



## เทคนิคการทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตบนโครงสร้างอาหารที่ยืดหยุ่นและหนืด

### Dynamic Oscillatory Shear Testing on Viscoelastic Food Structure

นักสิทธิ์ ปัญญไใหญ่

Naksit Panyoyai

ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

Department of Agro-Industry, Faculty of Agricultural Technology, Chiang Mai Rajabhat University

Received : 2 September 2021

Revised : 27 December 2021

Accepted : 14 January 2022

#### บทคัดย่อ

บทความนี้อธิบายให้เห็นว่าวัสดุอาหารมีโครงสร้างที่ซับซ้อนขององค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ จึงส่งผลต่อเนื้อสัมผัส การไหล และการต้านทานต่อแรง โครงสร้างอาหารที่มีลักษณะยืดหยุ่นและหนืดมีการตอบสนองต่อแรงเฉือนที่สั่นเป็นจังหวะคลื่นโดยรูปแบบผสมระหว่างของแข็งและของเหลว ดังนั้น การใช้หลักการทางฟิสิกส์ชีวภาพจึงรายงานผลการต้านทานด้วยค่ามอดูลัสทั้งหมด ซึ่งเป็นค่ารวมระหว่างมอดูลัสที่แสดงความยืดหยุ่นหรือมอดูลัสสะสม และมอดูลัสสูญเสียที่แสดงความหนืด การทดสอบสั่นเฉือนพลวัตเริ่มจากการกำหนดช่วงของแรงที่เหมาะสมที่ไม่ทำลายโครงสร้างวัสดุอาหาร จากนั้นจึงศึกษาผลของความถี่ เวลา และอุณหภูมิที่ส่งผลต่อโครงสร้างทั้งในเชิงการพัฒนาโครงสร้างที่แข็งแรงมากขึ้นหรือการสูญเสียโครงสร้างไป

**คำสำคัญ :** การสั่นเฉือนพลวัต ; ความยืดหยุ่นและหนืด ; รีโอโรยี ; โครงสร้างอาหาร

#### Abstract

The review objective is to explain that food materials have a complex structure from various chemical components, affecting the texture, flow, and resistance to forces. The elastic and viscous food structure responds to dynamic oscillation on shear, which has a solid-liquid behaviour. Therefore, using the biological physics principle, the total modulus is reported as a derivation from an elastic component or storage modulus and a viscous component or loss modulus. The dynamic oscillatory test starts with a determination of the viscoelastic region for the deformation, followed by the effects of frequency, time, and temperature on the development of a strong food structure or structural loss.

**Keywords :** dynamic oscillation on shear, viscoelasticity, rheology ; food structure

\*Corresponding author E-mail : naksit\_pan@cmru.ac.th



## บทนำ

อาหารเป็นวัสดุที่ประกอบขึ้นมาจากองค์ประกอบทางเคมีหลายชนิด ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน วิตามิน แร่ธาตุ และน้ำ ทำให้เกิดโครงสร้างเนื้อวัสดุอาหารที่แตกต่างกัน ซึ่งสัดส่วนขององค์ประกอบเหล่านี้ในโครงสร้างอาหารมีผลต่อสถานะของอาหารนั้น โดยทั่วไปจัดเป็นของแข็งและของเหลว อาหารที่มีสถานะเป็นของแข็ง เช่น แครกเกอร์ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป แท่งซ็อกโกแลต เมื่อได้รับแรงภายนอกกระทำ หรือเรียกว่า ความเค้น (stress) ก็จะมีการสะสมความเค้นในเนื้อวัสดุเพิ่มมากขึ้นจนเกิดเป็นความเครียด (strain) ในโครงสร้าง และหากความเครียดนั้นมากเกินไปที่เนื้อวัสดุจะสะสมแรงภายนอกที่มากกระทำนั้นได้ เนื้ออาหารจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนรูปและเสียหายทางโครงสร้างไป (deformation) ในที่สุด ทั้งนี้ พฤติกรรมที่ยืดหยุ่นของของแข็งอธิบายได้ด้วยกฎความยืดหยุ่นของฮุก (Hook's law of elasticity) โดยแสดงด้วยค่ามอดูลัสความยืดหยุ่น (elasticity modulus) ที่เป็นค่าเฉพาะของอาหารแต่ละชนิด ระบุถึงอัตราส่วนความเค้นต่อความเครียด ดังสมการที่ (1) หากมีการเปลี่ยนแปลงค่ามอดูลัสของอาหารให้มากกว่าค่านี้ วัสดุจะไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม

$$\text{มอดูลัสความยืดหยุ่น } (E) = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{ความเครียด } (\gamma)} \quad (1)$$

อาหารที่เป็นของเหลว เช่น น้ำผลไม้ น้ำมันโค น้ำมันพืช เมื่อได้รับแรงมากกระทำกับของเหลวค่าหนึ่ง ของเหลวนั้นมีคุณสมบัติของวัสดุในการต้านทานการไหล หรือเรียกว่า ความหนืด (viscosity) และหากแรงที่กระทำมากขึ้นจนมากเกินไปค่าความหนืดของของเหลวนั้น ทำยที่สุดของเหลวจะเกิดการไหล (flow) พฤติกรรมการไหลของของเหลวพื้นฐานอธิบายได้ด้วยกฎของนิวตัน (Newton's law) ความหนืดของอาหารแต่ละชนิดจึงมีค่าคงที่ ณ เวลาและอุณหภูมิคงที่ ความหนืดของอาหารเปลี่ยนแปลงได้จากกรณีแรก การลดความเค้นที่ให้ของเหลว หรือ กรณีที่สอง การเพิ่มอัตราการเฉือน (shear rate) ให้มากขึ้น โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วของชั้นของเหลวที่เกิดจากแรงเฉือนต่อระยะห่างระหว่างชั้นของเหลวนั้น ซึ่งทั้งสองกรณีส่งผลให้ค่าความหนืดมีค่าลดลงและเกิดการเสียสภาพอย่างรวดเร็วจนของเหลวนั้นเริ่มไหลได้ ดังสมการที่ (2)

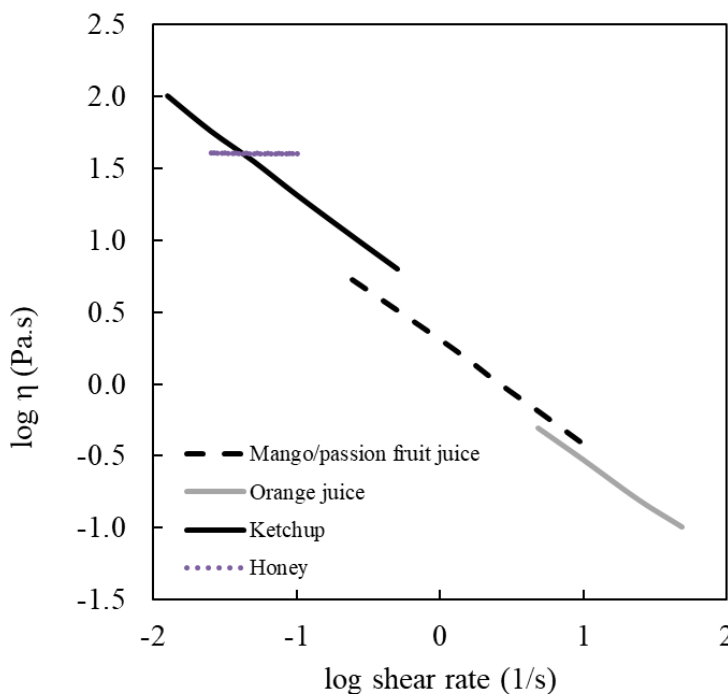
$$\text{ความหนืด } (\eta) = \frac{\text{ความเค้น } (\sigma)}{\text{อัตราเฉือน } (\gamma^*)} \quad (2)$$

พฤติกรรมการไหลของอาหารเหลวแสดงด้วยค่าความหนืด ซึ่งในหน่วยสากลเป็นระบบเมตริก คือ พาสคาลคูณวินาที (Pa.s) และจำแนกลักษณะการไหลได้ 2 แบบที่สำคัญคือ ของไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian fluid) และ ของไหลแบบไม่ใช่นิวโตเนียน (non-Newtonian fluid)

ของไหลแบบนิวโตเนียนมีความหนืดไม่ขึ้นกับอัตราเฉือน ของไหลประเภทนี้เป็นเนื้อเดียว ไม่มีสารแขวนลอยหรือคอลลอยด์ผสม หากของไหลนี้มีความหนืดเพิ่มขึ้นจึงต้องเพิ่มอัตราเฉือนให้มากขึ้นเพื่อรักษาอัตราการไหลให้คงที่ ตัวอย่างเช่น น้ำผึ้ง มีปริมาณ

ของแข็งร้อยละ 80 ประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตส กลูโคส มีความเหนียวหนืด พฤติกรรมเป็นนิวโตเนียนแต่น้ำผึ้งไหลได้หากออกแรงเฉือนมากพอ ดังภาพที่ 1

ของไหลแบบนอนนิวโตเนียน มีความแตกต่างในการตอบสนองต่ออัตราเฉือนที่เพิ่มขึ้นไป เช่น ของไหลนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติก (pseudoplastic) ที่มีความหนืดลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน เช่น น้ำผลไม้ ซอสมะเขือเทศ (ภาพที่ 1) ซึ่งเป็นพฤติกรรมการไหลของอาหารส่วนใหญ่ เพราะมีสารแขวนลอย และ สารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน พอลิแซ็กคาไรด์ ในรูปคอลลอยด์หรืออิมัลชัน เป็นองค์ประกอบในเนื้ออาหาร นอกจากนี้ยังมีของไหลนอนนิวโตเนียนแบบไดลาแทนต์ (dilatant) ที่กลับมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามการเฉือนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น สารละลายน้ำแป้งเมื่อกวนให้ความร้อนไปตามเวลา ความหนืดเพิ่มขึ้นได้ การทดสอบอาหารเหลวโดยเพิ่มอัตราเฉือนให้มากขึ้นมักศึกษาด้วยเครื่องวัดความหนืดที่มีแกนกลางหมุนได้ ให้อาหารสัมผัสแกนหมุนนั้น การต้านการหมุนของอาหารเหลวจะวัดและคำนวณออกมาเป็นความหนืดได้ ซึ่งการทดสอบแบบนี้เป็นการทดสอบที่ทำให้ตัวอย่างเสียสภาพทางโครงสร้างไป (large deformation)



ภาพที่ 1 พฤติกรรมการตอบสนองต่ออัตราเฉือนของอาหารเหลวบางชนิด ที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส

กฎความยืดหยุ่นของฮุกและกฎของนิวตันเป็นกฎพื้นฐานที่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้อธิบายวัสดุอาหารบางชนิดที่มีพฤติกรรมแตกต่างไปจากของแข็งและของเหลว เช่น โยเกิร์ตที่มีลักษณะคล้ายของแข็งเมื่อตั้งทิ้งไว้ แต่เมื่อกวนโยเกิร์ตก็กลับมีการไหลได้ หรือ ซอสมะเขือเทศและซอสพริกเมื่อบรรจุในขวดพลาสติกไม่เกิดการไหลจนกว่าจะออกแรงบีบ เป็นต้น

วัตถุประสงค์หลักในบทความนี้ คือ วัสดุอาหารบางชนิดมีพฤติกรรมผสมระหว่างของแข็งและของเหลว กล่าวคือ มีพฤติกรรมหยุ่นและหนืด ทั้งนี้เมื่อได้รับแรงกระทำจากภายนอกไม่มาก โครงสร้างของอาหารเหล่านี้ยังคงสภาพ หากมีการเพิ่มแรง

กระทำให้มากขึ้นโครงสร้างอาหารอาจเสียสภาพไป การศึกษาสมบัติยืดหยุ่นและหนืดในอาหารจึงเป็นการศึกษาเฉพาะในอีกรูปแบบหนึ่ง เรียกว่า สมบัติวิสโคอิลาสติกซิตี (viscoelasticity) ของอาหาร ขณะทดสอบยังรักษาสภาพทางโครงสร้างของวัสดุอาหารไว้

สมบัติยืดหยุ่นและหนืดในอาหาร

การศึกษาสมบัติยืดหยุ่นและหนืด หรือ วิสโคอิลาสติกซิตีในอาหารจัดเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและพฤติกรรมกลการไหลที่ผสมระหว่างของแข็งและของเหลว ซึ่งจัดเป็นส่วนหนึ่งของศาสตร์ที่เรียกว่า ริโอโรยี หรือ วิทยากระแส (rheology)

สมบัติยืดหยุ่นและหนืดในอาหารขึ้นกับการควบคุมเวลาในการสังเกตที่นานพอ เวลานานทำให้วัสดุอาหารเกิดการกลับคืนตัวสู่โครงสร้างดั้งเดิมก่อนได้รับแรงกระทำจากภายนอก ของเหลวในอุดมคติที่มีพฤติกรรมตามกฎของนิวตันมีค่าเวลาในการคลายตัวเป็นศูนย์ ส่วนของแข็งในอุดมคติกลับมีค่าเวลาในการคลายตัวเป็นอนันต์ โดยกำหนดจากเลขเดบอราห์ (Deborah number,  $De$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างค่าเวลาในการคลายตัว (relaxation time) กับ เวลาในการทดสอบ ดังสมการที่ (3)

$$De = \frac{\tau}{T} \quad (3)$$

โดย  $De$  คือเลขเดบอราห์ (ไม่มีหน่วย),  $\tau$  คือ เวลาในการคลายตัว (วินาที) และ  $T$  คือ เวลาในการทดสอบ (วินาที)

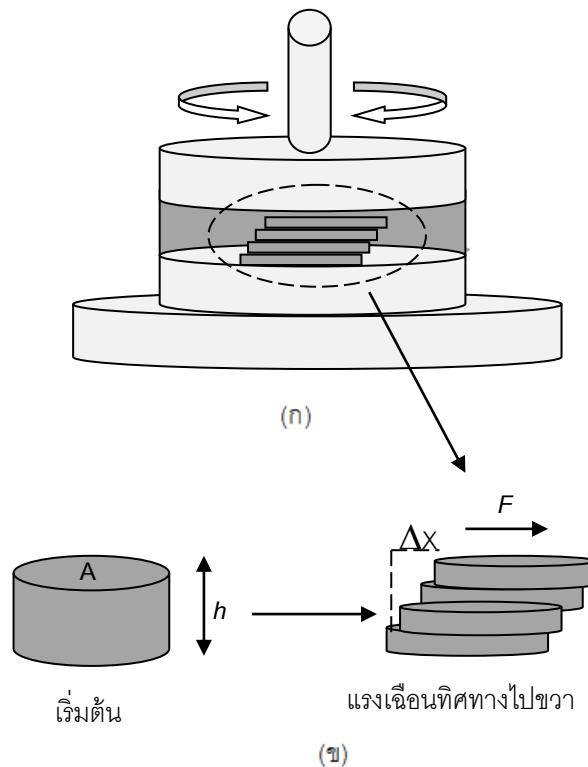
วัสดุอาหารที่มีพฤติกรรมเหมือนของเหลวมีค่าตัวเลขเดบอราห์น้อยกว่า 1 มาก ในขณะที่วัสดุอาหารที่มีพฤติกรรมเหมือนของแข็งมีค่ามากกว่า 1 ซึ่งการทดสอบสมบัติยืดหยุ่นและหนืดนั้น วิธีการทดสอบสั่นเฉือนพลวัต (dynamic oscillatory shear testing) เป็นวิธีการที่สามารถแปรช่วงเวลาในการสังเกตที่ยาวนานพอเพื่อให้วัสดุอาหารที่ยืดหยุ่นและหนืดเกิดการคลายตัว (เลขเดบอราห์น้อยกว่า 1) และการสังเกตในช่วงเวลาสั้น ๆ ไม่ให้ตัวอย่างอาหารเกิดการคลายตัว (เลขเดบอราห์มากกว่า 1) กลับมาสู่สภาพดั้งเดิมได้ทัน (Tattiyakul, 2014)

การทดสอบการสั่นเฉือนพลวัต (dynamic oscillatory shear testing)

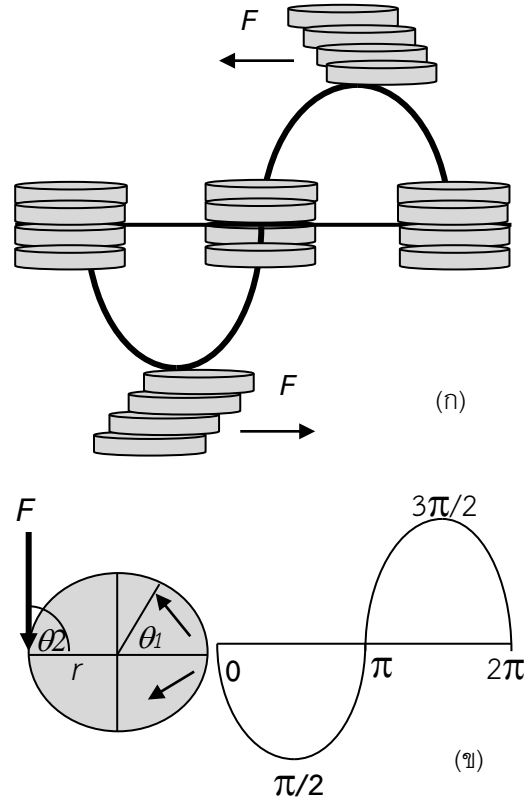
การทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตใช้หลักการของการวัดความหนืด โดยวางตัวอย่างอาหารระหว่างแผ่นวัสดุผิวเรียบสองแผ่นที่มีระยะห่าง ( $h$ ) ดังภาพที่ 2 วัสดุผิวเรียบด้านล่างยึดตรึงไว้ ส่วนวัสดุผิวเรียบด้านบนสามารถเคลื่อนที่แนวราบได้โดยอิสระ

การควบคุมระยะห่างและแรงจากภายนอก ( $F$ ) ที่มากระทำกับตัวอย่างอาหารโดยส่งผ่านจากแผ่นวัสดุผิวเรียบด้านบนผ่านพื้นผิวของแผ่นวงกลม ดังภาพที่ 2(ก) จึงทำให้เกิดแรงเฉือน ( $F/A$ ) และวัสดุอาหารเคลื่อนที่ไปด้วยระยะทางหนึ่งจากจุดเริ่มต้น ( $\Delta X$ ) ดังภาพที่ 2(ข) การเคลื่อนที่ของแผ่นวงกลมเรียบด้านบนจากจุดเริ่มต้น จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางคาบการสั่นอย่างต่อเนื่องโดยแกนของแผ่นเรียบวงกลมหมุนบิดไปทางซ้ายเป็นมุมองศาที่แน่นอน ( $\theta_1$ ) ต่อด้วยการหมุนกลับมาที่จุดเริ่มต้นอีกครั้ง จากนั้นแกนหมุนจึงบิดไปด้านขวาเป็นมุมองศาเดียวกับมุมบิดครั้งแรกและเคลื่อนกลับมาที่จุดเริ่มต้นอีกครั้ง การเคลื่อนที่แบบสั่นเป็นคาบนี้จึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง การสั่นเฉือนพลวัต  $1/4$  รอบกำหนดให้ได้มุม 90 องศา หรือ  $\pi/2$  เรเดียน การเคลื่อนที่ไปครบ  $1/2$  รอบตามมุม 180 องศา หรือ  $\pi$  เรเดียน และการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบจึงให้มุมรอบวงกลมเท่ากับ 360 องศา หรือ  $2\pi$  เรเดียน ดังภาพที่ 3(ก)

การสั่นพลาวัตที่มีลักษณะการสั่นกลับไปด้านซ้ายและกลับมาด้านขวาสลับกัน พบว่ามีรูปแบบการแกว่งขึ้นลงเป็นลูกคลื่นแบบฮาร์มอนิกที่สามารถนำเสนอในรูปแบบกราฟของฟังก์ชันตรีโกณมิติ (กราฟไซน์, sine graph) พิจารณาจากแรงบิดที่ก่อให้เกิดการสั่นเป็นคลื่นไซน์ที่แน่นอนเพื่อติดตามพฤติกรรมยืดหยุ่นและหนืดของวัสดุอาหารที่เปลี่ยนแปลงสภาพทางโครงสร้างไปตามระยะเวลาของคาบการสั่น เนื่องจากมีแรงเฉือนกระทำอย่างต่อเนื่องจึงทำให้สังเกตพฤติกรรมของตัวอย่างอาหารในเชิงโครงสร้างออกมาได้



**ภาพที่ 2** การสั่นเฉือนพลาวัต (ก) การวางตัวอย่างบนแผ่นเรียบที่ประกบด้านบนบนด้วยทรงกระบอก และ (ข) แรงบิดเฉือนไปทางด้านขวา



ภาพที่ 3 การสั่นเขื่อนพลวัต (ก) การเคลื่อนที่แบบคลื่นไซน์ และ (ข) ความถี่เชิงมุมในหน่วยเรเดียน

จากภาพที่ 3(ข) หากมองจากด้านบนตรงลงมาที่ทรงกระบอกพื้นผิวเรียบหนึ่งที่กำลังหมุนได้อิสระ ณ ที่ตำแหน่งด้านล่าง ทรงกระบอกมีตัวอย่างวัสดุอาหารสัมผัสกับผิวเรียบของทรงกระบอกนี้ และอีกระนาบด้านล่างของวัสดุอาหารสัมผัสกับพื้นผิว ทรงกระบอกเรียบอีกชั้นที่มีฐานยึดตรึงเอาไว้ เมื่อมีแรงหนึ่งมากระทำกับทรงกระบอกด้านบน คือแรง  $F$  ทางด้านข้างเพื่อให้ ทรงกระบอกนี้เกิดการหมุนได้ โดยมีจุดศูนย์กลางของทรงกระบอกเป็นจุดหมุน และมีมุมที่กระทำต่อทรงกระบอกมุม ค่าหนึ่ง ( $\theta_2$ ) ตามระยะห่างระหว่างจุดหมุนและจุดที่มีแรงมากระทำคือรัศมี ( $r$ ) เรียกแรงที่มากระทำกับทรงกระบอกแล้วทำให้เกิดการบิดหมุนนี้ว่า ทอร์ก (torque,  $M$ ) ตามสมการที่ (4) และ สมการที่ (5)

$$M = r \cdot F \cdot \sin\theta \quad (4)$$

(โดย  $\theta_2$  ในภาพคือ  $90^\circ$ ) ดังนั้นสมการที่ 4 ลดรูปลงเหลือสมการที่ (5)

$$M = r \cdot F \quad (5)$$

ผลจากการให้แรงบิดหมุนที่ด้านข้างทรงกระบอกต่อวัสดุอาหารที่สัมผัสแผ่นเรียบด้านล่างของทรงกระบอกนั้น ทำให้ศึกษาพฤติกรรมยืดหยุ่นและเหน็ดได้จากการตอบสนองของวัสดุอาหารต่อแรงกระทำ โดยแบ่งได้เป็นหลายกรณีดังนี้

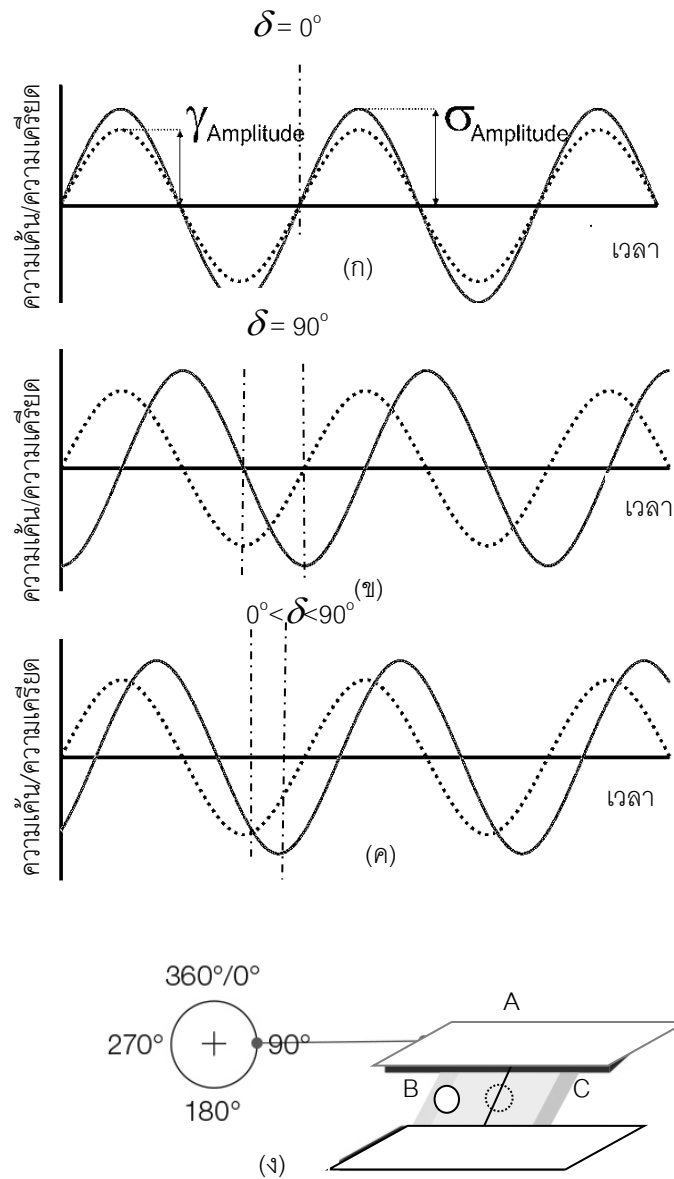
วัสดุที่เป็นของแข็งในอุดมคติตามกฎของฮุก การให้แรงกระทำเข้าไป พบว่า วัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นสูงจึงไม่มีการหักตัวเมื่อถูกความเค้น ( $\sigma$ ) นี้และการตอบสนองของความเครียด ( $\eta$ ) ที่เกิดขึ้นทำให้วัสดุนั้นเกิดการการคืนตัวได้ทันที ความเค้นสูงสุดจะทำให้เกิดความเครียดหรือการเสียหายได้สูงสุด ดังนั้นเมื่อนำข้อมูลไปสร้างกราฟลูกคลื่นแสดงเปรียบเทียบค่าความเค้นและความเครียดที่วัดได้จึงเป็นคลื่นที่อยู่ในมุมเฟสเดียวกันและมีความต่างของมุมเฟส ( $\delta$ ) เป็น  $0^\circ$  ดัง ภาพที่ 4(ก)

วัสดุที่เป็นของเหลวในอุดมคติตามกฎของนิวตัน วัสดุนี้มีธรรมชาติที่พร้อมจะไหลได้ง่ายเมื่อมีแรงมากระทำ ดังนั้นการกลับคืนไปสู่สภาพเดิมจึงช้ากว่าวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง นั่นคือวัสดุมีการตอบสนองต่อความเครียดน้อยมาก หรือความเค้นสูงสุดทำให้เกิดอัตราการไหลมากที่สุด ส่งผลให้คลื่นที่ได้มีลักษณะเป็นคลื่นที่ไม่ได้อยู่ในมุมเฟสเดียวกัน คือ มีความแตกต่างของมุมเฟส ( $\delta$ ) เป็น  $90^\circ$  ดังภาพที่ 4 (ข)

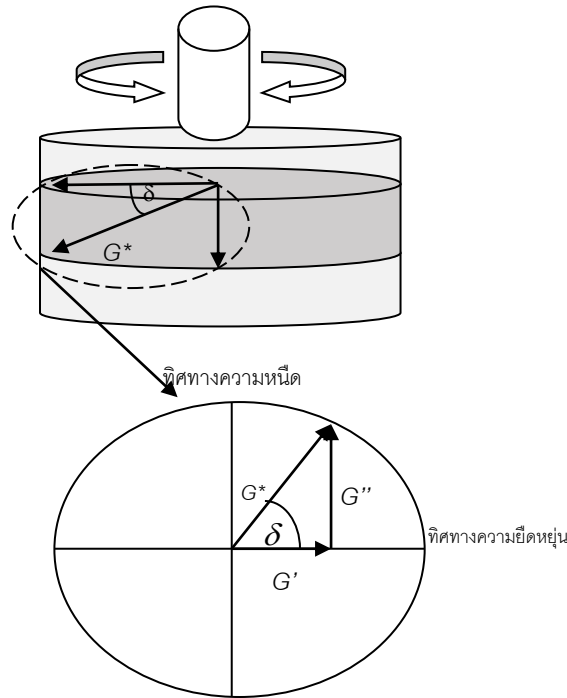
กรณีวัสดุยืดหยุ่นและเหน็ด พบว่า พฤติกรรมการตอบสนองต่อความเค้นนั้นช้ากว่าวัสดุของแข็งจึงทำให้ลักษณะคลื่นมีเฟสที่ซ้อนทับกันอยู่ระหว่างความเค้นและความเครียดโดยมีมุมองศาที่ความต่างอยู่ระหว่าง  $0^\circ$  และ  $90^\circ$  ดังภาพที่ 4(ค) โดยการพักโครงสร้างในระหว่างที่ตัวอย่างบิดเฉือนนั้นเป็นเพราะมีองค์ประกอบทางเคมีบางชนิดที่มีความเหน็ดผสมอยู่ในเนื้อวัสดุนั้น ๆ (Gunasekaran, and Mehmet 2000; Tabilo-Munizaga, and Barbosa-Canovas, 2005)

ในขณะที่เกิดการสั่นเฉือนของแกนหมุนทรงกระบอกไปด้านซ้ายและหมุนกลับมาด้านขวาเป็นจังหวะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพตัวอย่างวัสดุอาหารด้านบนที่สัมผัสกับพื้นผิวแกนทรงกระบอกแผ่นเรียบมากกว่าผิวสัมผัสเรียบที่อยู่ด้านล่าง โดยตัวอย่างที่ถูกทอร์กกระทำนี้จะเกิดการต้านทานการเสียหายทางโครงสร้างที่แสดงออกมาในรูปของค่ามอดูลัส (modulus,  $G^*$ ) ซึ่งเป็นค่าเฉพาะของตัวอย่างหนึ่ง ๆ โดยตัวอย่างที่ยืดหยุ่นและเหน็ดมีองศาของค่ามอดูลัสนี้ทำมุมกับระนาบผิวตัวอย่างที่สัมผัสกับทรงกระบอกผิวเรียบเป็นมุมหนึ่ง คือ  $\delta$  ดังภาพที่ 5 และมีสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมอดูลัสกับแรงเฉือน ( $\sigma^*$ ) และความเครียดดังสมการที่ (6)

$$G^* = \frac{\sigma^*}{\gamma} \quad (6)$$



ภาพที่ 4 การตอบสนองของวัสดุอาหารที่มีโครงสร้าง (ก) ของแข็ง (ข) ของเหลว (ค) หยุนและหนืด และ (ง) การเหลื่อมเฟสของ ตัวอย่างอาหารที่มีคุณสมบัติหยุนและหนืด



**ภาพที่ 5** พารามิเตอร์ของวัสดุที่มีพฤติกรรมแบบหยุ่นและหนืดตามหลักการของสามเหลี่ยมพีทาโกรัส

จากภาพที่ 5 เห็นว่าทิศทางการเปลี่ยนแปลงของค่ามอดุลัส  $G^*$  ที่แสดงถึงการต้านทานการสั่นเฉือนต่อเนื่องเป็นเวกเตอร์ตามมุมองศา  $\delta$  เมื่อทอร์คเคลื่อนไปทางด้านซ้าย การประยุกต์ใช้หลักของสามเหลี่ยมพีทาโกรัส (Pythagoras theorem) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ค่ามอดุลัสในแนวนอนกับระบบและแนวตั้งฉากกับระบบ (Mezger, 2014; TA Instruments, 2019) พบว่ามอดุลัสหนืด (viscous modulus,  $G''$ ) เป็นมอดุลัสในทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุนทรงกระบอกเพราะมีองศาความแตกต่างคือ  $90^\circ$  แสดงถึงการสูญเสียสภาพของวัสดุอาหารด้วยการกระจายแรงเฉือนที่มากกระทำออกไปในรูปของความร้อน จึงเรียกอีกชื่อได้ว่ามอดุลัสสูญเสีย (loss modulus) ตามสมการที่ (7)

$$G'' = \frac{\sigma^* \sin \theta}{\gamma} \quad (7)$$

มอดุลัสยืดหยุ่น (elastic modulus,  $G'$ ) เป็นมอดุลัสในทิศทางขนานกับแกนหมุนทรงกระบอกเพราะมีองศาความแตกต่างคือ  $0^\circ$  แสดงถึงการรักษาสภาพของวัสดุอาหารในการเก็บแรงเฉือนที่มากกระทำต่อโครงสร้างวัสดุ จึงเรียกอีกชื่อได้ว่ามอดุลัสสะสม (storage modulus) แสดงดังสมการที่ (8)

$$G' = \frac{G^* \cos \theta}{\gamma} \quad (8)$$

ทั้งนี้มอดูลัสหนืดและมอดูลัสยืดหยุ่นเมื่อนำค่ารวมกันมีความสัมพันธ์กับมอดูลัสทั้งหมดดังสมการที่ (9)

$$G^* = (G' + G'')^{1/2} \quad (9)$$

นอกจากนี้มีค่าพารามิเตอร์อีก 2 ค่าที่เกี่ยวข้องกับการสั่นเฉือนพลวัตของตัวอย่างอาหารที่ยืดหยุ่นและหนืด ได้แก่ ค่าแทนเดลตา ( $\tan \delta$ ) สมการที่ (10) และ ค่าความหนืดซับซ้อน (complex viscosity,  $\eta^*$ ) สมการที่ (11) ดังนี้

$$\tan \delta = \frac{G''}{G'} \quad (10)$$

ค่าแทนเดลตา คือ อัตราส่วนระหว่างมอดูลัสสูญเสียและมอดูลัสยืดหยุ่น เมื่อนำค่านี้เข้าใกล้หนึ่งแสดงว่าตัวอย่างแสดงพฤติกรรมคล้ายของเหลวในอุดมคติที่เสียสภาพจากการสั่นเฉือนพลวัตต่อเนื่องได้ โดยมีการสูญเสียในรูปของการสั่นของวัสดุ การเกิดเสียง หรือการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน ในทางตรงกันข้ามหากค่านี้เข้าใกล้ศูนย์แสดงว่า วัสดุมีความยืดหยุ่นได้จึงไม่เกิดการสูญเสียโครงสร้างไป ดังนั้นจึงมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งในอุดมคติ

$$\eta^* = \frac{G^*}{\omega} \quad (11)$$

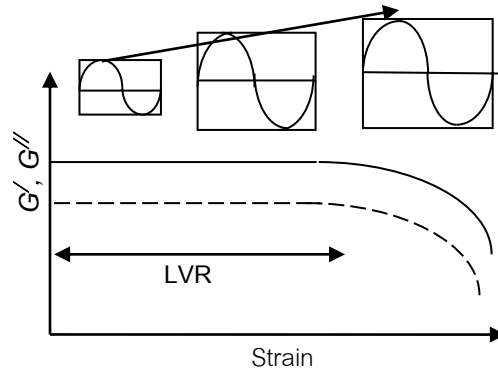
ค่าความหนืดซับซ้อน แสดงค่ามอดูลัสทั้งหมดที่เป็นสัดส่วนกับความถี่เชิงมุม (เรเดียน ต่อ วินาที) ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดขึ้นในสถานะที่คงตัว (steady state) ระหว่างการสั่นเฉือนพลวัต

#### ค่าตัวแปรในการทดสอบการสั่นเฉือนพลวัต

การสั่นเฉือนพลวัตเป็นการทดสอบทางกายภาพชนิดหนึ่งที่ใช้ทดสอบตัวอย่างอาหารที่มีลักษณะยืดหยุ่นและหนืด โดยการทดสอบตัวแปรกายภาพต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางโมเลกุลขององค์ประกอบทางเคมีอาหาร ได้แก่ ความเค้น ความถี่ เวลา และอุณหภูมิ (Tunick, 2000) รายละเอียด ดังต่อไปนี้

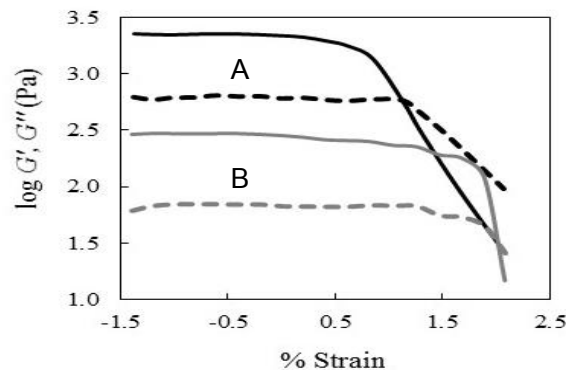
(1) ความเครียด หรือการเสียสภาพทางโครงสร้าง เป็นตัวแปรตามสืบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความเค้น โครงสร้างของวัสดุอาหารยืดหยุ่นและหนืดที่ได้รับความเค้นที่มากเกินไปจะทำลายโครงสร้างภายในระบบอาหารจนเกิดการเสียสภาพ การทดสอบแบบนี้เรียกว่า สเตรน สวีฟ หรือ แอมพลิจูด สวีฟ (strain/amplitude sweep)

หลักการทดสอบจะกำหนดความถี่ อุณหภูมิ ของวัสดุอาหารให้คงที่ตลอดการทดลองแต่เพิ่มระดับของความเครียดหรือการเสียหายทางโครงสร้างให้มากขึ้น แล้วติดตามค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและมอดุลัสหนืด การเพิ่มระดับการเสียหายโครงสร้างให้มากขึ้น ส่งผลให้ค่ามอดุลัสทั้งสองค่าลดลง แต่มีช่วงหนึ่งที่มอดุลัสทั้งสองมีค่าคงที่ต่อเนื่องแสดงว่าโครงสร้างภายในวัสดุยังไม่ถูกทำลาย เรียกว่า ขอบเขตสมบัติยืดหยุ่นและหนืดในแนวเส้นตรง (linear viscoelastic region, LVR) ผลที่ได้แสดงใน ภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ขอบเขตสมบัติยืดหยุ่นและหนืดในแนวเส้นตรงในระนาบจากการทดสอบสเตรนสวีฟ

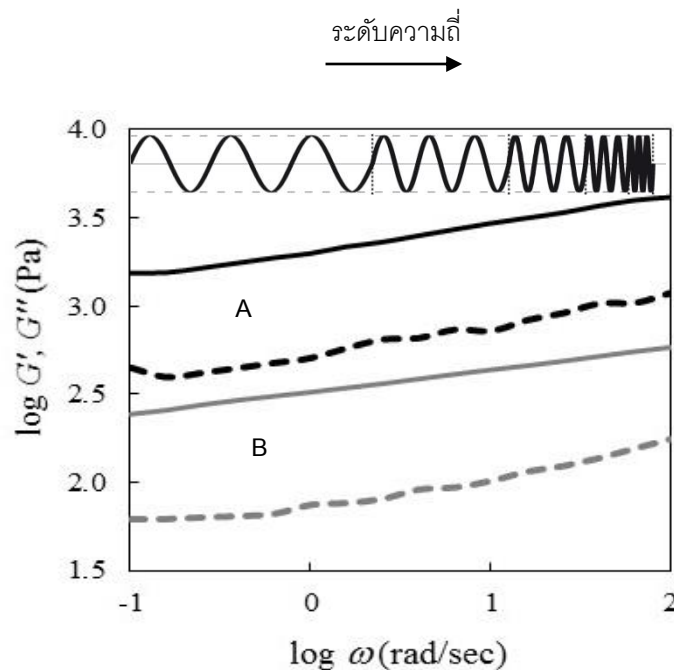
โยเกิร์ตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่แสดงสมบัติยืดหยุ่นและหนืดได้ จากภาพที่ 7 เปรียบเทียบโยเกิร์ตสองยี่ห้อคือ ยี่ห้อ A และ ยี่ห้อ B โยเกิร์ตยี่ห้อ A มีค่ามอดุลัสสะสมและมอดุลัสสูญเสียมากกว่าโยเกิร์ตยี่ห้อ B โยเกิร์ตยี่ห้อ A จึงมีโครงสร้างของเคิร์ด (curd) ที่เป็นโปรตีนเคซีนเกาะกับแคลเซียมที่แข็งแรงกว่า โยเกิร์ตยี่ห้อ B แต่เมื่อเพิ่มแรงเค้นมากขึ้น (แอมพลิจูดสูงขึ้น) ส่งผลให้การเสียหายของโยเกิร์ตชนิด A ที่มีความแข็งแต่เปราะเกิดการเสียหายได้ง่ายกว่า สังเกตจากขอบเขตรักษาสสมบัติยืดหยุ่นและหนืดที่สั้นกว่าโยเกิร์ตชนิด B โยเกิร์ตชนิด A เป็นลักษณะของโยเกิร์ตแบบคงตัว (set yoghurt) ที่ให้เนื้อโยเกิร์ตเกิดเจลคงตัวในถ้วยบรรจุ ส่วนชนิด B เป็นโยเกิร์ตแบบคนที่มีกรคนผสมให้ขึ้นในถังผสมก่อนแล้วจึงบรรจุในถ้วยจึงมีความคงตัวน้อยกว่าแต่เป็นเจลที่ต้านทานแรงกระทำได้มากกว่า



ภาพที่ 7 สเตรน สวีฟ ผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสองยี่ห้อ คือ ยี่ห้อ A (เส้นสีดำ) และยี่ห้อ B (เส้นสีเทา): (—) ค่ามอดุลัสยืดหยุ่น และ (-----) มอดุลัสหนืด วัดที่ 1 รอบต่อวินาที อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ช่องว่างใส่ตัวอย่าง 1 มิลลิเมตร

(2) ความถี่เชิงมุม การเพิ่มความถี่ในรอบการสั่นเฉือนในแต่ละวงรอบการบิดแกนหมุนไปด้านซ้ายและด้านขวามากขึ้น ส่งผลให้เวลาที่ตัวอย่างที่ยืดหยุ่นและเหนียวมีเวลาดำเนินการพักตัว จากนั้นศึกษาพฤติกรรมของวัสดุอาหาร การทดสอบแบบนี้เรียกว่า ฟรีควเอนซี สวีฟ (frequency sweep)

หลักการทดสอบนี้จะกระทำกับตัวอย่างอาหารที่ไม่เสียสภาพทางโครงสร้าง นั่นคือกำหนดความเค้นหรือความเครียดภายในขอบเขตรักษาสสมบัติยืดหยุ่นและเหนียว หรือ LVR ณ อุณหภูมิคงที่หนึ่ง จากนั้นแปรผันความถี่เชิงมุมกับตัวอย่างอาหาร โดยเริ่มจากความถี่เชิงมุมที่มีความถี่ต่ำไปที่ความถี่เชิงมุมสูง หรือเริ่มจากความถี่เชิงมุมสูงกลับมาที่ความถี่เชิงมุมต่ำ ดังภาพที่ 8

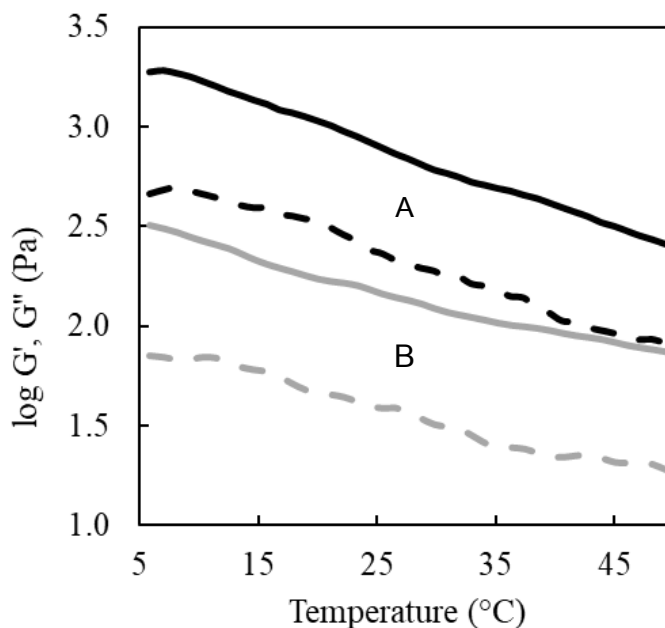


ภาพที่ 8 ฟรีควเอนซี สวีฟ ผลิตรกณฑ์โยเกิร์ตสองยี่ห้อ คือ ยี่ห้อ A (เส้นสีดำ) และยี่ห้อ B (เส้นสีเทา): (—) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และ (-----) มอดูลัสเหนียว วัดค่าที่ร้อยละเสียสภาพ 0.5 อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ช่องว่างตัวอย่าง 1 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบการเพิ่มความถี่เชิงมุมจากค่าต่ำ (0.1 เรเดียน ต่อ วินาที) ไปความถี่เชิงมุมที่สูง (100 เรเดียน ต่อ วินาที) กระทำกับโยเกิร์ต ยี่ห้อ A และ ยี่ห้อ B นั้น การกำหนดการทดสอบที่ร้อยละการเสียสภาพ 0.5 (หรือ 0.5% strain) จากช่วง LVR (0-1% strain) ในภาพที่ 7 พบว่า โยเกิร์ต ยี่ห้อ A และ ยี่ห้อ B มีพฤติกรรมคล้ายกัน นั่นคือ โยเกิร์ตมีค่ามอดูลัสสะสมมากกว่ามอดูลัสสูญเสีย ดังนั้นจึงแสดงพฤติกรรมคล้ายของแข็ง โดยค่าความต่างของมอดูลัสสะสมมากกว่ามอดูลัสสูญเสียประมาณ 0.5 เท่า (ค่าความแตกต่างที่น้อยกว่า 1 แสดงว่า เจลโยเกิร์ตเป็นเจลอ่อนนุ่ม) เมื่อเพิ่มความถี่เชิงมุมให้มากขึ้น โยเกิร์ตมีค่ามอดูลัสสะสมมากกว่ามอดูลัสสูญเสียเพิ่มขึ้นแสดงว่า เจลโยเกิร์ตมีพฤติกรรมคล้ายของแข็งมากขึ้นเพราะโครงสร้างโมเลกุลเคซีนที่อยู่กระจายทั่วในเนื้อโยเกิร์ตได้รับการสั่นเฉือนที่ความถี่สูงค่อย ๆ เคลื่อนที่มารวมตัวกันเป็นร่างแหของเจลที่แข็งแรงมากขึ้น

(3) เวลา การปล่อยให้ตัวอย่างอาหารเป็นไปตามสภาวะที่กำหนด เช่น กำหนดค่าร้อยละการเสียดสภาพ ความถี่ และ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ เช่น การเกิดเจลของสารละลายน้ำแป้ง ที่ 65 องศาเซลเซียส หรือการเกิด เจลของสารละลายเจลาตินที่ 4 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกับการเกิดเจลในน้ำนมหมักจุลินทรีย์กลุ่มแลคติกเป็นเจลโยเกิร์ต เป็นการ เปลี่ยนสภาวะจากของเหลวไปเป็นกึ่งของแข็งตามเวลาในการบ่มตัวอย่าง ณ อุณหภูมิหนึ่ง การทดสอบนี้เรียกว่า ทาม สวีฟ (time sweep)

(4) อุณหภูมิ การเพิ่มหรือลดอุณหภูมิมีผลต่อโครงสร้างของวัสดุอาหารใน 2 กรณี ได้แก่ การเสียโครงสร้างเจลเมื่ออุณหภูมิ สูงขึ้น ในกรณีการหลอมของเนื้อมะพร้าวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจากอุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียสขึ้นไป การเสียดสภาพความยืดหยุ่นของเจล ไข่ขาวดิบเป็นเจลแข็งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หรือ การลดอุณหภูมิต่ำลงถึง 4 องศาเซลเซียสให้สารละลายเจลาตินเกิดเจล ที่คงตัว หรือการเสียดสภาพโปรตีนเคซีนน้ำนมในโยเกิร์ตทำให้ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และมอดูลัสหนืดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (ภาพที่ 9) การทดสอบลักษณะนี้กำหนดค่าร้อยละการเสียดสภาพต่ำ ความถี่ต่ำ แต่ค่อย ๆ ลดอุณหภูมิ หรือ เพิ่มอุณหภูมิ หรือ เปลี่ยนแปลงค่าทั้งสองทีละน้อยเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของอาหารทั้งที่ผันกลับหรือไม่ผันกลับ การทดสอบแบบนี้เรียกว่า เทมเพอร์เจอร์สวีฟ (temperature sweep) การทดสอบแบบนี้เป็นประโยชน์มากต่อการนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมของวัสดุอาหารที่มี ลักษณะยืดหยุ่นและหนืดที่เปลี่ยนไปและสัมพันธ์กับการเปลี่ยนโครงสร้างไปสู่สภาพใกล้เคียงของแข็ง เช่น การเกิดเจล หรือ ของเหลว ที่สามารถไหลได้



ภาพที่ 9 เทมเพอร์เจอร์สวีฟ ผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตสองยี่ห้อ คือ ยี่ห้อ A (เส้นสีดำ) และยี่ห้อ B (เส้นสีเทา): (—) ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และ (-----) มอดูลัสหนืด วัดค่าที่ร้อยละเสียดสภาพ 0.5 ความถี่เชิงมุม 100 เรเดียน ต่อ วินาที ช่องว่างตัวอย่าง 1 มิลลิเมตร

การประยุกต์การทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตในผลิตภัณฑ์อาหาร

การทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตเป็นวิธีการทดสอบที่ใช้ในการศึกษาโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะกึ่งแข็ง (semi solid foods) ที่แสดงสมบัติที่ยืดหยุ่นและเหนียวได้ การทดสอบมีการแปรสภาวะการทดสอบ ได้แก่ ความเค้น ความเครียด (หรือการเสียสภาพทางโครงสร้าง) ความถี่ เวลาและอุณหภูมิเพื่อศึกษาเชิงลึกถึงโครงสร้างอาหาร เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในระดับไมเลกุลของผลิตภัณฑ์นั้น วิธีการนี้จึงใช้ทดสอบอาหารในกลุ่มผลิตภัณฑ์น้ำมันที่มีความเป็นอิมัลชัน (emulsion) อาหารที่มีลักษณะเจลจากการเติมไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloids) เติมหคาร์โบไฮเดรต เช่น สตาร์ช (starch) พอลิแซ็กคาไรด์ ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปปรับส่วนผสมอาหารกึ่งแข็งให้เหมาะสมกับผู้บริโภค การปรับชนิดของบรรจุภัณฑ์ การปรับกระบวนการผลิตและการศึกษาความคงตัวผลิตภัณฑ์ในระหว่างการเก็บรักษา ดังตัวอย่างต่อไปนี้

**ตารางที่ 1** การทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตกับผลิตภัณฑ์อาหารบางชนิด

ผลิตภัณฑ์	สภาวะการทดสอบ	ผลการทดสอบและการแปลผล	อ้างอิง
แยมผลไม้	strain sweep 0.2-1% frequency sweep 0-10 Hz time sweep 200-1,800s temperature sweep 5-25°C a parallel plate (Ø 50 mm)	ค่ามอดุลัสทั้งหมดของแยมมีค่าคงที่ในช่วง LVR โดยแยมมีลักษณะเป็นกึ่งของแข็ง ค่าแทนเดลตาประมาณ 0.3 จึงจัดผลิตภัณฑ์นี้เป็นเจลอ่อน ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและค่ามอดุลัสหนืดขึ้นไม่ขึ้นกับความถี่และเวลา แต่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 40 องศาเซลเซียส	Gao <i>et al.</i> (2011)
เนย แคลอรีต่ำ	stress sweep 0.02-150 Pa frequency sweep 0.1-100 Hz time sweep 0-800 s temperature sweep 25-70°C a parallel plate (Ø 15 mm)	เนยแสดงค่า LVR ในช่วง 1-10 พาสคาล ค่ามอดุลัสยืดหยุ่นและค่ามอดุลัสหนืดเพิ่มขึ้นตามความถี่ โดยแสดงค่าเลขเดบอว์ราใกล้เคียงกับของแข็ง การเพิ่มอุณหภูมิและเวลาให้ความร้อนแก่ตัวอย่างนานทำให้โครงสร้างของก้อนเนยเสียสภาพมากขึ้นโดยมีค่าแทนเดลต้าประมาณ 1 แต่การเติมแซนแทนแกม (xanthan gum) ลงในก้อนเนยร้อยละ 1 ช่วยให้ก้อนเนยหลอมเหลวได้ช้าลงด้วย	Emadzadeh <i>et al.</i> ,(2013)
สเปรต อะโวคาโด	strain sweep 0.02-150 % frequency sweep 0.01-100 rad/s	สเปรตอะโวคาโดที่เติมไฮโดรคอลลอยด์ร้อยละ 3 ได้แก่ กัวกัม (guar gum) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxymethyl cellulose) และ อินนูลิน (inulin) เพิ่มมอดุลัสยืดหยุ่นให้ระบบเทียบกับการไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์	Panyoyai <i>et al.</i> (2018)

**ตารางที่ 1** ชนิด (ต่อ) การทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตกับผลิตภัณฑ์อาหารบาง

ผลิตภัณฑ์	สภาวะการทดสอบ	ผลการทดสอบและการแปลผล	อ้างอิง
สเปรด อะโวคาโด (ต่อ)	temperature sweep 15-65°C a parallel plate (Ø 50 mm)	ดังนั้น ผลิตภัณฑ์จึงคงตัวในระหว่างการทดสอบการสั่นเฉือนพลวัต โดยเฉพาะความคงตัวอุณหภูมิในช่วง 25-50 องศาเซลเซียส การทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เติมไฮโดรคอลลอยด์มีการยอมรับทางประสาทสัมผัสมากกว่าสูตรควบคุมที่ไม่เติมไฮโดรคอลลอยด์	Panyoyai <i>et al.</i> (2018)
แป้งโด	frequency sweep 0.1-100 rad/s strain 0.1% temperature 26°C a parallel plate (Ø 50 mm)	แป้งสาลีทำเป็นโดพิชชามีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นมากกว่ามอดุลัสหนืด การเติมผิวหอมหัวใหญ่ช่วยเพิ่มค่ามอดุลัสยืดหยุ่นมากขึ้นตามปริมาณที่เพิ่มจาก 2%, 3.5% และ 5% ตามลำดับเพราะในผิวหอมหัวใหญ่มีเส้นใยอาหารทำให้โครงสร้างโดแข็งแรงมากขึ้น	Sagar and Pareek (2020)
น้ำผึ้ง	frequency sweep 0.1-10 Hz strain 1 Pa in LVR region temperature 20°C a parallel plate (Ø 40 mm)	น้ำผึ้งแสดงพฤติกรรมไม่ตอบสนองความถี่ที่เพิ่มขึ้นสังเกตจากค่าความหนืดซับซ้อนคงที่ นั่นคือ เป็นของเหลวหนืดที่มีการไหลเป็นแบบนิวโตเนียน (Newtonian) และมีค่ามอดุลัสหนืดมากกว่ามอดุลัสยืดหยุ่นด้วย ความชื้นของน้ำผึ้งมีผลต่อการลดค่าพารามิเตอร์ทั้งสามค่าเพราะความชื้นที่ปนในน้ำผึ้งลดความหนืด ลดความเสียดทานระหว่างโมเลกุลและแรงจากพันธะไฮโดรเจนของน้ำตาลในน้ำผึ้ง	Oroian <i>et al.</i> (2018)

### บทสรุป

เทคนิคทดสอบการสั่นเฉือนพลวัตเป็นการวัดทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารที่มีลักษณะกึ่งของแข็ง การทดสอบอาศัยการตอบสนองของโครงสร้างอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อได้รับแรงเฉือน แรงกด และแรงบิดพร้อมกัน หรือระดับการทำลายโครงสร้างภายใน นอกจากนี้ยังมีการศึกษาความถี่ เวลา และอุณหภูมิที่มีผลต่อตัวอย่างอาหาร ซึ่งข้อมูลเทคนิคด้านการทดสอบกายภาพนี้เป็นประโยชน์ในการพัฒนาส่วนผสม กระบวนการผลิต การเก็บรักษาและขนส่งผลิตภัณฑ์อาหารได้



## เอกสารอ้างอิง

- Emadzadeh, B., Razari, S. M. A., and Schleining, G. (2013, January). Dynamic rheological and textural characteristics of low-calorie pistachio butter. *International Journal of Food Properties*, 16(3), 512-526.
- Gao, X., Yu, T., Zhang, Z., Xu, J., and Fu, X. (2011, December). Rheological and sensory properties of four kinds of jams. *Journal of Stored Products and Postharvest Research*, 2(11), 227-234.
- Gunasekaran, S., and Mehmet Ak, M. (2000, March). Dynamic oscillatory shear testing on foods-selected applications. *Trends in Food Science and Technology*, 11(1), 115-127.
- Mezger, T. G. (2014, January). *Applied rheology*. Austria: Anton Paar GmbH.
- Oroian, M., Repciue, S., and Paduret, S. (2018, September). Honey authentication using rheological and physicochemical properties. *Journal of Food Science and Technology*, 55(12), 4711–4718.
- Panyoyai, N., Inta, K., Gateam, S., and Boonraeng, S. (2018, July). physical and sensorial characteristics of avocado spread added with different types of food hydrocolloids. *Indonesian Food Science & Technology Journal*, 1(2), 52-56.
- Sagar, N. A., and Pareek, S. (2020, October). Dough rheology, antioxidants, textural, physicochemical characteristics, and sensory quality of pizza base enriched with onion (*Allium cepa* L.) skin powder. *Scientific Reports*, 10, 18669. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75793-0>
- Tabilo-Munizaga, G., and Barbosa-Canovas, G. V. (2005, March). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67(1), 147-156.
- TA Instruments. (2019, March). *Rheology theory and applications*. Boston: TA Instruments.com.



Tattiyakul, J. (2014, December). Food rheology. Bangkok: Chulalongkorn University. (in Thai).

Tunick, M.H. (2000, August). Rheology of dairy foods that gel, strength, and fracture. *Journal of Dairy Science*, 83(1), 1982-1998.