

พฤติกรรมทางวิสโคอีลาสติก ของเยลลี่ลำไยโดยวัดแบบทรานเซนท์

Viscoelastic Behavior of Longan Jelly with Transient Measurement

อรุณี อภิชาติสร้างกูร ศศิธร ลอเลิศลักษณ์

Arune Apichartsrangkoon Sasitorn Laolertlakana

หน่วยวิจัยผลิตภัณฑ์อาหารจากธรรมชาติ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร

คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ABSTRACT

In preparation of longan jelly, minced longan was blended with carrageenan and locustbean gum for setting gels. Mixture design was applied to the experiment by varying minced longan, mixed sugar, carrageenan and locustbean gum. Transient measurement i.e. creep test was performed with constant stress at 40 Pa. It was found that the creep model of longan jelly consisting four elements included a unit of Maxwell connected in series with a unit of Voigt-Kelvin. For creep parameters, an elastic modulus and viscosity increased with increasing levels of carrageenan and locustbean gum, but these were antagonistic with permanent deformation and retardation time.

Keyword : Viscoelastic, Creep, Longan Jelly

บทคัดย่อ

การผลิตเยลลี่ลำไยโดยผสมคาร์ราจีแนนและ
โลคัสต์บีนัมในลำไยบดละเอียดเพื่อช่วยก่อเจล โดยใช้
แผนการทดลองแบบส่วนผสม (mixture design) ซึ่ง
แปรผันส่วนผสมเป็นร้อยละของ เนื้อลำไย น้ำตาลผสม
คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บีนัม จากการศึกษาพฤติกรรม
ทางวิสโคอีลาสติก โดยทดสอบแบบทรานส์เซนท์ ได้แก่
การทดสอบการคืบ โดยใช้ความเค้นคงที่เป็น 40 Pa พบว่า

เยลลี่ลำไยมีแบบจำลองเป็น 4 องค์ประกอบ ซึ่งประกอบ
ด้วยแบบจำลองไวค-เคลวิน 1 หน่วยต่ออนุกรมกับแบบ
จำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย โดยค่าวิสโคอีลาสติกโมดูลัสและค่า
ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์ราจีแนนและ
โลคัสต์บีนัมที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีค่าผกผันกับค่าการผิดรูปอย่าง
ถาวร และเวลาหน่วง

คำนำ

ลำไยเป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย
โดยเฉพาะในเขตภาคเหนือตอนบน ในปัจจุบันประเทศไทย
สามารถปลูกลำไยได้เกือบทั่วประเทศ และได้ผลผลิต
ตลอดทั้งปี เพราะมีการนำสารไฟแทสเซียมคลอไรด์มาใช้
เพื่อเร่งการออกดอกนอกฤดูกาล เป็นเหตุให้เกิดภาวะผลิต
ผลล้นตลาด ทำให้ราคาของผลผลิตตกต่ำเป็นอย่างมาก

ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศโดยรวม ดังนั้น
การแปรรูปลำไยเพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ เช่น เยลลี่
ที่มีความหลากหลายเพิ่มมากขึ้น นอกจากจะช่วยระบาย
ผลผลิตที่ล้นตลาดแล้ว ยังสามารถเพิ่มมูลค่าให้แก่ลำไย
ซึ่งมีราคาตกต่ำได้อีก

ในการผลิตเยลลี่ลำไย จะใช้ไฮโดรคอลลอยด์ (hydrocolloid) ซึ่งเป็นโพลิเมอร์ใหญ่ เพื่อเสริมโครงสร้างของเยลลี่ให้ความเหนียวยืดหยุ่น ไฮโดรคอลลอยด์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นการผสมผสานร่วมกันระหว่างคาร์ราจีแนนกับโลคัสต์บินกัม ซึ่งสารทั้งสองชนิดนี้ จัดอยู่ในกลุ่มฟังก์ชันนอล ฟู้ดส์ (functional foods) เนื่องจากเป็นเส้นใยอาหารชนิดที่ลุ่มน้ำได้ดี (Pilnik and Rombouts, 1985) การใช้คาร์ราจีแนน (carrageenan) ร่วมกับโลคัสต์บินกัม (locustbean gum) สามารถดัดแปลงลักษณะของผลิตภัณฑ์ได้ตามความต้องการของผู้บริโภค คือ ตั้งแต่เจลเปราะ (brittle gel) จนถึงเจลเหนียวยืดหยุ่น (elastic gel) อย่างไรก็ดี ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่ใช้ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้คาร์ราจีแนนร่วมกับโลคัสต์บินกัม ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยลดปัญหาการแยกน้ำ (syneresis) ของคาร์ราจีแนนได้ดี (Maier et al., 1993)

การใช้ส่วนผสมของไฮโดรคอลลอยด์ เพื่อปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารนั้น จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

วัตถุดิบ

1. แคปปา-คาร์ราจีแนน (บริษัท ไทยฟู้ดส์แอนด์เคมีคอล)
2. โลคัสต์บินกัม (บริษัท ไทยฟู้ดส์แอนด์เคมีคอล)
3. มอลโตเดกซ์ทริน (บริษัท เอส. ดับเบิลยู. เกรท จำกัด)
4. น้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ (บริษัท น้ำตาลทรายมิตรผล จำกัด)
5. ลำไยสดพันธุ์ดอ (ตลาดคอยติ อ.เมือง จ.ลำพูน)

เครื่องมือ

เครื่องรีโอมิเตอร์

(Rheometer, TA Instruments : AR2000, USA)

การศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของเยลลี่ลำไย

1. ผลิตเยลลี่ลำไย โดยปั่นเนื้อลำไยด้วยเครื่องผสมอาหารความเร็วสูง 2 นาที ผสมน้ำตาลทราย มอลโตเดกซ์ทริน คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกัมเข้าด้วยกัน เพื่อป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อน จากนั้นนำไปปั่นรวมอีกครั้งกับเนื้อ

ที่มีผลต่อการก่อเจลและความเหนียว เนื่องจากมีความสำคัญต่อลักษณะเนื้อสัมผัสที่ผู้บริโภคยอมรับได้ วิธีที่นิยมใช้ประเมินคุณสมบัติทางกายภาพของเจล โดยไม่กระทบต่อโครงสร้างโมเลกุล ได้แก่ การวิเคราะห์ทางวิสโคอิลาสติก เจลทั่วไปจะประกอบด้วยคุณสมบัติขั้นหนึ่ง (viscous) และคุณสมบัติยืดหยุ่น (elastic) ซึ่งรวมเรียกว่า วิสโคอิลาสติก การวัดคุณสมบัตินี้ วิธีที่นิยมได้แก่การคืบ (creep) และการพักความเค้น (stress relaxation) การศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) โดยมากจะอธิบายในเชิงแบบจำลองทางวิสโคอิลาสติก (viscoelastic model) ซึ่งสามารถบ่งบอกถึงพฤติกรรมเชิงกล (mechanical behaviors) ของวัสดุนั้น (อรุณีและอุทัยวรรณ, 2546; อุทัยวรรณและอรุณี, 2546 ; Supavititpatana and Apichartsrangkoon, 2007)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติก พร้อมทั้งหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมของเยลลี่ลำไยที่เกิดจากการใช้ไฮโดรคอลลอยด์สองชนิดร่วมกันคือ คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกัม

ลำไยที่ปั่นแล้วใช้เวลาปั่นประมาณ 1 นาที นำส่วนผสมที่ได้ไปต้มพร้อมคนตลอดเวลา จนส่วนผสมมีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เทลงพิมพ์ที่เตรียมไว้ พยายามอย่าให้มีฟองอากาศ ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที จนเยลลี่แข็งตัว แกะเยลลี่ออกจากพิมพ์ ตัดให้ได้ขนาด $3 \times 3 \times 1.5$ เซนติเมตร จัดวางเยลลี่ลงในภาดอลูมิเนียม ให้มีระยะห่างระหว่างชิ้นเล็กน้อย นำไปอบที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ใช้เวลาอบ 20 ชั่วโมง (จนเยลลี่มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 30 หรือ มีค่าวอเตอร์แอกทิวิตีอยู่ในช่วง 0.75-0.80) การผันแปรสูตรของเยลลี่ลำไยใช้แผนการทดลองแบบส่วนผสม (mixture design) ประกอบด้วย 4 ปัจจัยคือ เนื้อลำไย ร้อยละ 60-80 น้ำตาลผสม (น้ำตาลทราย : มอลโตเดกซ์ทริน = 2 : 1) ร้อยละ 15-30 แคปปา-คาร์ราจีแนนร้อยละ 0.25-1 และโลคัสต์บินกัมร้อยละ 0.25-1 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการกำหนดสูตร ดัง Table 1

Table 1. Longan jelly recipe

Treatment	Longan (%)	Sucrose:Maltodextrin=2:1 (%)	•-Carrageenan (%)	Locustbean gum (%)
1	84.50	15.00	0.25	0.25
2	83.75	15.00	1.00	0.25
3	76.63	22.50	0.63	0.25
4	75.88	22.50	1.00	0.62
5	72.69	26.25	0.63	0.44
6	79.81	18.75	0.81	0.63
7	68.00	30.00	1.00	1.00
8	83.00	15.00	1.00	1.00
9	83.75	15.00	0.63	0.63
10	76.25	22.50	0.25	1.00
11	68.75	30.00	1.00	0.25
12	69.50	30.00	0.25	0.25

2. วิธีการวัดสมบัติทางวิสโคอิลาสติก

2.1 เตรียมตัวอย่างเยลลี่ลำไย โดยตัดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร จากนั้นใช้ใบมีดเฉือนตัวอย่างให้ได้ความสูง 3 มิลลิเมตร ทารอบๆ ตัวอย่าง ด้วยซิลิโคนออยล์ (silicone oil) เล็กน้อยเพื่อป้องกัน ตัวอย่างแห้งในระหว่างวัด

2.2.หาค่าความเค้นที่ไม่ทำให้โครงสร้างของตัวอย่างเสียสภาพ โดยวิธี stress sweep โดยนำตัวอย่างเยลลี่ ที่มีลักษณะแข็งที่สุดได้แก่ treatment 7 และอ่อนสุดได้แก่ treatment 12 ที่ได้จากการทดลองเบื้องต้น ทำการทดสอบหาค่าความเค้นที่เหมาะสม ดัง Figure 1. จะเห็นว่าความเค้นที่เหมาะสมอยู่ที่ 40 Pa

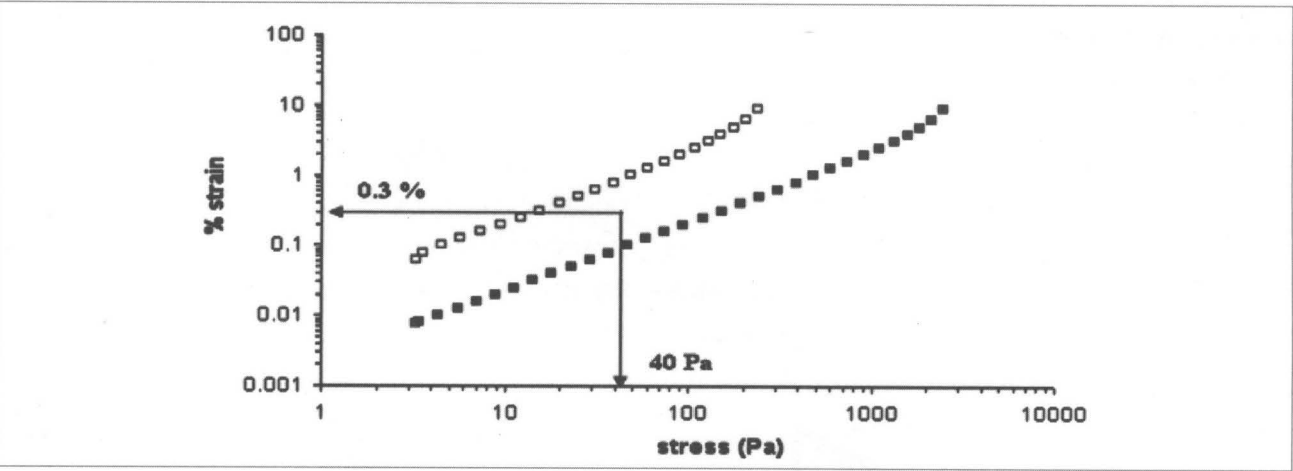


Figure1. Stress amplitude sweep of longan jelly, (●) treatment 7, (○) treatment12

2.3. ทดสอบการคืบ นำตัวอย่างที่เตรียมได้ทดสอบการคืบโดยกำหนดค่าความเค้นคงที่ 40 Pa ใช้เวลาในการทดสอบ creep 5 นาที หลังจากนั้น ถอนแรงแล้วทดสอบ recovery อีก 15 นาที ทำการทดลอง 6 ซ้ำ พิจารณากราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า compliance (J) และเวลา จากนั้นทำการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม

พร้อมทั้งศึกษาสมบัติ ทางวิสโคอิลาสติกของเยลลี่ลำไย โดยพิจารณาจากค่าตัวแปรทางวิสโคอิลาสติก เช่น ค่าอิลาสติกโมดูลัส (E_0) ค่าความหนืด (μ) การผิดรูปอย่างถาวร (compliance permanent deformation : J_{pd}) และเวลาหน่วง (retardation time : \bullet ret)

ผลและวิจารณ์

ลำไยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีส่วนประกอบทางเคมีคือ ปริมาณความชื้น (Moisture content) ร้อยละ 84.92 ปริมาณน้ำอิสระ (a_w) 0.97 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.17 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solid) 17.5 องศาบริกซ์

จากการทดสอบการคืบของเยลลี่ลำไยทั้ง 12 สิ่ง ทดลองพบว่า เยลลี่ลำไยทุกสิ่งทดลองมีลักษณะกราฟ คล้ายคลึงกัน ดัง Figure 2 กราฟการคืบแบ่งได้เป็น 3 ช่วง คือช่วงที่ 1 เป็นช่วงที่ compliance J_0 เกิดการเปลี่ยนแปลงทันทีทันใด (instantaneous compliance) โดยที่เวลาไม่เปลี่ยน ซึ่งเกิดเนื่องจากเยลลี่ลำไยมีสมบัติที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น (elastic) เช่นเดียวกับสปริง (spring) เมื่อออกแรงดึง (โดยแรงนั้นไม่ทำให้สปริงเสียสภาพ) สปริงเกิดการยืดตัวออกทันทีทันใด แต่เมื่อปล่อยแรงดึงสปริงจะหดกลับสู่สภาพเดิมทันที ดังนั้นสปริงจึงเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้แทนแบบจำลองส่วนนี้ โดยค่า compliance J_0 สามารถพิจารณาได้ในรูปของ อีลาสติกโมดูลัส (elastic modulus; E_0) ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่า J_0 โดยเป็นพลังงานสะสมในวัสดุที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นและ สามารถใช้พลังงานนั้นในการกลับคืนสู่สภาพเดิม (Ward and Hadley, 1995) ในช่วงนี้ถ้าถอนแรงออก เยลลี่ลำไยจะสามารถคืนสู่สภาพเดิมได้ เนื่องจากความเค้นที่ไม่มากพอที่จะทำให้พันธะในเยลลี่ลำไยเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยคาดว่าพันธะที่เกิดขึ้นในเยลลี่ลำไยเป็นพันธะที่ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ (non-covalent bond) อาจเป็นแรงยึดเหนี่ยวซึ่งเกิดระหว่างคาร์ราจีแนนและไลค์สตีปีนกัน โดยการก่อกำเนิดที่มากขึ้น ทำให้เจลมีความคงตัวและแข็งแรงมากขึ้น (Bayarri et al., 2004)

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ compliance เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากกราฟที่ได้พบว่าช่วงนี้ประกอบด้วยแบบจำลองไวค-เคลวิน 1 หน่วย โดยแบบจำลองไวค-เคลวินมีสปริงต่อขนานกับลูกสูบ ซึ่งลูกสูบ (dashpot) เป็นสัญลักษณ์ที่ใช้

แทนของเหลวที่ไม่ขึ้นกับเวลาหรือการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร ดังนั้นในช่วงนี้จึงมีสมบัติที่เป็นทั้งของแข็งยืดหยุ่นและของเหลวหนืด โดยการเปลี่ยนรูปจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเกิดเวลาหน่วง (retardation time) เนื่องจากเมื่อให้ความเค้นคงที่ค่าหนึ่งกระทำกับตัวอย่างสปริงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงทันที แต่ลูกสูบค่อยๆ เกิดการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้เกิดเวลาหน่วงในส่วนของการสร้างเยลลี่ลำไยในช่วงนี้ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของพันธะบางส่วน ดังนั้นสมบัติความยืดหยุ่นของเยลลี่ลำไยจึงลดลง

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่ compliance ไม่สามารถคืนรูปได้ จึงแสดงสมบัติของของไหล โดยเมื่อมีความเค้นคงที่ค่าหนึ่งมากระทำจะเกิดการไหลขึ้น เนื่องจากสมบัติของของไหลไม่มีความสามารถในการเก็บสะสมพลังงานเหมือนของแข็ง จึงทำให้พลังงานสูญหายไปในช่วงที่ 3 นี้ จะพิจารณาการไหลของวัสดุโดยพิจารณาจากค่าความหนืด ซึ่งเป็นส่วนกลับของค่าความชัน (slope) โดยถ้าวัสดุนั้นมีความหนืดมาก นั่นคือความชันของเส้นกราฟจะน้อย ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของค่าความเครียด (strain) จึงน้อย หมายถึงการมีสมบัติของแข็งที่มากขึ้นและส่งผลให้การไหลเกิดขึ้นน้อย

ในส่วนของการคืนรูป (recovery) พบว่าเมื่อถอนแรงเค้น บางส่วนเกิดการคืนรูป ขณะที่บางส่วนเกิดการผิดรูปอย่างถาวร เยลลี่ลำไยไม่สามารถคืนรูปได้หมดเนื่องจากลักษณะของวัสดุวิสโคอีลาสติกที่มีการยืดหยุ่น โดยมีการคืนรูปตามเวลาเหมือนสมบัติของแข็ง แต่จะไม่กลับไปสู่สภาพเริ่มต้นเนื่องจากมีลักษณะของของเหลวที่เกิดการไหล (มันส์, 2538) ในที่นี้พิจารณาการคืนรูปจากค่า compliance (J) ที่เกิดการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (permanent deformation ; J_{pd}) ซึ่งพิจารณาจากค่า J_{pd} วินาทีที่ 1200 เนื่องจากเป็นจุดสุดท้ายของการทดสอบในส่วน โครงสร้างของเยลลี่ลำไยจะเกิดการสลายของพันธะเป็นบางส่วนจากการที่มีสมบัติการไหล

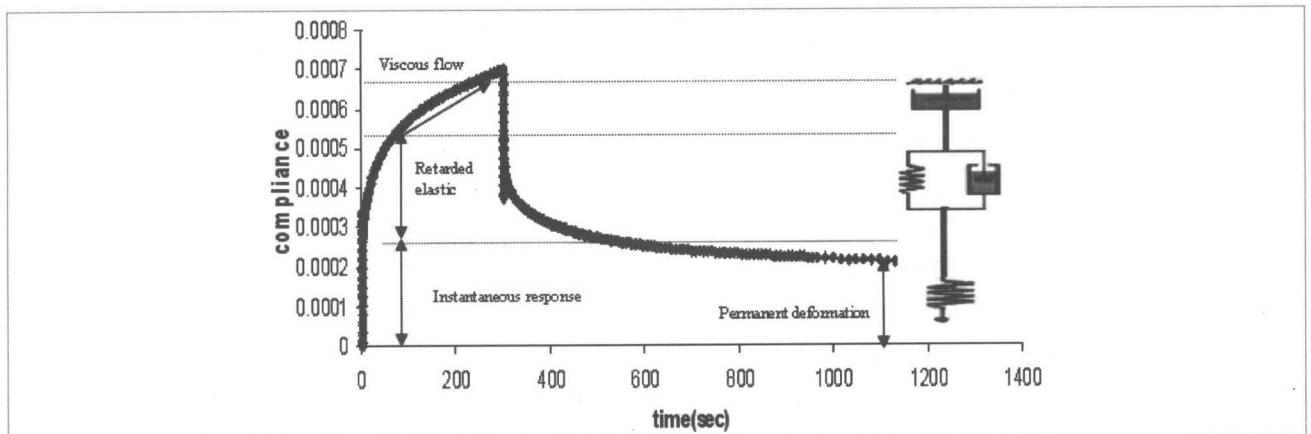


Figure 2. Creep curve fitted with 4-elements model

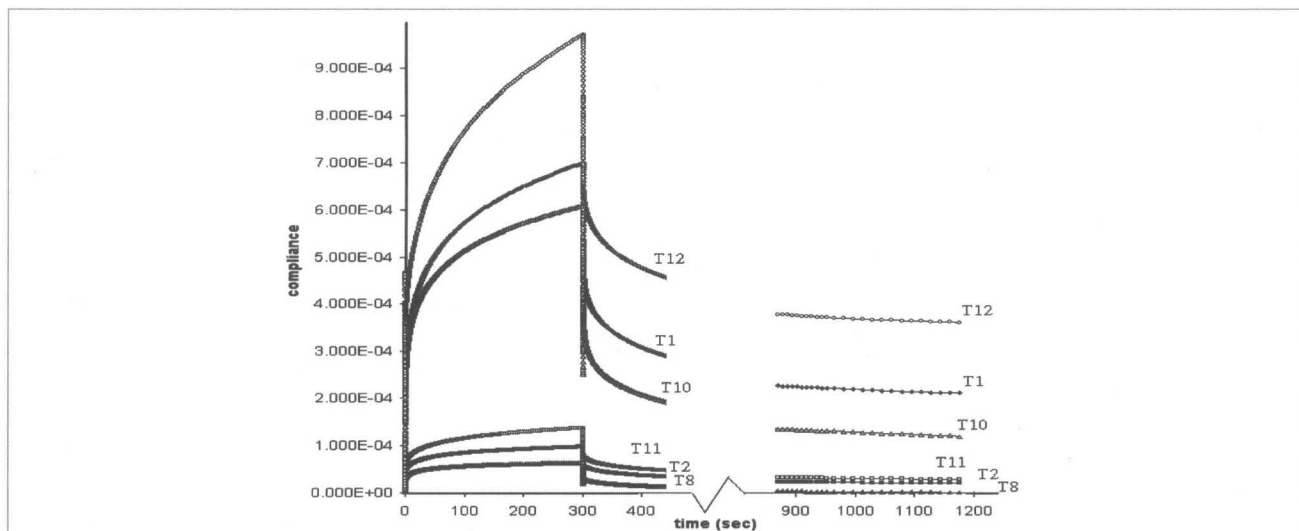


Figure 3. Creep compliance curve versus time of longan jelly, \diamond treatment 12, \blacklozenge treatment 1, \triangle treatment10, \square treatment11, \blacksquare treatment 2, \blacktriangle treatment8

จาก Figure 3 แสดงกราฟการคืบของเยลลี่ลำไย สิ่งทดลองที่ 1, 2, 8, 10, 11 และ 12 ตามลำดับ เท่านั้น เนื่องจากกราฟการคืบของสิ่งทดลองอื่นๆ มีลักษณะที่ คล้ายกันและกราฟบางเส้นเกิดการซ้อนทับกันทำให้เห็น ภาพไม่ชัดเจน จึงยกตัวอย่างกราฟเพียง 6 เส้นดังกล่าว

เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการแบบจำลอง แล้ว plot กราฟ compliance (J) เปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากการ ทดลองจริง พบว่าแบบจำลอง 4 องค์ประกอบ ซึ่งประกอบ ด้วยแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย และแบบจำลอง ไวค-เคลวิน 1 หน่วยมีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากกราฟ การคืบ ที่ได้จากการทดลองจริงและจากสมการแบบ จำลองมีรูปแบบที่สอดคล้องกันพอดี โดยพบว่าเยลลี่ลำไย

ทั้ง 12 สิ่งทดลองมีแบบจำลองในรูปแบบเดียวกันจาก แบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายคุณสมบัติวิสโคอีลาสติก ของตัวอย่างเยลลี่ลำไยทุกสิ่งทดลอง (Chatotong and Apichartsrangkoon, 2007) และสามารถหาค่าตัวแปร ของแบบจำลอง (viscoelastic parameter) ดังนี้ compliance J_0 หรืออีลาสติกโมดูลัส (elastic modulus ; E_0) แทนสมบัติ อีลาสติกหรือความเป็นของแข็งยืดหยุ่น ในที่นี้จึงใช้ค่า E_0 ในการอธิบายเพื่อให้เข้าใจได้ง่ายและใช้ค่าความหนืด (viscosity ; μ) ในการอธิบายสมบัติการไหล (flow) ซึ่งเป็น สมบัติของของเหลวของวัสดุ โดยค่าความหนืดพิจารณา ได้จากส่วนกลับของค่าความชันของกราฟการคืบและ พิจารณาพฤติกรรมการผิรูปของวัสดุจากค่า J_{pd} ดัง Table 2.

Table 2. Creep parameters of longan jelly from 12 treatments condition

Treatment	E_0 (kPa)	J_{pd} (μ Pa-1)	μ (Pa.s) x106	\bullet ret (s)
1	$3.07^h \pm 0.04$	$211.50^d \pm 9.10$	$1.95^h \pm 0.05$	$48.22^g \pm 0.48$
2	$16.73^e \pm 0.45$	$22.20^a \pm 6.39$	$17.65^c \pm 0.37$	$43.75^{de} \pm 0.88$
3	$9.62^g \pm 0.42$	$71.98^b \pm 9.41$	$6.17^f \pm 0.09$	$44.33^e \pm 0.14$
4	$21.54^c \pm 0.76$	$19.52^a \pm 2.71$	$17.85^c \pm 0.39$	$42.83^c \pm 0.52$
5	$8.52^g \pm 0.24$	$72.06^b \pm 7.73$	$6.03^f \pm 0.08$	$44.33^e \pm 0.68$
6	$18.54^d \pm 0.76$	$21.60^a \pm 2.55$	$17.68^c \pm 0.17$	$43.67^d \pm 0.68$
7	$24.98^b \pm 3.10$	$8.16^a \pm 2.58$	$26.33^b \pm 0.47$	$41.92^b \pm 0.37$
8	$26.90^a \pm 1.03$	$0.75^a \pm 0.15$	$38.97^a \pm 0.48$	$41.13^a \pm 0.23$
9	$13.44^f \pm 0.94$	$32.08^a \pm 9.34$	$10.63^e \pm 0.16$	$44.25^{de} \pm 0.16$
10	$3.14^h \pm 0.12$	$125.82^c \pm 27.92$	$2.76^g \pm 0.07$	$45.37^f \pm 0.38$
11	$13.71^f \pm 0.51$	$28.43^a \pm 1.12$	$11.24^d \pm 0.18$	$43.86^{de} \pm 0.44$
12	$2.45^h \pm 0.06$	$359.16^e \pm 87.86$	$1.27^i \pm 0.04$	$49.16^h \pm 0.23$

Note : Data in each column with the same superscript letter were not significantly different ($p > 0.05$) by DMRT

E_0 : elastic modulus

μ : viscosity

J_{pd} : compliance permanent deformation

\bullet ret : retardation time

จาก Table 2 แสดงค่าตัวแปรทางวิสโคอิลาสติก สำหรับการทดสอบการคืบ โดยค่า E_0 หรือ elastic modulus หาได้จากส่วนกลับของ J_0 จากการทดลองพบว่าสิ่งทดลองที่มีค่า E_0 มากที่สุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 8, 7, 4, 6, 2, 11, 9, 3, 5, 10, 1 และ 12 ตามลำดับ สิ่งทดลองที่

8 มีค่า E_0 เท่ากับ 26.90 ± 1.03 kPa ขณะที่ สิ่งทดลองที่ 12 มีค่า E_0 เท่ากับ 2.45 ± 0.06 kPa แสดงว่า สิ่งทดลองที่ 8 มีความยืดหยุ่นสูงสุดในขณะที่สิ่ง ทดลองที่ 12 มีความยืดหยุ่นต่ำสุด

Table 3 Regression equation of creep parameters

	Regression equation	r^2
1	$E_0 = -0.101X_2 + 14.462X_3 - 1.422X_4 + 15.622X_3X_4$	0.997
2	$J_{pd} = 2.210X_1 + 6.048X_2 - 247.323X_3 - 90.409X_4$	0.786
3	$\mu = -0.5X_2 + 23.702X_3 + 14.057X_4$	0.936
4	$\bullet_{ret} = 0.495X_1 + 0.523X_2 - 5.285X_3 - 2.492X_4$	1.000

Note : X_1 = Longan X_2 = Mixed sugar
 X_3 = •-Carrageenan X_4 = Locustbean gum

เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า E_0 และปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (1) ใน Table 3 โดยพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า E_0 ได้แก่ น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน โคลด์สตปีนกันและคาร์ราจี เนนร่วมกับโคลด์สตปีนกันโดยปริมาณคาร์ราจีแนนที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า E_0 มีค่ามากขึ้น ขณะที่ปริมาณน้ำตาล ผสมและโคลด์สตปีนกันที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า E_0 มีค่าลดลง นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้ คาร์ราจีแนน ร่วมกับโคลด์สตปีนกัน ทำให้ค่า E_0 มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบสิ่งทดลองที่ 7 และ 8 ซึ่งมีเพียงปริมาณน้ำตาลผสมเท่านั้นที่แตกต่างกัน โดยสิ่งทดลองที่ 7 มีปริมาณน้ำตาลผสมร้อยละ 30 สิ่งทดลองที่ 8 มีปริมาณน้ำตาลผสมร้อยละ 15 พบว่าค่า E_0 ของสิ่งทดลอง ที่ 8 มากกว่า ค่า E_0 ของสิ่งทดลองที่ 7 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำตาลที่มากขึ้นมีผลให้ค่า E_0 มีค่าลดลง (Fizman and Duran,1992) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (1) ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณน้ำตาลที่มากเกินไป รวมตัวกับน้ำส่งผลให้น้ำไม่เพียงพอที่จะใช้ ในการก่อเจลของไฮโดรคอลลอยด์ทั้งสองชนิด จึงทำให้ได้ เจลที่อ่อนลง (Whittaker *et al.*,1997)

เช่นเดียวกับสิ่งทดลองที่ 1 เปรียบเทียบกับสิ่งทดลองที่ 12 และสิ่งทดลองที่ 2 เปรียบเทียบกับสิ่งทดลองที่ 11 ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกันกล่าวคือ ปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ความยืดหยุ่นของเจลลดลง และเมื่อพิจารณาถึง คาร์ราจีแนนจะพบว่า สิ่งทดลองที่ประกอบด้วยคาร์ราจีแนน

ในปริมาณมากมีผลให้ค่า E_0 มีค่ามาก ซึ่งคาร์ราจีแนนจัดเป็นสารก่อเจลที่ให้เจลมีลักษณะแข็ง โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมที่นิยมใช้จะอยู่ในช่วง 0.50-2.00 (อรอนงค์, 2545) และพบว่าอัตราส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนและ โคลด์สตปีนกันมีผลต่อค่า E_0 ด้วย ทั้งนี้หากให้คาร์ราจีแนน มีอัตราส่วนมากกว่าโคลด์สตปีนกันจะทำให้ได้เจลที่มีลักษณะแข็งและมีความยืดหยุ่นดังเช่นสิ่งทดลองที่ 2 และ 4 แต่หากให้โคลด์สตปีนกันมีอัตราส่วนมากกว่า คาร์ราจีแนนจะทำให้ได้เจลที่มีลักษณะอ่อนนุ่มแต่มีความยืดหยุ่นสูง ดังเช่นสิ่งทดลองที่ 10 และหากให้อัตราส่วน ระหว่างคาร์ราจีแนนกับโคลด์สตปีนกันเป็น 2:1 จะทำให้เกิดความเหนียวของเจล (gel strength) สูงสุดและที่อัตรา ส่วนระหว่างคาร์ราจีแนนกับโคลด์สตปีนกันเป็น 1:4 จะทำให้เกิดการแยกน้ำ (syneresis) น้อยที่สุด (สุวรรณา, 2543)

สำหรับค่า J_{pd} ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงพฤติกรรมการผิดรูปของวัสดุ โดยวัสดุใดมีค่า J_{pd} มากนั้นหมายถึง วัสดุนั้นจะเกิดการผิดรูปมากเมื่อมีแรงกระทำหากวัสดุใด มีค่า J_{pd} น้อย นั้นหมายถึงเกิดการผิดรูปน้อย ซึ่งแสดงว่ามีความคงตัวต่อความเค้นหรือแรงที่มากระทำ โดยดูได้จาก ส่วน recovery ของกราฟการคืบ ซึ่งค่า J_{pd} จะเป็นค่าที่ ผกผันกับค่า E_0 โดยวัสดุใดมีค่า E_0 มากจะมีค่า J_{pd} น้อย นั้นแสดงว่าวัสดุมีความยืดหยุ่นมากหรือมีการผิดรูปน้อย จากการทดลองพบว่า ทุกสิ่งทดลองมีค่า J_{pd} ที่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยสิ่งทดลองที่มีค่า J_{pd} มากสุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 12, 1, 10, 5,

3, 9, 11, 2, 6, 4, 7 และ 8 โดยสิ่งทดลองที่ 12 มีค่า J_{pd} เท่ากับ $359.16 \pm 87.86 \mu Pa^{-1}$ ขณะที่สิ่งทดลองที่ 8 มีค่า J_{pd} เท่ากับ $0.75 \pm 0.15 \mu Pa^{-1}$ นั่นคือสิ่งทดลองที่ 12 เป็นเยลลี่ลาโยที่มีลักษณะเจลที่มีความคงตัวน้อย จึงมีการผิวดรูปถาวรมาก สาเหตุอาจเป็นเพราะปริมาณน้ำตาลผสมที่มากเกินไปหรือปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่น้อยเกินไป จึงส่งผลให้เกิดเจลอย่างไม่สมบูรณ์ เจลที่ได้จึงค่อนข้างอ่อน สำหรับสิ่งทดลองที่ 8 สาเหตุที่มีความคงตัวสูงสุด อาจเป็นเพราะอัตราส่วนและปริมาณของคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่มากพอ รวมถึงปริมาณน้ำตาลผสมที่มีความเหมาะสมจึงเกิดโครงสร้างตาข่ายอย่างแข็งแรงและเมื่อนำค่า J_{pd} ในทุกสิ่งทดลองไปหาสมการเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_{pd} ที่ได้กับปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (2) ใน Table 3 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า J_{pd} ได้แก่ เนื้อลำไย น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกัม โดยปริมาณเนื้อลำไยและปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า J_{pd} มีค่ามากขึ้น ในทางตรงข้าม ปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า J_{pd} มีค่าลดลง โดยคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมมีอิทธิพลต่อค่า J_{pd} มากกว่าเนื้อลำไยและน้ำตาลผสมดูได้จากสัมประสิทธิ์หน้าตัวแปร

ค่า μ หรือค่าความหนืด (viscosity) ใช้อธิบายสมบัติการไหล โดยถ้าวัสดุใดมีความหนืดมากนั่นคือ มีความสามารถในการต้านการไหลได้มากเมื่อมีแรงกระทำ แสดงว่าวัสดุนั้นมีสมบัติความเป็นของแข็งมากขึ้น จึงส่งผลให้การไหลเกิดขึ้นได้น้อย (Jackman and Stanley, 1995) จากการทดลองพบว่า สิ่งทดลองที่มีค่า μ มากที่สุดจนถึงน้อยที่สุดคือ สิ่งทดลองที่ 8, 7, 4, 6, 2, 11, 9, 3, 5,

10, 1 และ 12 ตามลำดับ สิ่งทดลองที่ 8 มีค่า เท่ากับ $38.97 \times 10^6 Pa.s$ สิ่งทดลองที่ 12 มีค่า เท่ากับ $1.27 \times 10^6 Pa.s$ เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า μ และปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ(3) ใน Table 3 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า μ ได้แก่ น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนน และโลคัสต์บินกัมโดยปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า μ มีค่ามากขึ้น ส่วนปริมาณน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า μ มีค่าลดลง

ค่า $\bullet ret$ หรือเวลาที่ใช้ในการหน่วง (retardation time) ซึ่ง $\bullet ret = \mu / E$ โดย μ แทนสมบัติการเป็นของไหลหนืด ส่วน E แทนสมบัติการเป็นของแข็งยืดหยุ่น โดยจะเห็นว่าเวลาที่ใช้ในการหน่วง มีความสัมพันธ์ในเชิงผกผันกับความยืดหยุ่น (Ojijo et al., 2004) จากการทดลองพบว่าทุกสิ่งทดลองมีค่า $\bullet ret$ ใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 41.13- 49.16 โดยสิ่งทดลองที่มีค่า $\bullet ret$ มากที่สุด แสดงความเป็นของแข็งยืดหยุ่นน้อยที่สุด คือสิ่งทดลองที่ 12 และสิ่งทดลองที่มีค่า $\bullet ret$ น้อยที่สุด แสดงความเป็นของแข็งยืดหยุ่นมากที่สุด คือ สิ่งทดลองที่ 8 ซึ่งคล้ายตามค่า parameters อื่นๆ เมื่อนำข้อมูลที่ได้ไปหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า $\bullet ret$ และปัจจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษา ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการ (4) ใน Table 3 พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อค่า $\bullet ret$ ได้แก่ ปริมาณเนื้อลำไย น้ำตาลผสม คาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัม โดยปริมาณเนื้อลำไยและน้ำตาลผสมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า $\bullet ret$ เพิ่มขึ้น ส่วนคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า $\bullet ret$ มีค่าลดลง

สรุป

การศึกษาสมบัติทางวิสโคอีลาสติก โดยทดสอบการคืบ พบว่าเยลลี่ลาโยทั้ง 12 สิ่งทดลองมีลักษณะแบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกเป็น 4 องค์ประกอบ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองไวค-เคลวิน 1 หน่วย ต่ออนุกรมกับแบบจำลองแมกซ์เวลล์ 1 หน่วย และพบว่า ค่าอีลาสติกโมดูลัส (E_0) ค่าความหนืด (μ) มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าการผิวดรูปอย่าง

ถาวร (J_{pd}) และเวลาหน่วง (retardation time) มีค่าลดลงตามปริมาณคาร์ราจีแนนและโลคัสต์บินกัมที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้นยังพบว่า เยลลี่ลาโยสิ่งทดลองที่ 8 ซึ่งมีปริมาณน้ำตาลต่ำ แต่มีปริมาณไฮโดรคอลลอยด์สูงจะมีความยืดหยุ่นสูงสุด ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 12 ซึ่งมีปริมาณน้ำตาลสูงแต่มีปริมาณไฮโดรคอลลอยด์ต่ำ จะมีความยืดหยุ่นและความข้นหนืดต่ำสุด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- มนัส แซ่ด่าน 2538. รีโอไลยีเบื้องต้น. สำนักพิมพ์ไฟรีเพช กรุงเทพมหานคร. 1-27 หน้า.
- สุวรรณา สุภิมารส 2543. เทคโนโลยีการผลิตลูกกวาดและชีกโกแลต.
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร.
- อรอนงค์ กิตติพงษ์พัฒนา 2545. คาราจีแนน : ของขวัญจากทะเล. คณะเภสัชศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่. 43-79 หน้า.
- อรุณี อภิชาติสรางกูร และ อุทัยวรรณ ฉัตรธง. 2546. การจำลองแบบทางวิสโคอีลาสติกของมะม่วงแก้วกวน.
อาหาร 33(4) : 292-298.
- อุทัยวรรณ ฉัตรธง และ อรุณี อภิชาติสรางกูร. 2546. แบบจำลองทางวิสโคอีลาสติกของมะม่วงกวน.
วิทยาศาสตร์เกษตร. 34 : กรกฎาคม-ธันวาคม.
- Bayarri, S., Duran, L. and Costell, E. 2004. Influence of sweeteners on the viscoelasticity of hydrocolloids gelled systems. *Food Hydrocolloids*. 18 : 611-619.
- Chattong U., Apichartsrangkoon, A., and Bell, A.E. 2007. Effects of hydrocolloids addition and high pressure processing on rheological properties and microstructure of a commercial ostrich meat product "Yor" (Thai sausage). *Meat Science*. 76(3) : 548-554.
- Fiszman, S. M. and Duran, L. 1992. Effects of fruit pulp and sucrose on the compression response of different polysaccharides gels systems. *Carbohydrate Polymer*. 17 : 11-17.
- Jackman, R. L. and Stanley, D. W. 1995. Creep behavior of tomato pericarp tissue as influenced by ambient temperature ripening and chilled storage. *Texture Studies*. 26 : 537-552.
- Maier, H., Anderson, M., Harl, C., Magnuson, K. and Whistler, R.L. 1993. Guar, Locust Bean, Tara and Fenugreek gums. In *Industrial gums, polysaccharides and their derivatives*. San Diego, Academic Press. 181-226 p.
- Ojijo, N. K. O., Kesselman, E., Eichler, S., Shuster, V., Neeman, I. and Eger, S. 2004. Changes in microstructure, thermal and rheological properties of olive oil / monoglyceride networks during storage. *Food Research International*. 37 : 385-393.
- Pilnik, W. and Rombouts, F. M. 1985. Polysaccharides and food processing.
Carbohydrate Research. 142 : 93-105.
- Supavititpatana, T., Apichartsrangkoon, A. 2007. Combination effects of ultra-high pressure and temperature on physical and thermal properties of ostrich meat sausage (yor).
Meat Science. 76(3) : 555-560.
- Ward, I. M. and Hardley, D. W. 1995. *An Introduction to the mechanical properties of solid polymers*. New York. John Wiley and Sons. Inc.
- Whittaker, L. E., Al-Ruqaie, I. M., Kasapis, S. and Richardson, R. K. 1997.
Development of composite structures in gellan polysaccharide/sugar system.
Carbohydrate Polymer. 33 : 39-46.

