Agricultural Sci. J. 34 : 4-6 (Suppl.) : 29-32 (2003) ว. วิทย. กษ. 34 : 4-6 (พิเศษ) : 29-32 (2546)

แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติคของมะม่วงกวน
Viscoelastic Modeling of Mango Candies

อุทัยวรรณ ฉัตรธง[1] และ อรุณี อภิชาติสรางกูร[1]
Utaiwan Chattong[1] and Arunee Apichartsrangkoon[1]

Abstract

Creep measurement for analysed texture of mango candies that have total soluble solids (TSS) 65%(w/w) and varying viscosity by using the concentration of pectin in 4 levels, which were 0, 1, 2 and 3%(w/w). The results found that a six-element model consisting one Maxwell model and two Kelvin model was fitted for all the samples analysed. The values of creep compliance; J (μPa^{-1}) were decreased according to the increase of pectin contents. In consequently the decrease of creep compliance was related to the increase of a_w and total sugar. The values of elastic and viscous behavior as well as the permanent deformation were also analysed.

บทคัดย่อ

การวัด creep เพื่อวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมะม่วงกวนที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total Soluble Solid) ร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก และมีการผันแปรความหนืดโดยใช้เพกติน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมกับมะม่วงกวนเป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย และแบบจำลองเคลวิน 2 หน่วย และค่า creep compliance; J (μPa^{-1}) มีค่าลดลงเมื่อปริมาณเพกตินเพิ่มขึ้น โดยค่า J ที่ลดลงมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total Sugar) ที่เพิ่มขึ้น ลักษณะทางอีลาสติค วิสคลาส และการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรได้มีการวิเคราะห์ด้วย

คำนำ

การเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของมะม่วงกวนซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างโพลีเมอร์ของน้ำตาล และโพลีแซคคาไรด์อื่น สามารถวิเคราะห์ได้โดยขั้นตอนของรีโอโลยี (rheology) (Apichartsrangkoon, 2002) เนื่องจากศาสตร์ทางรีโอโลยีสามารถใช้วิเคราะห์สมบัติทางวิสโคอีลาสติคของไบโอโพลีเมอร์ (biopolymer) ได้ ซึ่งในการอธิบายสมบัติวิสโคอีลาสติคนี้อธิบายได้โดยใช้แบบจำลองซึ่งแบบจำลองที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ แบบจำลองแมกซ์เวลล์ (Maxwell model) แบบจำลองเคลวิน-โวค (Kelvin-Voigt model) แบบจำลอง 4 องค์ประกอบ (Four-element Burger model) และแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ (Six-element model) เป็นต้น (Steffe, 1996) ด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติคของมะม่วงกวน โดยหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม ศึกษาถึงผลการเพิ่มปริมาณเพกตินที่มีต่อสมบัติวิสโคอีลาสติคของมะม่วงกวน และความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของมะม่วงกวนกับค่า compliance J

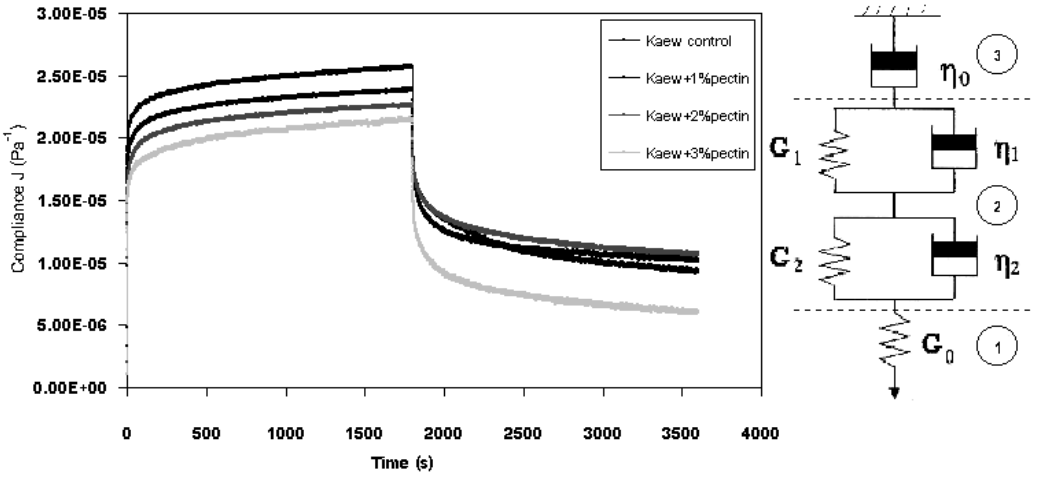
อุปกรณ์และวิธีการ

นำมะม่วงแก้วสุกที่ผสมเพกตินร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก และมี pH เป็น 3.2 กวนด้วยไฟอ่อน อุณหภูมิ 70-75 °ซ. จนได้ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดร้อยละ 65 โดยน้ำหนัก ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ขึ้นรูปมะม่วงกวน จากนั้นนำไปทดสอบ creep ด้วยเครื่อง TA.XT2i Texture Analyser โดยกำหนดค่าแรงกดคงที่ (stress) เป็น 1 นิวตัน เพื่อเป็นการยืนยันว่าเป็น linear viscoelastic regin หรือเป็นแรงที่ไม่ทำให้โครงสร้างแตกสลายระหว่างการวัด ใช้เวลาวัด 3,600 วินาที โดยกดด้วยแรงที่ 1,800 วินาที และถอนแรง 1,800 วินาที ใช้ความเร็วในการทดสอบ 1 มิลลิเมตรต่อวินาที หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเพิ่มปริมาณเพกตินกับค่าตัวแปรทางวิสโคอีลาสติค ได้แก่ อีลาสติคโมดูลัส (E_0) ความหนืด (η_0) และการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (J_{PD}) จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) และปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของมะม่วงกวน และหาความสัมพันธ์กับค่า compliance J

[1] ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50100
[1] Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, Chiang Mai 50100

ผลและวิจารณ์

จากการทดสอบ creep ของมะม่วงแก้วกวนที่มีปริมาณเพกตินที่ต่างกันคือ ร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก มีพฤติกรรม creep compliance ของมะม่วงแก้วกวนดัง Figure 1(a)



(a) (b)

Figure 1 (a) Creep compliance VS Time of mango candies for Kaew variety with different pectin contents (b) 6-element model from the experiment

จากกราฟ creep ของมะม่วงแก้วกวนที่ได้ พบว่าแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับมะม่วงแก้วกวนทุกระดับเพกตินเป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ ดัง Figure 1(b) ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 ส่วน (สปริงต่ออนุกรมกับลูกสูบ) และเคลวิน -โวค 2 ส่วน (สปริงต่อขนานกับลูกสูบ) โดยแบ่งกราฟออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ compliance J_0 เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด (instantaneous compliance) โดยที่เวลาไม่เปลี่ยน ค่า J_0 อาจพิจารณาได้ในรูปของ E_0; อีลาสติคโมดูลัส (elastic modulus) ซึ่งเป็นส่วนกลับของ J_0 และเป็นตัวแปรที่บอกถึงสมบัติของของแข็งที่มีความยืดหยุ่นของมะม่วงกวน ในช่วงนี้ถ้าถอนแรงออกมะม่วงกวนจะสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากมีพลังงานสะสมในการกลับคืนสู่รูปเดิมได้ (Christensen, 1971) สันนิษฐานว่าพันธะที่เกิดในมะม่วงกวนอาจเป็นพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดระหว่างโมเลกุลของน้ำและน้ำตาล หรือแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรโฟบิคซึ่งเกิดระหว่างโมเลกุลของเพกตินกับเพกติน โดยการก่อพันธะมากขึ้นทำให้เจลมีความคงตัวและแข็งแรงมากขึ้น (Apichartsrangkoon *et. al*, 1999)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ค่า compliance ขึ้นกับเวลา ช่วงนี้ประกอบด้วยแบบจำลองของเคลวิน 2 หน่วย ซึ่งจะมีทั้งสปริงและลูกสูบ ดังนั้นในช่วงนี้มะม่วงกวนจึงมีสมบัติที่เป็นทั้งของแข็งและของเหลวรวมกัน โดยการเปลี่ยนรูปเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเกิดเวลาการหน่วง (retardation time) ในส่วนโครงสร้างของมะม่วงกวนในช่วงนี้เกิดการแตกหักของพันธะบางส่วน ดังนั้นสมบัติความยืดหยุ่นของมะม่วงกวนจึงลดลง (Sherman, 1970)

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ค่า compliance ของของเหลว (viscous) ที่ไม่มีความสามารถในการคืนรูปได้เนื่องจากสมบัติของของเหลวที่ไม่สามารถเก็บสะสมพลังงานเหมือนของแข็ง จึงทำให้พลังงานสูญหายไป ในช่วงนี้จะพิจารณาการไหล (flow) จากความชัน (slope) ซึ่งเป็นส่วนกลับของความหนืด (η_0) และในมะม่วงกวนมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ซึ่งน้ำภายในเซลล์ก็มีสมบัติที่เป็นของไหลดังนั้นในมะม่วงกวนจึงมีสมบัติการไหลด้วย (Apichartsrangkoon and Ledward, 2002)

ในส่วนของการคืนรูป (recovery) พบว่าเมื่อถอนแรงที่กดกราฟ creep ของมะม่วงกวนมีลักษณะที่สามารถคืนรูปได้แต่ไม่สามารถคืนรูปได้ทั้งหมด เนื่องจากลักษณะของวัสดุวิสโคอีลาสติคซึ่งมีการยืดหยุ่นโดยมีการคืนรูปตามเวลาเหมือนสมบัติของของแข็ง แต่ไม่กลับไปสู่สภาพเริ่มต้นได้เนื่องจากมีลักษณะของของเหลวที่เกิดการไหลไปข้างหน้าโดยไม่มีการย้อนกลับสู่สภาพเดิม (Christensen, 1971) ดังนั้นการพิจารณาการคืนรูปหรือการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรจึงพิจารณาจากค่า J ที่วินาทีที่ 3600; J_{PD} ในส่วนโครงสร้างของมะม่วงกวนเกิดการแตกหักของพันธะเป็นบางส่วน จากการที่มีสมบัติของการไหลและไม่สามารถกลับคืนรูปเดิมได้

จากกราฟ creep สามารถหาค่าตัวแปรของสมบัติวิสโคอีลาสติค (viscoelastic parameter) คือ E_0, η_0 และ J_{PD} แสดงได้ดัง Figure 2(a), 2(b) และ 2(c) ตามลำดับ

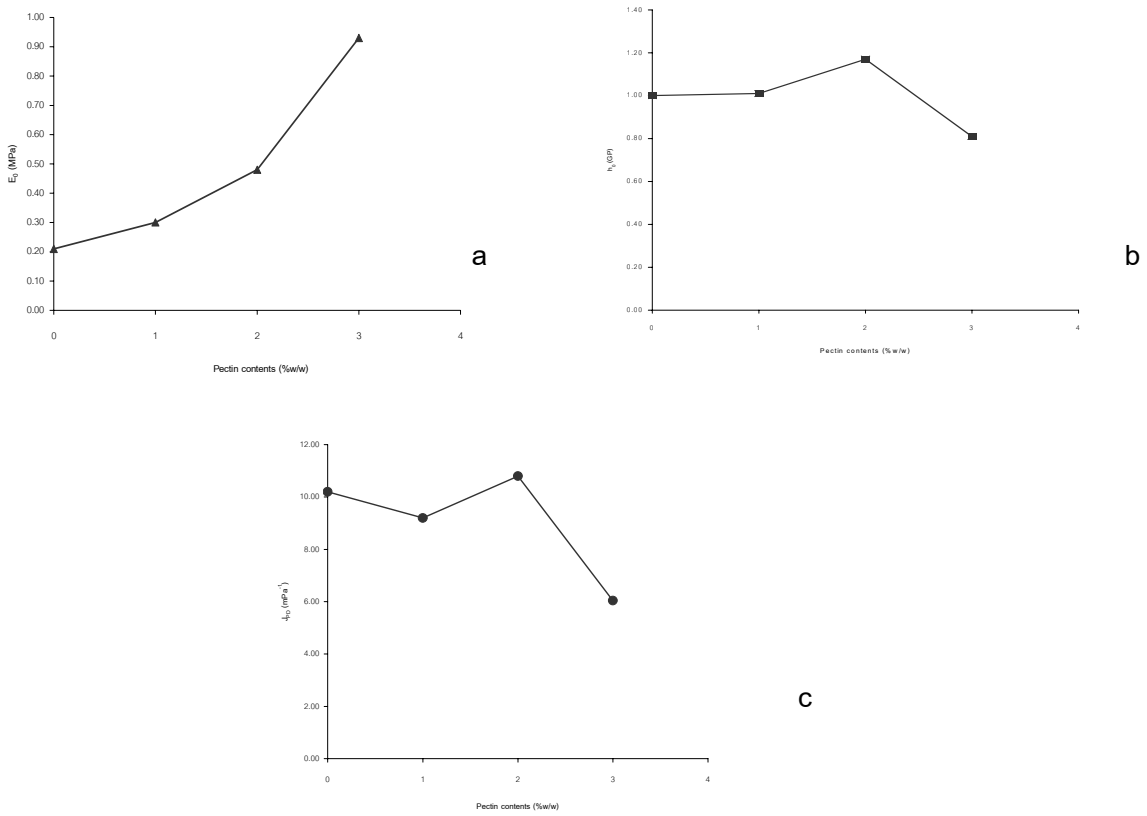


Figure 2 Relationship between pectin contents and viscoelastic parameters (a) E_0, (b) η_0 and (c) J_{PD}

จาก Figure 2 พบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณเพกตินจากร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนัก ค่า E_0 (MPa) มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเป็น 0.21 0.30 0.48 และ 0.93 ตามลำดับ โดยการเพิ่มขึ้นของค่า E_0 สามารถบอกได้ถึงสมบัติของแข็งที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเปลี่ยนแปลงของความเครียดมีค่าน้อยเมื่อความเค้นคงที่ สอดคล้องกับการเพิ่มปริมาณเพกตินเป็นการเพิ่มการก่อ cross-link และเกิดจังก์ชันโซนมากขึ้น ทำให้เจลของเพกตินมีความคงตัวและแข็งแรงมากขึ้น (Apichartsrangkoon *et. al*, 1998) เมื่อพิจารณาค่า η_0(GP) พบว่ามะม่วงแก้วกวนมีค่าความหนืดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีค่าเป็น 1.00 1.01 1.17 และ 0.81 ตามลำดับของเพกตินที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นลักษณะการไหลของมะม่วงแก้วกวนทั้ง 4 หน่วยทดลองนี้จึงมีลักษณะที่ไม่แตกต่างกันด้วย ในส่วนของการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร; J_{PD} พบว่ามะม่วงแก้วกวนมีค่า $J_{PD}(\mu Pa^{-1})$ เป็น 10.20 9.20 10.80 และ 6.04 ตามลำดับเพกตินที่เพิ่มขึ้นซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมะม่วงแก้วกวนที่เติมเพกตินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่า J_{PD} ต่ำที่สุด ซึ่งหมายถึงมะม่วงแก้วกวนที่เติมเพกตินร้อยละ 3 โดยน้ำหนักนี้มีสมบัติของของแข็งมากที่สุดและมีสมบัติในการไหลน้อยที่สุดซึ่งสอดคล้องกับค่า E_0

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า a_w และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดกับค่า J มีความสัมพันธ์ที่หาได้ดังนี้ คือ

$$J\ (\mu Pa^{-1}) = -\ 76.51\ a_w + 88.12 \qquad R^2 = 0.9666$$

$$J\ (\mu Pa^{-1}) = -\ 0.36\ \text{Total sugar} + 50.69 \qquad R^2 = 0.7596$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้น พบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า a_w และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดมีผลทำให้ค่า J มีแนวโน้มลดลง โดยมีความสัมพันธ์ของค่า a_w กับค่า J คิดเป็นร้อยละ 96.66 และความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดกับค่า J คิดเป็นร้อยละ 75.96 ดังนั้นค่า J ที่ลดลงจึงมีความสัมพันธ์กับปริมาณน้ำอิสระ (a_w) และปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นด้วย

สรุป

จากผลการทดลองพบว่ามะม่วงแก้วกวนที่มีเพกตินร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมเป็นแบบจำลอง 6 องค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 ส่วน และแบบจำลองเคลวิน-โวค 2 ส่วน

และสามารถอธิบายคุณสมบัติทางวิสโคอีลาสติคของมะม่วงกวนได้จากแบบจำลอง และจากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเพกตินที่เพิ่มขึ้นกับค่าตัวแปร E_0, η_0 และ J_{PD} พบว่าการเพิ่มเพกตินทำให้มะม่วงแก้วกวนมีสมบัติอีลาสติคเพิ่มขึ้น สมบัติของการไหลของของเหลวลดลง และมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวรลดลงด้วย และจากการหาความสัมพันธ์ของค่า J กับค่า a_w และปริมาณน้ำตาลทั้งหมด พบว่าค่า J มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณเพกตินเพิ่มมากขึ้นจากร้อยละ 0 1 2 และ 3 โดยน้ำหนักตามลำดับ โดยค่า J ที่ลดลงนี้มีความสัมพันธ์กับค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และ a_w ที่มีค่าเพิ่มมากขึ้น เห็นได้ชัดในมะม่วงแก้วกวนที่เติมเพกตินร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เกิดจากการก่อ cross-link ที่มากขึ้น (Apichartsrangkoon *et. al*, 1998) ซึ่งอาจจะเกิดอันตรกิริยาที่เกิดจากเพกตินกับเพกติน หรือเพกตินกับโพลีแซคคาไรด์อื่นในมะม่วงแก้วกวน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่า J ที่เกิดนี้ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด และ a_w ด้วย (Apichartsrangkoon, 2003)

เอกสารอ้างอิง

Apichartsrangkoon, A., D. A Ledward, A. E Bell and J. G Brennan. 1998. Physicochemical properties of high pressure treated wheat gluten. Food Chemistry. 63: 215-220.

Apichartsrangkoon, A., A. E Bell, D. A Ledward and J. D Schofield. 1999. Dynamic Viscoelastic Behavior of High-Pressure-Treated Wheat Gluten. Cereal Chemistry. 76: 777-782.

Apichartsrangkoon, A. 2002. Dynamic Viscoelastic Properties of Heated Gluten/Soy Protein Gels. Journal of Food Science. 67: 653-657.

Apichartsrangkoon, A. and D. A Ledward. 2002. Dynamic Viscoelastic behavior of high pressure treated gluten-soy mixtures. Food Chemistry. 77: 317-323.

Apichartsrangkoon, A. 2003. Effects of high pressure on rheological properties of soy protein gels. Food Chemistry. 80: 55-60.

Christensen, R. M. 1971. Theory of viscoelastic: An Introduction. Academic Press. New York.

James, F. S. 1996. Rheological Methods in Food Process Engineering. Second Edition. Freeman Press. Michigan.

Sherman, P. 1970. Industrial Rheology. Academic Press. New York.