริงของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

### 3.2.3 วิธีการปรับค่าเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง ( Refractometer )

1. นำเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงขนาดช่วง 0 – 32 องศาบริกซ์ มาปรับค่าก่อน โดยนำมาวัดค่าองศาบริกซ์ของน้ำกลั่น ซึ่งอ่านค่าระดับองศาบริกซ์ได้จากเส้นรอยต่อระหว่างสีขาวกับสีฟ้าภายในเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงซึ่งค่าที่อ่านได้จากน้ำกลั่นจะต้องเป็นศูนย์องศาบริกซ์ หากเส้นรอยต่อดังกล่าวไม่อยู่ที่ศูนย์องศาบริกซ์ให้ปรับที่สกรูด้านบนให้ระดับเส้นรอยต่อดังกล่าวอยู่ที่ศูนย์องศาบริกซ์
2. นำน้ำตาลมาละลายในน้ำกลั่นเพื่อให้ได้สารละลายน้ำตาล แล้ววัดค่าความเข้มข้นด้วยเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงขนาด 0 – 32 องศาบริกซ์เป็นช่วง ๆ จนกระทั่งได้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้น 30 องศาบริกซ์
3. นำเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงขนาดช่วง 28 – 62 องศาบริกซ์ มาวัดค่าความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้น 30 องศาบริกซ์ หากค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงขนาด 28 – 62 องศาบริกซ์ ไม่เท่ากับ 30 องศาบริกซ์ ให้ปรับสกรูด้านบนเช่นเดียวกับเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงขนาด 0 – 32 องศาบริกซ์ จนกระทั่งค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสงขนาด 28 – 62 องศาบริกซ์ เท่ากับ 30 องศาบริกซ์ ซึ่งหากสารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงไม่สามารถละลายน้ำตาลได้แล้วหรือละลายได้ในอัตราที่ช้ามากเนื่องจากเริ่มจะเป็นสารละลายอัมตวัให้นำไปตั้งไฟเพื่อช่วยให้การละลายดีขึ้นจนการละลาย แต่เมื่อให้ความร้อนแล้วก่อนที่จะนำมาวัดค่าความเข้มข้นให้ทิ้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไว้ให้เขียนลงจนอุณหภูมิปกติก่อน เพราะอุณหภูมิที่สูงไปจะทำให้ค่าที่อ่านได้จากเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง คลาดเคลื่อน

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

#### 3.3.1 การเตรียมตัวอย่างน้ำผลไม้

1. น้ำเสาวรสเข้มข้น
2. น้ำสับประรดเข้มข้น
3. น้ำกลั่น
4. หลอดหยด
5. กระจกบด
6. แท่งแก้วคนสารละลาย
7. บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
8. เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง ( Refractometer ) ช่วง 0 – 32 และ 28 – 62 องศาบริกซ์

#### 3.3.2 การสร้าง Calibration Curve

1. น้ำกลั่นปริมาตร 600 มิลลิลิตร
2. ชุดเครื่องวัดค่าความหนืด ( Viscometer )
3. บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
4. อ่างควบคุมความร้อน ( Water Bath )
5. เทอร์โมมิเตอร์
6. แท่งแก้วคน

#### 3.3.3 การปรับค่าเครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractometer )

1. เครื่องวัดค่าดัชนีหักเหของแสง (Refractometer ) ช่วง 0 – 32 และ 28 - 62 องศาบริกซ์
2. น้ำกลั่น
3. สารละลายน้ำตาลเข้มข้น
4. แท่งแก้วคนสารละลาย
5. หลอดหยด
6. ชุดหม้อต้ม

#### 3.3.4 การทดลองหาค่าความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ตัวอย่างน้ำผลไม้ปริมาตร 600 มิลลิลิตร
2. ชุดเครื่องวัดค่าความหนืด ( Viscometer )
3. บีกเกอร์ขนาด 600 มิลลิลิตร
4. อ่างควบคุมความร้อน ( Water Bath )
5. เทอร์โมมิเตอร์
6. แท่งแก้วคน

### 3.3.5 การทดลองหาค่าความหนาแน่น

1. ตัวอย่างน้ำผลไม้ปริมาตร 50 มิลลิลิตร
2. Pycnometer
3. กรวยแก้ว
4. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
5. กระจกนํ้ากลั่น

## 3.4 วิธีการทดลอง

### 3.4.1 วิธีการใช้เครื่องวัดความหนืด ( Viscometer )

1. เปิดสวิตช์และตรวจสอบระดับลูกน้ำ
2. ปรับความเร็วรอบไปที่ 10 รอบต่อนาที ( สำหรับรุ่น RVTDVI )
3. เปิดสวิตช์ของมอเตอร์ที่อยู่ด้านขวาของเครื่อง รอจนขึ้นตัวเลข 00.0
4. ถ้าตัวเลขไม่อยู่ที่ 00.0 ให้ปรับปุ่ม “Zero” จนกระทั่งได้ค่า 00.0
5. ปิดสวิตช์ของมอเตอร์
6. ใส่ตัวป้องกัน ( Guard log ) และเข็ม ( Spindle ) ที่เหมาะสม โดยหมุนตามเข็มนาฬิกา
7. จุ่มเข็มลงในตัวอย่างจนถึงกึ่งกลางรอบตัวของเข็ม ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศอยู่ภายใต้เข็ม และ ให้เข็มจุ่มอยู่กึ่งกลางของภาชนะที่ใส่ตัวอย่าง
8. ปรับความเร็วรอบตามความเหมาะสม
9. เปิดสวิตช์ของมอเตอร์แล้วรอนกระทั่งค่าที่อ่านได้ไม่เปลี่ยนแปลง แล้วทำการบันทึกค่าที่อ่านได้
10. เปิดตาราง เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ ( Factor ) มาคูณกับค่าที่อ่านได้ ผลคูณที่ได้คือค่าความหนืดซึ่งมีหน่วยเป็น เซนติพอยซ์ ( Centipoise )

### 3.4.2 วิธีการหาค่าความหนืด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. จัดเตรียมอุปกรณ์เครื่องวัดความหนืด (Viscometer)
2. เทตัวอย่างน้ำเสาวรสถี่ความเข้มข้น 7 องศาบริกซ์ในบีกเกอร์ปริมาตร 600 มิลลิลิตร นำไปตั้งในอ่างควบคุมความร้อนโดยควบคุมอุณหภูมิที่ 5 องศาเซลเซียส
3. ทำการบันทึกค่าความหนืดของน้ำเสาวรสถี่สภาวะคงที่ (steady state)
4. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
5. ทำการทดลองจากข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเสาวรสถี่โดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส
6. ทำการทดลองจากข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำเสาวรสถี่เป็น 10 และ 13.8 องศาบริกซ์ ตามลำดับ
7. ทำการทดลองจากข้อ 1-5 โดยเปลี่ยนตัวอย่างน้ำผลไม้จากน้ำเสาวรสถี่เป็นน้ำส้มประด โดยทำการวัดค่าความหนืดที่ความเข้มข้น 10, 15, 25, 35, 45 และ 60.8 องศาบริกซ์ ตามลำดับ
8. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

### 3.4.3 วิธีการหาค่าความหนาแน่น

1. จัดเตรียมเครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่ง
2. ชั่งน้ำหนัก Pycnometer ขนาด 50 มิลลิลิตร บันทึกน้ำหนักของ Pycnometer
3. ตวงตัวอย่างน้ำเสาวรสถี่ความเข้มข้น 7 องศาบริกซ์ อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ปริมาตร 50 มิลลิลิตร เทใส่ Pycnometer ที่เตรียมไว้
4. จดบันทึกน้ำหนักของ Pycnometer เมื่อบรรจุน้ำเสาวรสถี่อยู่เต็ม (รักษาอุณหภูมิให้คงที่ตลอดการทดลอง)
5. ความหนาแน่นของน้ำผลไม้ หาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างมวลและปริมาตรของน้ำผลไม้ดังสมการ

$$\rho = \frac{m}{v}$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่นของน้ำผลไม้ ( $\text{kg/m}^3$ )

$m$  = มวลของน้ำผลไม้ (kg)

$v$  = ปริมาตรของน้ำผลไม้ ( $\text{m}^3$ )

6. ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

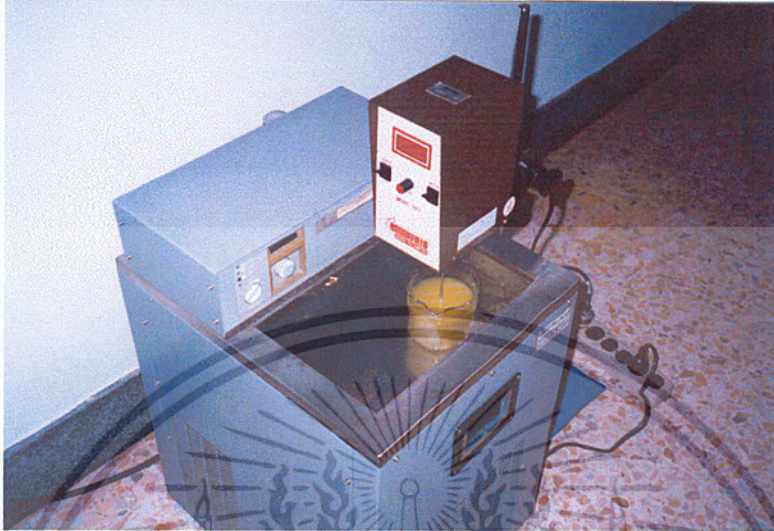
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. ทำการทดลองจากข้อ 1-6 โดยเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำเสาวรศโดยเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 องศาเซลเซียส จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส
8. ทำการทดลองจากข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของน้ำผลไม้เป็น 10 และ 13.8 องศาปริกซ์ ตามลำดับ
9. ทำการทดลองจากข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนตัวอย่างน้ำผลไม้จากน้ำเสาวรศเป็นน้ำสับปะรด โดยทำการวัดค่าความหนาแน่นที่ความเข้มข้น 10, 15, 25, 35, 45 และ 60.8 องศาปริกซ์ ตามลำดับ
10. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างน้ำผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การหาความหนืดของน้ำผลไม้ตัวอย่าง



รูปที่ 3.3 การหาความหนาแน่นของน้ำผลไม้ตัวอย่าง (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การหาความหนาแน่นของน้ำผลไม้ตัวอย่าง (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

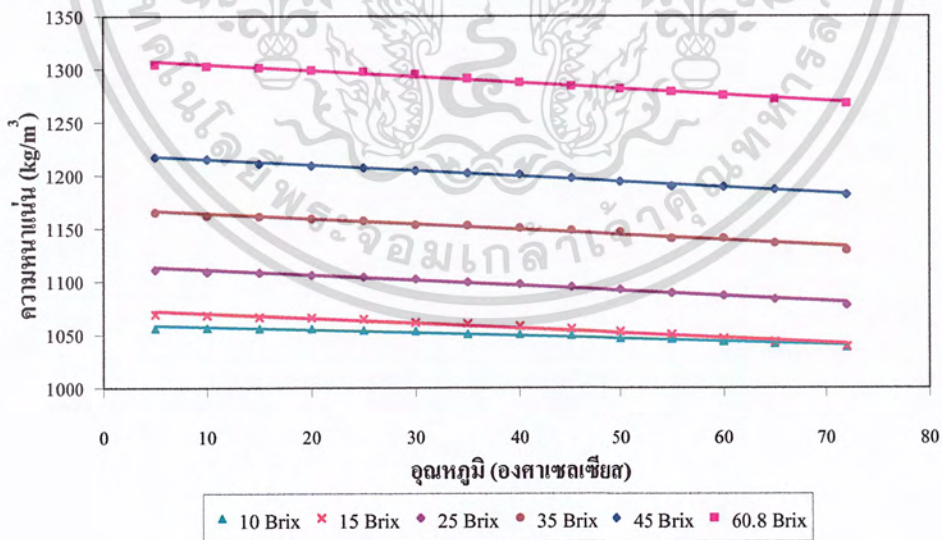
#### 4.1 ผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของน้ำสับประรด และน้ำเสาวรศ

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิ และความเข้มข้นของน้ำสับประรดและน้ำเสาวรศ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิ เป็นแบบเชิงเส้น (ดังรูปที่ 4.1 และ 4.3) และความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับความเข้มข้นเป็นแบบโพลิโนเมียล (ดังรูปที่ 4.2 และ 4.4) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น, อุณหภูมิ กับ ความเข้มข้น จึงเป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$\rho = k_1 + k_2T + k_3C + k_4C^2$$

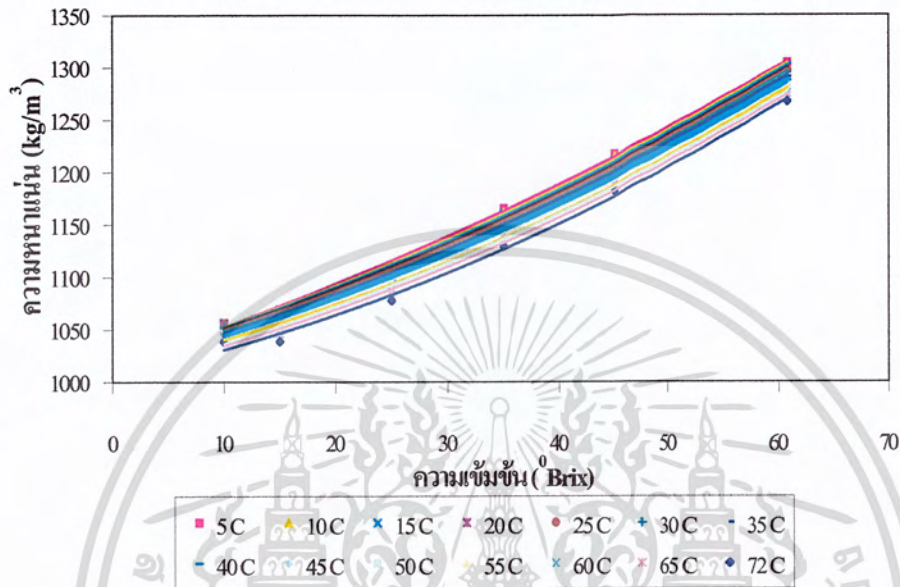
โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่น ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )  
 $T$  = อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $C$  = ความเข้มข้นของน้ำผลไม้ ( $^{\circ}\text{Brix}$ )

รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของน้ำสับประรดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

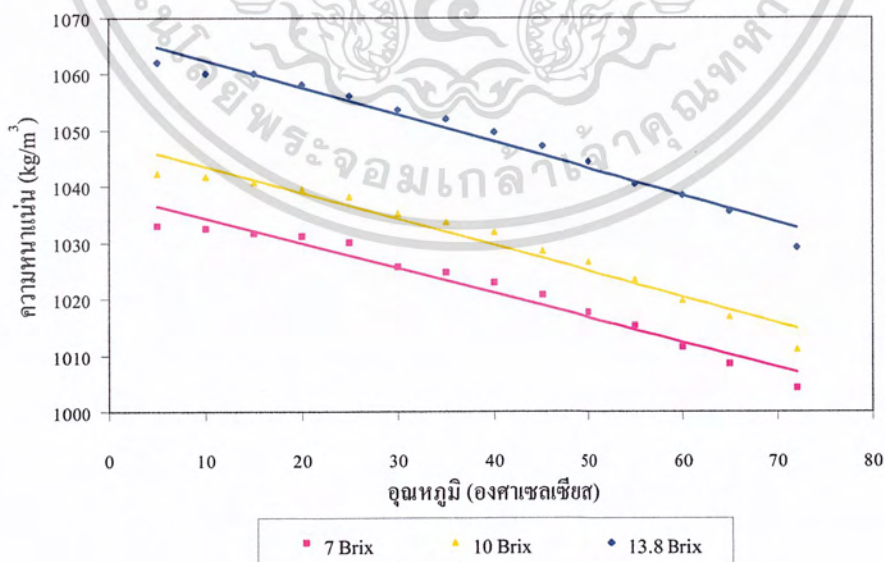


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกับความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่อุณหภูมิต่าง ๆ

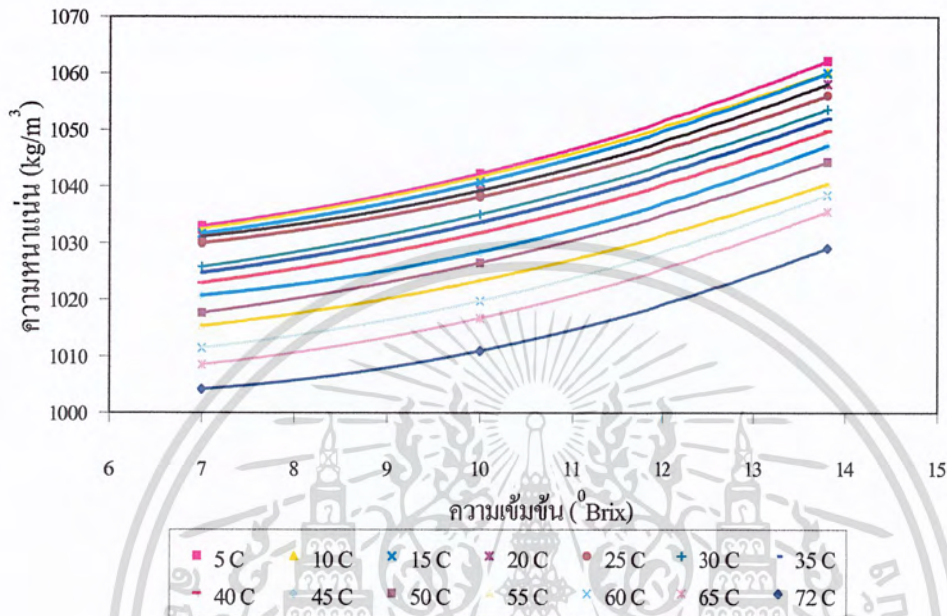


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับอุณหภูมิของน้ำสั้วรสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรสถ์อุณหภูมิต่าง ๆ



#### 4.2 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำสับปะรด

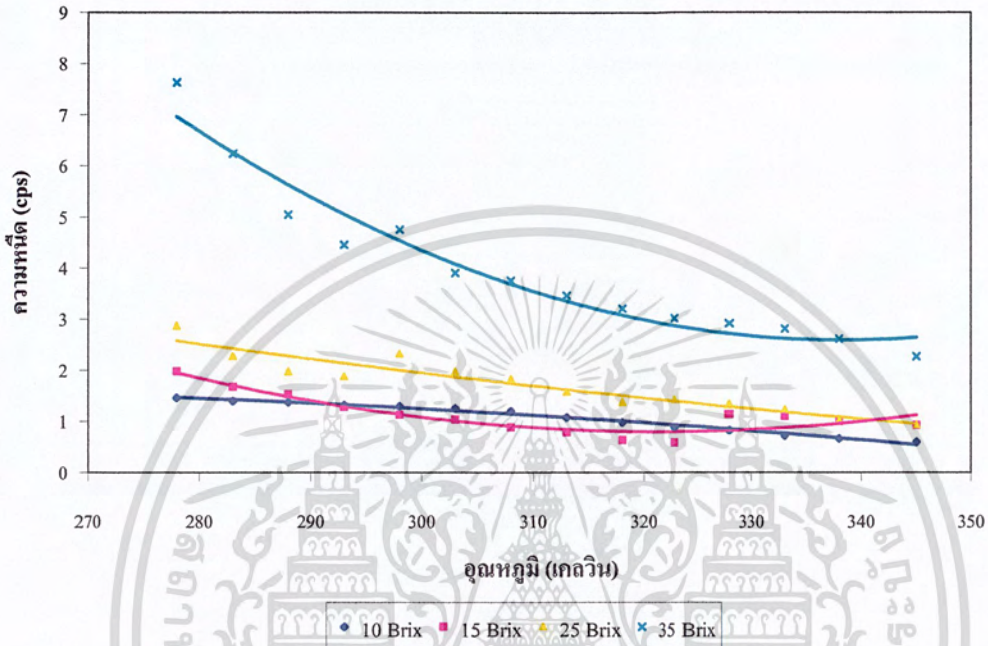
เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ และ  $\ln$  ของความหนืดกับความเข้มข้นของน้ำสับปะรด พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิ เป็นแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7) ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Arrhenius และความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln$  ของความหนืดกับความเข้มข้นเป็นแบบโพลีโนเมียล ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด, อุณหภูมิ กับ ความเข้มข้น จึงเป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$\eta = K_1 \exp\left(\frac{E_a}{RT} + K_2 + K_3 C^2\right)$$

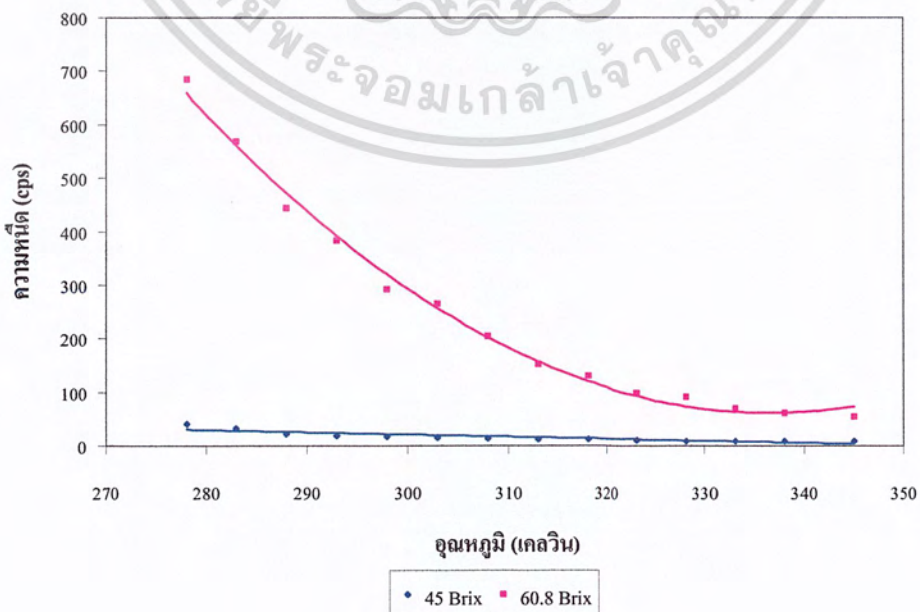
โดยที่	$E_a$	=	พลังงานกระตุ้น (kcal / (gmol))
	R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (kcal / (gmol.K))
	T	=	อุณหภูมิของของไหล (K)
	c	=	ความเข้มข้นของของไหล (°Brix)
	$\eta$	=	ความหนืด (cps)
	A	=	ค่าคงที่ (°Brix <sup>-1</sup> )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของน้ำสับประดที่ความเข้มข้น 10, 15, 25 และ 35 องศาบริกซ์

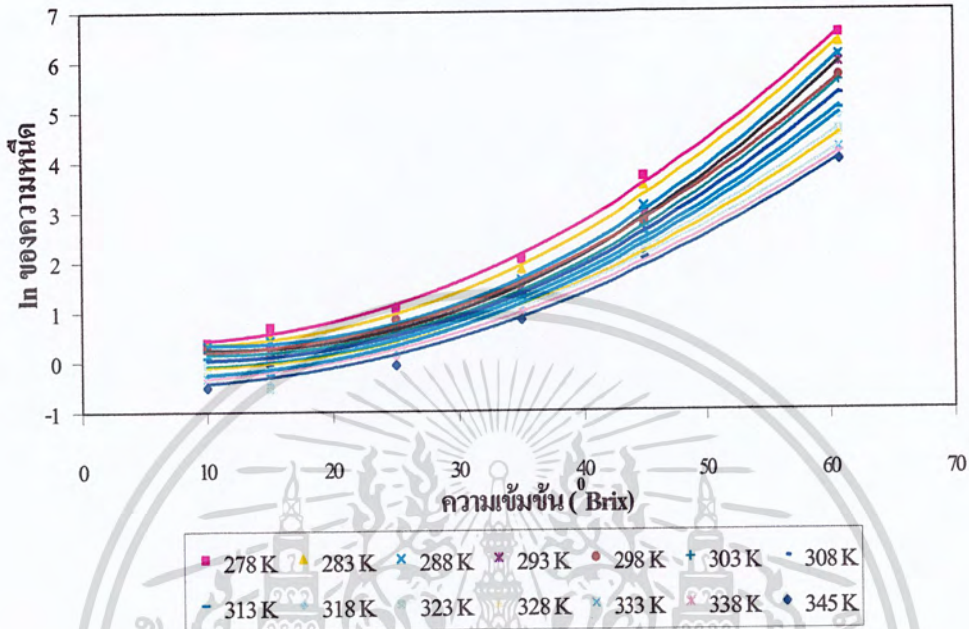


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของน้ำสับประดที่ความเข้มข้น 45 และ 60.8 องศาบริกซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของความหนืด กับ ความเข้มข้นของน้ำสับปะรดที่อุณหภูมิต่าง ๆ



### 4.3 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรศ

เนื่องจากน้ำเสาวรศมีลักษณะเป็นเนื้อผลไม้แขวนลอยอยู่ภายในและจากการทดลองพบว่า น้ำเสาวรศเป็นของไหลประเภท Non-Newtonian ค่าความหนืดที่วัดได้จึงอยู่ในรูปของสมการยกกำลัง หรือ Power Law Equation และ ค่าความหนืดที่วัดได้อยู่ในรูปของดัชนียกกำลัง (n) และดัชนีความหนืด (k)

#### 4.3.1 ดัชนียกกำลัง

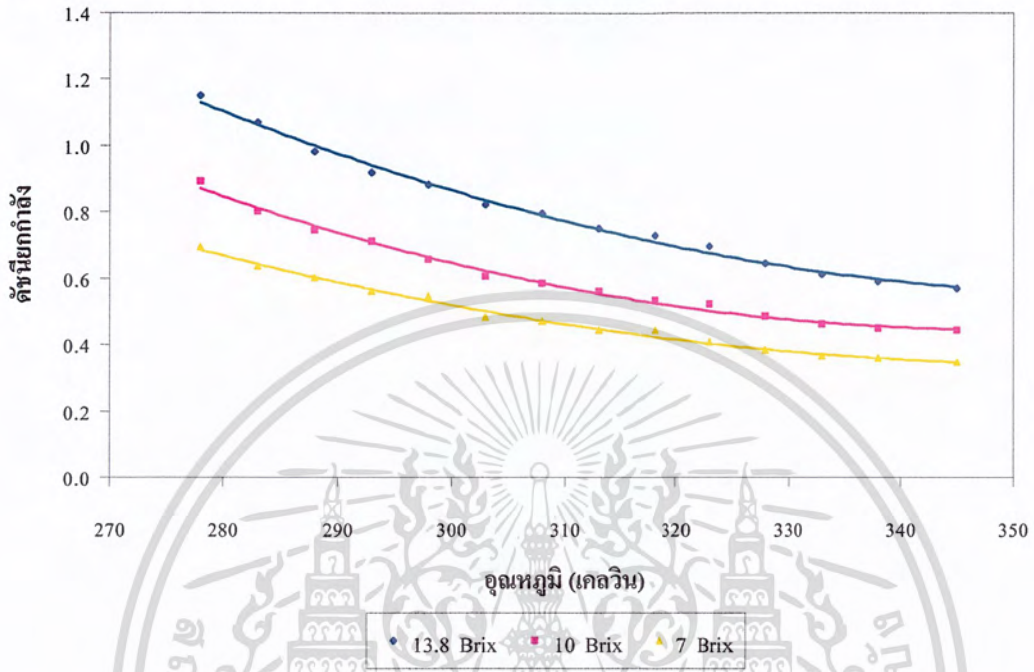
เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับอุณหภูมิ และ ดัชนียกกำลังกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรศ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับอุณหภูมิ เป็นแบบโพลิโนเมียล (ดังรูปที่ 4.8) และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับความเข้มข้นเป็นแบบเชิงเส้น (ดังรูปที่ 4.9) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลัง, อุณหภูมิ กับ ความเข้มข้นจึงเป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$n = k_1 + k_2 C + k_3 T + k_4 T^2$$

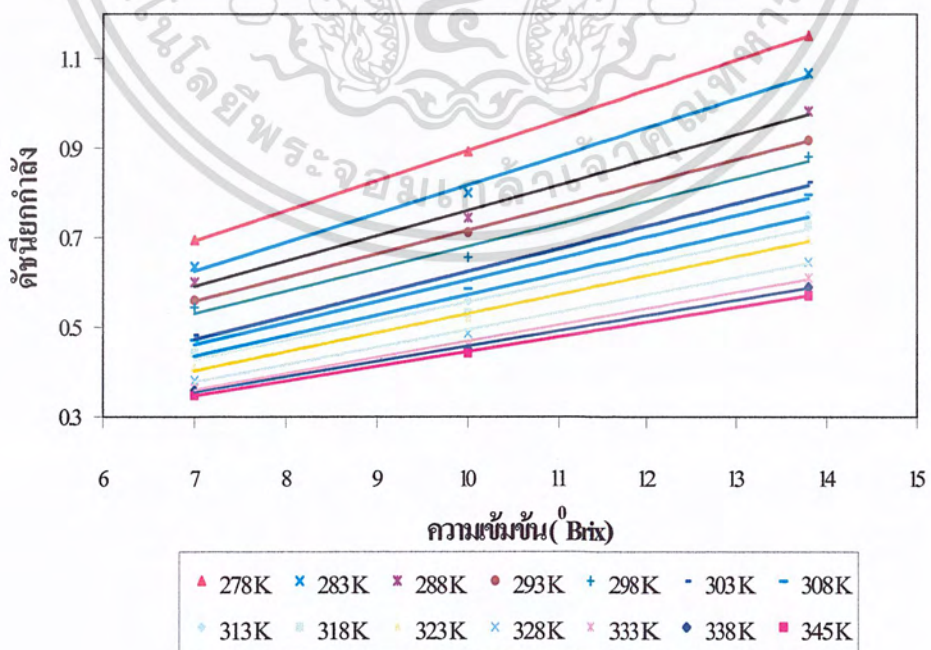
โดย  $n$  = ดัชนียกกำลัง  
 $C$  = ความเข้มข้นของน้ำผลไม้ (°Brix)  
 $T$  = อุณหภูมิ (K)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับอุณหภูมิของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลังกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรสที่อุณหภูมิต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

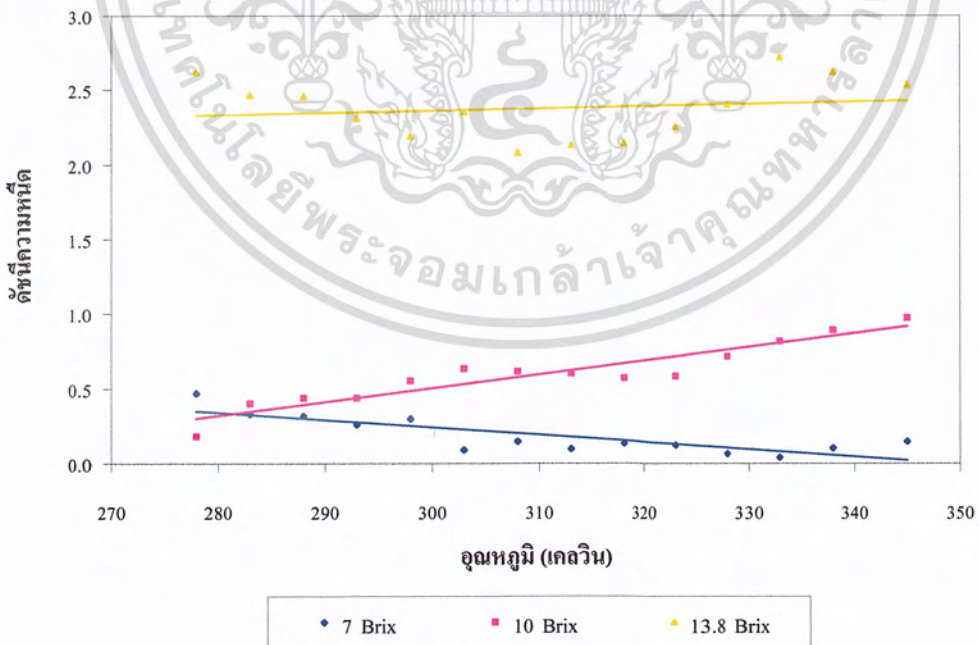
4.3.2 ดัชนีความหนืด

เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืดกับอุณหภูมิ และ ดัชนีความหนืดกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรส พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิเป็นแบบเชิงเส้น (ดังรูปที่ 4.10) และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืดกับความเข้มข้นเป็นแบบโพลิโนเมียล (ดังรูปที่ 4.11) ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืด, อุณหภูมิ กับ ความเข้มข้นจึงเป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$k = k_1 + k_2T + k_3C + k_4C^2$$

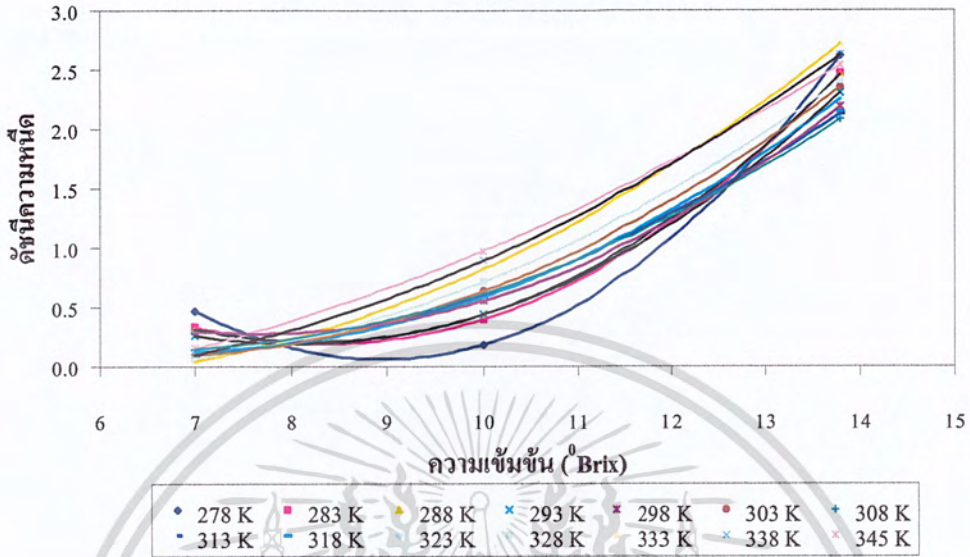
โดย k = ดัชนีความหนืด  
 C = ความเข้มข้นของน้ำผลไม้ (Brix)  
 T = อุณหภูมิ (K)

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืดกับอุณหภูมิของน้ำเสาวรสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืดกับความเข้มข้นของน้ำเสาวรสีที่อุณหภูมิต่าง ๆ



4.4 การหาค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ (Gomez A. and A.Arturo, 1984)

4.4.1 ความหนาแน่นของน้ำสับปรดและน้ำเสาวรสี

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น, อุณหภูมิ กับความเข้มข้น เป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$\rho = a + b_1 T + b_2 C + b_3 C^2$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3$$

แก้สมการหาค่า  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  โดยจัดรูปสมการให้อยู่ในแบบฟอร์มของ normal equation ดังนี้

$$b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1 x_2 + b_3 \sum x_1 x_3 = \sum x_1 y$$

$$b_1 \sum x_1 x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2 x_3 = \sum x_2 y$$

$$b_1 \sum x_1 x_3 + b_2 \sum x_2 x_3 + b_3 \sum x_3^2 = \sum x_3 y$$

โดย  $\sum x_i^2 = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Sigma y^2 &= \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2 \\ \Sigma x_i y &= \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y}) \\ \bar{X}_i &= \frac{\Sigma X_i}{n} \\ \bar{Y}_i &= \frac{\Sigma Y_i}{n}\end{aligned}$$

หาค่า a ได้จากสมการ

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3$$

โดย  $a = \bar{Y} - b_1 \bar{X}_1 - b_2 \bar{X}_2 - b_3 \bar{X}_3$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ( $R^2$ ) ได้จากสมการ

$$R^2 = \frac{SSR}{\Sigma y^2}$$

โดย  $SSR = \sum_{i=1}^k (b_i)(\Sigma x_i y)$

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

#### 4.4.2 ความหนืดของน้ำสับประค

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด, อุณหภูมิ กับความเข้มข้นของน้ำสับประค เป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$\eta = K_1 \exp\left(\frac{E}{RT} + K_2 + K_3 C^2\right)$$

หรือ  $\ln \eta = \ln k + \frac{Ea}{RT} + AC + BC^2$

เปลี่ยนรูปสมการให้อยู่ในรูปแบบเส้นตรงดังนี้

$$y' = a' + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$$

โดย  $y' = \ln y$  และ  $a' = \ln a$  แล้วทำการแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังวิธีข้างต้น ซึ่ง

ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 ความหนืดของน้ำเสาวรศ

ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลัง, อุณหภูมิ กับความเข้มข้น เป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$n = a + b_1C + b_2T + b_3T^2$$

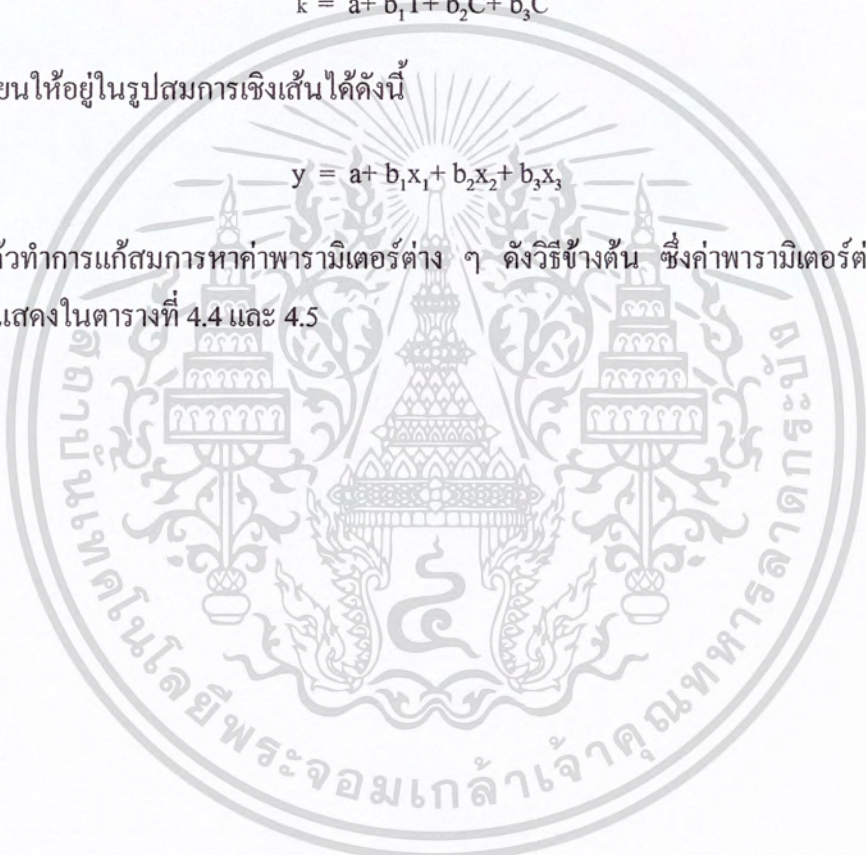
และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืด, อุณหภูมิ กับความเข้มข้น เป็นไปตามรูปแบบสมการดังนี้

$$k = a + b_1T + b_2C + b_3C^2$$

เขียนให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$y = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

แล้วทำการแก้สมการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังวิธีข้างต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5



ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำเสียประรด

$\rho$ (Y)	$y$	T (X <sub>1</sub> )	$x_1^2$	C (X <sub>2</sub> )	$x_2^2$	C <sup>2</sup> (X <sub>3</sub> )	$x_3^2$	$x_1 y$	$x_2 y$	$x_3 y$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
1303.7767	26722.6044	5	1065.56	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-5336.1446	4740.6445	389146.9198	-946.6429	-77707.4054	69035.4570
1217.0293	5886.4341	5	1065.56	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-2504.4614	1012.7449	54388.4685	-430.8858	-23140.2950	9357.3876
1165.0340	611.4641	5	1065.56	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-807.1861	79.1290	-2252.8757	-104.4572	2973.9930	-291.5424
1110.9267	863.1550	5	1065.56	25.0	46.24	625.00	477628.8854	959.0309	199.7806	20304.3781	221.9714	22559.7090	4699.5276
1068.7480	5120.5760	5	1065.56	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	2335.8643	1202.1778	78077.6529	548.4000	35616.8530	18330.5976
1055.8080	7139.9458	5	1065.56	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	2758.2629	1842.0608	102758.8525	711.6143	39697.2105	26511.1326
1302.2400	26222.5556	10	764.13	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-4476.3134	4696.0802	385488.7547	-801.6429	-65804.7404	69035.4570
1215.2053	5609.8752	10	764.13	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-2070.4253	988.6681	53095.4477	-364.8858	-19595.8300	9357.3876
1161.6260	454.5339	10	764.13	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-589.3402	68.2234	-1942.3830	-88.4572	2518.4580	-291.5424
1108.7287	997.1385	10	764.13	25.0	46.24	625.00	477628.8854	872.8924	214.7270	21823.4313	187.9714	19104.1740	4699.5276
1067.9253	5238.9947	10	764.13	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	2000.8151	1215.9991	78975.3067	464.4000	30161.3180	18330.5976
1055.9073	7123.1743	10	764.13	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	2333.0270	1839.8960	102638.0931	602.6143	33616.6755	26511.1326
1300.8173	25763.8132	15	512.70	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-3634.4304	4654.8219	382101.9704	-656.6429	-53902.0754	69035.4570
1210.8013	4969.5591	15	512.70	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-1596.2107	930.5353	49973.4829	-298.8858	-16051.3650	9357.3876
1160.8440	421.8012	15	512.70	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-465.0345	65.7210	-1871.1373	-72.4572	2062.9230	-291.5424
1108.1133	1036.3828	15	512.70	25.0	46.24	625.00	477628.8854	728.9393	218.9117	22248.7385	153.9714	15648.6390	4699.5276
1066.1433	5500.1357	15	512.70	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	1679.2602	1245.9367	80919.6593	380.4000	24705.7830	18330.5976
1055.5433	7184.7492	15	512.70	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	1919.2745	1847.8312	103080.7560	493.6143	27536.1405	26511.1326
1298.6613	25076.3377	20	311.27	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-2793.8369	4592.2979	376969.5413	-511.6429	-41999.4104	69035.4570
1209.0713	4728.6390	20	311.27	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-1213.2130	907.6993	48747.0980	-232.8858	-12506.9000	9357.3876
1158.9107	346.1274	20	311.27	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-328.2366	59.5344	-1695.0002	-56.4572	1607.3880	-291.5424
1105.9220	1182.2732	20	311.27	25.0	46.24	625.00	477628.8854	606.6356	233.8126	23763.1613	119.9714	12193.1040	4699.5276
1065.5113	5594.2771	20	311.27	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	1319.5959	1256.5543	81609.2390	296.4000	19250.2480	18330.5976
1055.0987	7260.3181	20	311.27	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	1503.3040	1857.5235	103621.4372	384.6143	21455.6055	26511.1326
1297.1113	24587.8394	25	159.84	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-1982.4649	4547.3479	373279.7151	-366.6429	-30096.7454	69035.4570
1207.0753	4458.1127	25	159.84	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-844.1524	881.3521	47332.1476	-166.8858	-8962.4350	9357.3876

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความถี่พื้นที่ความหนาแน่น, ความเข้มข้น และอุณหภูมิจนของน้ำใต้ประด (ต่อ)

$P(Y)$	$y^2$	$T(X_1)$	$x_1^2$	$C(X_2)$	$x_2^2$	$C^2(X_3)$	$x_3^2$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1157.0127	279.1071	25	159.84	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-211.2179	53.4608	-1522.0791	-40.4572	1151.8530	-291.5424
1104.2433	1300.5328	25	159.84	25.0	46.24	625.00	477628.8854	455.9382	245.2277	24923.3226	85.9714	8737.5690	4699.5276
1064.3667	5766.8077	25	159.84	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	960.0925	1275.7836	82858.1200	212.4000	13794.7130	18330.5976
1053.8380	7476.7496	25	159.84	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	1093.2053	1885.0068	105154.5833	275.6143	15375.0705	26511.1326
1294.7220	23844.2393	30	58.41	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-1180.1783	4478.0582	367591.9076	-221.6429	-18194.0804	69035.4570
1204.1873	4080.7949	30	58.41	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-488.2343	843.2305	45284.8646	-100.8858	-5417.9700	9357.3876
1153.0427	162.2184	30	58.41	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-97.3433	40.7568	-1160.3843	-24.4572	696.3180	-291.5424
1102.0007	1467.3113	30	58.41	25.0	46.24	625.00	477628.8854	292.7636	260.4774	26473.1992	51.9714	5282.0340	4699.5276
1060.9320	6300.2636	30	58.41	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	606.6459	1333.4866	86605.7452	128.4000	8339.1780	18330.5976
1053.1720	7592.3688	30	58.41	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	665.9545	1899.5256	105964.5106	166.6143	9294.5355	26511.1326
1290.6807	22612.4903	35	6.98	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-397.4188	4360.8605	357971.4596	-76.6429	-6291.4154	69035.4570
1201.9927	3805.2243	35	6.98	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	-163.0288	814.2618	43729.1280	-34.8858	-1873.5050	9357.3876
1152.5267	149.3406	35	6.98	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-32.2971	39.1056	-1113.3731	-8.4572	240.7830	-291.5424
1099.2280	1687.4185	35	6.98	25.0	46.24	625.00	477628.8854	108.5639	279.3318	28389.4316	17.9714	1826.4990	4699.5276
1059.9033	6464.6263	35	6.98	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	212.4936	1350.7687	87728.1670	44.4000	2883.6430	18330.5976
1050.3873	8085.4086	35	6.98	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	237.6431	1960.2320	109351.0037	57.6143	3214.0005	26511.1326
1287.1820	21572.5006	40	5.56	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	346.2068	4259.3982	349642.6888	68.3571	5611.2496	69035.4570
1200.5980	3635.1011	40	5.56	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	142.1162	795.8518	42740.4350	31.1142	1670.9600	9357.3876
1150.3313	100.5026	40	5.56	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	23.6306	32.0803	-913.3568	7.5428	-214.7520	-291.5424
1097.4980	1832.5420	40	5.56	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-100.9049	291.0958	29585.0467	-16.0286	-1629.0360	4699.5276
1057.7247	6819.7041	40	5.56	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-194.6562	1387.3692	90105.2527	-39.6000	-2571.8920	18330.5976
1050.1960	8119.8481	40	5.56	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-212.4024	1964.4024	109583.6450	-51.3857	-2866.5345	26511.1326
1283.6580	20549.7386	45	54.13	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	1054.6593	4157.2022	341253.6905	213.3571	17513.9146	69035.4570
1197.2147	3238.5774	45	54.13	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	418.6838	751.1922	40342.0373	97.1142	5215.4250	9357.3876
1148.1440	61.4311	45	54.13	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	57.6638	25.0810	-714.0784	23.5428	-670.2870	-291.5424
1094.7800	2072.6349	45	54.13	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-334.9426	309.5782	31463.4755	-50.0286	-5084.5710	4699.5276

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำดิบประรด (ต่อ)

$P(Y)$	$y^2$	$T(X_1)$	$x_1^2$	$C(X_2)$	$x_2^2$	$C^2(X_3)$	$x_3^2$	$x_1Y$	$x_2Y$	$x_3Y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1055.3187	7222.8752	45	54.13	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-625.2649	1427.7900	92730.4562	-123.6000	-8027.4270	18330.5976
1049.2140	8297.7889	45	54.13	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-670.1781	1985.8100	110777.8621	-160.3857	-8947.0695	26511.1326
1281.2173	19855.9381	50	152.70	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	1741.2582	4086.4219	335443.5236	358.3571	29416.5796	69035.4570
1193.8407	2865.9427	50	152.70	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	661.5333	706.6554	37950.2323	163.1142	8759.8900	9357.3876
1146.3880	36.9883	50	152.70	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	75.1537	19.4618	-554.0946	39.5428	-1125.8220	-291.5424
1092.4213	2292.9636	50	152.70	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-591.7204	325.6173	33093.5896	-84.0286	-8540.1060	4699.5276
1052.6367	7685.9412	50	152.70	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-1083.3443	1472.8476	95656.8051	-207.6000	-13482.9620	18330.5976
1046.3907	8820.1211	50	152.70	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-1160.5270	2047.3579	114211.2970	-269.3857	-15027.6045	26511.1326
1278.3107	19045.2420	55	301.27	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	2395.3634	4002.1305	328524.2664	503.3571	41319.2446	69035.4570
1189.2760	2398.0413	55	301.27	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	849.9757	646.4014	34714.3484	229.1142	12304.3550	9357.3876
1140.3220	0.0002	55	301.27	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	0.2742	0.0506	-1.4395	55.5428	-1581.3570	-291.5424
1089.0073	2631.5771	55	301.27	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-890.4022	348.8325	35453.0289	-118.0286	-11995.6410	4699.5276
1049.7787	8195.2283	55	301.27	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-1571.2985	1520.8620	98775.1889	-291.6000	-18938.4970	18330.5976
1045.6400	8961.6894	55	301.27	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-1643.1345	2063.7232	115124.2285	-378.3857	-21108.1395	26511.1326
1274.9013	18115.8409	60	499.84	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	3009.1615	3903.2579	320408.0772	648.3571	53221.9096	69035.4570
1188.9273	2364.0114	60	499.84	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	1087.0287	641.7985	34467.1574	295.1142	15848.8200	9357.3876
1140.4587	0.0233	60	499.84	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	3.4095	0.4880	-13.8938	71.5428	-2036.8920	-291.5424
1086.4433	2901.2120	60	499.84	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-1204.2204	366.2677	37225.0272	-152.0286	-15451.1760	4699.5276
1046.2600	8844.6877	60	499.84	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-2102.6041	1579.9762	102614.4671	-375.6000	-24394.0320	18330.5976
1043.3087	9408.5150	60	499.84	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-2168.5867	2114.5455	117959.3387	-487.3857	-27188.6745	26511.1326
1271.4367	17195.2080	65	748.41	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	3587.3554	3802.7845	312160.4826	793.3571	65124.5746	69035.4570
1186.2227	2108.3250	65	748.41	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	1256.1441	606.0978	32549.8854	361.1142	19393.2850	9357.3876
1135.8887	19.5143	65	748.41	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-120.8502	-14.1360	402.4652	87.5428	-2492.4270	-291.5424
1083.1380	3268.2031	65	748.41	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-1563.9585	388.7438	39509.3432	-186.0286	-18906.7110	4699.5276
1043.0120	9466.1614	65	748.41	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-2661.6911	1634.5426	106158.3827	-459.6000	-29849.5670	18330.5976
1041.3360	9795.1005	65	748.41	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-2707.5416	2157.5504	120358.3530	-596.3857	-33269.2095	26511.1326

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความถ่วงน้ำหนักความหนาแน่น, ความเข้มข้น และอุณหภูมิ ของน้ำต้บประรด (ต่อ)

$\rho$ (Y)	$y^2$	T (X <sub>1</sub> )	$x_1^2$	C (X <sub>2</sub> )	$x_2^2$	$C^2$ (X <sub>3</sub> )	$x_3^2$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1267.3733	16146.0479	72	1180.41	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	4365.6621	3684.9459	302487.4248	996.3571	81788.3056	69035.4570
1181.5747	1703.0891	72	1180.41	45.0	174.24	2025.00	502529.2854	1417.8676	544.7442	29254.9508	453.5142	24355.5360	9357.3876
1129.1387	124.7131	72	1180.41	35.0	10.24	1225.00	8300.4854	-383.6834	-35.7360	1017.4374	109.9428	-3130.1760	-291.5424
1077.7353	3915.1175	72	1180.41	25.0	46.24	625.00	477628.8854	-2149.7572	425.4821	43243.1870	-233.6286	-23744.4600	4699.5276
1038.6120	10341.7103	72	1180.41	15.0	282.24	225.00	1190514.4854	-3493.9219	1708.4626	110959.2535	-577.2000	-37487.3160	18330.5976
1038.0480	10456.7395	72	1180.41	10.0	475.24	100.00	1478916.2354	-3513.2993	2229.2288	124356.9128	-748.9857	-41781.9585	26511.1326

$$\begin{aligned} \Sigma x_1^2 &= 34927.29 & \Sigma x_2^2 &= 25608.8 & \Sigma x_3^2 &= 130547574.4 \\ \Sigma x_1y &= -16216.71 & \Sigma x_2y &= 122885.8 & \Sigma x_3y &= 8740918.8 \\ \Sigma x_1x_2 &= 0 & \Sigma x_1x_3 &= 8E-08 & \Sigma x_2x_3 &= 1786995.8 \\ \Sigma y^2 &= 603662.86 & b_1 &= -0.46430 & b_2 &= 2.8199 \\ b_3 &= 0.02836 & a &= 1030.7912 & SSR &= 601910.30 \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้สมการความถ่วงน้ำหนักดังนี้

$$\rho = 1030.7912 - 0.4643T + 2.8199C + 0.0284C^2 \quad R^2 = 0.9971$$

ตารางที่ 4.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำเสาวรต

$\rho$ (Y)	$y$	T (X <sub>1</sub> )	$x_1^2$	C (X <sub>2</sub> )	$x_2^2$	C <sup>2</sup> (X <sub>3</sub> )	$x_3^2$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1062.1287	797.3451	5	1066	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-921.7474	99.7717	2182.5541	-115.3381	-2523.0775	273.1027
1042.2373	69.6540	5	1066	10	0.0711	100	172.8357	-272.4344	-2.2256	-109.7210	8.7049	429.1464	3.5058
1032.9160	0.9514	5	1066	7	10.6711	49	4114.7991	31.8399	3.1863	62.5687	106.6336	2093.9343	209.5461
1060.0593	684.7590	10	764	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-723.3566	92.4598	2022.6033	-97.6715	-2136.6110	273.1027
1041.7653	61.9983	10	764	10	0.0711	100	172.8357	-217.6574	-2.0997	-103.5158	7.3715	363.4129	3.5058
1032.4340	2.1240	10	764	7	10.6711	49	4114.7991	40.2868	4.7608	93.4874	90.3002	1773.2008	209.5461
1060.0233	682.8762	15	513	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-591.7020	92.3326	2019.8208	-80.0048	-1750.1445	273.1027
1040.7360	46.8485	15	513	10	0.0711	100	172.8357	-154.9816	-1.8252	-89.9839	6.0382	297.6794	3.5058
1031.6233	5.1443	15	513	7	10.6711	49	4114.7991	51.3564	7.4091	145.4911	73.9669	1452.4673	209.5461
1058.1007	586.0902	20	311	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-427.1223	85.5394	1871.2167	-62.3382	-1363.6780	273.1027
1039.3093	29.3536	20	311	10	0.0711	100	172.8357	-95.5875	-1.4448	-71.2275	4.7048	231.9459	3.5058
1031.1413	7.5631	20	311	7	10.6711	49	4114.7991	48.5197	8.9837	176.4098	57.6335	1131.7338	209.5461
1056.0167	489.5289	25	160	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-279.7280	78.1760	1710.1375	-44.6715	-977.2115	273.1027
1038.1113	17.8076	25	160	10	0.0711	100	172.8357	-53.3518	-1.1253	-55.4778	3.3715	166.2124	3.5058
1029.8913	16.0008	25	160	7	10.6711	49	4114.7991	50.5729	13.0670	256.5932	41.3002	811.0003	209.5461
1053.5993	388.4013	30	58	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-150.6255	69.6345	1523.2886	-27.0049	-590.7450	273.1027
1035.0647	1.3766	30	58	10	0.0711	100	172.8357	-8.9674	-0.3129	-15.4250	2.0381	100.4789	3.5058
1025.7227	66.7277	30	58	7	10.6711	49	4114.7991	62.4326	26.6844	523.9951	24.9668	490.2668	209.5461
1051.9507	326.1383	35	7	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-47.7289	63.8095	1395.8629	-9.3382	-204.2785	273.1027
1033.6320	0.0673	35	7	10	0.0711	100	172.8357	0.6856	0.0692	3.4103	0.7048	34.7454	3.5058
1024.6673	85.0840	35	7	7	10.6711	49	4114.7991	24.3784	30.1321	591.6956	8.6335	169.5333	209.5461
1049.7100	250.2281	40	6	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	37.2860	55.8923	1222.6718	8.3284	182.1880	273.1027
1031.7593	4.5459	40	6	10	0.0711	100	172.8357	-5.0256	0.5686	28.0301	-0.6286	-30.9881	3.5058
1022.8693	121.4867	40	6	7	10.6711	49	4114.7991	-25.9802	36.0056	707.0313	-7.6999	-151.2002	209.5461
1047.2067	177.2972	45	54	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	97.9620	47.0473	1029.1835	25.9951	568.6545	273.1027
1028.4047	30.1039	45	54	10	0.0711	100	172.8357	-40.3662	1.4631	72.1320	-1.9619	-96.7216	3.5058
1020.6907	174.2585	45	54	7	10.6711	49	4114.7991	-97.1189	43.1223	846.7813	-24.0332	-471.9337	209.5461

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่น, ความเข้มข้น และอุณหภูมิ  
ของน้ำเสาวรต (ต่อ)

$\rho$ (Y)	$y^2$	T ( $X_1$ )	$x_1^2$	C ( $X_2$ )	$x_2^2$	$C^2$ ( $X_3$ )	$x_3^2$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1044.2807	107.9376	50	153	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	128.3816	36.7088	803.0233	43.6617	955.1210	273.1027
1026.4787	54.9481	50	153	10	0.0711	100	172.8357	-91.5995	1.9767	97.4525	-3.2953	-162.4551	3.5058
1017.5840	265.9313	50	153	7	10.6711	49	4114.7991	-201.5122	53.2709	1046.0659	-40.3666	-792.6672	209.5461
1040.4053	42.4309	55	301	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	113.0624	23.0158	503.4808	61.3284	1341.5875	273.1027
1023.3053	112.0655	55	301	10	0.0711	100	172.8357	-183.7440	2.8230	139.1723	-4.6286	-228.1886	3.5058
1015.2307	348.2217	55	301	7	10.6711	49	4114.7991	-323.8956	60.9583	1197.0223	-56.6999	-1113.4007	209.5461
1038.4707	20.9700	60	500	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	102.3799	16.1802	353.9492	78.9950	1728.0540	273.1027
1019.7640	199.5834	60	500	10	0.0711	100	172.8357	-315.8477	3.7674	185.7287	-5.9620	-293.9221	3.5058
1011.4433	503.9172	60	500	7	10.6711	49	4114.7991	-501.8744	73.3305	1439.9715	-73.0333	-1434.1342	209.5461
1035.5100	2.6199	65	748	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	44.2802	5.7190	125.1069	96.6617	2114.5205	273.1027
1016.6587	296.9659	65	748	10	0.0711	100	172.8357	-471.4367	4.5954	226.5531	-7.2953	-359.6556	3.5058
1008.4413	647.7076	65	748	7	10.6711	49	4114.7991	-696.2409	83.1371	1632.5399	-89.3666	-1754.8677	209.5461
1029.0447	23.4905	72	1180	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	-166.5186	-17.1250	-374.6174	121.3950	2655.5736	273.1027
1010.9220	527.5933	72	1180	10	0.0711	100	172.8357	-789.1620	6.1252	301.9718	-9.1620	-451.6825	3.5058
1004.1293	885.7826	72	1180	7	10.6711	49	4114.7991	-1022.5394	97.2230	1909.1405	-112.2333	-2203.8946	209.5461

$$\begin{aligned} \sum x_1^2 &= 17463.64 & \sum x_2^2 &= 325.1733 & \sum x_3^2 &= 143666.4469 \\ \sum x_1y &= -8044.43 & \sum x_2y &= 1302.7884 & \sum x_3y &= 27626.1756 \\ \sum x_1x_2 &= 6E-09 & \sum x_1x_3 &= 6E-08 & \sum x_2x_3 &= 6806.1653 \\ \sum y^2 &= 9163.93 & b_1 &= -0.4606 & b_2 &= -2.1939 \\ b_3 &= 0.2962 & a &= 1040.23778 & SSR &= 9031.0716 \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$\rho = 1040.2378 - 0.4606T - 2.1939C + 0.2962C^2 \quad R^2 = 0.9855$$

ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำที่ใส่ประรด

$\eta(Y)$	$\ln \eta(Y)$	$y^2$	$1/T (X_1)$	$x_1^2$	$C (X_2)$	$x_2^2$	$C^2 (X_3)$	$x_3^2$	$x_1 y$	$x_2 y$	$x_3 y$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
683.9308	6.5279	24.0302	0.003597	0.0018321	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.2098	142.1596	11669.5078	-1.2413	-101.8937	69035.4570
39.6901	3.6811	4.2243	0.003597	0.0018321	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0880	27.1300	1456.9890	-0.5650	-30.3427	9357.3876
7.6270	2.0317	0.1648	0.003597	0.0018321	35	10.24	1225.00	8300.4854	-0.0174	1.2989	-36.9798	-0.1370	3.8996	-291.5424
2.8622	1.0516	0.3297	0.003597	0.0018321	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0246	3.9046	396.8402	0.2911	29.5814	4699.5276
1.9688	0.6774	0.8994	0.003597	0.0018321	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0406	15.9327	1034.7795	0.7191	46.7025	18330.5976
1.4526	0.3734	1.5686	0.003597	0.0018321	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0536	27.3033	1523.1071	0.9331	52.0529	26511.1326
567.7888	6.3417	22.2402	0.003534	0.0018375	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.2022	136.7625	11226.4735	-1.2431	-102.0450	69035.4570
32.7415	3.4886	3.4702	0.003534	0.0018375	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0799	24.5895	1320.5566	-0.5658	-30.3877	9357.3876
6.2373	1.8305	0.0419	0.003534	0.0018375	35	10.24	1225.00	8300.4854	-0.0088	0.6552	-18.6539	-0.1372	3.9054	-291.5424
2.2666	0.8183	0.6521	0.003534	0.0018375	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0346	5.4911	558.0821	0.2915	29.6253	4699.5276
1.6710	0.5134	1.2374	0.003534	0.0018375	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0477	18.6879	1213.7232	0.7202	46.7719	18330.5976
1.3931	0.3315	1.6751	0.003534	0.0018375	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0555	28.2151	1573.9690	0.9345	52.1302	26511.1326
442.7128	6.0929	19.9552	0.003472	0.0018428	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1918	129.5465	10634.1296	-1.2449	-102.1910	69035.4570
21.8221	3.0829	2.1232	0.003472	0.0018428	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0626	19.2340	1032.9444	-0.5666	-30.4312	9357.3876
5.0461	1.6186	0.0001	0.003472	0.0018428	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0003	-0.0230	0.6545	-0.1374	3.9110	-291.5424
1.9688	0.6774	0.8994	0.003472	0.0018428	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0407	6.4490	655.4291	0.2919	29.6677	4699.5276
1.5221	0.4201	1.4537	0.003472	0.0018428	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0518	20.2559	1315.5576	0.7212	46.8388	18330.5976
1.3732	0.3171	1.7126	0.003472	0.0018428	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0562	28.5287	1591.4660	0.9358	52.2048	26511.1326
382.1601	5.9458	18.6627	0.003413	0.0018479	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1857	125.2811	10283.9969	-1.2466	-102.3320	69035.4570
18.4471	2.9149	1.6618	0.003413	0.0018479	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0554	17.0162	913.8391	-0.5674	-30.4732	9357.3876
4.4505	1.4930	0.0176	0.003413	0.0018479	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0057	-0.4249	12.0975	-0.1376	3.9164	-291.5424
1.8695	0.6257	1.0003	0.003413	0.0018479	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0430	6.8009	691.1961	0.2923	29.7086	4699.5276
1.2739	0.2421	1.9147	0.003413	0.0018479	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0595	23.2464	1509.7832	0.7222	46.9035	18330.5976
1.3136	0.2728	1.8307	0.003413	0.0018479	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0582	29.4960	1645.4275	0.9371	52.2768	26511.1326
290.8348	5.6728	16.3778	0.003356	0.0018528	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1742	117.3617	9633.9109	-1.2483	-102.4684	69035.4570
16.2632	2.7889	1.3528	0.003356	0.0018528	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0501	15.3530	824.5169	-0.5682	-30.5138	9357.3876
4.7483	1.5578	0.0046	0.003356	0.0018528	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0029	-0.2176	6.1965	-0.1377	3.9216	-291.5424

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำที่ป่าประด (ต่อ)

$\eta(Y)$	$\ln \eta(Y')$	$y^2$	$1/T(X_1)$	$x_1^2$	$C(X_2)$	$x_2^2$	$C^2(X_3)$	$x_3^2$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
2.3162	0.8399	0.6176	0.003356	0.0018528	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0338	5.3439	543.1217	0.2927	29.7482	4699.5276
1.1250	0.1178	2.2741	0.003356	0.0018528	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0649	25.3347	1645.4079	0.7231	46.9659	18330.5976
1.2938	0.2576	1.8720	0.003356	0.0018528	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0589	29.8271	1663.8975	0.9384	52.3465	26511.1326
265.0255	5.5798	15.6343	0.003300	0.0018576	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1704	114.6668	9412.6895	-1.2499	-102.6002	69035.4570
14.6749	2.6861	1.1243	0.033333	0.0001707	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0139	13.9965	751.6666	-0.1725	-9.2629	9357.3876
3.9045	1.3621	0.0695	0.033333	0.0001707	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0034	-0.8437	24.0222	-0.0418	1.1905	-291.5424
1.9688	0.6774	0.8994	0.033333	0.0001707	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0124	6.4490	655.4291	0.0889	9.0305	4699.5276
1.0258	0.0255	2.5610	0.033333	0.0001707	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0209	26.8855	1746.1282	0.2195	14.2571	18330.5976
1.2541	0.2264	1.9583	0.033333	0.0001707	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0183	30.5065	1701.7980	0.2849	15.8905	26511.1326
203.4801	5.3156	13.6144	0.003247	0.0018622	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1592	107.0033	8783.6150	-1.2514	-102.7277	69035.4570
13.4837	2.6015	0.9520	0.003247	0.0018622	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0421	12.8790	691.6538	-0.5696	-30.5910	9357.3876
3.7556	1.3232	0.0915	0.003247	0.0018622	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0131	-0.9682	27.5646	-0.1381	3.9316	-291.5424
1.8199	0.5988	1.0548	0.003247	0.0018622	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0443	6.9837	709.7796	0.2934	29.8235	4699.5276
0.8769	-0.1314	3.0876	0.003247	0.0018622	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0758	29.5203	1917.2521	0.7250	47.0848	18330.5976
1.1945	0.1777	2.0969	0.003247	0.0018622	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0625	31.5680	1761.0109	0.9407	52.4790	26511.1326
151.8615	5.0230	11.5408	0.003195	0.0018667	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1468	98.5179	8087.0727	-1.2529	-102.8512	69035.4570
12.4911	2.5250	0.8086	0.003195	0.0018667	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0389	11.8697	637.4482	-0.5703	-30.6278	9357.3876
3.4578	1.2406	0.1484	0.003195	0.0018667	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0166	-1.2325	35.0915	-0.1383	3.9363	-291.5424
1.5717	0.4522	1.3774	0.003195	0.0018667	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0507	7.9808	811.1123	0.2938	29.8594	4699.5276
0.7776	-0.2515	3.5244	0.003195	0.0018667	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0811	31.5394	2048.3821	0.7258	47.1414	18330.5976
1.0754	0.0727	2.4121	0.003195	0.0018667	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0671	33.8577	1888.7447	0.9419	52.5420	26511.1326
130.5191	4.8715	10.5347	0.003145	0.0018710	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1404	94.1259	7726.5426	-1.2544	-102.9708	69035.4570
11.4984	2.4422	0.6665	0.003145	0.0018710	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0353	10.7766	578.7458	-0.5710	-30.6634	9357.3876
3.2096	1.1661	0.2113	0.003145	0.0018710	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0199	-1.4709	41.8777	-0.1384	3.9409	-291.5424
1.3732	0.3171	1.7126	0.003145	0.0018710	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0566	8.8989	904.4215	0.2941	29.8941	4699.5276
0.6287	-0.4641	4.3677	0.003145	0.0018710	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0904	35.1103	2280.3057	0.7267	47.1962	18330.5976
0.9761	-0.0242	2.7225	0.003145	0.0018710	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0714	35.9698	2006.5647	0.9430	52.6031	26511.1326

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำที่ปั่นปรืด (ต่อ)

$\eta(Y)$	$\ln \eta(Y)$	$y^2$	$1/T(X_1)$	$x_1^2$	$C(X_2)$	$x_2^2$	$C^2(X_3)$	$x_3^2$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
98.4560	4.5896	8.7842	0.003096	0.0018752	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1283	85.9505	7055.4469	-1.2558	-103.0867	69035.4570
10.5057	2.3519	0.5272	0.003096	0.0018752	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0314	9.5848	514.7399	-0.5716	-30.6979	9357.3876
3.0111	1.1023	0.2740	0.003096	0.0018752	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0227	-1.6752	47.6940	-0.1386	3.9453	-291.5424
1.4228	0.3526	1.6210	0.003096	0.0018752	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0551	8.6576	879.8989	0.2945	29.9277	4699.5276
0.5791	-0.5463	4.7179	0.003096	0.0018752	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0941	36.4909	2369.9718	0.7275	47.2493	18330.5976
0.8769	-0.1314	3.0876	0.003096	0.0018752	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0761	38.3061	2136.8974	0.9440	52.6623	26511.1326
91.3088	4.5142	8.3431	0.003049	0.0018793	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1252	83.7650	6876.0438	-1.2572	-103.1990	69035.4570
9.1160	2.2100	0.3413	0.003049	0.0018793	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0253	7.7119	414.1573	-0.5722	-30.7314	9357.3876
2.9118	1.0688	0.3103	0.003049	0.0018793	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0241	-1.7825	50.7492	-0.1387	3.9496	-291.5424
1.3236	0.2804	1.8102	0.003049	0.0018793	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0583	9.1490	929.8463	0.2948	29.9603	4699.5276
1.1350	0.1266	2.2475	0.003049	0.0018793	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0650	25.1860	1635.7520	0.7283	47.3008	18330.5976
0.8173	-0.2017	3.3399	0.003049	0.0018793	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0792	39.8406	2222.4952	0.9451	52.7197	26511.1326
69.4701	4.2409	6.8387	0.003003	0.0018833	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1135	75.8378	6225.3234	-1.2585	-103.3080	69035.4570
9.1160	2.2100	0.3413	0.003003	0.0018833	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0254	7.7119	414.1573	-0.5728	-30.7638	9357.3876
2.8126	1.0341	0.3501	0.003003	0.0018833	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0257	-1.8934	53.9072	-0.1389	3.9538	-291.5424
1.2243	0.2024	2.0262	0.003003	0.0018833	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0618	9.6793	983.7430	0.2951	29.9920	4699.5276
1.0953	0.0910	2.3555	0.003003	0.0018833	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0666	25.7842	1674.6001	0.7291	47.3508	18330.5976
0.7180	-0.3313	3.8302	0.003003	0.0018833	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0849	42.6645	2380.0256	0.9461	52.7754	26511.1326
60.6354	4.1049	6.1458	0.002959	0.0018872	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1077	71.8933	5901.5291	-1.2598	-103.4137	69035.4570
8.3219	2.1189	0.2431	0.002959	0.0018872	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0214	6.5088	349.5485	-0.5734	-30.7953	9357.3876
2.6140	0.9609	0.4421	0.002959	0.0018872	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0289	-2.1277	60.5787	-0.1390	3.9578	-291.5424
1.0258	0.0255	2.5610	0.002959	0.0018872	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0695	10.8822	1105.9973	0.2954	30.0227	4699.5276
0.9960	-0.0040	2.6563	0.002959	0.0018872	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0708	27.3808	1778.2949	0.7298	47.3992	18330.5976
0.6585	-0.4178	4.1763	0.002959	0.0018872	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0888	44.5503	2485.2250	0.9470	52.8294	26511.1326
53.7860	3.9850	5.5659	0.002899	0.0018924	60.8	841.00	3696.64	5666937.3641	-0.1026	68.4172	5616.1849	-1.2615	-103.5566	69035.4570
7.9248	2.0700	0.1973	0.002899	0.0018924	45	174.24	2025.00	502529.2854	-0.0193	5.8634	314.8882	-0.5742	-30.8379	9357.3876
2.2666	0.8183	0.6521	0.002899	0.0018924	35	10.24	1225.00	8300.4854	0.0351	-2.5841	73.5706	-0.1392	3.9633	-291.5424

ตารางที่ 4.3 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ a, b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, และ b<sub>3</sub> ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำใต้ประรด (ต่อ)

η(Y)	ln η(Y')	y <sup>2</sup>	1/T (X <sub>1</sub> )	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	C (X <sub>2</sub> )	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	C <sup>2</sup> (X <sub>3</sub> )	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> y	x <sub>2</sub> y	x <sub>3</sub> y	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>
0.9265	-0.0763	2.8973	0.002899	0.0018924	25	46.24	625.00	477628.8854	0.0740	11.5746	1176.3617	0.2958	30.0642	4699.5276
0.9166	-0.0871	2.9340	0.002899	0.0018924	15	282.24	225.00	1190514.4854	0.0745	28.7765	1868.9398	0.7308	47.4647	18330.5976
0.5989	-0.5127	4.5730	0.002899	0.0018924	10	475.24	100.00	1478916.2354	0.0930	46.6184	2600.5970	0.9483	52.9024	26511.1326

$$\begin{aligned} \sum x_1^2 &= 0.1481 & \sum x_2^2 &= 25608.8 & \sum x_3^2 &= 130547574 \\ \sum x_1 y &= -0.0875 & \sum x_2 y &= 2593.8527 & \sum x_3 y &= 191948.05 \\ \sum x_1 x_2 &= -0.8710 & \sum x_1 x_3 &= -71.493407 & \sum x_2 x_3 &= 1786995.8 \\ \sum y^2 &= 301.626 & b_1 &= 0.1401 & b_2 &= -0.0293 \\ b_3 &= 0.00187 & a' &= 0.0939 & \text{antilog}(a') &= 1.0985 \\ SSR &= 283.2150 \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ได้สมการความสัมพันธ์นี้  
 $\eta = 0.79813 \exp(6.8942T - 0.0293C + 0.00187C^2)$       $R^2 = 0.9390$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนียกกำลัง, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำเสารส

$n(Y)$	$y$	$C(X_1)$	$x_1$	$T(X_2)$	$x_2$	$T(X_3)$	$x_3$	$x_1y$	$x_2y$	$x_3y$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$
1.1510	0.2736	13.8	12.4842	278	57772	77284	5692885694.07	1.8483	125.7308	39468.5300	849.2537	266591.7744	18135234.9885
0.8908	0.0691	10	0.0711	278	57772	77284	5692885694.07	-0.0701	63.1899	19836.1242	-64.1032	-20122.8388	18135234.9885
0.6933	0.0043	7	10.6713	278	57772	77284	5692885694.07	-0.2136	15.7194	4934.5094	-785.1745	-246476.4808	18135234.9885
1.0680	0.1937	13.8	12.4842	283	60200	80089	6124035029.61	1.5550	107.9817	34440.5598	866.9202	276502.6809	19200717.7240
0.7996	0.0295	10	0.0711	283	60200	80089	6124035029.61	-0.0458	42.1278	13436.5919	-65.4367	-20870.9323	19200717.7240
0.6347	0.0000	7	10.6713	283	60200	80089	6124035029.61	-0.0222	1.6684	532.1423	-801.5080	-255639.5743	19200717.7240
0.9827	0.1259	13.8	12.4842	288	62679	82944	6579029036.55	1.2536	88.8267	28778.2587	884.5867	286590.2524	20306768.3145
0.7439	0.0135	10	0.0711	288	62679	82944	6579029036.55	-0.0309	29.0414	9408.9008	-66.7702	-21632.3608	20306768.3145
0.5998	0.0008	7	10.6713	288	62679	82944	6579029036.55	0.0918	-7.0350	-2279.2251	-817.8415	-264966.0028	20306768.3145
0.9170	0.0836	13.8	12.4842	293	65207	85849	7058724214.89	1.0215	73.8237	24289.0875	902.2532	296854.4889	21454136.7600
0.7112	0.0069	10	0.0711	293	65207	85849	7058724214.89	-0.0222	21.2712	6998.5506	-68.1037	-22407.1243	21454136.7600
0.5594	0.0047	7	10.6713	293	65207	85849	7058724214.89	0.2238	-17.4920	-5755.1107	-834.1750	-274455.7663	21454136.7600
0.8814	0.0643	13.8	12.4842	298	67786	88804	7563992064.63	0.8957	66.0005	22047.2027	919.9197	307295.3904	22643573.0605
0.6554	0.0008	10	0.0711	298	67786	88804	7563992064.63	-0.0073	7.1598	2391.7084	-69.4372	-23195.2228	22643573.0605
0.5441	0.0070	7	10.6713	298	67786	88804	7563992064.63	0.2737	-21.8179	-7288.1877	-850.5085	-284108.8648	22643573.0605
0.8233	0.0382	13.8	12.4842	303	70414	91809	8095719085.77	0.6904	51.8508	17381.3522	937.5862	317912.9569	23875827.2160
0.6056	0.0005	10	0.0711	303	70414	91809	8095719085.77	0.0059	-5.9175	-2006.4696	-70.7707	-23996.6563	23875827.2160
0.4814	0.0215	7	10.6713	303	70414	91809	8095719085.77	0.4786	-38.8748	-13181.5154	-866.8420	-293925.2983	23875827.2160
0.7954	0.0281	13.8	12.4842	308	73093	94864	8654806778.31	0.5918	45.2848	15582.7283	955.2527	328707.1884	25151649.2265
0.5855	0.0018	10	0.0711	308	73093	94864	8654806778.31	0.0113	-11.4631	-3944.5235	-72.1042	-24811.4248	25151649.2265
0.4706	0.0247	7	10.6713	308	73093	94864	8654806778.31	0.5139	-42.5272	-14633.8100	-883.1755	-303905.0668	25151649.2265
0.7504	0.0150	13.8	12.4842	313	75822	97969	9242171642.25	0.4328	33.7312	11776.6862	972.9192	339678.0849	26471789.0920
0.5596	0.0047	10	0.0711	313	75822	97969	9242171642.25	0.0182	-18.8069	-6566.1034	-73.4377	-25639.5283	26471789.0920
0.4416	0.0347	7	10.6713	313	75822	97969	9242171642.25	0.6086	-51.2990	-17910.1767	-899.5090	-314048.1703	26471789.0920
0.7288	0.0102	13.8	12.4842	318	78600	101124	9858745177.59	0.3565	28.2880	10018.4835	990.5857	350825.6464	27836996.8125
0.5314	0.0093	10	0.0711	318	78600	101124	9858745177.59	0.0257	-27.0545	-9581.6022	-74.7712	-26480.9668	27836996.8125
0.4417	0.0347	7	10.6713	318	78600	101124	9858745177.59	0.6083	-52.2025	-18488.0240	-915.8425	-324354.6088	27836996.8125

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนียกกำลัง, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำเสาวรต (ต่อ)

n (Y)	y	C (X <sub>1</sub> )	x <sub>1</sub>	T (X <sub>2</sub> )	x <sub>2</sub>	T (X <sub>3</sub> )	x <sub>3</sub>	x <sub>1</sub> y	x <sub>2</sub> y	x <sub>3</sub> y	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>
0.6946	0.0044	13.8	12.4842	323	81429	104329	10505473884.33	0.2357	19.0333	6836.4975	1008.2522	362149.8729	29248022.3880
0.5195	0.0118	10	0.0711	323	81429	104329	10505473884.33	0.0289	-30.9327	-11110.5896	-76.1047	-27335.7403	29248022.3880
0.4069	0.0488	7	10.6713	323	81429	104329	10505473884.33	0.7219	-63.0639	-22651.6633	-932.1760	-334824.3823	29248022.3880
0.6457	0.0003	13.8	12.4842	328	84307	107584	11183319262.47	0.0629	5.1684	1882.3716	1025.9187	373650.7644	30705615.8185
0.4858	0.0202	10	0.0711	328	84307	107584	11183319262.47	0.0379	-41.2597	-15027.2475	-77.4382	-28203.8488	30705615.8185
0.3812	0.0609	7	10.6713	328	84307	107584	11183319262.47	0.8059	-71.6311	-26088.8245	-948.5095	-345457.4908	30705615.8185
0.6097	0.0003	13.8	12.4842	333	87236	110889	11893257812.01	-0.0643	-5.3755	-1984.8231	1043.5852	385328.3209	32210527.1040
0.4593	0.0284	10	0.0711	333	87236	110889	11893257812.01	0.0450	-49.7972	-18386.8777	-78.7717	-29085.2923	32210527.1040
0.3635	0.0699	7	10.6713	333	87236	110889	11893257812.01	0.8637	-78.0924	-28834.4630	-964.8430	-356253.9343	32210527.1040
0.5894	0.0015	13.8	12.4842	338	90214	114244	12636281032.95	-0.1360	-11.5637	-4327.8317	1061.2517	397182.5424	33763506.2445
0.4501	0.0316	10	0.0711	338	90214	114244	12636281032.95	0.0474	-53.4035	-19986.7138	-80.1052	-29980.0708	33763506.2445
0.3582	0.0727	7	10.6713	338	90214	114244	12636281032.95	0.8810	-81.0063	-30317.3044	-981.1765	-367213.7128	33763506.2445
0.5703	0.0033	13.8	12.4842	345	94468	119025	13734015022.22	-0.2035	-17.7038	-6750.2715	1085.9848	414075.2497	36019859.0376
0.4416	0.0347	10	0.0711	345	94468	119025	13734015022.22	0.0497	-57.2606	-21832.9095	-81.9721	-31255.1635	36019859.0376
0.3471	0.0788	7	10.6713	345	94468	119025	13734015022.22	0.9173	-86.3059	-32907.5737	-1004.0434	-382831.8055	36019859.0376

$$\begin{aligned} \sum x_1^2 &= 325 & \sum x_3^2 &= 3147680.6601 & \sum x_3^2 &= 386467367213.10 \\ \sum x_1 y &= 15.3866 & \sum x_2 y &= -115.9889 & \sum x_2 y &= -71601.5558 \\ \sum x_1 x_2 &= -0.3822 & \sum x_1 x_3 &= -133.1148 & \sum x_2 x_3 &= 1101072671.3621 \\ \sum y^2 &= 1.569 & b_1 &= -0.0473 & b_2 &= 0.0083 \\ b_3 &= -0.00002 & a &= -0.1352 & SSR &= 1.4688 \end{aligned}$$

จากการคำนวณค่าพารามิเตอร์ ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$n = -0.1352 + 0.0473C + 0.0083T - 0.00002T^2 \quad R^2 = 0.9363$$

ตารางที่ 4.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความหนัก, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำเสาวรศ

k (Y)	y <sup>2</sup>	T (X <sub>1</sub> )	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	C (X <sub>2</sub> )	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	C <sup>2</sup> (X <sub>3</sub> )	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> y	x <sub>2</sub> y	x <sub>3</sub> y	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>
2.6178	2.4492	278	57771.5355	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	376.1589	5.5297	120.9640	849.2610	18577.9934	273.1027
0.1796	0.7625	278	57771.5355	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-209.8798	0.2329	11.4797	-64.0960	-3159.9027	3.5058
0.4668	0.3434	278	57771.5355	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-140.8493	1.9143	37.5900	-785.1673	-15418.1148	209.5461
2.4619	1.9856	283	60200.1065	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	345.7327	4.9788	108.9140	866.9276	18964.4599	273.1027
0.3941	0.4339	283	60200.1065	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-161.6167	0.1757	8.6597	-65.4294	-3225.6362	3.5058
0.3305	0.5217	283	60200.1065	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-177.2214	2.3595	46.3332	-801.5007	-15738.8483	209.5461
2.4562	1.9695	288	62678.6775	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	351.3512	4.9587	108.4734	884.5943	19350.9264	273.1027
0.4363	0.3801	288	62678.6775	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-154.3452	0.1644	8.1049	-66.7627	-3291.3697	3.5058
0.3141	0.5457	288	62678.6775	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-184.9388	2.4131	47.3852	-817.8340	-16059.5818	209.5461
2.3059	1.5703	293	65207.2485	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	319.9880	4.4276	96.8562	902.2609	19737.3929	273.1027
0.4374	0.3787	293	65207.2485	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-157.1468	0.1641	8.0905	-68.0961	-3357.1032	3.5058
0.2572	0.6330	293	65207.2485	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-203.1621	2.5990	51.0351	-834.1674	-16380.3153	209.5461
2.1846	1.2810	298	67785.8195	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	294.6722	3.9990	87.4806	919.9276	20123.8594	273.1027
0.5503	0.2525	298	67785.8195	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-130.8294	0.1340	6.6062	-69.4294	-3422.8367	3.5058
0.2933	0.5768	298	67785.8195	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-197.7412	2.4810	48.7194	-850.5007	-16701.0488	209.5461
2.3512	1.6858	303	70414.3905	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	344.5397	4.5877	100.3576	937.5942	20510.3259	273.1027
0.6295	0.1792	303	70414.3905	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-112.3257	0.1129	5.5650	-70.7628	-3488.5702	3.5058
0.0897	0.9276	303	70414.3905	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-255.5654	3.1461	61.7797	-866.8341	-17021.7823	209.5461
2.0776	1.0502	308	73092.9615	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	277.0620	3.6210	79.2102	955.2609	20896.7924	273.1027
0.6109	0.1953	308	73092.9615	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-119.4708	0.1178	5.8095	-72.0961	-3554.3037	3.5058
0.1457	0.8228	308	73092.9615	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-245.2409	2.9632	58.1875	-883.1674	-17342.5158	209.5461
2.1286	1.1573	313	75821.5325	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	296.2292	3.8012	83.1521	972.9275	21283.2589	273.1027
0.5982	0.2067	313	75821.5325	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-125.1773	0.1212	5.9765	-73.4295	-3620.0372	3.5058
0.0923	0.9226	313	75821.5325	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-264.4805	3.1376	61.6129	-899.5008	-17663.2493	209.5461
2.1452	1.1933	318	78600.1035	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	306.2621	3.8598	84.4352	990.5942	21669.7254	273.1027
0.5687	0.2344	318	78600.1035	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-135.7209	0.1291	6.3643	-74.7628	-3685.7707	3.5058
0.1308	0.8501	318	78600.1035	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-258.4892	3.0119	59.1433	-915.8341	-17983.9828	209.5461

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสำนักงานการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 การคำนวณค่าพารามิเตอร์  $a$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , และ  $b_3$  ของสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีความหนัก, ความเข้มข้น และอุณหภูมิของน้ำเสาวรต (ต่อ)

k (Y)	y <sup>2</sup>	T (X <sub>1</sub> )	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	C (X <sub>2</sub> )	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	C <sup>2</sup> (X <sub>3</sub> )	x <sub>3</sub> <sup>2</sup>	x <sub>1</sub> y	x <sub>2</sub> y	x <sub>3</sub> y	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>3</sub>	x <sub>2</sub> x <sub>3</sub>
2.2521	1.4383	323	81428.6745	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	342.2288	4.2375	92.6979	1008.2608	22056.1919	273.1027
0.5824	0.2213	323	81428.6745	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-134.2320	0.1254	6.1842	-76.0962	-3751.5042	3.5058
0.1207	0.8688	323	81428.6745	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-265.9814	3.0449	59.7911	-932.1675	-18304.7163	209.5461
2.4028	1.8225	328	84307.2455	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	391.9821	4.7700	104.3460	1025.9275	22442.6584	273.1027
0.7113	0.1166	328	84307.2455	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-99.1569	0.0911	4.4896	-77.4295	-3817.2377	3.5058
0.0604	0.9849	328	84307.2455	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-288.1504	3.2418	63.6592	-948.5008	-18625.4498	209.5461
2.7141	2.7599	333	87235.8165	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	490.6768	5.8699	128.4074	1043.5941	22829.1249	273.1027
0.8160	0.0561	333	87235.8165	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-69.9406	0.0631	3.1131	-78.7629	-3882.9712	3.5058
0.0387	1.0284	333	87235.8165	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-299.5216	3.3127	65.0512	-964.8342	-18946.1833	209.5461
2.6224	2.4636	338	90214.3875	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	471.4405	5.5459	121.3196	1061.2608	23215.5914	273.1027
0.8900	0.0265	338	90214.3875	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-48.8981	0.0434	2.1403	-80.0962	-3948.7047	3.5058
0.0986	0.9105	338	90214.3875	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-286.6007	3.1171	61.2088	-981.1675	-19266.9168	209.5461
2.5360	2.1999	345	94468.3869	13.8	12.4844	190.44	5974.2542	455.8721	5.2406	114.6414	1085.9941	23756.6445	273.1027
0.9687	0.0071	345	94468.3869	10.0	0.0711	100.00	172.8357	-25.8487	0.0224	1.1056	-81.9629	-4040.7316	3.5058
0.1474	0.8197	345	94468.3869	7.0	10.6711	49.00	4114.7991	-278.2811	2.9576	58.0784	-1004.0342	-19715.9437	209.5461

$$\begin{aligned} \Sigma x_1^2 &= 3147680.66 & \Sigma x_2^2 &= 325.17333 & \Sigma x_3^2 &= 143666.447 \\ \Sigma x_1 y &= 33.38 & \Sigma x_2 y &= 106.82479 & \Sigma x_3 y &= 2294.5196 \\ \Sigma x_1 x_2 &= -3.82E-02 & \Sigma x_1 x_3 &= -3.82E-01 & \Sigma x_2 x_3 &= 6806.16533 \\ \Sigma y^2 &= 39.2332 & b_1 &= 0.0000 & b_2 &= -0.6870 \\ b_3 &= 0.0485 & a &= 2.6133 & SSR &= 37.9365 \end{aligned}$$

จากการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ได้สมการความสัมพันธ์นี้

$$k = 2.5437 + 0.0019T - 0.6870C + 0.0485C^2 \quad R^2 = 0.9669$$

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองวัดความหนาแน่นและความหนืดของน้ำสับประรดและน้ำเสาวรสที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้พิกโนมิเตอร์วัดความหนาแน่น และ ใช้ Brookfield Rotating Spindle วัดความหนืดของน้ำผลไม้ เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์โดย least-squares method สามารถสรุปสมการความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

1. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น, อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของน้ำสับประรด คือ

$$\rho = 1030.7912 - 0.4643T + 2.8199C + 0.0284C^2, R^2 = 0.9971$$

2. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น, อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของน้ำเสาวรส คือ

$$\rho = 1040.2378 - 0.4606T - 2.1939C + 0.2962C^2, R^2 = 0.9855$$

โดยที่  $\rho$  = ความหนาแน่น (Kg / m<sup>3</sup>)  
 $T$  = อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)  
 $C$  = ความเข้มข้น (° Brix)

3. สมการความสัมพันธ์ระหว่างความหนืด, อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของน้ำสับประรด คือ

$$\eta = 0.7981 \exp(6.8942T - 0.0293C + 0.00187C^2), R^2 = 0.9396$$

4. สมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนียกกำลัง, อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของน้ำเสาวรส คือ

$$n = -0.1352 + 0.0473C + 0.0083T - 0.00002T^2, R^2 = 0.9363$$

5. สมการความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหนืด, อุณหภูมิ และ ความเข้มข้นของน้ำสับประรด คือ

$$k = 2.5437 + 0.0019T - 0.6870C + 0.0485C^2, R^2 = 0.9669$$

โดยที่  $\eta$  = ความหนืด (cps)  
 $k$  = ดัชนีความหนืด (N.s<sup>n</sup>.m<sup>-2</sup>x10<sup>3</sup>)  
 $n$  = ดัชนียกกำลัง ( Power Law Index )  
 $T$  = อุณหภูมิ (เคลวิน)  
 $C$  = ความเข้มข้น (° Brix)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีข้อกำหนดของสมการดังนี้

1. สมการความสัมพันธ์ของน้ำสับปะรด มีขอบเขตของช่วงความเข้มข้นที่ 10 - 60.8 °Brix และ ช่วงอุณหภูมิ 5 - 72 องศาเซลเซียส
2. สมการความสัมพันธ์ของน้ำเสาวรส มีขอบเขตของช่วงความเข้มข้นที่ 7 - 13.8 °Brix และ ช่วงอุณหภูมิ 5 - 72 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

1. คณะอนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตรสาขาเคมีตาม โครงการปรับปรุงหลักสูตร วิทยาศาสตร์ระดับมหาวิทยาลัยของทบวงมหาวิทยาลัย. 2536. เคมีเล่ม 1. บริษัทไทยร่มเกล้า จำกัด. นนทบุรี. หน้า 411-415.
2. คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2540. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. หน้า 322-323, 409-416.
3. ชำรง เปรมปรีดี และ ดำรงค์ดี มลิตา. 2534. เครื่องสูบน้ำ : การออกแบบ การใช้งานและการบำรุงรักษา. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. หน้า 1-43.
4. ศิริลักษณ์ สินธวาลัย. 2520. ทฤษฎีอาหาร เล่ม 2 : หลักการถนอมอาหารและการควบคุมคุณภาพอาหาร. วรุฒิกิจการพิมพ์. กรุงเทพมหานคร. หน้า 151.
5. โสภณ เรืองสำราญ และคณะ. 2535. เคมีทั่วไปสำหรับนักศึกษาวิทยาศาสตร์ชีวภาพและพยาบาล. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพมหานคร. หน้า 116-121.
6. Dennis R. and R.Paul. 1981. Food Process Engineering 2<sup>nd</sup>.AVI Publishing Company. United States of America. pp 25 – 86.
7. Gomez, K.A. and A.A. Gomez. 1984. Statistical Procedures for Agricultural Research 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons. Singapore.
8. Hernandez E. et al. 1995. Viscosity Changes in Orange Juice After Ultrafiltration and Evaporation. J.Food Eng.25. pp 387-396.
9. Ibarz A., C.Gonzalez and S.Esplugas. 1994. Rheology of Clarified Fruit Juices.III:Orange Jices. J.Food Eng. 21. pp 485-494.
10. Ibarz A. et al. 1989. Rheological Properties of Clarified Pear Pear Juice Concentrates. J.Food Eng.10. pp 57-63.
11. Incropera, P.Frank and P.David. 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Wiley. United States of America. pp 584-586.
12. Janna, W.S. 1993. Introduction to Fluid Mechanics. 3<sup>rd</sup> ed. PWS Publishing Company. United States of America. pp 729-730.
13. Manohar B., P. Ramakrishna and K. Udayasankar. 1991. Some Physical Property of Tamarind (Tamarindus indica L.) Juice Concentrates. J.Food Eng.13. pp 241-258.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. Muller H.G. 1973. An Introduction of food Rheology. Heineman. England. pp 1-9, 28-74.
15. Ramos A.M. and A.Ibarz. 1998. Density of Juice and Fruit Puree as a Function of Soluble Solids Content and Temperature. J.Food Eng.35. pp 57-63.
16. Rao M.A. and S.S.H. Rizvi. 1994. Engineering Property of Foods. 2<sup>nd</sup> ed. Marcel Dekker Inc. United States of America. pp 1-49.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการทำ Calibration Curve ของเครื่องวัดความหนืด

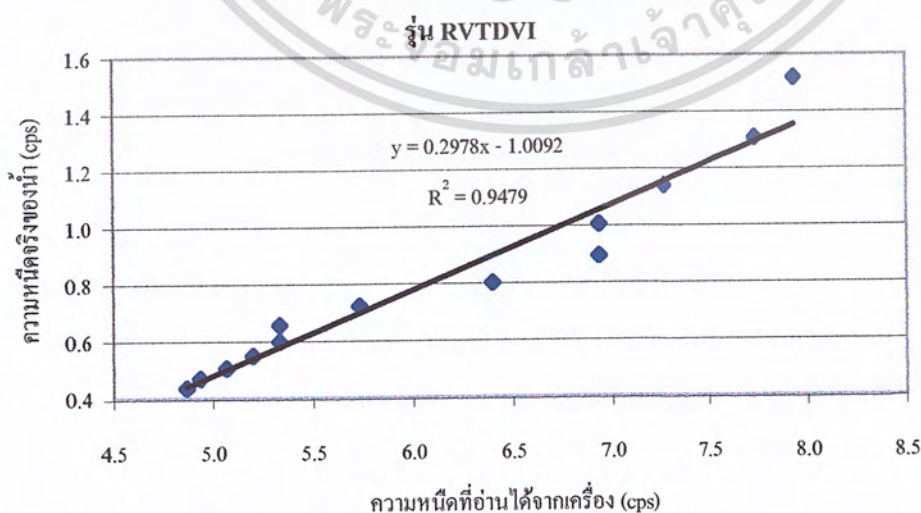


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อทำ Calibration Curve

อุณหภูมิ (°C)	ความหนืด (cps)				ค่าความหนืดจริง (cps)
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย	
5	7.800	8.000	8.000	7.933	1.519
10	7.600	7.800	7.800	7.733	1.308
15	7.400	7.200	7.200	7.267	1.140
20	7.000	7.000	6.800	6.933	1.005
25	7.000	7.000	6.800	6.933	0.894
30	6.200	6.400	6.600	6.400	0.801
35	5.600	5.600	6.000	5.733	0.723
40	5.200	5.200	5.600	5.333	0.656
45	5.200	5.400	5.400	5.333	0.599
50	5.200	5.200	5.200	5.200	0.549
55	5.000	5.000	5.200	5.067	0.506
60	5.000	4.800	5.000	4.933	0.469
65	4.800	4.800	5.000	4.867	0.436

รูปที่ ก.1 Calibration Curve ของเครื่องวัดความหนืดบรูคฟีลด์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

1. การหาความหนาแน่นของน้ำสับประรด
2. การหาความหนาแน่นของน้ำเสาวรศ
3. การหาความหนืดของน้ำสับประรด
4. การหาความหนืดของน้ำเสาวรศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และความหนืดของน้ำสับประรดที่ความเข้มข้น 10<sup>0</sup> Brix

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.			ความหนืดที่วัดได้ (cps)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	51.7377	52.0665	52.5135	8.2000	8.4000	8.2000
10	51.7596	52.0595	52.5058	8.0000	8.2000	8.0000
15	51.7251	52.0394	52.4996	8.0000	8.0000	8.0000
20	51.6945	52.0033	52.4747	7.8000	7.8000	7.8000
25	51.6156	51.8931	52.3697	7.6000	7.8000	7.8000
30	51.5539	51.8549	52.3497	7.6000	7.6000	7.6000
35	51.3453	51.6458	52.1149	7.4000	7.4000	7.4000
40	51.3206	51.6418	52.1090	7.0000	7.0000	7.0000
45	51.2708	51.5443	52.0179	6.8000	6.6000	6.6000
50	51.0470	51.3446	51.8264	6.4000	6.4000	6.2000
55	50.9987	51.2803	51.7282	6.2000	6.2000	6.0000
60	50.7889	51.1404	51.5453	5.8000	5.8000	5.8000
65	50.6702	50.9632	51.3983	5.6000	5.6000	5.6000
72	50.4121	50.7281	51.1827	5.4000	5.4000	5.4000

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และความหนืดของน้ำสับประรดที่ความเข้มข้น 15<sup>0</sup> Brix

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.			ความหนืดที่วัดได้ (cps)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	53.392	53.2099	53.7103	10.0000	10.0000	10.0000
10	53.3192	53.1708	53.6988	9.0000	9.0000	9.0000
15	53.1834	53.066	53.6721	8.5000	8.5000	8.5000
20	53.1724	53.0241	53.6302	7.5000	8.0000	7.5000
25	53.1209	52.9473	53.5868	7.0000	7.5000	7.0000
30	52.9683	52.7815	53.39	6.5000	7.0000	7.0000
35	52.9062	52.7323	53.347	6.0000	6.5000	6.5000
40	52.8148	52.6272	53.2167	6.0000	6.0000	6.0000
45	52.6879	52.511	53.0989	5.5000	5.5000	5.5000
50	52.5558	52.3745	52.9652	5.0000	5.5000	5.5000
55	52.4059	52.2307	52.8302	7.2000	7.2000	7.2000
60	52.1945	52.0736	52.6709	7.2000	7.0000	7.0000
65	52.0604	51.8931	52.4983	6.8000	6.6000	6.8000
72	51.8387	51.6728	52.2803	6.6000	6.4000	6.4000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และความหนืดของน้ำสับประดที่ความเข้มข้น 25<sup>0</sup> Brix

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.			ความหนืดที่วัดได้ (cps)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	55.2844	55.7665	55.5881	13.0000	13.0000	13.0000
10	55.1659	55.6780	55.4654	11.0000	11.0000	11.0000
15	55.1262	55.6471	55.4437	10.0000	10.0000	10.0000
20	55.0350	55.5313	55.3220	9.0000	10.0000	10.0000
25	54.9396	55.4572	55.2397	11.0000	11.5000	11.0000
30	54.8349	55.3430	55.1222	10.0000	10.0000	10.0000
35	54.7135	55.1937	54.9770	9.5000	9.5000	9.5000
40	54.6240	55.1086	54.8921	9.0000	8.5000	8.5000
45	54.4882	54.9722	54.7566	8.0000	8.0000	8.0000
50	54.3573	54.8569	54.6490	8.0000	8.0000	8.5000
55	54.1692	54.7007	54.4812	7.5000	8.0000	8.0000
60	54.0525	54.5610	54.3530	7.5000	7.5000	7.5000
65	53.8941	54.3991	54.1775	6.5000	7.0000	7.0000
72	53.6125	54.1166	53.9312	6.5000	6.5000	6.5000

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และความหนืดของน้ำสับประดที่ความเข้มข้น 35<sup>0</sup> Brix

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.			ความหนืดที่วัดได้ (cps)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	58.0258	58.0842	58.6451	29.0000	29.0000	29.0000
10	57.8733	57.8926	58.478	24.0000	25.0000	24.0000
15	57.8022	57.8648	58.4596	20.0000	21.0000	20.0000
20	57.6926	57.7664	58.3776	19.0000	18.0000	18.0000
25	57.6097	57.6674	58.2748	19.5000	19.0000	19.5000
30	57.4269	57.4713	58.0582	16.5000	16.5000	16.5000
35	57.3863	57.4419	58.0508	16.0000	16.0000	16.0000
40	57.3208	57.3233	57.9056	15.0000	15.0000	15.0000
45	57.3157	57.1487	57.7572	14.0000	14.0000	14.5000
50	57.3123	57.0323	57.6136	13.0000	13.5000	14.0000
55	57.178	56.3831	57.4872	12.5000	13.5000	13.5000
60	57.0151	56.7249	57.3288	12.5000	13.0000	13.0000
65	56.7636	56.5132	57.1065	12.0000	12.0000	12.5000
72	56.4429	56.1563	56.7716	11.0000	11.0000	11.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และความหนืดของน้ำสับประดที่ความเข้มข้น 45<sup>0</sup> Brix

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.			ความหนืดที่วัดได้ (cps)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	60.7315	59.8774	61.9455	140.0000	130.0000	140.0000
10	60.6319	59.7716	61.8773	120.0000	110.0000	110.0000
15	60.5056	59.4823	61.6323	75.0000	75.0000	80.0000
20	60.3768	59.4001	61.5838	66.0000	64.0000	66.0000
25	60.2734	59.3447	61.4432	58.0000	56.0000	60.0000
30	60.1581	59.1994	61.2706	54.0000	52.0000	52.0000
35	59.9911	59.1101	61.1977	50.0000	48.0000	48.0000
40	59.957	59.0349	61.0978	44.0000	46.0000	46.0000
45	59.7879	58.8592	60.9351	42.0000	40.0000	44.0000
50	59.6226	58.6845	60.769	40.0000	38.0000	38.0000
55	59.4841	58.4212	60.4861	34.0000	34.0000	34.0000
60	59.4577	58.4158	60.4656	34.0000	34.0000	34.0000
65	59.3313	58.2187	60.3834	32.0000	30.0000	32.0000
72	59.0386	57.9541	60.2435	30.0000	30.0000	30.0000

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนัก และความหนืดของน้ำสับประดที่ความเข้มข้น 60.8<sup>0</sup> Brix

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.			ความหนืดที่วัดได้ (cps)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	64.10	65.4034	66.0631	2240.0000	2300.0000	2360.0000
10	64.06	65.2958	65.9802	1950.0000	1850.0000	1930.0000
15	64.00	65.1801	65.9425	1840.0000	1350.0000	1280.0000
20	63.94	65.0386	65.8206	1630.0000	1130.0000	1100.0000
25	63.82	64.9734	65.7733	1180.0000	850.0000	910.0000
30	63.77	64.7806	65.6577	1020.0000	840.0000	820.0000
35	63.62	64.591	65.3911	850.0000	590.0000	620.0000
40	63.48	64.4783	65.119	550.0000	480.0000	510.0000
45	63.36	64.2994	64.8893	465.0000	430.0000	430.0000
50	63.24	64.1839	64.7587	272.0000	370.0000	360.0000
55	63.17	64.0078	64.5688	300.0000	310.0000	320.0000
60	62.90	63.8785	64.4567	150.0000	280.0000	280.0000
65	62.72	63.7255	64.27	131.0000	250.0000	240.0000
72	62.64	63.4783	63.9877	112.0000	220.0000	220.0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 7 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรตเข้มข้น 7<sup>0</sup> Brix ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	N (RPM)	% Full Scale				T (dynes/cm <sup>2</sup> )	dv/dr (1/s)
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย		
5	10	2.20	2.30	2.30	2.27	1.4575	2.0499
	20	3.30	3.40	3.30	3.33	2.1434	4.0999
	50	9.70	9.80	9.60	9.70	6.2374	10.2497
	100	21.60	22.10	21.60	21.77	13.9967	20.4994
10	10	2.20	2.20	2.20	2.20	1.4147	2.0499
	20	3.10	3.10	3.20	3.13	2.0148	4.0999
	50	9.00	9.00	9.00	9.00	5.7873	10.2497
	100	20.20	19.90	20.00	20.03	12.8821	20.4994
15	10	2.10	2.10	2.10	2.10	1.3504	2.0499
	20	2.90	3.00	2.90	2.93	1.8862	4.0999
	50	8.60	8.50	8.40	8.50	5.4658	10.2497
	100	19.30	18.80	18.70	18.93	12.1747	20.4994
20	10	2.00	2.10	2.00	2.03	1.3075	2.0499
	20	2.80	2.80	2.80	2.80	1.8005	4.0999
	50	7.70	8.00	8.10	7.93	5.1014	10.2497
	100	17.30	17.70	18.20	17.73	11.4031	20.4994
25	10	1.90	1.90	1.90	1.90	1.2218	2.0499
	20	2.70	2.70	2.70	2.70	1.7362	4.0999
	50	7.70	7.60	7.50	7.60	4.8870	10.2497
	100	17.20	17.20	17.20	17.20	11.0601	20.4994
30	10	1.90	1.90	1.90	1.90	1.2218	2.0499
	20	2.60	2.60	2.70	2.63	1.6933	4.0999
	50	7.10	7.10	7.10	7.10	4.5655	10.2497
	100	15.50	15.40	15.40	15.43	9.9241	20.4994
35	10	1.80	1.80	1.80	1.80	1.1575	2.0499
	20	2.50	2.50	2.50	2.50	1.6076	4.0999
	50	6.80	6.70	6.80	6.77	4.3512	10.2497
	100	15.10	15.00	15.00	15.03	9.6669	20.4994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 7 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรสเข้มข้น 7<sup>0</sup> Brix ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	N (RPM)	% Full Scale				T (dynes/cm <sup>2</sup> )	dv/dr (1/s)
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย		
40	10	1.80	1.80	1.80	1.80	1.1575	2.0499
	20	2.40	2.40	2.40	2.40	1.5433	4.0999
	50	6.30	6.40	6.40	6.37	4.0940	10.2497
	100	14.20	14.20	14.20	14.20	9.1310	20.4994
45	10	1.80	1.80	1.80	1.80	1.1575	2.0499
	20	2.30	2.30	2.30	2.30	1.4790	4.0999
	50	6.20	6.30	6.30	6.27	4.0297	10.2497
	100	14.40	14.00	14.10	14.17	9.1096	20.4994
50	10	1.70	1.70	1.70	1.70	1.0932	2.0499
	20	2.00	2.10	2.00	2.03	1.3075	4.0999
	50	5.80	5.90	5.80	5.83	3.7510	10.2497
	100	13.00	13.10	13.00	13.03	8.3808	20.4994
55	10	1.70	1.70	1.70	1.70	1.0932	2.0499
	20	1.90	2.20	1.80	1.97	1.2646	4.0999
	50	5.40	5.70	5.50	5.53	3.5581	10.2497
	100	12.20	12.50	12.20	12.30	7.9093	20.4994
60	10	1.70	1.70	1.60	1.67	1.0717	2.0499
	20	2.20	2.20	2.20	2.20	1.4147	4.0999
	50	5.30	5.40	5.30	5.33	3.4295	10.2497
	100	11.80	12.00	11.90	11.90	7.6521	20.4994
65	10	1.80	1.70	1.70	1.73	1.1146	2.0499
	20	2.20	2.30	2.20	2.23	1.4361	4.0999
	50	5.30	5.50	5.40	5.40	3.4724	10.2497
	100	11.70	11.90	11.80	11.80	7.5878	20.4994
72	10	1.70	1.70	1.70	1.70	1.0932	2.0499
	20	2.20	2.40	2.30	2.30	1.4790	4.0999
	50	5.30	5.40	5.30	5.33	3.4295	10.2497
	100	11.40	11.60	11.50	11.50	7.3949	20.4994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 8 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรสเข้มข้น 10<sup>0</sup> Brix ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	N (RPM)	% Full Scale				T (dynes/cm <sup>2</sup> )	dv/dr (1/s)
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย		
5	10	4.50	4.40	4.30	4.40	2.8293	2.0499
	20	5.50	5.40	5.30	5.40	3.4724	4.0999
	50	13.20	13.10	12.90	13.07	8.4023	10.2497
	100	29.70	29.60	28.80	29.37	18.8837	20.4994
10	10	4.30	4.20	4.20	4.23	2.7222	2.0499
	20	5.20	5.20	5.10	5.17	3.3223	4.0999
	50	12.30	12.30	12.30	12.30	7.9093	10.2497
	100	26.60	27.20	26.10	26.63	17.1261	20.4994
15	10	4.00	4.10	4.00	4.03	2.5936	2.0499
	20	5.00	4.80	4.90	4.90	3.1509	4.0999
	50	11.60	11.60	11.60	11.60	7.4592	10.2497
	100	25.10	24.70	24.80	24.87	15.9901	20.4994
20	10	4.00	3.90	3.90	3.93	2.5293	2.0499
	20	4.70	4.70	4.70	4.70	3.0222	4.0999
	50	11.10	11.00	11.10	11.07	7.1162	10.2497
	100	24.10	23.20	24.20	23.83	15.3256	20.4994
25	10	3.90	3.90	3.80	3.87	2.4864	2.0499
	20	4.50	4.50	4.50	4.50	2.8936	4.0999
	50	10.40	10.50	10.60	10.50	6.7518	10.2497
	100	22.10	22.20	22.20	22.17	14.2539	20.4994
30	10	3.80	3.80	3.70	3.77	2.4221	2.0499
	20	4.30	4.30	4.40	4.33	2.7865	4.0999
	50	9.90	9.90	9.90	9.90	6.3660	10.2497
	100	20.70	20.60	20.70	20.67	13.2893	20.4994
35	10	3.70	3.70	3.60	3.67	2.3578	2.0499
	20	4.20	4.20	4.00	4.13	2.6579	4.0999
	50	9.60	9.60	9.70	9.63	6.1945	10.2497
	100	19.80	19.90	20.20	19.97	12.8392	20.4994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 8 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรสเข้มข้น 10<sup>0</sup> Brix ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	N (RPM)	% Full Scale				T (dynes/cm <sup>2</sup> )	dv/dr (1/s)
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย		
40	10	3.60	3.60	3.60	3.60	2.3149	2.0499
	20	3.80	3.80	4.00	3.87	2.4864	4.0999
	50	9.20	9.30	9.30	9.27	5.9588	10.2497
	100	19.10	19.00	19.20	19.10	12.2819	20.4994
45	10	3.40	3.40	3.30	3.37	2.1649	2.0499
	20	3.70	3.80	3.70	3.73	2.4007	4.0999
	50	8.90	8.70	8.80	8.80	5.6587	10.2497
	100	18.20	18.00	18.20	18.13	11.6603	20.4994
50	10	3.30	3.40	3.40	3.37	2.1649	2.0499
	20	3.70	3.70	3.70	3.70	2.3792	4.0999
	50	8.50	8.60	8.60	8.57	5.5086	10.2497
	100	17.60	17.80	18.00	17.80	11.4460	20.4994
55	10	3.20	3.40	3.40	3.33	2.1434	2.0499
	20	3.90	3.70	4.00	3.87	2.4864	4.0999
	50	8.10	8.20	8.20	8.17	5.2514	10.2497
	100	16.90	16.90	17.00	16.93	10.8887	20.4994
60	10	3.10	3.40	3.20	3.23	2.0791	2.0499
	20	4.10	4.10	4.00	4.07	2.6150	4.0999
	50	7.90	8.00	7.80	7.90	5.0800	10.2497
	100	16.20	16.30	16.20	16.23	10.4385	20.4994
65	10	3.50	3.30	3.40	3.40	2.1863	2.0499
	20	4.20	4.00	3.90	4.03	2.5936	4.0999
	50	7.80	7.90	7.90	7.87	5.0585	10.2497
	100	16.00	16.00	16.20	16.07	10.3314	20.4994
72	10	3.40	3.30	3.40	3.37	2.1649	2.0499
	20	3.90	3.70	4.80	4.13	2.6579	4.0999
	50	8.00	8.10	8.00	8.03	5.1657	10.2497
	100	15.90	15.70	15.90	15.83	10.1813	20.4994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรตเข้มข้น 13.8<sup>0</sup> Brix ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	N (RPM)	% Full Scale				T (dynes/cm <sup>2</sup> )	dv/dr (1/s)
		1	2	3	เฉลี่ย		
5	10	9.30	9.70	9.40	9.47	6.0874	2.0499
	20	11.50	11.50	11.50	11.50	7.3949	4.0999
	50	19.10	19.30	19.10	19.17	12.3248	10.2497
	100	42.40	42.10	42.10	42.20	27.1359	20.4994
10	10	8.80	9.20	9.00	9.00	5.7873	2.0499
	20	10.40	10.80	10.60	10.60	6.8161	4.0999
	50	17.70	17.80	17.70	17.73	11.4031	10.2497
	100	38.50	40.10	39.20	39.27	25.2497	20.4994
15	10	8.40	8.60	8.50	8.50	5.4658	2.0499
	20	10.10	9.90	10.00	10.00	6.4303	4.0999
	50	16.90	16.90	16.70	16.83	10.8244	10.2497
	100	36.20	36.20	36.60	36.33	23.3635	20.4994
20	10	8.10	8.20	8.00	8.10	5.2086	2.0499
	20	9.30	9.00	9.20	9.17	5.8945	4.0999
	50	15.90	15.80	15.60	15.77	10.1385	10.2497
	100	34.30	33.80	33.70	33.93	21.8202	20.4994
25	10	7.40	7.70	7.80	7.63	4.9085	2.0499
	20	8.80	8.90	9.00	8.90	5.7230	4.0999
	50	15.10	15.00	15.10	15.07	9.6883	10.2497
	100	33.00	32.20	32.50	32.57	20.9414	20.4994
30	10	7.30	7.50	7.70	7.50	4.8227	2.0499
	20	8.70	8.80	9.00	8.83	5.6801	4.0999
	50	14.70	14.70	14.70	14.70	9.4526	10.2497
	100	30.50	30.90	31.10	30.83	19.8268	20.4994
35	10	6.90	6.90	7.20	7.00	4.5012	2.0499
	20	8.20	8.00	8.50	8.23	5.2943	4.0999
	50	14.20	13.50	13.70	13.80	8.8738	10.2497
	100	29.40	29.40	29.80	29.53	18.9909	20.4994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9 ผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำเสาวรเข้มข้น 13.8<sup>0</sup> Brix ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ต่อ)

อุณหภูมิ ( <sup>0</sup> C)	N (RPM)	% Full Scale				T (dynes/cm <sup>2</sup> )	dv/dr (1/s)
		ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2	ตัวอย่างที่ 3	เฉลี่ย		
40	10	6.90	7.00	6.90	6.93	4.4584	2.0499
	20	8.00	7.90	7.80	7.90	5.0800	4.0999
	50	13.50	13.40	13.20	13.37	8.5952	10.2497
	100	29.00	27.80	27.50	28.10	18.0692	20.4994
45	10	6.60	6.80	6.80	6.73	4.3297	2.0499
	20	8.10	8.00	7.70	7.93	5.1014	4.0999
	50	13.30	13.10	12.90	13.10	8.4237	10.2497
	100	27.70	27.40	27.10	27.40	17.6191	20.4994
50	10	6.80	6.90	6.70	6.80	4.3726	2.0499
	20	8.10	7.70	7.60	7.80	5.0156	4.0999
	50	12.80	12.90	12.80	12.83	8.2522	10.2497
	100	26.40	26.30	26.60	26.43	16.9975	20.4994
55	10	6.90	6.60	6.80	6.77	4.3512	2.0499
	20	7.60	7.70	8.10	7.80	5.0156	4.0999
	50	12.60	12.40	12.10	12.37	7.9522	10.2497
	100	24.90	25.00	25.30	25.07	16.1187	20.4994
60	10	6.90	7.30	6.90	7.03	4.5227	2.0499
	20	8.30	8.50	8.10	8.30	5.3372	4.0999
	50	11.90	12.30	12.00	12.07	7.7592	10.2497
	100	24.30	24.90	24.20	24.47	15.7328	20.4994
65	10	7.00	7.10	6.40	6.83	4.3940	2.0499
	20	8.20	8.40	7.40	8.00	5.1443	4.0999
	50	11.50	11.80	11.60	11.63	7.4806	10.2497
	100	23.70	24.30	23.00	23.67	15.2184	20.4994
72	10	6.70	6.60	6.30	6.53	4.2011	2.0499
	20	7.90	7.90	7.40	7.73	4.9728	4.0999
	50	11.60	11.50	11.10	11.40	7.3306	10.2497
	100	23.20	23.00	22.30	22.83	14.6826	20.4994

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลการทดลองหาค่าน้ำหนักของน้ำเสาวรสถิตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	น้ำหนักของน้ำผลไม้ 50 ml.								
	ความเข้มข้น 7° Brix			ความเข้มข้น 10° Brix			ความเข้มข้น 13.8° Brix		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
5	51.2576	51.9802	51.6996	52.2492	52.1169	51.9695	52.9223	52.9746	53.4224
10	51.2464	51.9499	51.6688	52.2074	52.1032	51.9542	52.8617	52.9162	53.3810
15	51.1996	51.9151	51.6288	52.1666	52.0364	51.9074	52.8132	52.8624	53.3279
20	51.1629	51.8753	51.6330	52.0978	51.9686	51.8300	52.7515	52.7739	53.1897
25	51.0873	51.8078	51.5886	52.0330	51.9102	51.7735	52.6123	52.6656	53.1246
30	50.8505	51.5534	51.4545	51.8858	51.7580	51.6159	52.5022	52.5442	52.9935
35	50.8081	51.5244	51.3676	51.8164	51.6934	51.5350	52.4049	52.4785	52.9092
40	50.7489	51.4271	51.2544	51.7331	51.5911	51.4397	52.2992	52.3582	52.7991
45	50.6613	51.3569	51.0854	51.5510	51.4272	51.2825	52.1750	52.2192	52.6868
50	50.5140	51.1966	50.9270	51.4743	51.3288	51.1687	52.0205	52.0704	52.5512
55	50.4032	51.0799	50.8015	51.3201	51.1627	51.0130	51.8217	51.8729	52.3662
60	50.1872	50.8968	50.6325	51.1570	50.9876	50.8200	51.7846	51.7538	52.2322
65	50.0281	50.7562	50.4819	50.9895	50.8376	50.6717	51.6427	51.6415	52.0423
72	49.8329	50.5272	50.2593	50.7227	50.5502	50.3654	51.2743	51.3300	51.7524

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

ข้อมูลเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง

1. การหาความหนาแน่นของน้ำสับประค
2. การหาความหนาแน่นของน้ำเสาวรศ
3. การหาความหนืดของน้ำสับประค
4. การหาความหนืดของน้ำเสาวรศ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ค.1 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความหนาแน่นของน้ำส้มที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น		ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )												
(Brix)	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	72 °C
60.8	1303.78	1302.24	1300.82	1298.66	1297.11	1294.72	1290.68	1287.18	1283.66	1281.22	1278.31	1274.90	1271.44	1267.37
45.0	1217.03	1215.21	1210.80	1209.07	1207.08	1204.19	1201.99	1200.60	1197.21	1193.84	1189.28	1188.93	1186.22	1181.57
35.0	1165.03	1161.63	1160.84	1158.91	1157.01	1153.04	1152.53	1150.33	1148.14	1146.39	1140.32	1140.46	1135.89	1129.14
25.0	1110.93	1108.73	1108.11	1105.92	1104.24	1102.00	1099.23	1097.50	1094.78	1092.42	1089.01	1086.44	1083.14	1077.74
15.0	1068.75	1067.93	1066.14	1065.51	1064.37	1060.93	1059.90	1057.72	1055.32	1052.64	1049.78	1046.26	1043.01	1038.61
10.0	1055.81	1055.91	1055.54	1055.10	1053.84	1053.17	1050.39	1050.20	1049.21	1046.39	1045.64	1043.31	1041.34	1038.05

ตารางที่ ค.2 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาความหนาแน่นของน้ำเตาที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่าง ๆ

ความเข้มข้น		ความหนาแน่น (kg/m <sup>3</sup> )												
(Brix)	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	72 °C
13.8	1062.13	1060.06	1060.02	1058.10	1056.02	1053.60	1051.95	1049.71	1047.21	1044.28	1040.41	1038.47	1035.51	1029.04
10.0	1042.24	1041.77	1040.74	1039.31	1038.11	1035.06	1033.63	1031.76	1028.40	1026.48	1023.31	1019.76	1016.66	1010.92
7.0	1032.92	1032.43	1031.62	1031.14	1029.89	1025.72	1024.67	1022.87	1020.69	1017.58	1015.23	1011.44	1008.44	1004.13

ตารางที่ ค.3 ค่าเฉลี่ยผลการทดลองหาค่าความหนืดของน้ำส้มปรีดที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้น ( <sup>0</sup> Brix)	ความหนืด (cps)													
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	72 °C
<b>60.8</b>	683.9308	567.7888	442.7128	382.1601	290.8348	265.0255	203.4801	151.8615	130.5191	98.4560	91.3088	69.4701	60.6354	53.7860
<b>45.0</b>	39.6901	32.7415	21.8221	18.4471	16.2632	14.6749	13.4837	12.4911	11.4984	10.5057	9.1160	9.1160	8.3219	7.9248
<b>35.0</b>	7.6270	6.2373	5.0461	4.4505	4.7483	3.9045	3.7556	3.4578	3.2096	3.0111	2.9118	2.8126	2.6140	2.2666
<b>25.0</b>	2.8622	2.2666	1.9688	1.8695	2.3162	1.9688	1.8199	1.5717	1.3732	1.4228	1.3236	1.2243	1.0258	0.9265
<b>15.0</b>	1.9688	1.6710	1.5221	1.2739	1.1250	1.0258	0.8769	0.7776	0.6287	0.5791	1.1350	1.0953	0.9960	0.9166
<b>10.0</b>	1.4526	1.3931	1.3732	1.3136	1.2938	1.2541	1.1945	1.0754	0.9761	0.8769	0.8173	0.7180	0.6585	0.5989

ตารางที่ ค.4 ผลการคำนวณค่าดัชนีกำลังและดัชนีความหนืดของน้ำส้มปรีดที่อุณหภูมิและความเข้มข้นต่างๆ

<b>13.8 Brix</b>	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	72 °C
n	1.1510	1.0680	0.9827	0.9170	0.8814	0.8233	0.7954	0.7504	0.7288	0.6946	0.6457	0.6097	0.5894	0.5703
k	2.6178	2.4619	2.4562	2.3059	2.1846	2.3512	2.0776	2.1286	2.1452	2.2521	2.4028	2.7141	2.6224	2.5360
<b>10<sup>0</sup> Brix</b>	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	72 °C
n	0.8908	0.7996	0.7439	0.7112	0.6554	0.6056	0.5855	0.5596	0.5314	0.5195	0.4858	0.4593	0.4501	0.4416
k	0.1796	0.3941	0.4363	0.4374	0.5503	0.6295	0.6109	0.5982	0.5687	0.5824	0.7113	0.8160	0.8900	0.9687
<b>7<sup>0</sup> Brix</b>	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	45 °C	50 °C	55 °C	60 °C	65 °C	72 °C
n	0.6933	0.6347	0.5998	0.5594	0.5441	0.4814	0.4706	0.4416	0.4417	0.4069	0.3812	0.3635	0.3582	0.3471
k	0.4668	0.3305	0.3141	0.2572	0.2933	0.0897	0.1457	0.0923	0.1308	0.1207	0.0604	0.0387	0.0986	0.1474

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงการขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาทิป รัตนภาสกร อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนแนวทางในการแก้ปัญหา อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อโครงการ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ อาจารย์ กัณฑ์กนิษฐ์ ธนศิริวัฒนา ที่กรุณามาเป็นกรรมการสอบโครงการและให้คำแนะนำอื่น ๆ

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วันชัย สุทธิบูรณ์ และ ศูนย์วิจัยผสมเทียม กรมปศุสัตว์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ขอพระขอบคุณบริษัท นูบูน จำกัด ที่เอื้อเฟื้อน้ำสับปรดและน้ำเสาวรสเข้มข้นที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมอาหารทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างและปรับปรุงแก้ไขเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง จนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ และ ขอบใจ ผู้ที่ให้กำลังใจในการทำโครงการฉบับนี้จนสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้