คู่มือปฏิบัติการวิชา 421363
ปฏิบัติการวิศวกรรมแปรรูปอาหาร 1
บทปฏิบัติการที่ 1-3

โดย

ดร.เทวรัตน์ ทิพยวิมล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2553

157116

สารบัญ

	หน้า
ปฏิบัติการที่ 1	1
ปฏิบัติการที่ 2	6
ปฏิบัติการที่ 3	11

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปฏิบัติการที่ 1

สมบัติทางกายภาพของวัสดุอาหาร

(Physical Properties of Food Materials)

1. บทนำ

สมบัติทางกายภาพของวัสดุเกษตรและอาหารมีความสำคัญต่อการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรและเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยสมบัติทางกายภาพในบทปฏิบัติการนี้จะประกอบด้วยการหาค่าความหนาแน่น ความพรุนและความถ่วงจำเพาะของวัสดุ

ความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

ความหนาแน่นเป็นอัตราส่วนมวลของวัสดุต่อปริมาตร หาได้จากสมการ (1)

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad \text{.....(1)}$$

แบ่งออกเป็นในทางวิศวกรรมเกษตรจะแบ่งออกเป็น ***ความหนาแน่นจริง*** (***Particle density,*** ρ_p) คือความหนาแน่นที่แท้จริงของวัสดุ หาได้จากมวลของวัสดุหารด้วยปริมาตรของวัสดุ และ ***ความหนาแน่นปรากฏ*** (***Bulk density,*** ρ_b) คือ คือมวลของกลุ่มอนุภาคของวัสดุหารด้วยปริมาตรที่บรรจุอนุภาคนั้น

ความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นเป็นตัวแปรทางกายภาพที่สำคัญในการออกแบบไซโลและถังเก็บรักษา การอัดเอ็นไซเลจเชิงกล การแยกวัสดุที่ไม่ต้องการออกไปจากของผสมทางการเกษตร และอาหารเป็นต้น

เนื่องจากรูปทรงของวัสดุเกษตรซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับอาหารในธรรมชาติที่ไม่เป็นระเบียบ (เทียบกับทรงเรขาคณิต) ขนาดที่เล็กของเมล็ดพืช และความมีรูพรุนในอาหารสัตว์ทำให้เกิดปัญหาในเรื่องการวัดหารปริมาตร ความถ่วงจำเพาะ และความหนาแน่น

การแทนที่น้ำเป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยให้สามารถหาค่าดังกล่าวได้ โดยวัสดุจะถูกชั่งในอากาศก่อนแล้วนำไปจุ่มลงในน้ำให้ปิ่มพอดี น้ำหนักที่อ่านได้จากเครื่องชั่งขณะอยู่ในน้ำนี้ไปคำนวณหาปริมาตรได้

จากกลศาสตร์ของไหลจะได้ว่า

$$m_p = S_g \rho_w V_p \qquad \text{.....(2)}$$

เมื่อนำเอาวัสดุไปแทนที่น้ำ น้ำที่ถูกแทนที่จะมีปริมาตรเท่ากับวัสดุ ดังนั้น

$$m_w = s_{gw}\rho_w V_p \quad \text{.....(3)}$$

เมื่อ m_p คือมวลของวัสดุ และ m_w คือมวลของน้ำ

S_g คือค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุ และ S_{gw} คือค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำ

ρ_w คือความหนาแน่นของน้ำ

V_p คือปริมาตรของวัสดุ

เมื่อนำ (2)/(3) จะสามารถหาค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุได้จาก

$$S_g = \frac{m_p}{m_w} \quad \text{.....(4)}$$

ซึ่งเมื่อทราบค่าความถ่วงจำเพาะเราสามารถคำนวณเพื่อหาค่าความหนาแน่นของวัสดุได้

ความพรุน

ความพรุน (Porosity, ε) คือ เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างอนุภาคในหนึ่งหน่วยปริมาตร มีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นดังนี้

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad \text{..... (5)}$$

ค่าความพรุนมีผลต่อการไหลของอากาศผ่านวัสดุ อย่างเช่นในกระบวนการอบแห้งเมล็ดพืช เมล็ดพืชที่มีความความพรุนต่ำจะมีความต้านทานการไหลของอากาศสูงกว่าเมล็ดพืชที่มีค่าความพรุนสูง

2.วัตถุประสงค์

เพื่อให้นักศึกษาสามารถหาค่าคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอาหาร คือ ความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุน และค่าความถ่วงจำเพาะได้

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. กระบอกตวง
2. บิ๊กเกอร์ขนาด 1000 ml

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3. ธัญพืช เช่น ถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วลิสง อย่างละครึ่งกิโลกรัม
4. ผลไม้ตัวอย่าง เช่น แอเปิ้ลลูกเล็ก หัวมันฝรั่ง มะม่วง อย่างละ 3 ผล
5. ตาชั่งดิจิตอลพิกัด ไม่น้อยกว่า 3200 g

4. วิธีการทดลอง

ความหนาแน่นจริงและความหนาแน่นปรากฏ

1. นำเมล็ดธัญพืชจำนวน 100 กรัมใส่ลงในกระบอกตัว อ่านค่าปริมาตรที่ได้ บันทึกผล
2. เติมน้ำลงในกระบอกตวงให้ได้ปริมาตร 100 cc. บันทึกปริมาตร
3. เติมเมล็ดธัญพืชลงในกระบอกตวง จำนวน 20 กรัม ลงในกระบอกตวงบรรจุน้ำตามข้อ 2
4. อ่านปริมาตรของน้ำที่เพิ่มขึ้นในกระบอกตวง บันทึกปริมาตรน้ำ
5. ทำซ้ำข้อ 1- 4 โดยใช้เมล็ดธัญพืชที่เหลือในการทดลอง

การหาความถ่วงจำเพาะผลไม้

1. ทำการชั่งบิกเกอร์และน้ำ โดยกะปริมาณน้ำให้สามารถท่วมผลไม้ที่นำมาทดสอบ บันทึกน้ำหนักน้ำและภาชนะ

2. นำผลไม้ตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบจุ่มลงในน้ำโดยไม่ให้ผลไม้ตกลงถึงก้นภาชนะ บันทึกน้ำหนัก

5. รายงานผล

1. ให้นักศึกษาแสดงวิธีการคำนวณค่าความหนาแน่นจริง ความหนาแน่นปรากฏ ความพรุน และความถ่วงจำเพาะของตัวอย่างให้ชัดเจน

2. จงอธิบายถึงความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุอาหารกับงานทางด้านวิศวกรรมอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. คำถามท้ายการทดลอง

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลอง หากต้องการบรรจุเมล็ดถั่วเขียวจำนวน 500 กรัมลงบรรจุภัณฑ์ทรงกระบอกซึ่งจำกัดความสูงไว้คือ 10 เซนติเมตร อยากทราบว่าบรรจุภัณฑ์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่าใด

7. ตารางบันทึกผล

ตารางที่ 1 บันทึกผลความหนาแน่นปรากฏ (Bulk density)

วัสดุตัวอย่าง		มวลของตัวอย่าง	ปริมาตรที่อ่านได้	ค่าความหนาแน่น
ถั่วเหลือง	1			
	2			
	3			
ถั่วเขียว	1			
	2			
	3			
ถั่วลิสง	1			
	2			
	3			

ตารางที่ 2 บันทึกผลความหนาแน่นที่แท้จริง (Particle density)

วัสดุตัวอย่าง		มวลของตัวอย่าง (g)	ปริมาตรน้ำก่อนใส่ตัวอย่าง (cc)	ปริมาตรน้ำหลังใส่ตัวอย่าง (cc)	ค่าความหนาแน่น
ถั่วเหลือง	1				
	2				
	3				
ถั่วเขียว	1				
	2				
	3				
ถั่วลิสง	1				
	2				
	3				

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3 บันทึกผลการชั่งน้ำหนักผลไม้

วัสดุตัวอย่าง		มวลของน้ำและภาชนะก่อนจุ่มผลไม้ (g)	มวลของน้ำและภาชนะขณะจุ่มผลไม้ (g)	ค่าความถ่วงจำเพาะ
แอปเปิ้ล	1			
	2			
	3			
มันฝรั่ง	1			
	2			
	3			
มะม่วง	1			
	2			
	3			

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปฏิบัติการที่ 2

สมดุลมวลและพลังงาน

(Mass and energy balanced)

1. บทนำ

สมดุลมวล

ในกระบวนการแปรรูปอาหาร จะพบว่าการสมดุลมวลมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมการผลิต เพื่อให้ได้ผลผลิต (yield) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแปรรูปอาหาร

สำหรับกระบวนการไหลทั่วไปของปริมาตรควบคุมสมการสมดุลมวลหาได้จาก

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \dot{m}_{acc} \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ $\dot{m}_{in}$ คือ อัตราการไหลมวลเข้าสู่ปริมาตรควบคุม

$\dot{m}_{out}$ คือ อัตราการไหลมวลออกจากปริมาตรควบคุม

$\dot{m}_{acc}$ คือ อัตราการสะสมมวลภายในปริมาตรควบคุม

สำหรับในสภาวะสม่ำเสมอ จะไม่มีการสะสมของมวลในปริมาตรควบคุมดังนั้นสมการ (1) จะลดรูปดังนี้

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \qquad \text{.....(2)}$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สมการ (2) สามารถใช้พิจารณากับมวลทั้งหมดหรือมวลของแต่ละองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่สนใจ นอกจากนี้สมดุลมวลยังสามารถใช้กับแต่ละหน่วยปฏิบัติการหรือส่วนหนึ่งของกระบวนการ หรือทั้งกระบวนการก็ได้ สมการสมดุลมวลมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ระบบการแปรรูปอาหารที่ซับซ้อน เมื่อเขียนสมการสมดุลมวลแล้ว มวลหรืออัตราการไหลของมวลหรือความเข้มข้นของมวลที่ไม่ทราบค่าองค์ประกอบหนึ่งของผลิตภัณฑ์ก็สามารถคำนวณได้ โดยจำนวนของสมการที่ใช้การคำนวณต้องเป็นอิสระต่อกัน และมีจำนวนเท่ากับจำนวนตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (unknown)

สมดุลพลังงาน

หลักการของการอนุรักษ์พลังงานสามารถอธิบายได้ด้วยกฎเทอร์โมไดนามิกส์ข้อที่ 1 โดยที่ความร้อนและงานจะรวมในพลังงานทั้งหมด ในการแปรรูปอาหารส่วนใหญ่มักสนใจในสภาวะที่เรียกว่า สถานะคงตัว สมการทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับสมดุลพลังงานเมื่ออยู่ในสถานะคงตัวคือ

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \qquad \text{.....(3)}$$

เมื่อ Q_{in} คือพลังงานขาเข้า

Q_{out} คือพลังงานขาออก

เทอมพลังงานในสมการ (3) อาจอยู่ในรูปของความร้อน พลังงานจลน์ หรือพลังงานศักย์ ในการแปรรูปอาหารด้วยความร้อน เช่น การทำให้ร้อน การทำให้เย็น การทำให้สุก การฆ่าเชื้อด้วยความร้อน ฯลฯ พลังงานความร้อนจะเด่นที่สุด ทำให้พลังงานรูปอื่นๆ อาจไม่จำเป็นต้องนำมาพิจารณาก็ได้ในบางสภาวะ

ในเทอมของพลังงานความร้อนที่พบและนำมาพิจารณาในการแปรรูปมี 2 ชนิดคือ ความร้อนสัมผัส (sensible heat) และความร้อนแฝง (latent heat) โดยความร้อนสัมผัสหาได้ดังนี้

$$Q_{sen} = \dot{m}C_p\Delta T \qquad \text{.....(4)}$$

และความร้อนแฝงหาได้จาก

$$Q_{latent} = \dot{m}L \qquad \text{.....(5)}$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของมวล

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของวัสดุ

ΔT คือ อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป

L คือ ความร้อนแฝงของวัสดุ

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อให้เข้าใจระบบสมดุลของมวลและพลังงานในการแปรรูปอาหาร
2. เพื่อให้สามารถนำสมดุลของมวลและพลังงานไปวิเคราะห์กระบวนการแปรรูปอาหาร

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. บิกเกอร์ขนาด 500 ml.
2. เทอร์โมมิเตอร์ช่วงการวัดอย่างน้อย 0-100 °C
3. รีเฟรคโตมิเตอร์ (refractometer) ซึ่งมีช่วงการวัด 0-32 °Brix
4. หม้อ เครื่องปั่น เครื่องชั่ง มีด เขียง แท่งแก้วคน
5. ขวดแก้วพร้อมฝาขวดที่มีช่องสำหรับเสียบเทอร์โมมิเตอร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. ผลไม้ (มะละกอ หรือ สับปะรด)
7. น้ำตาลทราย

4. วิธีการทดลอง

สำหรับศึกษาการสมดุลมวล

6. นำผลไม้ผลไม้ตัวอย่างมาปอกเปลือก หั่น แล้วชั่งน้ำหนักให้ได้ 500 กรัม
7. ทำการปั่นผลไม้ที่เตรียมไว้ในข้อ 1. ด้วยเครื่องปั่น แบ่งส่วนหนึ่งไว้สำหรับการศึกษาสมดุลพลังงาน
8. ทำการวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ทั้งหมด (total soluble solid) หน่วยเป็น °Brix ของผลไม้ที่ได้หลังปั่น บันทึกผล
9. ชั่งผลไม้ปั่นที่ได้จากข้อ 2 บันทึกน้ำหนัก แล้วทำการปรับความหวานด้วยน้ำตาลทรายให้เป็น 18 °Brix โดยคำนวณปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มเข้าไปจากหลักการสมดุลมวลดังนี้

$$m_{fruit} + m_{sugar} = m_{mixed} \qquad \text{.....(6)}$$

และ

$$x_1 m_{fruit} + x_2 m_{sugar} = x_3 m_{mixed} \qquad \text{.....(7)}$$

เมื่อ m_{fruit} คือมวลของน้ำผลไม้ (กรัม)

m_{sugar} คือมวลของน้ำตาลทราย (กรัม)

m_{mixed} คือมวลของน้ำผลไม้ที่ปรับความหวานแล้ว (กรัม)

x_1 คือสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำผลไม้

x_2 คือสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำตาลทราย

x_3 คือสัดส่วนความเข้มข้นของน้ำผลไม้ที่ปรับความหวานแล้ว

5. ทำการวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ของน้ำผลไม้ที่ทำการปรับความหวานโดยการเติมน้ำตาลจากการคำนวณข้อ 4.

สำหรับการศึกษาสมดุลพลังงาน

1. เตรียมน้ำร้อนอุณหภูมิ 90-100 °C ปริมาณ 2 กิโลกรัม ใส่ในภาชนะที่ทราบน้ำหนักแน่นอน
2. นำผลไม้ที่ผ่านการปั่นแล้วจากข้อ 2 ของการศึกษาสมดุลมวล บรรจุลุงในขวด โดยทำการบันทึกน้ำหนักของน้ำผลไม้ ฝากับขวดก่อนการบรรจุ

3. ปิดฝาขวดด้วยฝาซึ่งมีช่องสำหรับเทียบเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิ อ่านค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำผลไม้และขวดแก้ว แล้วแช่ลงในน้ำร้อนที่เตรียมไว้ บันทึกค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำผลไม้ ขวดแก้วและน้ำร้อน
4. ทำการวัดอุณหภูมิของน้ำผลไม้และน้ำร้อนทุกๆ 5 นาทีจนครบ 20 นาที

4. รายงานผล

1. ให้นักศึกษาแสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณน้ำตาลที่ต้องเติมเพื่อปรับความหวานของน้ำผลไม้และวิจารณ์ผลการทดลองอย่างละเอียด

2. แสดงวิธีการคำนวณหาค่าความร้อนสูญเสีย (Heat loss) ที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการสมดุลพลังงานดังนี้

$$m_1 c_{p1} \Delta T_1 = m_2 c_{p2} \Delta T_2 + m_3 c_{p3} \Delta T_3 + \text{heat loss}$$

เมื่อ ตัวห้อย 1, 2, 3 หมายถึง น้ำเดือด, น้ำผลไม้ และขวดแก้ว ตามลำดับ

3. ให้นักศึกษาวิจารณ์ผลของการเกิดความร้อนสูญเสียและแนวทางการลดค่าความร้อนสูญเสียในระบบ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางบันทึกผล

ตารางที่ 1 สมดุลของมวล

ชนิดของผลไม้:.....

ตัวอย่างที่	น้ำหนักก่อนปรับความหวาน (g)	TSS ก่อนปรับความหวาน (°Brix)	ปริมาณน้ำตามที่เติม (g)	น้ำหนักหลังปรับความหวาน (g)	TSS หลังปรับความหวาน (°Brix)
1					
2					
3					

ตารางที่ 2 สมดุลพลังงาน

เวลา (นาที)	วัสดุ	น้ำหนัก (g)	อุณหภูมิ (°C)
0	น้ำเดือด		
	น้ำผลไม้		
	ขวดแก้ว+ฝา		
5	น้ำเดือด		
	น้ำผลไม้		
	ขวดแก้ว+ฝา		
10	น้ำเดือด		
	น้ำผลไม้		
	ขวดแก้ว+ฝา		
15	น้ำเดือด		
	น้ำผลไม้		
	ขวดแก้ว+ฝา		
20	น้ำเดือด		
	น้ำผลไม้		
	ขวดแก้ว+ฝา		

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปฏิบัติการที่ 3
สมบัติทางรีโอโลยีของอาหารเหลว
(Rheological properties of liquid foods)

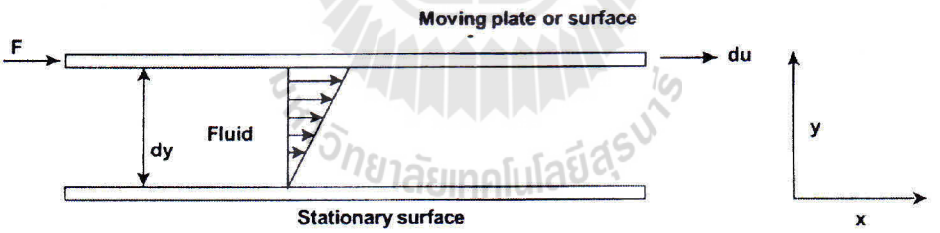
1. บทนำ

รีโอโลยี เป็นการศึกษาการเสียรูป (deformation) และการไหลของวัตถุลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมทางรีโอโลยีของวัตถุหรืออาหารเหลวได้จากความสัมพันธ์ของ shear stress กับ shear strain และ ความเข้าใจเชิงปริมาณของพฤติกรรมการไหลเหล่านี้เป็นสิ่งสำคัญต่อการขนถ่ายวัสดุและการออกแบบกระบวนการ สมบัติทางรีโอโลยีมักใช้กำหนดพารามิเตอร์ของการแปรรูป เช่นลักษณะความเร็วที่ตำแหน่งต่างๆ ความดันที่ลดลง และการออกแบบท่อ ขนาดของปั๊มที่ต้องการในระบบการขนถ่ายของไหล นอกจากนี้สมบัติทางรีโอโลยียังใช้เพื่อประเมินพลังงานที่ต้องการในการกวนหรือการผสม รวมทั้งยังใช้เพื่อหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการให้ความร้อนในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion cooking) ของอาหาร

<u>ชนิดและพฤติกรรมทางรีโอโลยี</u>

(1) ของไหลนิวโตเนียน

เมื่อพิจารณาการไหลของของไหลดังแสดงในภาพที่ 1



<u>ภาพที่ 1</u> อัตราเฉือนของของไหลหนืด

หากของไหลหรืออาหารเหลวที่มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า shear stress กับ shear rate เป็นกราฟเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด (origin) เรียกว่าของไหลนิวโตเนียน ของไหลที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้อาจกล่าวว่าเป็นไปตามกฎความหนืดนิวตัน (Newton's law of viscosity) ซึ่งนิยามได้ดังนี้

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือน (shear stress, Pa)

μ คือ ความหนืด (Pa.s)

$\frac{du}{dy}$ คือ อัตราเฉือน (shear rate, s^{-1})

ความเค้นเฉือนเป็นค่าอัตราส่วนของแรงเฉือนต่อพื้นที่ตั้งฉากกับแรงนั้น (F/A) ส่วนอัตราเฉือนนิยามได้ว่าเป็นอัตราส่วนการเสียรูปของวัตถุในทิศทาง x

(2) ของไหลนอนนิวโตเนียน

ของไหลนอนนิวโตเนียน คือของไหลที่ไม่เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน โดยพฤติกรรมของอาหารส่วนใหญ่จะปรากฏพฤติกรรมเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน นั่นคือเมื่อสร้างกราฟระหว่าง shear stress กับ shear rate กราฟที่ได้จะไม่เป็นเส้นตรงหรือผ่านจุดกำเนิดหรือทั้งสองอย่าง ของไหลนอนนิวโตเนียนสามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังนี้

(2.1) Bingham plastics อาหารเหลวที่มีพฤติกรรมแบบนี้จำเป็นต้องอาศัยค่า shear stress ค่าหนึ่งที่เรียกว่า yield stress หรือ yield value เพื่อให้เกิดการไหลเริ่มต้น หลังจากนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายของไหลนิวโตเนียน อาหารเหล่านี้ได้แก่ พิวเรย์ (purees) ของผักผลไม้ อาหารที่มีอนุภาคแขวนลอย ยาสีฟัน เป็นต้น ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ที่กำหนดสมบัติของอาหารเหล่านี้เป็นไปตามสมการ (2) ดังนี้

$$\tau = \mu_b\left(\frac{du}{dy}\right) + \tau_0 \quad \text{เมื่อ} \quad \tau > \tau_0 \qquad \text{.....(2)}$$

เมื่อ μ_b คือ Bingham viscosity

τ_0 คือ yield stress

ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate ของของไหลนอนนิวโตเนียนส่วนใหญ่อธิบายได้ด้วยพารามิเตอร์ 2 ค่า ของ power law ดังสมการ (3)

$$\tau = m\left(\frac{du}{dy}\right)^n \qquad \text{..... (3)}$$

เมื่อ m คือ consistency coefficient

n คือ flow behavior index (dimensionless)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ของไหลนอนนิวโตเนียนอาจจำแนกออกโดยใช้ค่า n ที่เบี่ยงเบนออกจากค่า n=1 เมื่อ

$n < 1$ เรียกของไหลนี้ว่า pseudoplastic หรือ shear thinning

$n > 1$ เรียกของไหลนี้ว่า dilatant หรือ shear thickening

$n = 1$ คือสมการ power low ซึ่งเป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตันนั่นเอง

เนื่องจากอัตราส่วนของ shear stress กับ shear rate ของอาหารที่เป็นของไหลนอนนิวโตเนียนไม่ได้มีค่าคงที่ พฤติกรรมการไหลจึงไม่สามารถแสดงได้ด้วยค่าหนึ่งเช่นเดียวกับอาหารที่มีพฤติกรรมแบบนิวโตเนียน เพื่อแยกให้เกิดความแตกต่าง ดังนั้นอัตราส่วนของ shear stress ต่อ shear rate ของของไหลนอนนิวโตเนียนจึงนิยามให้เป็นความหนืดปรากฏ (apparent viscosity: μ_a) ดังนี้

จากสมการ (3) จะได้ว่า

$$\tau = m\left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1}\left(\frac{du}{dy}\right)$$

หรือ

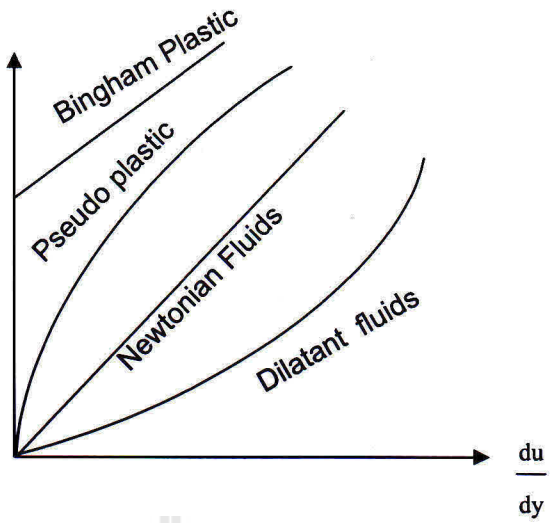
$$\mu_a = \frac{\tau_{yx}}{\left(\frac{du}{dy}\right)} = m\left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1} \qquad \text{.....(4)}$$

จะเห็นว่า สำหรับความหนืดปรากฏของของไหลนอนนิวโตเนียนที่รายงาน จะต้องระบุค่า shear rate และ shear stress ที่ใช้ในการหาด้วย

(2.2) ของไหล pseudoplastic เป็นของไหลที่แสดงค่าความหนืดปรากฏลดลงเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2 อาหารที่อยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ ซอสมะเขือเทศ พิวเรย์กล้วย ซอสแอปเปิ้ล โดของอาหาร และสารละลายกัมต่างๆ

(2.3) ของไหล dilatant เป็นของไหลที่แสดงค่าความหนืดปรากฏเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราเฉือนเพิ่มขึ้นดังแสดงในภาพที่ 2 ตัวอย่างของของไหลประเภทนี้มีไม่มากนัก เช่น น้ำแป้ง สารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของเซรามิกซ์กับซิลิโคนสูง ก็แสดงพฤติกรรมเหล่านี้

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ shear rate

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของของไหลที่มีสมบัติเป็นนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian fluid) โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบ coaxial - cylinder

2. เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิต่อความหนืดของของของไหล

3. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องวัดความหนืดแบบ coaxial-cylinder (Brookfield viscometer)
2. วอเตอร์บาธ
3. เทอร์โมมิเตอร์
4. บิกเกอร์ขนาด 600 ml
5. ของเหลวที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วย
   - -น้ำมันข้าวโพด
   - -สลัดน้ำข้น
   - -แป้งข้าวโพดในน้ำความเข้มข้น 55% (w/w)

4. วิธีการทดลอง

พารามิเตอร์ทางรีโอโลยีหาได้จากความสัมพันธ์ของ shear stress กับ shear rate ที่เกิดขึ้นในวิสโคมิเตอร์ชนิด coaxial-cylinder ซึ่งเครื่องวัดความหนืดชนิดนี้ แกนของเข็ม (spindle) จะหมุนในของไหลที่ความเร็วเชิงมุม (ω)ค่าหนึ่งที่กำหนดให้และทำการวัดค่าทอร์ค (torque) ที่ต้องการเพื่อเอาชนะความ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ต้านทานความหนืดของของไหล จากนั้นคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางรีโอโลยีจากการวัดที่ความเร็วเชิงมุมต่างๆ กัน

1. ศึกษาคู่มือการใช้งานของเครื่องมือให้ละเอียดจนเข้าใจ
2. บันทึกข้อมูลของเครื่องมือวัดกับข้อมูลของผลิตภัณฑ์ (ของเหลวที่ทดสอบ) ให้ละเอียด
3. เทสารของเหลวที่ต้องการทดสอบประมาณ 500 ml ลงในบิกเกอร์ขนาด 600 ml แล้ววาบิกเกอร์ลงในวอเตอร์บาธที่ควบคุมอุณหภูมิ 30 °C บันทึกอุณหภูมิหลังจากของเหลวถึงสมดุล
4. ติดแกน spindle กับเพลาของเครื่องวัดความหนืด ระวังการดันเพลาที่ด้านข้าง
5. จุ่มแกน spindle ในของเหลวที่ทำการทดสอบจนท่วมรอยตัดที่หยักไว้ (groove cut) ที่เพลาของ spindle
6. ปรับระดับของเครื่องวัดความหนืดโดยการปรับสกรูที่ขาตั้งและระดับของ bubble ที่ dial casing
7. กดคลัทช์และให้มอเตอร์หมุน จากนั้นปล่อยคลัทช์และให้หน้าปัด (dial) หมุนจนกระทั่งเข็มชี้คงที่ที่ตำแหน่งหนึ่งบนหน้าปัด
8. กดคลัทช์เพื่อหยุดตัวเข็มชี้ หยุดมอเตอร์และบันทึกความเร็วรอบของการหมุนและอ่านค่าบนหน้าปัด (ซึ่งเป็นค่า torque) ถ้าค่าที่อ่านได้จากหน้าปัดน้อยกว่า 30 เปลี่ยนตัวแกน spindle เป็นตัวที่ใหญ่ขึ้น (หมายเลข spindle ต่ำกว่าเดิม) สำหรับค่าที่อ่านได้สูงกว่าสเกลที่สามารถอ่านได้ควรใช้ spindle ที่มีขนาดเล็กกว่า (หมายเลขที่สูงกว่า)
9. หยุดมอเตอร์และบันทึกค่าที่อ่านได้จากหน้าปัด และความเร็วรอบของการหมุน (rpm)
10. ตั้งค่าความเร็วรอบการหมุนใหม่และทำซ้ำจากข้อ 6. ถึง ข้อ 8. เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดีนั้นควรวัดทอร์ค (dial reading) ที่ความเร็วรอบของการหมุนมากกว่า 4 ค่า
11. ทำการทดลองเช่นเดียวกันนี้กับของเหลวที่เหลือ

การศึกษาผลของอุณหภูมิ

1. บันทึกข้อมูลของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ทดสอบ
2. ปรับระดับของ viscometer (Brookfield model RV-DVIII+) ด้วยการปรับสกรูที่ฐานเพื่อให้ฟองอากาศอยู่ในช่องที่กำหนด
3. กดปุ่ม auto zero หลังจากที่เปิด power on ด้วยการกดปุ่มมอเตอร์เปิด/ปิ
4. ติดแกน spindle ที่เลือกไว้สำหรับ UL-adapter (หรือ small sample adapter) กับเพลาของ viscometer
5. ป้อนค่าหมายเลขของ spindle ด้วยการกดปุ่ม spindle number
6. เติมของไหลที่ต้องการทดสอบ 16 ml (หรือตามคู่มือของเครื่อง) ในอุปกรณ์หรือทรงกระบอกที่ใช้วัด และต่อเข้ากับเพลาของ viscometer พร้อมกับอุปกรณ์ที่มีการควบคุมอุณหภูมิ รอให้ระบบเข้าสู่สมดุล จึงบันทึกอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7. ตั้งค่าความเร็ว spindle ตามต้องการ
8. บันทึกข้อมูลความหนืดปรากฏ (Appearance viscosity) ณ ความเร็วรอบของการหมุน (rpm.), shear rate ต่างๆ (ด้วยการใช้ความเร็วที่ตั้งโปรแกรมไว้ตามคู่มือของเครื่องมือ) รวมทั้งค่า torque และ shear stress
9. ทำการทดลองซ้ำอีก 2 ครั้ง ที่อุณหภูมิเดิม
10. ทำการทดลองที่อุณหภูมิอื่นๆ อีก 3 ค่า

4. รายงานผล

1. **จากข้อมูลที่ได้จากการทดสอบให้นักศึกษาสร้างกราฟการไหล** แล้วตรวจสอบว่าของเหลวที่นำมา **ทดสอบเป็นของไหลชนิดใด พร้อมทั้งคำนวณหาค่าคงที่ และเลขชี้กำลังในกรณีที่เป็นของไหล** Non-Newtonian

2. **ให้นักศึกษาอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความหนืดกับอุณหภูมิ** โดยการสร้างกราฟ พร้อมทั้งใช้ความรู้ที่เรียนมาอธิบายผลให้เป็นไปตามหลักวิชาการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางบันทึกผล

ข้อมูลจากการทดสอบสมบัติของของไหล

ชนิดของเครื่องมือทดสอบ.....

หมายเลข spindle .....

อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ขณะทำการวัด.....°C

ข้อมูลของผลิตภัณฑ์

ชนิดที่ 1 .....

.....

ชนิดที่ 2 .....

.....

ชนิดที่ 3 .....

.....

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่อ่านได้จากเครื่องวัดความหนืด

Rotational speed (rpm)	Torque (dial reading)					
	ผลิตภัณฑ์ 1 (T=.....°C)		ผลิตภัณฑ์ 1 (T=.....°C)		ผลิตภัณฑ์ 1 (T=.....°C)	
	Dial reading	μ (cP)	Dial reading	μ (cP)	Dial reading	μ (cP)
Spindle number						
Spindle constant						

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิต่อความหนืดของของเหลว

หมายเลข Spindle.....

ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ทดสอบ.....

T (°C)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Viscosity (cP)		Torque (%)		Shear stress (Pa)	
			1	2	1	2	1	2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี