

การศึกษาศักยภาพการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกในตัวอย่างอาหาร
ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
The Study of Potential of the Viscoelastic Properties Analysis in Food Samples
with a Rheometer, Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University

ปาริดา จันทร์สว่าง^{1*}
Parida Chansawang^{1*}

บทคัดย่อ

ความหลากหลายของตัวอย่างอาหารที่นำมาตรวจวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ยังมีค่อนข้างน้อย ทั้งนี้เนื่องจากผู้รับบริการยังไม่ทราบถึงศักยภาพการใช้เครื่องรีโอมิเตอร์ในการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกในตัวอย่างอาหารชนิดต่าง ๆ ดังนั้นเพื่อรองรับการให้บริการของตัวอย่างที่หลากหลาย ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาศักยภาพการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกในตัวอย่างอาหารที่แสดงพฤติกรรมเชิงรีโอโลยีที่หลากหลายด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในตัวอย่างที่มีสถานะของเหลวและของเหลวกึ่งแข็ง โดยทดสอบการสั่นทางพลวัต (ความถี่ 0.1-100 rad/s) และการทดสอบการคืบและการคืน (ความเค้นเฉือน 10 Pa 200 วินาที) ผลการศึกษาพบว่า น้ำเชื่อม ช็อกโกแลต และสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 6 มีสมบัติวิสโคอีลาสติกคล้ายของไหล ($\tan\delta \approx 1$) แป้งถั่วเขียว ร้อยละ 6 ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ แป้งกล้วย ความเข้มข้นร้อยละ 6 แป้งข้าวโพด ร้อยละ 6 และมายองเนส และโดขนมปังที่มีลักษณะคล้ายเจลอ่อน ($0.15 \leq \tan\delta \leq 0.88$) เจลลี่และวุ้นอ่อนมีสมบัติคล้ายเจลที่แท้จริง นอกจากนี้เครื่องรีโอมิเตอร์ยังมีศักยภาพในการทดสอบการคืบและการคืนโดยพบว่า ตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 8 เจลสตาร์ชข้าวเหนียว ร้อยละ 8 เจลสตาร์ชข้าวหอมมะลิ ร้อยละ 8 โดขนมปัง ไข่กรอก ลูกชิ้นหมู ลูกชิ้นปลา และปูอัดมีลักษณะเป็นวิสโคอีลาสติก ตามรูปแบบของ Berger model ลูกชิ้นปลามีความเป็นวิสโคอีลาสติกสูงสุด ($G_0 = 9.5 \times 10^4$ Pa) โดขนมปังมีความเป็นวิสโคอีลาสติกสูงสุด ($T_f = 30$ s) ซึ่งเครื่องรีโอมิเตอร์ของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สามารถรองรับการตรวจวิเคราะห์สมบัติวิสโคอีลาสติกในอาหารที่หลากหลายได้

คำสำคัญ: การสั่นทางพลวัต การคืบและการคืน อาหาร รีโอมิเตอร์

Abstract

The variety of foods analyzed for viscoelastic properties with the rheometer of the Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University, is still relatively low. It is possible that the service receivers have insufficient information about the potential of rheometry in the analysis of viscoelastic properties of various food samples. Therefore, it is necessary to study the potential of using the rheometer for the analysis of viscoelastic properties in a variety of food samples with the rheometer of the Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University. Dynamic oscillation testing (frequency 0.1-100 Hz) and testing of creep recovery (10 Pa shear stress 200 seconds) showed that chocolate syrup and tapioca starch paste were fluid like with $\tan\delta \approx 1$; while sago paste, mung bean paste, chili sauce, tomato sauce, banana starch paste, corn paste mayonnaise and bread dough were like soft gels with $0.15 \leq \tan\delta \leq 0.88$. It was found

¹ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา 90110

¹ Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University, Songkhla, 90110

*Corresponding author: e-mail: parida.k@psu.ac.th

Received: 5 August 2019, Accepted: 28 May 2020, Published: 14 June 2020



that tapioca starch, glutinous rice, jasmine rice gel, bread, sausage, pork ball, fish ball and crab stick were viscoelastic, according to Burger's model. The fish ball had the highest tested elasticity ($G_0=9.5 \times 10^4$ Pa). The bread dough had the highest viscoelasticity ($T_1= 30$ s). It can be concluded that the rheometer of the Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University, can determine various viscoelastic properties of food.

Keywords: dynamic test, creep and creep recovery, food, rheometer

บทนำ

รีโอโลยีเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนรูปร่างและการไหลของวัสดุ การวิเคราะห์ทางรีโอโลยีส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการให้แรงกระทำจากภายนอกแก่วัสดุ แล้ววัดการไหลหรือการเปลี่ยนแปลงในรูปร่างที่เกิดขึ้น รีโอโลยีมีความสำคัญอย่างมากในวิทยาการอาหาร เนื่องจากสมบัติรีโอโลยีเกี่ยวข้องกับลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) ของอาหาร เช่น ความแข็งแน่น ความนุ่มเหนียว ความละเอียด ความหยาบ ความเปราะ เป็นต้น ลักษณะภายในของอาหาร เช่น ความสามารถในการปาด (Spread) ความสามารถการไหลของอาหารผ่านท่อหรือความยากง่ายในการบรรจุอาหารใส่ภาชนะบรรจุ เป็นต้น รวมทั้งยังอธิบายถึงส่วนประกอบภายในของอาหาร เช่น ความเป็นอิมัลชัน การพองตัวของเม็ดแป้ง การจับกันของโครงสร้างภายในอาหาร เป็นต้น ในอุตสาหกรรมอาหารมักใช้สมบัติทางรีโอโลยีสำหรับการหาคุณภาพของอาหาร การวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร และยังใช้สำหรับการศึกษาขั้นพื้นฐาน ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางรีโอโลยีโดยรวมของอาหารกับชนิดและความเข้มข้นของส่วนประกอบที่มีในอาหารชนิดนั้น ทำให้ผู้ผลิตอาหารได้ทราบถึงสมบัติทางกายภาพของอาหารและสภาวะในการผลิตที่ดีสำหรับการผลิตอาหารให้มีคุณภาพ (นิสสา, 2546) การวิเคราะห์ทางรีโอโลยีในอาหารสามารถวิเคราะห์ได้หลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างอาหารที่ต้องการวิเคราะห์ ผู้บริโภคมักจะทดสอบสมบัติทางรีโอโลยีของผลิตภัณฑ์อาหารด้วยวิธีง่าย ๆ เช่น การทดสอบการปาด (Spread) แยมบนขนมปัง การกวน (Stir) เพื่อดูความหนืด การกด (Press) ตัวอย่างเพื่อดูความนุ่มเหนียว ในขณะที่นักวิจัย หรือนักพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารมักจะวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องมือวิทยาศาสตร์ เช่น ตัวอย่างอาหารเหลววิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด (Viscometer) ตัวอย่างอาหารทั่วไปวิเคราะห์เนื้อสัมผัสด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer) และวัดสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ เป็นต้น อาหารส่วนใหญ่จะมีลักษณะรวมกันไม่ใช่ของแข็งหรือของเหลวทั้งหมดแต่มักจะแสดงสมบัติทางรีโอโลยีที่เป็นทั้งของไหล (Viscous) และอีลาสติก (Elastic) ในเวลาเดียวกันเรียกว่า สมบัติวิสโคอีลาสติกหรือสมบัติยืดหยุ่น ซึ่งเมื่อให้แรงกระทำต่อวัสดุวิสโคอีลาสติก วัสดุนั้นจะไม่มีรูปร่างใหม่ในทันทีเหมือนกับวัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ และวัสดุจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมเหมือนก่อนให้แรงกระทำได้ในทันทีและอาจจะมีการสูญเสียรูปร่างบางส่วนอย่างถาวร ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าสมบัติวิสโคอีลาสติกเป็นสมบัติของอาหารที่มีคุณสมบัติก้ำกึ่งระหว่างของไหลกับของแข็งยืดหยุ่น เช่น เจล เป็นต้น (Steffe, 1996) การศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกในตัวอย่างอาหารจึงมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เราสามารถวัดค่าพารามิเตอร์ทางวิสโคอีลาสติกได้ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ เพื่อจำแนกลักษณะดังกล่าวในตัวอย่างอาหาร ซึ่งมีความสำคัญมากต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร การติดตามคุณภาพอาหาร เป็นต้น ห้องปฏิบัติการของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีการให้บริการวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีโดยผู้ให้บริการส่วนใหญ่ยินยอมนำตัวอย่างอาหารเหลวมาวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืดซึ่งให้ค่าความหนืดเพียงอย่างเดียว หรือเมื่อตัวอย่างเป็นอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลวก็จะนำมาวิเคราะห์เนื้อสัมผัสเพื่อทราบค่าความแน่นเนื้อ ความแข็ง ความเปราะจากการให้แรงที่ทำให้ตัวอย่างมีการเสียหายมาก (Large deformation) ในขณะที่ยังมีผู้ให้บริการวิเคราะห์ตัวอย่างอาหารด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ซึ่งสามารถวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีในตัวอย่างอาหารที่ให้แรงที่ทำให้โครงสร้างเสียหายน้อย (Small deformation) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวนน้อย เนื่องจากเข้าใจว่าขั้นตอนการใช้งานเครื่องรีโอมิเตอร์ยุ่งยากซับซ้อน และอาจยังไม่ทราบถึงศักยภาพของการวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยี ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีในตัวอย่างอาหารที่หลากหลายตั้งแต่อาหารเหลวจนถึงอาหารที่มี

ลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลวโดยการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกด้วยการทดสอบการสั่นทางพลวัต (Dynamic or oscillatory test) และการทดสอบการคืบและการคืน (Creep and creep recovery test) ซึ่งนิยมทดสอบในอาหารหลากหลายชนิด เช่น โดจากแป้งข้าว (Skendi et al., 2009) อาหารกลุ่มโปรตีน เช่น เจลโปรตีนจากเนือปลา (Brenner et al., 2009) หรืออาหารกลุ่มเจลคาร์โบไฮเดรต โดยส่วนใหญ่พบว่า ตัวอย่างอาหารแสดงพฤติกรรมวิสโคอิลาสติก โดยมีค่า $G' > G''$ แต่ระดับความวิสโคอิลาสติกขึ้นอยู่กับหลาย ๆ ปัจจัยทั้งชนิดของตัวอย่าง ความเข้มข้น องค์ประกอบของตัวอย่าง เป็นต้น ผู้วิจัยไม่ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติทางรีโอมิโลยีในอาหาร แต่ต้องการทดสอบสมบัติวิสโคอิลาสติกในตัวอย่างอาหารหลายชนิด เพื่อศึกษาศักยภาพในการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกในตัวอย่างอาหารที่หลากหลายและสามารถแปรผลและอธิบายพฤติกรรมวิสโคอิลาสติก และสามารถแนะนำการวิเคราะห์ทดสอบ รongรับการให้บริการด้านการสนับสนุนการเรียนการสอน การวิจัย และการให้บริการวิเคราะห์สมบัติทางรีโอมิโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ได้มากขึ้น

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาศักยภาพการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกในตัวอย่างอาหารที่แสดงพฤติกรรมเชิงรีโอมิโลยีที่หลากหลายด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การกำหนดกลุ่มตัวอย่างอาหารสำหรับทดสอบการสั่นทางพลวัต โดยเลือกตัวอย่างอาหารที่มีความหนืดสูงและตัวอย่างอาหารที่มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างอาหารที่แสดงพฤติกรรมเชิงรีโอมิโลยีที่หลากหลาย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

อาหาร	พฤติกรรมเชิงรีโอมิโลยี	ความหนืด (เซนติพอยส์)	อ้างอิง
แป้งเปียกสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 6	ของไหลหนืด	280-9500	Sulaiman (2011)
แป้งเปียกสตาร์ชถั่วเขียว ร้อยละ 6	ของไหลหนืด	909	Ratnawati et al. (2018)
แป้งเปียกฟลาวแป้งสาลี ร้อยละ 6	ของไหลหนืด	828-1154	Kaur et al. (2016)
แป้งเปียกฟลาวแป้งกล้วย ร้อยละ 6	ของไหลหนืด	778-2583	Babu et al. (2014)
แป้งเปียกสตาร์ชข้าวโพด ร้อยละ 6	ของไหลหนืด	367-1108	Chhabra et al. (2018)
ขอสพริก	ของไหลหนืด	2,850	Nagasawa et al. (2019)
น้ำเชื่อมซ็อกโกแลต	ของไหลหนืด	5,960	Nagasawa et al. (2019)
ขอสมะเขือเทศ	ของไหลหนืด	2,864	Neeraja et al. (2018)
มายองเนส	ของไหลหนืด	14,300	Neeraja et al. (2018)
โตขนมปัง	เจลคาร์โบไฮเดรต	-	-
เจลลี่	เจลคาร์โบไฮเดรต	-	-
เจลสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 8	เจลคาร์โบไฮเดรต	-	-
เจลสตาร์ชข้าวเหนียว ร้อยละ 8	เจลคาร์โบไฮเดรต	-	-
เจลสตาร์ชข้าวหอมมะลิ ร้อยละ 8	เจลคาร์โบไฮเดรต	-	-
ไส้กรอก	เจลโปรตีน	-	-
ลูกชิ้นหมู	เจลโปรตีน	-	-
ปู้ด	เจลโปรตีน	-	-
ลูกชิ้นปลา	เจลโปรตีน	-	-

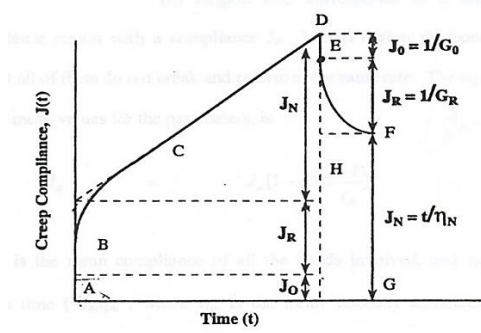
2. การทดสอบสมบัติวิสโคอีลาสติก ทำการศึกษาการสั่นทางพลวัต และการคืบและการคืน ดังนี้

2.1. การทดสอบการสั่นทางพลวัต (Dynamic or oscillatory test) ดัดแปลงการทดสอบตามวิธีของ Baixauli et. al.(2007) ทดสอบในกลุ่มตัวอย่างของไหลหนืด (Viscous fluid) และเจลคาร์โบไฮเดรต โดยเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในรูปของไหลหนืด ได้แก่ แป้งเปียกที่เตรียมจากสตาร์ชหรือฟลาวความเข้มข้น ร้อยละ 6 ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ น้ำเชื่อม ซ็อกโกแลตทางการค้า และโดขนมปัง ตัวอย่างละประมาณ 1 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (RheoStress, HAKKE., Germany) หาช่วงวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (Linear Viscoelastic Range, LVR) ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกในการตรวจสอบสมบัติวิสโคอีลาสติก เป็นการอธิบายการหาความเครียด (Strain) ที่กระทำต่อวัสดุ โดยใช้การทดสอบการกวาดความเครียด (strain sweep test) แล้วทำการเลือกช่วงวิสโคอีลาสติกเชิงเส้น (LVR) จะได้ค่าร้อยละความเครียดของตัวอย่าง ซึ่งเป็นช่วงเส้นตรงที่ใช้บ่งบอกได้ถึงพื้นที่ของความแข็งแรงทางโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบโดยอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้โครงสร้างของตัวอย่างเสียหาย (Steffe, 1996) การสั่นทางพลวัตโดยการกวาดความถี่ (Frequency sweep test) ที่อุณหภูมิ 25 °C ใช้หัววัดชนิดกรวยและจาน (Cone and Plate) เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ระยะห่าง (Gap)เท่ากับ 0.14 มิลลิเมตร วัดที่ช่วงความถี่ 0.1-100rad/s ค่าความเครียดเท่ากับร้อยละ 1 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ ค่ามอดุลัสสะสม (Storage modulus, G') ค่ามอดุลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') และค่าแทนเจนต์สูญเสีย (loss tangent, tan δ)

2.2. การทดสอบการคืบและการคืน (Creep and creep recovery test) ดำเนินการทดสอบตามวิธีของ Inokuchi (Sherman, 1966) โดยวิเคราะห์ในตัวอย่างเจลคาร์โบไฮเดรต และเจลโปรตีน อาหารที่ทดสอบได้แก่ เจลฟลาวและเจลสตาร์ชความเข้มข้น ร้อยละ 8 ใส่กรอก ลูกชิ้น และโดขนมปัง ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร แล้วนำไปศึกษาการคืบและการคืนด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ (RheoStress, HAKKE., Germany) ซึ่งต่อกับหัววัดชนิดแผ่นขนาน (Parallel Plate) โดยบันทึกค่าความยืดหยุ่นคืบ (Creep compliance) ของการคืบของตัวอย่างภายใต้ความเค้นเฉือน 10 Pa ในช่วงเวลา 200 วินาที หลังจากนั้นปล่อยแรงออกแล้วบันทึกค่าคอมไพล런스ของการคืนตัวของตัวอย่างในช่วงเวลา 200 วินาที (Noosuk, et al., 2005) คำนวนค่า Instantaneous elastic modulus (G₀), Retard elastic modulus (G₁), Retard viscoelastic (η₁) และ Final viscoelastic (η_N) ตามรูปแบบของ Burger model ซึ่งได้มาจากการนำ Maxwell model และ Kelvin model มาต่ออนุกรม สามารถอธิบายพฤติกรรม creep ได้ดังสมการที่(1) และภาพที่ 1

$$J(t) = J_0 + J_1(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) + \frac{t}{\eta_N} \dots\dots\dots(1)$$

โดย	J(t)	=	the measured compliance (1/Pa)	
	J ₀	=	the instantaneous elastic compliance (1/Pa)	= 1/G ₀
	J ₁	=	the retarded elastic compliance (1/Pa)	= 1/G ₁
	τ ₁	=	the retardation time (s)	= J ₁ · η ₁
	η ₁	=	the retarded viscosity (Pa.s)	
	η _N	=	the terminal viscosity (Pa.s)	



ภาพที่ 1 กราฟแสดงการคืบและการคืนของวัสดุวิสโคอีลาสติก (Sherman,1970)

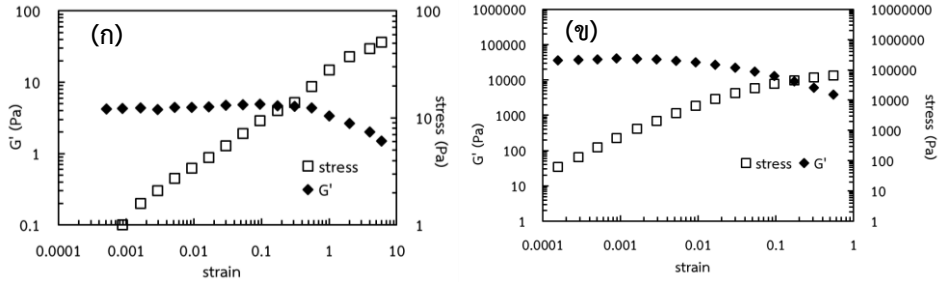


ผลการวิจัย

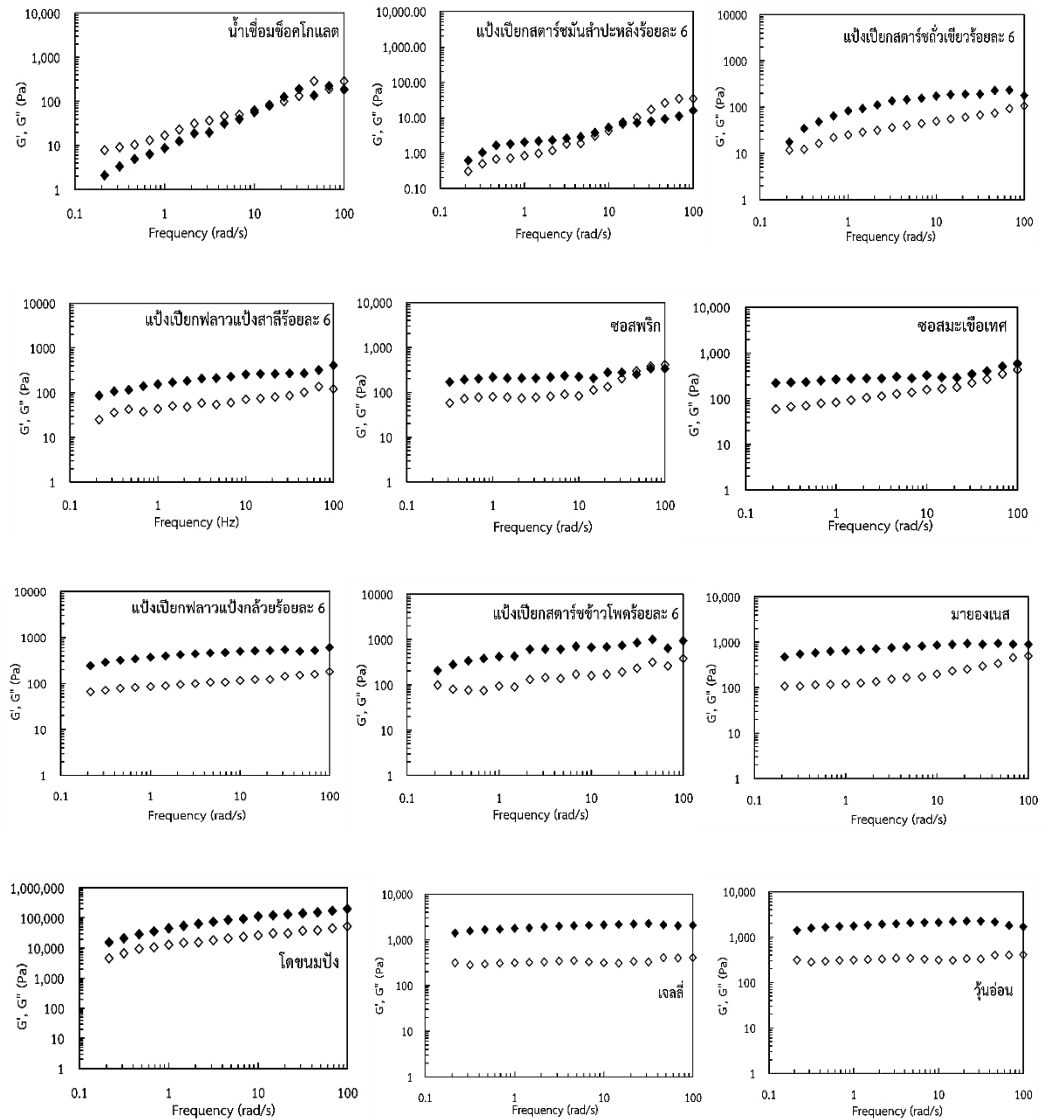
ผลของการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกในตัวอย่างอาหารที่แสดงพฤติกรรมเชิงรีโวลยีที่หลากหลาย ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เป็นดังนี้

การทดสอบการสั่นทางพลวัต (Dynamic or oscillatory test)

การวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกแบบการสั่นทางพลวัต เป็นการวิเคราะห์การตอบสนองต่อความเค้น (Stress) หรือความเครียด (Strain) ภายใต้การเคลื่อนที่แบบไซน์ (Sinusoidal oscillation) ของวัสดุวิสโคอิลาสติก โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ โมดูลัสสะสม (Storage modulus, G') โมดูลัสสูญเสีย (Loss modulus, G'') และ แทนเจนต์สูญเสีย (Loss tangent, $\tan \delta$) ซึ่งค่า G' หมายถึง ปริมาณพลังงานที่วัสดุสะสมไว้ หรือได้รับกลับคืนมาต่อหนึ่งรอบของการเสียสภาพแบบไซน์ ค่า G'' บ่งบอกถึงองค์ประกอบที่แสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นในวัสดุ G'' หมายถึง พลังงานที่สูญเสียในรูปของการกระจายพลังงานต่อหนึ่งรอบของการเสียสภาพแบบการสั่น ค่า G'' บ่งบอกถึงส่วนประกอบที่เป็นของไหลหนืดในวัสดุ และค่า $\tan \delta$ หมายถึง สัดส่วนของการแสดงสถานะเป็นวัสดุไหลหนืดต่อสถานะยืดหยุ่น (G''/G') ดังนั้นถ้าค่า $\tan \delta > 1$ หมายถึง วัสดุนั้นมีความไหลหนืดมากกว่าความยืดหยุ่น และ $\tan \delta < 1$ หมายถึง วัสดุนั้นมีความยืดหยุ่นมากกว่าความไหลหนืด การวิเคราะห์การสั่นทางพลวัตเริ่มจากการทดสอบการกวาดความเครียด (Strain sweep test) ในตัวอย่างอาหารเพื่อหาช่วงวิสโคอิลาสติกเชิงเส้น (Linear Viscoelastic Range, LVR) ดังภาพที่ 2 พบว่าความเครียด ร้อยละ 1 ของตัวอย่างแป้งเปียกสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 6 และ โดขนมปัง ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า G' และค่าความเค้นเฉือน จึงนำค่าความเครียดไปใช้ในการทดสอบการกวาดความถี่ (Frequency sweep test) (ภาพที่ 3) พบว่า กราฟระหว่างความถี่กับค่า G' และ G'' ของน้ำเชื่อมซ็อกโกแลต มีลักษณะกราฟของ $G'' > G'$ ซึ่งเป็นลักษณะของตัวอย่างที่มีความเป็นวิสโคอิลาสติกคล้ายของไหล (Fluid-like) (Billaderis et al., 1992) ส่วนแป้งเปียกแป้งมัน ร้อยละ 6 มีลักษณะกราฟของ $G'' > G'$ ในช่วงความถี่ต่ำและเมื่อความถี่สูงกว่า 10 Hz ค่า $G'' > G'$ สำหรับกราฟ G' และ G'' ของตัวอย่างแป้งเปียกสตาร์ชถั่วเขียว ร้อยละ 6 ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ แป้งเปียกฟลาวกัวย ร้อยละ 6 แป้งเปียกสตาร์ชข้าวโพด ร้อยละ 6 มายองเนส และโดขนมปังเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น และมีค่า $G' > G''$ ตลอดช่วงความถี่ที่ทำการทดสอบ ซึ่งเป็นลักษณะของตัวอย่างที่มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงหรือลักษณะคล้ายเจล (Gel-like) (Rao, 1999) โดยเมื่อพิจารณาค่า G' กับค่าความถี่ พบว่าตัวอย่างดังกล่าวมีลักษณะกราฟ G' เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงคุณลักษณะของเจลอ่อน (Weak gel) (Clark and Ross-Murphy, 1987) ในขณะที่ตัวอย่างเจลลี่ พบค่า $G' > G''$ ตลอดช่วงความถี่และค่า G' และ G'' ไม่ขึ้นกับความถี่ ซึ่งเป็นลักษณะของตัวอย่างที่แสดงพฤติกรรมแบบเจลแข็ง (Strong gel) หรืออาจเรียกว่า true gel (Clark and Ross-Murphy, 1987) จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์วิสโคอิลาสติก ได้แก่ G' , G'' และ $\tan \delta$ ที่ความถี่ 10 rad/s ของตัวอย่างอาหารชนิดต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า น้ำเชื่อมซ็อกโกแลต และแป้งเปียกสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 6 แป้งเปียกสตาร์ชถั่วเขียว ร้อยละ 6 ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ แป้งเปียกฟลาวกัวย ร้อยละ 6 แป้งเปียกสตาร์ชข้าวโพด ร้อยละ 6 มายองเนส และวุ้นอ่อนมีค่า G' ซึ่งบ่งบอกถึงระดับความแข็งแรงของเจล อยู่ในช่วง 4.3-1,483.8 Pa ในขณะที่โดขนมปังแสดงสมบัติวิสโคอิลาสติกที่มีค่าอิลาสติกสูงมากถึง 112,618 Pa เนื่องจากความแข็งแรงของพันธะโปรตีนกลูเตนินและไกลอะดินเกิดเป็นกลูเตนที่มีความแข็งแรงในโดขนมปัง (Tronsmo et al., 2003) เมื่อพิจารณาค่า $\tan \delta$ ซึ่งค่า $\tan \delta = 0$ หมายถึง ตัวอย่างแสดงลักษณะของยืดหยุ่นหรือของอิลาสติกสมบูรณ์ และเมื่อ $0 < \tan \delta < 1$ ตัวอย่างจะแสดงลักษณะของก้ำกึ่งระหว่างของยืดหยุ่นและของไหล แต่เมื่อค่าเข้าใกล้ 1 ตัวอย่างจะแสดงลักษณะของของไหล (Steffe, 1996) ในตัวอย่างกลุ่มเจลคาร์โบไฮเดรต พบว่า แป้งเปียกฟลาวกัวย ร้อยละ 6 มีค่า $\tan \delta$ เข้าใกล้ 0 ที่สุด (0.15) และมีค่าน้อยกว่า แป้งเปียกสตาร์ชข้าวโพด และแป้งเปียกฟลาวกัวย แป้งสาลี แสดงว่า แป้งเปียกฟลาวกัวย แป้งกัวยมีความวิสโคอิลาสติกที่มีลักษณะเจลที่ใกล้เคียงลักษณะเจลแข็ง (Strong gel) มากกว่า แป้งเปียกแป้งข้าวโพด ร้อยละ 6 แป้งเปียกฟลาวกัวย แป้งสาลี ร้อยละ 6 ในขณะที่ แป้งเปียกสตาร์ชมันสำปะหลัง มีค่า $\tan \delta$ เท่ากับ 0.76 ซึ่งมีลักษณะคล้ายของไหล (Fluid-like) ตัวอย่างมายองเนส มีค่า $\tan \delta$ เข้าใกล้ 0 และค่าน้อยกว่าซอสพริก ซอสมะเขือเทศ และน้ำเชื่อมซ็อกโกแลต ซึ่งแสดงว่าในตัวอย่างกลุ่มนี้ มายองเนสแสดงลักษณะเจลที่แข็งแรงมากที่สุด



ภาพที่ 2 ผลของความเครียดต่อค่า G' (◆) และค่าความเค้นเฉือน (□) ของตัวอย่างแป้งเปียกแป้งมันร้อยละ 6 (ก) และ โดขนมปัง (ข) ที่อุณหภูมิ 25°C



ภาพที่ 3 ผลของความถี่ต่อค่า G' (◆) และ G'' (◇) ของตัวอย่างอาหารที่แสดงพฤติกรรมเชิงรีโอโลยีที่หลากหลายที่อุณหภูมิ 25°C ความถี่ 0.1-100 rad/s

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของสมบัติวิสโคอีลาสติกที่วัดด้วยวิธีการสั่นทางพลวัต (ความถี่ 10 rad/s) สำหรับตัวอย่างอาหาร

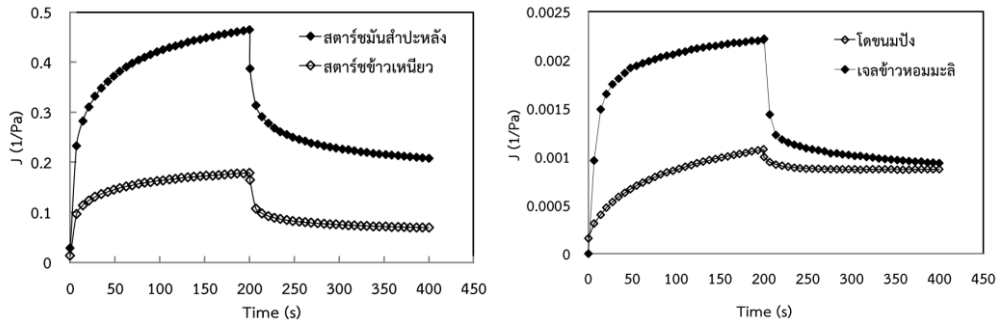
ตัวอย่าง	G'	G''	tanδ	ลักษณะเจล
1. แป้งเปียกสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 6	5.27±0.09	4.25±0.02	0.98±0.01	Fluid like, weak gel
2. น้ำเชื่อมซอกโกแลต	57.39±12.3	62.51±9.9	1.08±0.01	Fluid like
3. แป้งเปียกสตาร์ชข้าวเจ้า ร้อยละ 6	174.63±12.3	49.36±9.9	0.28±0.01	Weak gel
4. แป้งเปียกฟลาวแป้งสาลี ร้อยละ 6	256.8±18.2	70.87±6.4	0.28±0.01	Weak gel
5. ซอสพริก	219.0±11.2	69.98±5.3	0.32±0.02	Weak gel
6. ซอสมะเขือเทศ	266.8±10.5	91.32±6.5	0.34±0.02	Weak gel
7. แป้งเปียกฟลาวแป้งกล้วย ร้อยละ 6	497.42±11.3	114.41±4.6	0.15±0.00	strong gel
8. แป้งเปียกสตาร์ชข้าวโพด ร้อยละ 6	670.7±36.6	159.41±12.3	0.24±0.01	Weak gel
9. มายองเนส	657.9±33.3	120.24±8.0	0.18±0.01	strong gel
10. โดชนมปัง	112,618±36840	26469.6±22.2	0.24±0.01	strong gel
11. เจลลี่	1,483.8±261.3	284.01±19.1	0.14±0.02	strong gel
12. คุกกี้	2120.9±121.2	315.85±32.4	0.15±0.03	strong gel

การทดสอบการคืบและการคืน (Creep and creep recovery test)

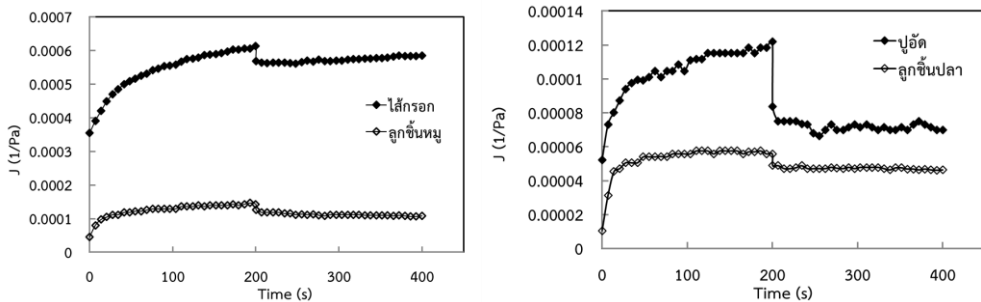
การทดสอบการคืบและการคืนเป็นการทดสอบการให้ความเค้นที่คงที่ (Constant stress) แก้วิสโคอีลาสติกที่ระยะเวลาหนึ่งก่อนเอาแรงออกเพื่อให้ตัวอย่างคืนตัว แล้ววิเคราะห์ผลการตอบสนองต่อความเค้นที่ได้รับโดยวัดการเปลี่ยนแปลงความเครียดที่เกิดขึ้นเป็นฟังก์ชันของเวลาในรูปของความยืดหยุ่นคืบ (Creep compliance, $J(t)$) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ทางวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic parameter) และมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความเครียดที่เปลี่ยนแปลงต่อความเค้น จากการวิเคราะห์การคืบและการคืนในตัวอย่างอาหารชนิดต่าง ๆ พบว่า กราฟการคืบและการคืนของตัวอย่างกลุ่มเจลคาร์โบไฮเดรตและเจลโปรตีน ดังภาพที่ 4-5 เมื่อพิจารณาแบบกราฟการคืบและการคืนของตัวอย่างอาหารทุกชนิด จะให้รูปแบบของกราฟในช่วงการคืบและการคืนสอดคล้องกับกราฟของตัวอย่างอาหารที่มีลักษณะวิสโคอีลาสติก (Lazaridou et al., 2007) คือ แสดงพฤติกรรมแบบยืดหยุ่น หรือ อีลาสติก (Elastic) พฤติกรรมวิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) และพฤติกรรมไหลหนืด (Viscous flow) และสามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามรูปแบบ Burger model (Sherman, 1966) โดยกราฟสามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 ความยืดหยุ่นอีลาสติกแบบทันที (Instantaneous elastic compliance, J_0) ที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองแรงแบบยืดหยุ่นทันทีทันใดของวัสดุ ช่วงที่ 2 ความยืดหยุ่นแบบอีลาสติกที่ขึ้นกับเวลา (Time-dependent retarded elastic compliance) ซึ่งแสดงค่ามอดูลัสยืดหยุ่นจากการหน่วง (Retarded elastic modulus, G_1), ความหนืด (η_1) และเวลาที่ชะลอไว้ (Retard time, τ_1) ช่วงนี้เป็นช่วงที่พันธะของวัสดุมีการแตกออกและคืนรูป (Reform) โดยพันธะทั้งหมดไม่ได้แตกออกและคืนรูปที่อัตราเดียวกันเป็นลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงจากสมบัติยืดหยุ่นไปเป็นสมบัติไหลหนืด และช่วงที่ 3 การไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian flow) เป็นช่วงที่วัสดุมีการตอบสนองต่อแรงแบบไหลหนืดซึ่งเกิดขึ้นเมื่อได้รับแรงกระทำเป็นเวลานาน ๆ จึงทำให้วัสดุเกิดการไหลแบบนิวโตเนียน โดยการไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับเวลาซึ่งพิจารณาได้จากค่า ความหนืดสุดท้าย (Terminal viscosity, η_∞) ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า ตัวอย่างเจลกลุ่มคาร์โบไฮเดรตนั้น โดชนมปังมีค่า G_0 ซึ่งแสดงถึงความแข็งแรงของเจลซึ่งในตัวอย่างเจลในกลุ่มเดียวกัน โดชนมปังมีความแข็งแรงสูงที่สุด และเมื่อพิจารณาช่วงของการปลดปล่อยความเค้นซึ่งบ่งบอกถึงลักษณะความเป็นวิสโคอีลาสติกของตัวอย่างพบว่า โดชนมปังมีค่า G_1 สูงที่สุด และยังมีค่า retardation time มาก นั่นคือ เวลาในการหน่วงเจลมากที่สุดอีกด้วย ($\tau_1=31.19$ วินาที) กราฟการคืบและการคืนของตัวอย่างโดชนมปัง (ภาพที่ 4) พบว่า มีลักษณะกราฟการคืบและการคืนเป็นไปตามรูปแบบของตัวอย่างที่มี ความเป็น วิสโคอีลาสติ กอย่าง ชัด เจน สอดคล้องกับการทดลองของ Korus et al. (2009) เจลสตาร์ชข้าวหอมมะลิ ร้อยละ 8 มีค่าความเป็นอีลาสติกมากกว่าสตาร์ชข้าวเหนียว และสตาร์ชมันสำปะหลังตามลำดับ สำหรับตัวอย่างเจลโปรตีน (ภาพที่ 5) พบว่า ในช่วงของการคืบลักษณะของ

กราฟยังมีความเป็นวิสโคอีลาสติกโดยลูกชิ้นปลาที่มีความเป็นอีลาสติกมากกว่าลูกชิ้นหมู ปูอัด และไส้กรอก ตามลำดับ แต่ในช่วงของการคืนลักษณะของกราฟสูญเสียความเป็นวิสโคอีลาสติกอาจเกิดจากโครงสร้างถูกทำลายเมื่อได้รับความเค้นเป็นเวลานาน เมื่อพิจารณาเส้นกราฟการคืบและการคืนของตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์มีลักษณะไม่เรียบอาจเนื่องมาจากการที่ตัวอย่างมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (Heterogeneous)

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเครื่องเครื่องมือรีโอมิเตอร์ ของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สามารถตรวจสอบคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติกในอาหารที่หลากหลายสำหรับการให้บริการการเรียนการสอน การวิจัย และการให้บริการสำหรับหน่วยงานภายนอกได้



ภาพที่ 4 กราฟการคืบและการคืนของกลุ่มเจลคาร์โบไฮเดรต ที่อุณหภูมิ 25°C, ความเค้น 10 Pa



ภาพที่ 5 กราฟการคืบและการคืนของกลุ่มเจลโปรตีน ที่อุณหภูมิ 25°C, ความเค้น 10 Pa

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ทางการคืบและการคืนของตัวอย่างอาหารชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25°C, ความเค้น 10 Pa

ตัวอย่าง	G_0 (Pa)	G_I (Pa)	T_I (s)	η_I (Pa.s)	η_n (Pa.s)
1. เจลสตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 8	3.4×10^1	4.7×10^1	24.04	1.1×10^2	1.8×10^3
2. เจลสตาร์ชข้าวเหนียว ร้อยละ 8	7.5×10^1	1.2×10^1	22.22	2.8×10^2	5.4×10^3
3. เจลสตาร์ชข้าวหอมมะลิ ร้อยละ 8	1.0×10^3	1.2×10^3	17.84	2.4×10^4	3.7×10^5
4. โดชนมปัง	6.1×10^3	1.9×10^3	31.19	5.9×10^4	4.3×10^5
5. ไส้กรอก	2.8×10^3	6.2×10^3	28.33	1.7×10^5	6.4×10^5
6. ลูกชิ้นหมู	2.2×10^4	2.1×10^4	26.67	5.7×10^5	3.5×10^6
7. ปูอัด	1.9×10^4	3.9×10^4	29.23	1.1×10^6	5.4×10^6
8. ลูกชิ้นปลา	9.5×10^4	4.2×10^4	17.72	7.6×10^5	9.9×10^6

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาศักยภาพของการวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีในตัวอย่างอาหารด้วยเครื่องมือรีโอมิเตอร์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในตัวอย่างที่มีสถานะของเหลว และสถานะกึ่งแข็งระหว่างของแข็งและของเหลว โดยทำการวิเคราะห์คุณสมบัติวิสโคอีลาสติก โดยศึกษาการสั่นทางพลวัต และ

การคืบและการคืน ผลการศึกษาพบว่า น้ำเชื่อมซ็อกโกแลต และสตาร์ชมันสำปะหลังมีสมบัติวิสโคอิลาสติกคล้ายของไหล($\tan\delta \approx 1$) แป้งสาคุ แป้งถั่วเขียว ซอสพริก ซอสมะเขือเทศ แป้งกล้วย แป้งข้าวโพด มายองเนส และโดขนมปังมีสมบัติวิสโคอิลาสติก คล้ายเจลอ่อน ($0.15 \leq \tan\delta \leq 0.88$) ในขณะที่เจลลี่และวุ้นอ่อนมีสมบัติคล้ายเจลที่แท้จริงเนื่องจากค่า G' ไม่ขึ้นกับความถี่ การทดสอบการคืบและการคืน พบว่า ตัวอย่างเจลสตาร์ชมันสำปะหลัง เจลสตาร์ชข้าวเหนียว เจลสตาร์ชข้าวหอมมะลิ โดขนมปัง ไส้กรอก ลูกชิ้นหมู ลูกชิ้นปลา และปูอัดมีลักษณะเป็นวิสโคอิลาสติกตามรูปแบบของ Burger model ลูกชิ้นปลามีความเป็นวิสโคอิลาสติกสูงสุด ($G_0 = 9.5 \times 10^4$ Pa) โดขนมปังมีลักษณะความเป็นวิสโคอิลาสติกสูงสุด ($T_1 = 30.19$ วินาที) นั่นคือ สามารถยืดหยุ่นได้สูงที่สุด ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เครื่องรีโอมิเตอร์ ของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีศักยภาพในการตรวจสอบคุณสมบัติทางวิสโคอิลาสติกในอาหารที่หลากหลาย สำหรับการให้บริการการเรียนการสอน การวิจัย และการให้บริการสำหรับหน่วยงานภายนอกได้

อภิปรายผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การวิเคราะห์สมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์สามารถวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกในตัวอย่างอาหารที่มีสถานะของเหลวหนืด และลักษณะก้ำกึ่งระหว่างของแข็งและของเหลวได้ ดังนั้นการวิเคราะห์การสั่นทางพลวัตทำให้ได้ค่า G' และ G'' ของน้ำเชื่อมซ็อกโกแลต มีสมบัติวิสโคอิลาสติกคล้ายของไหล($\tan\delta \approx 1$) สตาร์ชมันสำปะหลัง ร้อยละ 6 มีลักษณะคล้ายของไหลในช่วงความถี่ต่ำ แต่เมื่อความถี่สูงขึ้นจะทำให้แป้งเปียกของสตาร์ชมันสำปะหลังมีลักษณะคล้ายเจลอ่อนซอสพริก ซอสมะเขือเทศ แป้งกล้วย แป้งข้าวโพด มายองเนสและโดขนมปังมีสมบัติวิสโคอิลาสติก คล้ายเจลอ่อน ($0.15 \leq \tan\delta \leq 0.88$) ในขณะที่เจลลี่และวุ้นอ่อนมีสมบัติคล้ายเจลที่แท้จริงเนื่องจากค่า G' ไม่ขึ้นกับความถี่ การอธิบายถึงลักษณะของสมบัติวิสโคอิลาสติกนี้สามารถนำไปวิเคราะห์ถึงองค์ประกอบในอาหาร และความสัมพันธ์ของโครงสร้างอาหาร ซึ่งสามารถนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารหรือกระบวนการผลิตอาหาร (Tabilo-Munizaga and Barbosa-Canovas, 2005) แม้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดไม่อาจกำหนดเป็นมาตรฐานแน่นอนของแต่ละค่า แต่ความสามารถในการวัดสามารถอธิบายความแตกต่างของสมบัติวิสโคอิลาสติกในอาหารที่มีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบอาหารแม้เพียงเล็กน้อยได้ ซึ่งไม่สามารถวัดด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัสซึ่งเป็นการทำให้ตัวอย่างมีการเสียหายได้ (Tronsmo et al., 2003) การทดสอบสมบัติวิสโคอิลาสติกแบบการสั่นทางพลวัตนี้ได้ทำการทดลองเฉพาะในส่วนของการกวาดความถี่ แต่ยังมีกรทดสอบการกวาดอุณหภูมิ (Temperature sweep test) การทดสอบการกวาดเวลา (Time sweep test) ซึ่งยังสามารถอธิบายถึงพฤติกรรมทางวิสโคอิลาสติกได้อีกหลายรูปแบบ (Arici et al., 2014) การวิเคราะห์การคืบและการคืน ได้ทดลองศึกษาตามรูปแบบของ Burger เท่านั้น ซึ่งในทางรีโอโลยีการคืบและการคืนยังสามารถวิเคราะห์พารามิเตอร์แยกในช่วงของการคืบและการหาพารามิเตอร์ในช่วงการคืน ซึ่งสามารถวิเคราะห์สมบัติวิสโคอิลาสติกได้มากขึ้น นอกจากนี้หัววัดที่ใช้ในการวิเคราะห์ ยังมีหัววัดแบบกรวยและเพลท และหัววัดแบบแผ่นขนานขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร และสามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างได้ตั้งแต่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำมันพาราฟินตะรอบ ๆ ตัวอย่างที่สัมผัสอากาศ ซึ่งเป็นการเพิ่มทางเลือกในการใช้งานให้แก่ นักศึกษา นักวิจัย และผู้ใช้บริการภายนอกต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนเพื่อทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยรัตน์ ศิริวงศ์ไพศาล ที่เป็นที่ปรึกษาในการทดลอง และแนะนำการเขียนรายงาน และขอขอบคุณ ดร.คีนจันทร์ ณ นคร ที่ช่วยอ่านบททบทวนตรวจสอบเนื้อหาและแก้ไขงานเขียนให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- นิสสา ศีตะปิ่นย์. 2546. การวิเคราะห์อาหารด้วยเทคนิครีโอโลยี. *Polymer science*. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. [Online]. Available: https://www2.mtec.or.th/th/e-magazine/admin/upload/210_24-28.pdf. (สืบค้นเมื่อ 28 กรกฎาคม 2562).
- Arici, M., Tatlisu, N.B.E., Toker, S., Tilmaz, M.T., Cankurt, H., Durak, Z. and O. Sigdic. 2014. Microbiological, steady, and dynamic rheological characterization of boza samples: temperature sweep tests and applicability of the Cox–Merz rule. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 38(3): 377-387.
- Babu, A.S., Mahalakshmi, M. and R. Parimalavalli. 2014. Comparative study on properties of banana flour, starch and autoclaved starch. *Trends In Carbohydrate Research*. 6: 38-44.
- Baixaui, R., Sanz, T., Salvador, A. and S.M. Fiszman. 2007. Influence of the dosing process on the rheological and microstructural properties of a bakery product. *Food Hydrocolloids*. 21: 230-236.
- Billiaderis, C. G. 1992. Characterization of starch network: by small strain dynamic rheometry. p 87-135. *In*: Alexander, R.J. and H.F. Zobel (eds.). *Developments in carbohydrate chemistry*. Minnesola: American Association of Cereal Chemists.
- Brenner, T., Johannsson, R. and T. Nicolai. 2009. Characterization and thermo-reversible gelation of cod muscle protein isolates. *Food Chemistry*. 115: 26-31.
- Chhabra, N. and A. Kaur. 2018. Assessment of physicochemical characteristics and modifications of pasting properties of different varieties of maize flour using additives. *Journal of Food Science and Technology*. 55(10): 4111-4118.
- Clark, A.H. and S.B. Ross-Murphy. 1987. Structural and mechanical properties of biopolymer gels. *Advanced polymer Science*. 85: 57-192.
- Kaur, G., Sharma, S., Singh, B. and B.N. Dar. 2016. Comparative study on functional, rheological, thermal, and morphological properties of native and modified cereal flours. *International Journal of Food Properties*. 19:(9): 1949-1961.
- Korus, J., Witczak, M., Ziobro, R. and L. Juszczak. 2009. The impact of resistant starch on characteristics of gluten-free dough and bread. *Food hydrocolloids*. 23: 988-995.
- Lazaridou, A., Duta, D., Papageorgiou, M., Belc, N. and C.G. Biliaderis. 2007. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations. *Journal of Food Engineering*. 79: 1033-1047.
- Nagasawa, K., Suzuki, T., Seto, R., Okada, M. and Y. Yue. 2019. Mixing sauces: a viscosity blending model for shear thinning fluids. *ACM Transactions on Graphics*. 38(4): 1-17.
- Neeraja, G., Subramaniam, P. and S. Kumar. 2018. Assessment of physical properties of foods commonly consumed by children. *Saudi Journal of Oral Sciences*. 5(1): 41-46.
- Noosuk, P., Hill, S.E., Farhat, I.A., Pradipasena, P. and J.R. Mitcheli. 2005. Relationship between viscoelastic properties and starch structure in rice from Thailand. *Starch/starke*. 57: 587-598.
- Ratnawati, L., Desnilasari, D., Surahman, D.N. and R. Kumalasari. 2018. Evaluation of physicochemical, functional and pasting properties of soybean, mung bean and red kidney bean flour as ingredient in biscuit. *1-10. In: 2nd International Conference on Natural Products and Bioresource Sciences*. 1-2 November 2018, Tangerang, Indonesia.
- Rao, M.A. 1999. Rheological behavior of processed fluid and semisolid foods. pp. 105-108 and 244-254. *In*: Rao, M.A. (Ed.), *Rheology of Fluid and Semisolid Foods: principles and applications*.
- Sherman, P. 1966. The texture of ice cream. 3: rheological properties of mix and melted ice cream. *Journal of Food Science*. 31: 707-716.
- Sherman, P. 1970. *Industrial rheology with particular reference to foods, Pharmaceutical, and cosmetics*. Academic Press. London
- Skendi, A., Papageorgiou, M. and C.G. Biliaderis. Effect of barley β -glucan molecular size and level on wheat dough rheological properties. *Journal of Food Engineering*. 91: 594-601.
- Steffe, J.F. 1996. *Rheological methods in food process engineering*. Freeman Press. *Journal of Food Engineering*. 97: 147-156.
- Sulaiman, R. 2011. Estimation of kinetic parameters in a corn starch viscosity model at different amylose content. Michigan State University In partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Biosystems Engineering Food Science. USA.
- Tabilo-Munizaga, G. and G.V. Barbosa-Canovas. 2005. Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*. 67(1): 147-156.
- Tronsmo, K.M., Magnus, E.M., Baardseth, P.J., Schofield, D., Aarnodt, A. and E.M. Faergestad. 2003. Comparison of small and large deformation rheological properties of wheat dough and gluten. *Cereal Chemistry*. 80: 587-595.