

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1. สมบัติของสารกึ่งเจล

ศึกษาสมบัติของสารกึ่งเจล 3 ชนิด คือ วุ้น (Ac) วุ้นคัดแปร (As) และเจลาตินปลา (Fg) ที่ระดับความเข้มข้นของวุ้นและวุ้นคัดแปรคือร้อยละ 0.5, 1, 1.5, 2 และ 2.5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และระดับความเข้มข้นของเจลาตินปลาคือร้อยละ 5, 10, 15, 20 และ 25 สมบัติที่ตรวจสอบ ได้แก่ สมบัติวิสโคอิลาสติก การเปลี่ยนแปลงสถานะของเจล อุณหภูมิในการเกิดเจล และลักษณะเนื้อสัมผัส

4.1.1. สมบัติวิสโคอิลาสติก

4.1.1.1 Linear viscoelastic region (LVR)

การทดสอบหาความเครียด (%strain) ในการศึกษานี้ ทำโดยวิธี amplitude sweep เพื่อนำไปใช้ในการกำหนดช่วง LVR ของสารกึ่งเจล 3 ชนิด คือ Ac, As และ Fg ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ การทดสอบกำหนดความถี่ (frequency) คงที่ที่ 1.0 เฮิรตซ์ กำหนด %strain ที่ 0.1-100 ใช้หัววัด plate and plate geometry ขนาด 30 มิลลิเมตร และอุณหภูมิการทดสอบเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส พบว่าช่วง LVR ของ Ac ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.5 อยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 0.1-3.0 วุ้น As มีช่วง LVR ร้อยละ 0.1-2.0 (รูปที่ 4.1a และ 4.1b) จึงคัดเลือกค่า %strain ของวุ้น Ac และ As ที่ 1.0 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเส้นตรง บ่งบอกได้ถึงพื้นที่ของความแข็งแรงทางโครงสร้างของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ โดยอยู่ในระดับที่ไม่ทำให้โครงสร้างของตัวอย่างเสียหาย (Steffe, 1996) สำหรับ Fg ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5-25 มีช่วง LVR ประมาณร้อยละ 0.1-0.4 (รูปที่ 4.1c) จึงคัดเลือก %strain ของ Fg ที่ 0.2 จากการตรวจหาช่วง LVR ของสารกึ่งเจล 3 ชนิดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่า Ac มี %strain สูงกว่า As และ Fg ตามลำดับ ซึ่งเจลที่มีความแข็งแรง (strong gel) จะมีช่วง Linear Viscoelastic Range กว้างกว่าเจลอ่อน (weak gel) (Steffe, 1996) จึงสามารถบ่งชี้ได้ว่า Ac มีการเกิดอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลมากกว่า As และ Fg ตามลำดับ จึงเกิดการรวมตัวกันเป็นโครงสร้างร่างแหที่แข็งแรงกว่า

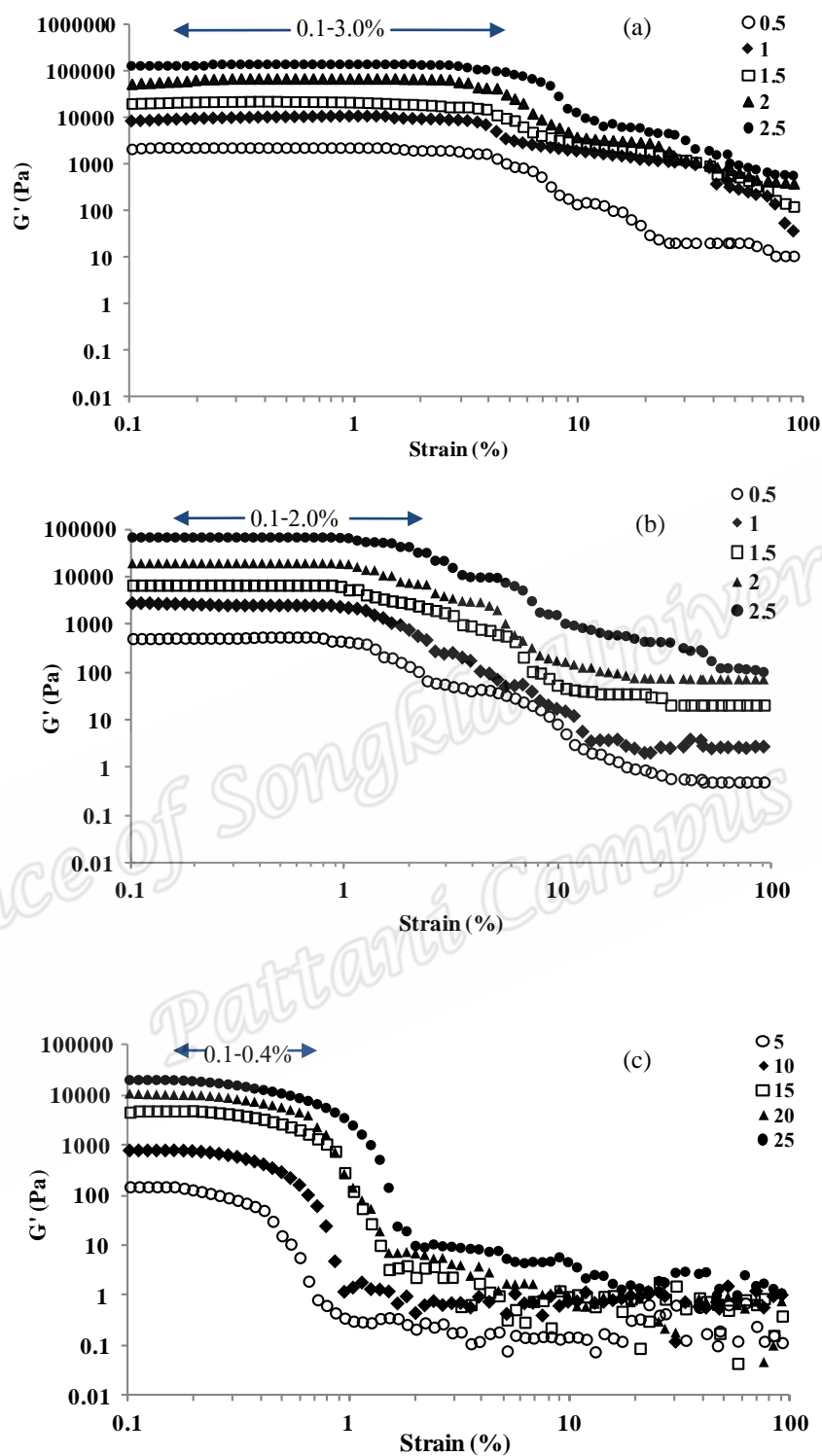


Figure 4.1 Linear viscoelastic region (LVR) of Ac (a), As (b) and Fg (c) at various concentrations.

4.1.1.2 การเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'')

จากการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกของสารก่อเจล 3 ชนิด ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ โดยวิธี temperature sweep ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ค่า %strain ของวุ้น Ac และ As ที่ 1.0 ค่า %strain ของ Fg ที่ 0.5 ในขั้นตอนของการลดอุณหภูมิ (cooling) ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 60 องศาเซลเซียส ลดลงจนถึง 0 องศาเซลเซียส (เป็นช่วงอุณหภูมิของการทำให้เกิดเจล) และขั้นตอนของการเพิ่มอุณหภูมิ (heating) ใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 0 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นจนถึง 100 องศาเซลเซียส โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงค่า G' และ G'' เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ผลการศึกษาพบว่าระดับความเข้มข้นของสารก่อเจลมีผลต่อค่า G' และ G''

การเปลี่ยนแปลงค่า G' และ G'' ของวุ้น Ac ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.5 ในระหว่างการลดอุณหภูมิ (รูปที่ 4.2) จาก 60 องศาเซลเซียส จนถึง 40 องศาเซลเซียส ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากสารน่าจะยังอยู่ในสถานะสารละลาย (sol) แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่า 40 องศาเซลเซียส พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งอาจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะจากสารละลายกลายเป็นเจล และระยะเวลาที่นานขึ้นทำให้โมเลกุลเกิดการจับตัวกันเป็นเกลียวคู่ให้อยู่ในรูปโครงสร้างอีลิกซ์ (โครงสร้างของการเกิดเจลในลักษณะเกลียวคู่) เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เจลมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (Lahrech *et al.*, 2005) ซึ่งกลไกการเกิดเจลของวุ้น ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2.3 ดังรูปที่ 2.4

จากผลการทดลองบ่งชี้ได้ว่าเจลมีความยืดหยุ่น (elastic) สูงกว่าความหนืด (viscosity) และที่ระดับความเข้มข้นสูงจะมีค่า G' และ G'' สูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Nayar *et al.*, (2012) ซึ่งทำการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกของวุ้นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-5 พบว่าค่า G' ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ใช้ ที่ร้อยละ 0.5 มีค่า G' ประมาณ 30 กิโลปาสคาล และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่า G' มีค่าสูงขึ้น และเมื่อความสูงขึ้นเป็นเข้มข้นร้อยละ 5 มีค่า G' ประมาณ 700 กิโลปาสคาล ค่า G' และ G'' ค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องซ้ำๆ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ จาก 0 ถึง 100 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ค่า G' และ G'' จะลดลงอย่างรวดเร็ว เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากเจลกลายเป็นสารละลาย เนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้นนั้น ทำให้โครงสร้างตาข่ายสามมิติของเจลเกิดการคลายตัวระหว่างโมเลกุล (Lahrech *et al.*, 2005)

สำหรับ As (รูปที่ 4.3) ค่า G' และ G'' สูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นสูงขึ้น (ทั้งช่วงการลดและเพิ่มอุณหภูมิ) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง เป็นไปในทิศทางเดียวกับวุ้น Ac สำหรับที่ระดับความเข้มข้นของสารเท่ากันพบว่า Ac มีค่า G' และ G'' สูงกว่า As เนื่องจาก As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลเข้าไปทำลายโครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้นให้มีขนาดสั้นและเล็กลง ทำให้ความสามารถในการรวมตัวให้อยู่ในรูปโครงสร้างอีลิกซ์ของสายโมเลกุลลดลง (Zhou and Ma, 2006)

สำหรับ Fg (รูปที่ 4.4) ค่า G' และ G'' สูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นสูงขึ้น เป็นไปในทิศทางเดียวกับ Ac และ As เนื่องจากในการเจลาของเจลาตินนั้นจะมีการเชื่อมข้ามระหว่างสายพอลิเปปไทด์ด้วยพันธะ 2 ชนิดคือ การเชื่อมระหว่างหมู่เปปไทด์ด้วยพันธะไฮโดรเจน และการเชื่อมข้ามด้วยพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างหมู่อะมิโน ดังนั้นที่ความเข้มข้นของเจลาตินสูงทำให้เกิดการเชื่อมกันระหว่างพันธะมากขึ้นส่งผลให้เจลาที่มีความแข็งแรงขึ้น (Glicksman, 1969) ซึ่งกลไกการเกิดเจลาของวุ้นได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.3.2 ดังรูปที่ 2.6

ค่า G' และ G'' ของ Fg มีค่าต่ำกว่า Ac และ As แม้ระดับความเข้มข้นสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก Fg มีโครงสร้างทางโมเลกุลและกลไกการเกิดเจลาที่แตกต่างจากวุ้น กล่าวคือวุ้นเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ประกอบด้วยอากาโรส (agarose) และอากาโรเพคติน (agaropectin) (Saxena *et al.*, 2011) ส่วน Fg เป็นโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนมาเชื่อมต่อกันเป็นสายพอลิเปปไทด์ กลไกการเกิดเจลาของสาร 2 ชนิดจึงมีความแตกต่างกันเนื่องจากการสร้างพันธะของโมเลกุลต่างกัน (Cole, 2000) ซึ่งได้อธิบายความแตกต่างของสารก่อเจลาทั้ง 2 ชนิดไว้ในหัวข้อ 2.2 และ 2.3

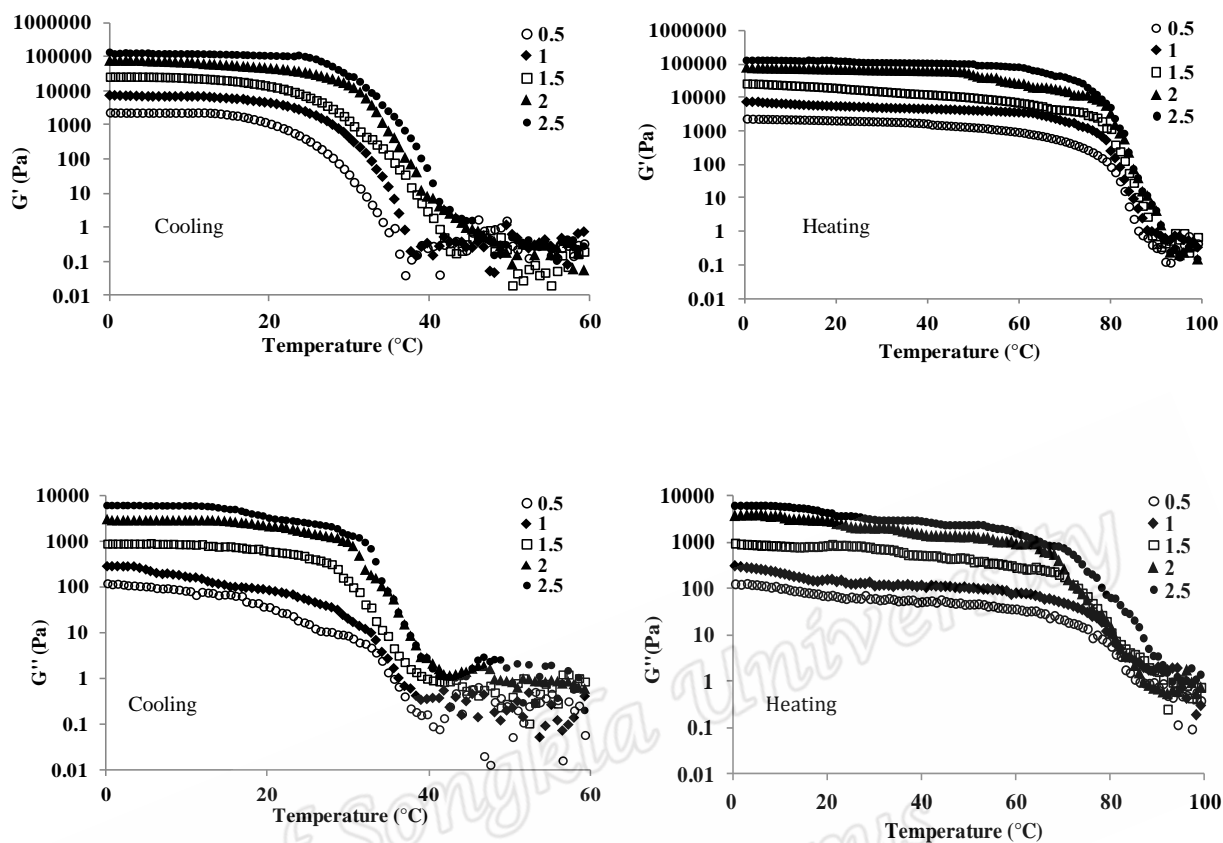


Figure 4.2 Storage modulus (G') and loss modulus (G'') of Ac at various concentrations.

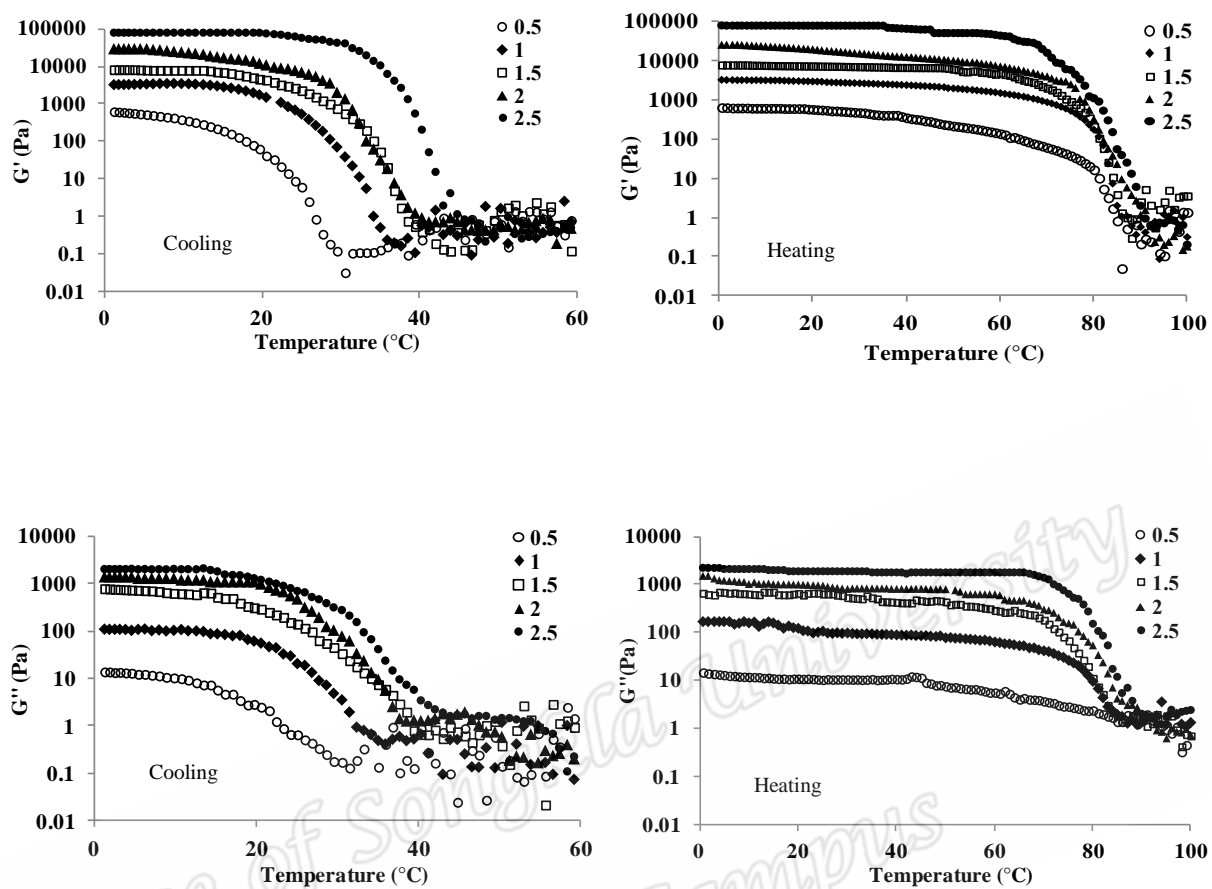


Figure 4.3 Storage modulus (G') and loss modulus (G'') of As at various concentrations.

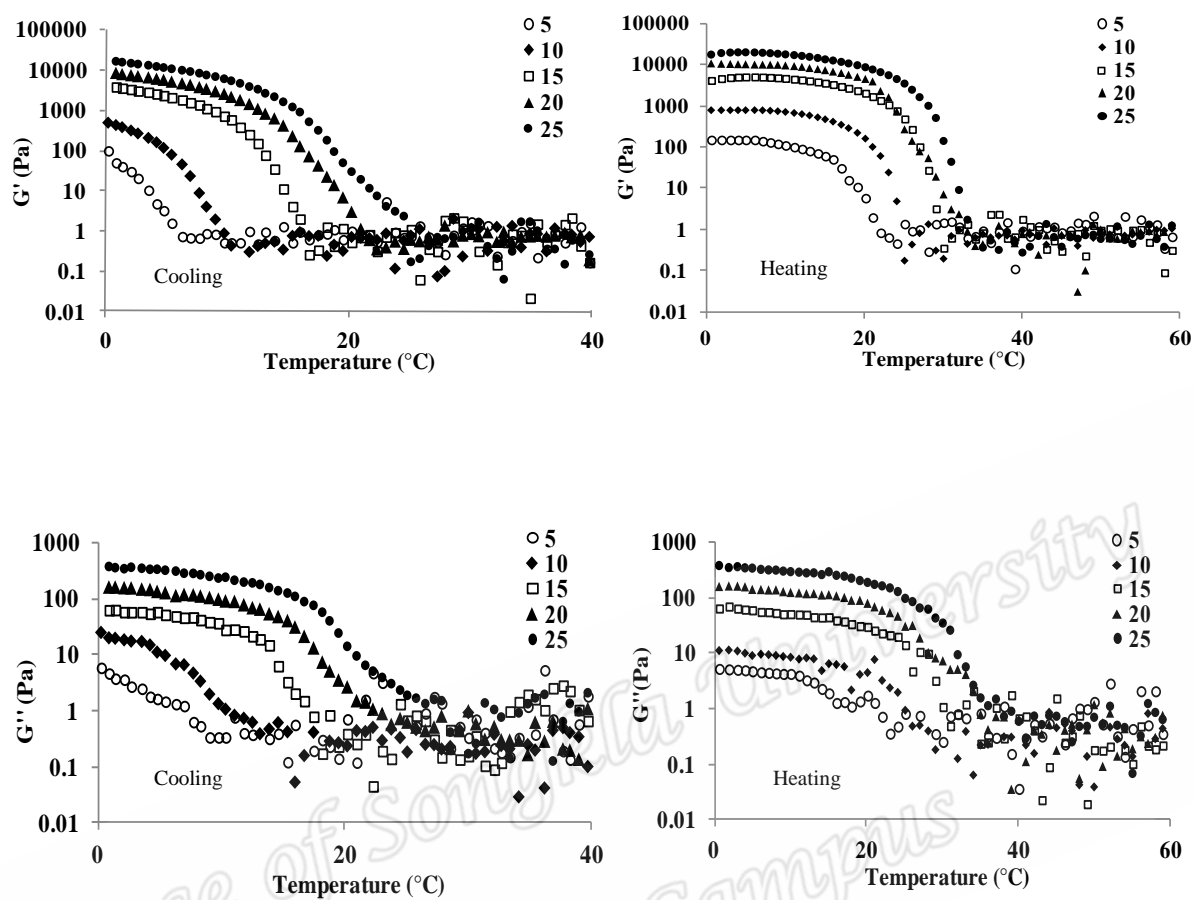


Figure 4.4 Storage modulus (G') and loss modulus (G'') of Fg at various concentrations.

4.1.1.2 อุณหภูมิในการเกิดเจล (T_{gel}) และอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) ที่ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G''

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอิลาสติกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถหาอุณหภูมิในการเกิดเจล (T_{gel}) ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G'' ในระหว่างการลดอุณหภูมิจาก 60 องศาเซลเซียส ถึง 0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจล (T_m) ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G'' ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดตัดระหว่าง G' และ G'' จะมีค่า $\tan \delta$ เท่ากับ 1 (Gudmundsson, 2002) ค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G'' ($G''/G' = \tan \delta = 1$) ดังแสดงในรูปที่ 4.5

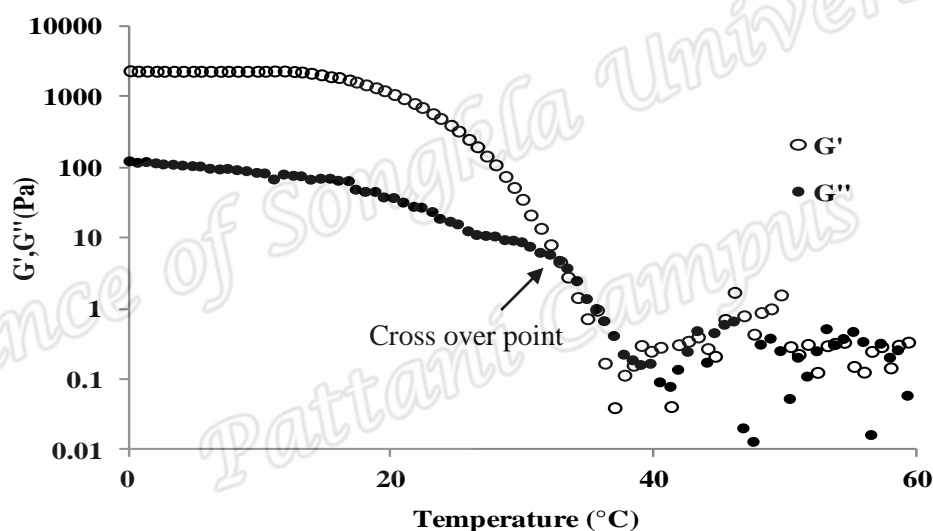


Figure 4.5 Cross over point between G' and G''

ผลการศึกษา (ตารางที่ 4.1) พบว่าระดับความเข้มข้นและชนิดของสารก่อเจลมีผลต่อค่า T_{gel} และ T_m ของเจลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเมื่อระดับความเข้มข้นสูงขึ้นค่า T_{gel} และ T_m สูงขึ้น โดยที่ Ac ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.5 มี T_{gel} อยู่ในช่วง 32.7 ± 0.39 ถึง 45.42 ± 0.48 องศาเซลเซียส และมีค่า T_m อยู่ในช่วง 86.63 ± 0.44 ถึง 92.08 ± 0.30 องศาเซลเซียส โดยสอดคล้องกับการศึกษาของ Lahrech *et al.* (2005) ซึ่งทำการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะจากโซลเป็นเจลของวุ้นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.04-2 พบว่าความเข้มข้นของวุ้นมีผลต่ออุณหภูมิในการเกิด และหลอมเหลวของเจล กล่าวคือความเข้มข้นของวุ้นสูงจะมีอุณหภูมิในการ

เกิดและหลอมเหลวของเจลสูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ โดยมีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 28-40 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ในช่วงประมาณ 77-92.5 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นสูง ปริมาณโมเลกุลที่เกิดเป็นโครงร่าง 3 มิติมากกว่า ทำให้เกิดเจลได้เร็วขึ้น ใช้ระยะเวลาสั้นกว่า ส่งผลให้ T_{gel} สูงกว่า รวมทั้งเจลที่ได้มีความแข็งแรงกว่า ดังนั้นจึงต้องใช้ความร้อนสูงในการทำลายโครงสร้างเจล ที่ความเข้มข้นสูงจึงมี T_m สูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lai and Iii. (1997) ทำการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกต่ออุณหภูมิในการเกิดและหลอมเหลวของวุ้นที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2 พบว่ามีอุณหภูมิในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 15-35 องศาเซลเซียส และมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวอยู่ในช่วง 70-92 องศาเซลเซียส โดยที่ระดับความเข้มข้นของวุ้นสูงจะมีอุณหภูมิในการเกิดและหลอมเหลวของเจลสูงกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ เนื่องจากมีจำนวนโมเลกุลของอะกาโรส (3,6-anhydro-galactose) สูงทำให้มีความสามารถในการจับตัวกันเป็นโครงร่างของเจลมากกว่าที่ระดับความเข้มข้นต่ำ จากการศึกษาพบว่า มีอุณหภูมิในการเกิดเจล และอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่างจากการศึกษาของ Lahrech *et al.* (2005) และ Lai and Iii. (1997) เนื่องจากความแตกต่างของปัจจัยหลายประการ เช่น วุ้นที่สกัดได้จากสาหร่ายต่างชนิดกันมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน (Freile-Pelegri and Murano, 2005) นอกจากนี้แหล่งที่อยู่อาศัยของสาหร่ายมีผลต่อสมบัติของเจลวุ้นเช่นกัน ถึงแม้สาหร่ายที่นำมาสกัดนั้นจะเป็นชนิดเดียวกัน และเก็บจากประเทศเดียวกันก็ตาม เนื่องจากในแต่ละพื้นที่ที่ทำการเก็บสาหร่ายนั้นมีสภาวะทางด้านต่างๆ และอาหารสำหรับสาหร่ายที่แตกต่างกัน จึงส่งผลให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน (Prasad *et al.*, 2007) นอกจากนี้วิธีการสกัดที่ต่างกันส่งผลให้สาหร่ายแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีที่ต่างกัน สมบัติของวุ้นจึงมีความแตกต่างกัน (Kumar and Foteda, 2009)

สำหรับ As มีค่า T_{gel} และ T_m สูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นสูงขึ้น เช่นเดียวกับ Ac แต่ค่า T_{gel} และ T_m จะต่ำกว่า Ac (ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน) โดยมีค่า T_{gel} อยู่ในช่วง 27.37 ± 0.57 ถึง 42.61 ± 0.56 องศาเซลเซียส และมีค่า T_m อยู่ในช่วง 84.24 ± 0.57 ถึง 90.51 ± 0.54 องศาเซลเซียส และที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน Ac มีค่า T_{gel} และ T_m สูงกว่า As ความแตกต่างของค่า T_{gel} และ T_m ระหว่าง Ac และ As ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน เนื่องจาก As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป (Zhou and Ma, 2006)

สำหรับ Fg มีค่า T_{gel} และ T_m สูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นสูงขึ้น เช่นเดียวกับ Ac และ As กล่าวคือ ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5-25 มี T_{gel} อยู่ในช่วง 5.3 ± 0.16 ถึง 21.57 ± 0.12 องศาเซลเซียส และมีค่า T_m อยู่ในช่วง 20.46 ± 0.36 ถึง 31.45 ± 0.39 องศาเซลเซียส แต่พบว่าค่า T_{gel} และ T_m มีค่าต่ำกว่า Ac และ As แม้ระดับความเข้มข้นสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก Fg มีโครงสร้างทางโมเลกุลและกลไกการเกิดเจลที่แตกต่างจากวุ้น (Dai and Matsukawa, 2012) และมีความแข็งของเจลต่ำกว่า ซึ่งกรดอะมิโนที่สำคัญที่ช่วยให้เกิดความคงตัวของโครงสร้างของเจลคือ กรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีน เจลาตินที่มีปริมาณกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนต่ำจะเสถียรภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่าเจลาตินที่มีกรดอะมิโนโพรลีนและไฮดรอกซีโพรลีนสูง (Cole, 2000)

Prince of Songkla University
Pattani Campus

Table 4.1 Gelling temperature (T_{gel}) and melting temperature (T_m) of Ac, As and Fg extracted from cross over point between storage modulus (G') and loss modulus (G'') at various concentrations.

Concentration (%)	Ac		As		Concentration (%)	Fg	
	T_{gel} (°C)	T_m (°C)	T_{gel} (°C)	T_m (°C)		T_{gel} (°C)	T_m (°C)
0.5	32.7±0.39 ^{aA}	86.63±0.44 ^{aA}	27.37±0.57 ^{aB}	84.24±0.57 ^{aB}	5	5.3±0.16 ^a	20.46±0.36 ^a
1.0	37.25±0.34 ^{bA}	87.12±0.18 ^{bA}	34.57±0.56 ^{bB}	85.53±0.4 ^{bB}	10	9.27±0.27 ^b	25.4±0.31 ^b
1.5	41.33±0.52 ^{cA}	88.22±0.2 ^{cA}	36.72±0.58 ^{cB}	86.14±0.4 ^{cB}	15	15.37±0.06 ^c	28.34±0.27 ^c
2.0	43.26±0.41 ^{dA}	89.15±0.2 ^{dA}	39.04±0.51 ^{dB}	87.74±0.83 ^{dB}	20	19.42±0.16 ^d	29.34±0.35 ^d
2.5	45.42±0.48 ^{eA}	92.08±0.3 ^{eA}	42.61±0.56 ^{eB}	90.51±0.54 ^{eB}	25	21.57±0.12 ^e	31.45±0.39 ^e

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

Different capital letters between column, in comparison between Ac and As are significantly different ($p \leq 0.05$)

4.1.2 อุณหภูมิ (T_{gel-C}) และระยะเวลาในการเกิดเจล

อุณหภูมิในการเกิดเจล หมายถึงอุณหภูมิที่สามารถทำให้โมเลกุลภายในสารละลายที่มีลักษณะเป็น random coil และกระจายอยู่กันอย่างไม่เป็นระเบียบ เกิดการเชื่อมต่อกันระหว่างสายพอลิเมอร์มากขึ้นด้วยพันธะไฮโดรเจน จนเกิดเป็นโครงสร้างของเจล อุณหภูมิในการเกิดเจลของสารขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นที่ใช้ นอกจากนี้ระดับความเข้มข้นที่ใช้มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการเกิดเจล หากระดับความเข้มข้นของสารสูง จะใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลสั้นลง (Rodríguez *et al.*, 2009) การศึกษาอุณหภูมิและระยะเวลาในการเกิดเจล ผลการศึกษาพบว่า ระดับความเข้มข้นและชนิดของสารก่อเจลมีผลต่ออุณหภูมิและระยะเวลาในการเกิดเจลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเมื่อระดับความเข้มข้นของสารสูงอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้นตามลำดับ แต่ใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลลดลง

Ac ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.5 มี T_{gel-C} อยู่ในช่วง 27.8 ± 0.83 ถึง 43.0 ± 1.00 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 1.26 ± 0.45 ถึง 6.36 ± 0.16 นาที

สำหรับ As มี T_{gel-C} และระยะเวลาในการเกิดเจลเป็นไปในทำนองเดียวกับ Ac (ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน) โดยมี T_{gel-C} อยู่ในช่วง 23.6 ± 0.89 ถึง 3.8 ± 0.83 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาในการเกิดเจลอยู่ในช่วง 1.8 ± 0.26 ถึง 10.57 ± 0.12 นาที (ตารางที่ 4.2) และที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน Ac มี T_{gel-C} สูงกว่า และใช้ระยะเวลาในการเกิดเจln้อยกว่า As เนื่องจาก As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป (Zhou and Ma, 2006) นอกจากนี้ T_{gel-C} มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการจับตัวเป็นเจลของสารละลายวุ้น กล่าวคือหากสารละลายวุ้นสามารถเกิดเจลได้ในระยะเวลาอันสั้น ตัวอย่างนั้นจะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูง

สำหรับ Fg มี T_{gel-C} สูงขึ้น และระยะเวลาในการเกิดเจลลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นของสารสูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกับ Ac และ As กล่าวคือที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5-25 มี T_{gel-C} อยู่ในช่วง 5.0 ± 0.50 ถึง 22.4 ± 2.50 องศาเซลเซียส และมีระยะเวลาในการเกิดเจล อยู่ในช่วง 3.62 ± 0.46 ถึง 16.16 ± 0.97 นาที แต่พบว่า Fg มี T_{gel-C} ต่ำกว่า และใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลสูงกว่าวุ้น (Ac และ As) แม้ระดับความเข้มข้นสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจาก Fg มีโครงสร้างทางโมเลกุลและกลไกการเกิดเจลที่แตกต่างจากวุ้น (Rodríguez *et al.*, 2009)

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าอุณหภูมิในการเกิดเจล (T_{gel-C}) ที่ได้จากการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ กับอุณหภูมิในการเกิดเจล (T_{gel}) ที่ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G'' พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.3) กล่าวคือ มีค่าต่ำกว่า T_{gel} โดยที่ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ได้จากทั้ง 2 วิธีมีข้อดีและข้อด้อยที่แตกต่างกัน ซึ่งข้อดีของ T_{gel} คือ เป็นค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องมือ (rheometer) ซึ่งมีความน่าเชื่อถือมากกว่า เนื่องจากการแปรผลออกมาเป็นโปรไฟล์ โดยสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงของสารได้ในแต่ละอุณหภูมิ แต่ข้อเสียคือ เครื่อง rheometer มีราคาแพงและใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์นาน ส่วนการวัดด้วยเทอร์โมมิเตอร์ มีข้อดีคือ เป็นวิธีการวัดที่ง่าย สะดวกและรวดเร็ว ไม่ต้องการเครื่องมือราคาแพง แต่ข้อเสียคือ อาจมีความคลาดเคลื่อนง่าย หรือค่าที่ได้นั้นอาจมีความน่าเชื่อถือของข้อมูลน้อยกว่าการวัดด้วย rheometer

Prince of Songkla University
Pattani Campus

Table 4.2 $T_{\text{gel-C}}$ and gelling time of Ac, As and Fg at various concentrations.

Concentration		Ac		As		Concentration		Fg	
(%)	$T_{\text{gel-C}}$ (°C)	Gelling time (min)	$T_{\text{gel-C}}$ (°C)	Gelling time (min)	(%)	$T_{\text{gel-C}}$ (°C)	Gelling time (min)		
0.5	27.80±0.83 ^{aA}	7.14±0.45 ^{aA}	23.60±0.89 ^{eB}	10.57±0.26 ^{eB}	5	5.00±0.70 ^a	16.16±0.97 ^a		
1.0	33.80±1.30 ^{bA}	4.36±0.64 ^{bA}	31.60±0.54 ^{dB}	7.06±0.27 ^{dB}	10	11.80±0.83 ^b	14.96±1.05 ^b		
1.5	39.00±0.70 ^{cA}	2.40±0.02 ^{cA}	33.40±1.34 ^{cB}	4.26±0.27 ^{cB}	15	14.80±1.09 ^c	8.56±0.54 ^c		
2.0	41.61±1.40 ^{0dA}	1.28±0.04 ^{dA}	35.20±0.83 ^{bB}	2.57±0.25 ^{bB}	20	18.80±0.83 ^d	5.69±0.33 ^d		
2.5	43.00±1.00 ^{eA}	1.26±0.15 ^{eA}	38.80±0.83 ^{aB}	1.80±0.02 ^{aB}	25	22.40±0.54 ^e	3.62±0.46 ^e		

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

Different capital letters between column, in comparison between Ac and As are significantly different ($p \leq 0.05$).

Table 4.3 Comparison of T_{gel} and T_{gel-C} of Ac, As and Fg.

Concentration (%)	Ac		As		Concentration (%)	Fg	
	T_{gel} (°C)	T_{gel-C} (°C)	T_{gel} (°C)	T_{gel-C} (°C)		T_{gel} (°C)	T_{gel-C} (°C)
0.5	32.70±0.39 ^{aA}	27.80±0.83 ^{aA}	27.37±0.57 ^{aB}	23.60±0.89 ^{aB}	5	5.30±0.16 ^{aA}	5.00±0.7 ^{aB}
1.0	37.25±0.34 ^{bA}	33.80±1.30 ^{bA}	34.57±0.56 ^{bB}	31.60±0.54 ^{bB}	10	9.27±0.27 ^{bA}	11.80±0.83 ^{bB}
1.5	41.33±0.52 ^{cA}	39.00±0.70 ^{cA}	36.72±0.58 ^{cB}	33.40±1.34 ^{cB}	15	15.37±0.06 ^{cA}	14.80±1.09 ^{cB}
2.0	43.26±0.41 ^{dA}	41.61±1.4 ^{dA}	39.04±0.51 ^{dB}	35.20±0.83 ^{dB}	20	19.42±0.16 ^{dA}	18.8±0.83 ^{dB}
2.5	45.42±0.48 ^{eA}	43.00±1.00 ^{eA}	42.61±0.56 ^{eB}	38.80±0.83 ^{eB}	25	21.57±0.12 ^{eA}	22.40±0.54 ^{eB}

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

Different capital letters between column, in comparison between T_{gel} and T_{gel-C} of the same gelling agents are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.1.3 ลักษณะเนื้อสัมผัส

การวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจล กล่าวถึงคุณลักษณะของเนื้อสัมผัสที่สามารถทำการวัดค่าได้โดยการใช้เครื่องมือ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดคือ เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) ทดสอบโดยวิธี texture profile analysis (TPA) วิธีการทดสอบแบบ TPA ซึ่งออกแบบโดยให้มิลักษณะการทำงานคล้ายกับการเคี้ยวของมนุษย์ ลักษณะของกราฟที่ได้จากการทดสอบลักษณะเนื้อสัมผัสแบบ TPA แสดงดังรูปที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดสอบเนื้อสัมผัสของเจลในที่นี้จะกล่าวถึง ความแข็งของเจล (hardness) ได้จากค่าแรงสูงสุด ที่เกิดขึ้นในการกดตัวอย่างครั้งที่ 1 (Lau *et al.*, 2000) และความยืดหยุ่น (springiness) คำนวณได้จากระยะทางที่เกิดขึ้นตามแนวแกนเวลาของกราฟ TPA ที่เกิดขึ้นในขณะกดครั้งที่ 2 (Length2)/ความสูงของตัวอย่าง (Lau *et al.*, 2000)

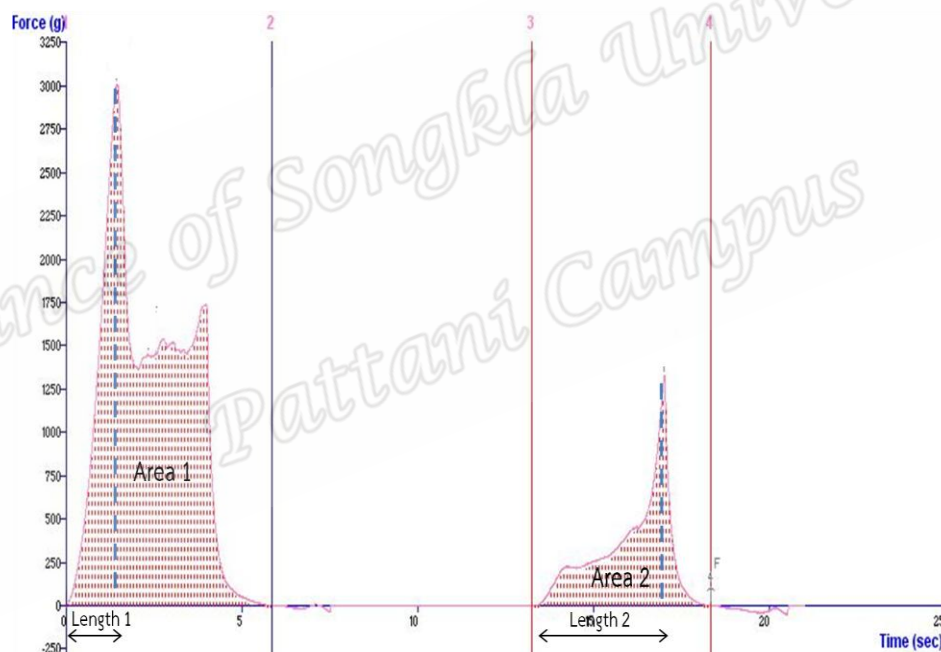


Figure 4.6 Texture profile analysis curve of Ac gel at 1.5 %

4.1.3.1 ความแข็งของเจล

ความแข็งของเจลเป็นสมบัติสำคัญที่ใช้สำหรับประเมินคุณภาพของเจล สารก่อเจลต่างชนิดกันให้ค่าความแข็งแรงที่ต่างกัน และนอกจากนี้ความเข้มข้นของสารก่อเจลที่ใช้ยังส่งผลต่อความแข็งของเจลเช่นกัน กล่าวคือหากใช้ระดับความเข้มข้นที่สูงขึ้นความแข็งของเจลก็จะเพิ่มขึ้น (Pye, 1997)

จากการทดสอบความแข็งของเจล ผลการศึกษาพบว่าระดับความเข้มข้นและชนิดของสารก่อเจลมีผลต่อความแข็งของเจลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเมื่อระดับความเข้มข้นของสารสูงขึ้นไปมีความแข็งของเจลสูงขึ้นตามลำดับ ขณะเดียวกันความแข็งแรงของ Ac กว่า As และ Fg ตามลำดับ

เจลรุ่น Ac (ความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.5) มีความแข็งของเจลอยู่ในช่วง 412.69 ± 30.25 ถึง 3472.95 ± 51.17 กรัม ส่วน As ค่าความแข็งของเจลต่ำกว่า Ac คือ 235.77 ± 2.87 ถึง 3010.25 ± 27.26 กรัม (รูปที่ 4.7a) และที่ความเข้มข้นเท่ากัน Ac มีความแข็งของเจลสูงกว่า As สอดคล้องกับค่า G' และ G'' ที่พบว่าเจลรุ่น Ac มีค่าสูงกว่า As นอกจากนี้ T_m ของ Ac มากกว่า As บ่งชี้ถึงโครงสร้างที่แข็งกว่าอีกด้วย

สำหรับ Fg มีความแข็งของเจลอยู่ในช่วง 192.45 ± 0.36 ถึง 2093.69 ± 51.62 กรัม (รูปที่ 4.7b) แต่ค่าดังกล่าวต่ำกว่าเจลของ Ac และ As เช่นเดียวกับค่า G' และ G'' หรือ T_m ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ซึ่งความแข็งของเจลลดินปลาเกิดจากกรดอะมิโนชนิดโปรตีนและไฮดรอกซีโปรตีน โดยที่กรดอะมิโนดังกล่าวทำให้เกิดโครงสร้าง triple helix ที่เสถียร ทำให้โครงร่างตาข่ายของเจลมีความแข็งแรงขึ้น (Cole, 2000)

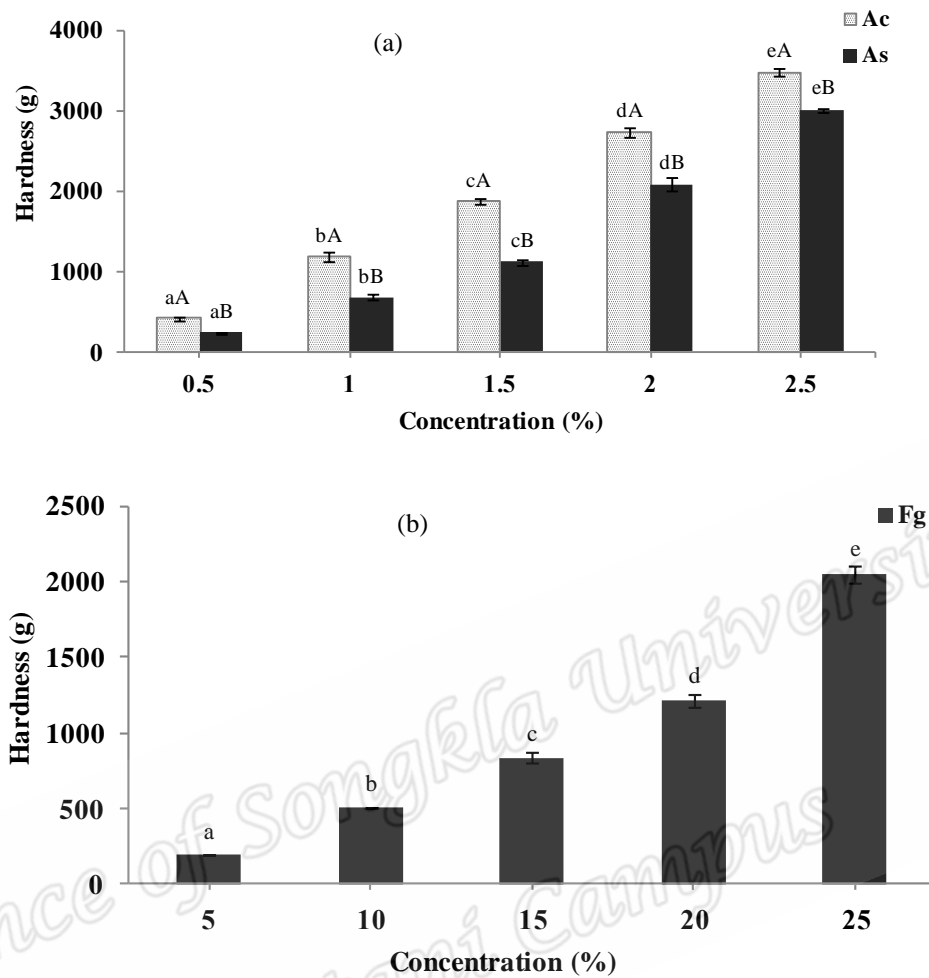


Figure 4.7 Hardness of Ac, As (a) and Fg (b) at various concentrations.

- Different small letters at various proportions are significantly different ($p \leq 0.05$).
- Different capital letters at the same concentrations, in comparison between Ac and As are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.1.3.2 ความยืดหยุ่น

ค่าความยืดหยุ่น (springiness) เป็นค่าที่บอกถึงความยืดหยุ่นของผลิตภัณฑ์หรือความสามารถในการคืนตัวกลับมา เหมือนเดิมของผลิตภัณฑ์เมื่อมีการถอนแรงออกไป (Bourne, 2002) จากการทดสอบความยืดหยุ่นของเจลพบว่า ระดับความเข้มข้นและชนิดของสารก่อเจลมีผลต่อค่าความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเมื่อระดับความเข้มข้นของสารก่อเจลสูงขึ้นความยืดหยุ่นของเจลสูงขึ้นตามลำดับ และพบว่าความยืดหยุ่นของ Fg มากกว่า As และ Ac ตามลำดับ

Ac ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0.5-2.5 มีความยืดหยุ่นของเจลอยู่ในช่วงร้อยละ 16.60 ± 0.38 ถึง 26.09 ± 0.35 ขณะที่ As มีความยืดหยุ่นของเจลอยู่ในช่วงร้อยละ 18.33 ± 0.35 ถึง 29.36 ± 0.53 (รูปที่ 4.8a) ที่ความเข้มข้นเท่ากัน Ac มีความยืดหยุ่นของเจลต่ำกว่า As ซึ่งตรงข้ามกับความแข็งของเจล แสดงว่าเจลของ As น่าจะมีความเปราะลดลงจากเจล Ac ดังนั้นการใช้กลิ่นเสียดความถี่สูง ซึ่งคาดว่าส่งผลให้โมเลกุลของวุ้นเกิดการแตกหัก จึงมีขนาดโมเลกุลที่ลดลงส่งผลให้เจลเกิดความยืดหยุ่นมากขึ้น

สำหรับ Fg (รูปที่ 4.8b) มีความยืดหยุ่นสูงขึ้นเมื่อระดับความเข้มข้นของสารสูงขึ้นโดยเป็นไปในทิศทางเดียวกับ Ac และ As กล่าวคือที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5-25 มีความยืดหยุ่นของเจลอยู่ในช่วงร้อยละ 57.90 ± 0.62 ถึง 75.66 ± 0.5 และพบว่า Fg มีความยืดหยุ่นของเจลสูงกว่าวุ้น (Ac และ As) เนื่องจากความยืดหยุ่นเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของเจลลาติน ซึ่งโครงสร้างของเจลลาตินมีทั้งหมู่อะมิโนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ โดยในโครงสร้างพบไกลซีน ในปริมาณมากที่สุด ร้อยละ 33 ของกรดอะมิโนทั้งหมด พบโพรลีนร้อยละ 12 ซึ่งกรดอะมิโนดังกล่าวเป็นกรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำ จึงมีบทบาทในการเกิดอันตรกิริยาร่วมกันระหว่างกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำด้วยกัน โดยมีพันธะไฮโดรเจนเชื่อมอยู่ระหว่างกรดอะมิโนเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง ส่วนกรดอะมิโนชนิดที่ชอบน้ำจะทำหน้าที่ไปจับกับน้ำ ดังนั้นในโครงสร้างของเจลจะมีบางส่วนที่เป็นน้ำซึ่งน้ำจะถูกกักไว้ภายในโครงสร้างของเจล ทำให้เจลเกิดความยืดหยุ่น (Glicksman, 1969) ดังนั้นเมื่อปริมาณเจลลาตินเพิ่มขึ้นจำนวนหมู่อะมิโนก็จะเพิ่มขึ้น ค่าความยืดหยุ่นจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

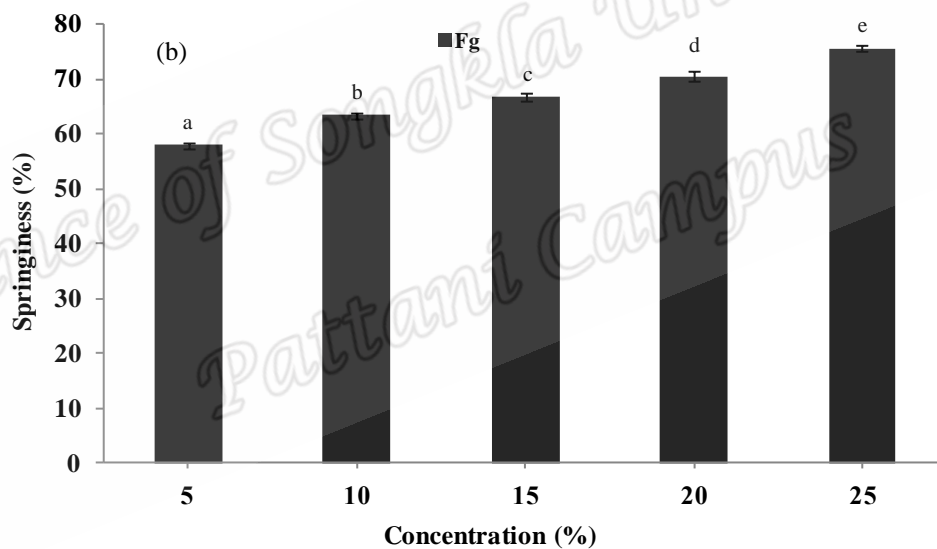
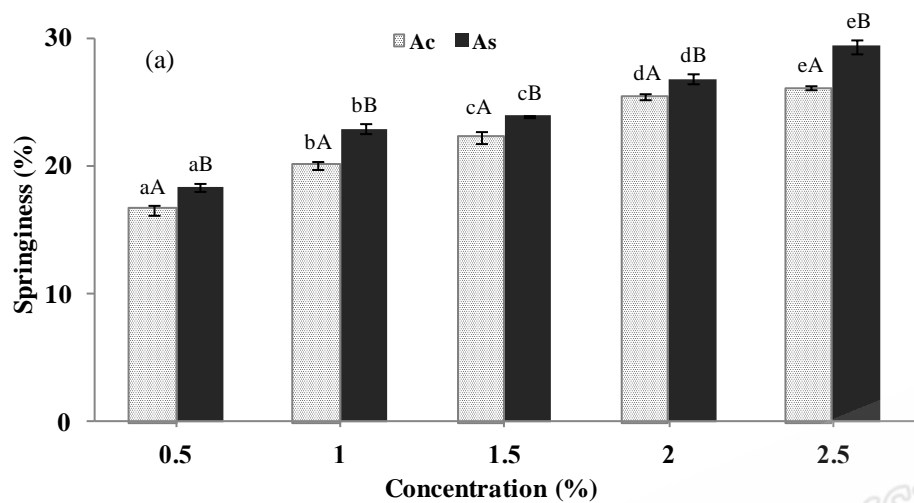


Figure 4.8 Springiness of Ac, As (a) and Fg (b) at various concentrations.

- Different small letters at various proportions are significantly different ($p \leq 0.05$).
- Different capital letters at the same concentrations, in comparison between Ac and As are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.2. สมบัติของเจลผสม

ศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างวุ้น Ac และ As กับเจลาตินปลา โดยกำหนดความเข้มข้นของวุ้นทั้ง 2 ชนิดคงที่คือร้อยละ 1 (การใช้วุ้นที่ระดับร้อยละ 1 เนื่องจากเป็นความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถเกิดเจลที่อุณหภูมิห้องได้) และเจลาตินปลาที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ คือ 0, 5, 10, 15, 20 และร้อยละ 25

4.2.1 Linear Viscoelastic Region (LVR)

ทดสอบตัวอย่างเพื่อหาช่วง LVR โดยวิธีการเช่นเดียวตอนที่ 4.1.1.1 พบว่าช่วง LVR ของเจลผสมระหว่างวุ้น Ac และ As (ร้อยละ 1) กับ Fg (ร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25) มี %strain อยู่ในช่วง 0.1- 0.5 คัดเลือก %strain ของเจลผสมดังกล่าวที่ร้อยละ 0.25 ซึ่งมีค่าความเค้นเฉือนต่ำกว่าเจลของวุ้นอย่างเดียว (รูปที่ 4.9) เนื่องจากเมื่อผสมเจลาตินปลาทำให้วุ้นมีบทบาทในการจับตัวกันระหว่างโมเลกุลลดลง

Prince of Songkla University
Pattani Campus

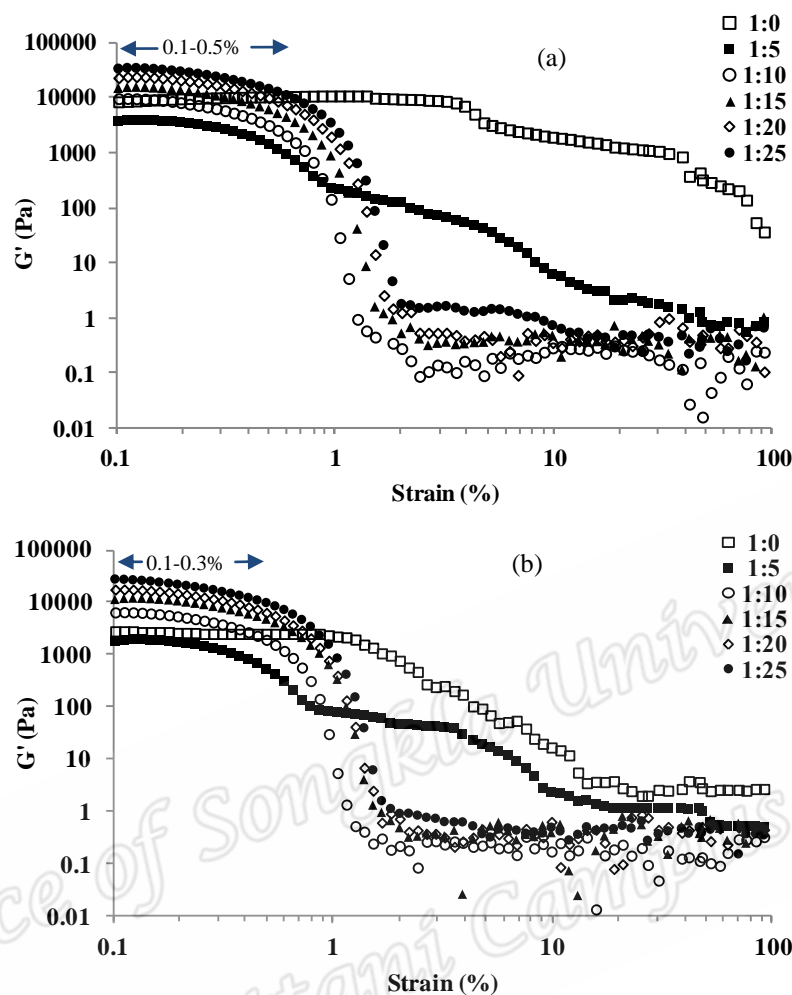


Figure 4.9 Linear Viscoelastic Region (LVR) of mixed gel between 1% Ac and 5, 10, 15, 20 and 25 % Fg (a) and mixed gel between 1% As and 5, 10, 15, 20 and 25 % Fg (b)

4.2.2 การเปลี่ยนแปลงค่า storage modulus (G') และ loss modulus (G'')

จากการศึกษาสมบัติวิสโคอีลาสติกของเจลผสมระหว่างวุ้น Ac กับ Fg และเจลผสมระหว่างวุ้น As กับ Fg ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ โดยวิธี temperature sweep ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ในขั้นตอนของการลดอุณหภูมิ (cooling) จาก 60 องศาเซลเซียส ถึง 0 องศาเซลเซียส และขั้นตอนของการเพิ่มอุณหภูมิ (heating) จาก 0 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส และติดตามการเปลี่ยนแปลงของค่า G' และ G'' ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของเจลผสมระหว่างวุ้น (Ac และ As) กับเจลาตินปลา มีผลต่อค่า G' และ G'' ในระหว่างการลดอุณหภูมิช่วงอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส ถึง 35 องศาเซลเซียส ค่า G' และ G'' ของเจลผสม (รูปที่ 4.10) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่ออุณหภูมิลดต่ำกว่าค่า G' และ G'' สูงขึ้น

สัดส่วน 1:5 เท่านั้นที่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมสถานะของสารก่อเจล 2 ชนิด กล่าวคือช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 10 องศาเซลเซียส น่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะของวุ้น เนื่องจากมีอุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงใกล้เคียงกับวุ้นร้อยละ 1 และที่ช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส น่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะของเจลาตินปลา ซึ่งพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงในลักษณะดังกล่าวนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงสถานะแบบต่อเนื่อง (bicontinuous phase) (Norziah *et al.*, 2006) ซึ่งในระหว่างการเปลี่ยนแปลงสถานะพอลิเมอร์ทั้ง 2 ชนิดจะไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน กล่าวคือในช่วงแรกเป็นอุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงสถานะของวุ้น (25 ถึง 10 องศาเซลเซียส) ซึ่งวุ้นเกิดการเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว เจลาตินปลายังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะจากโซลเป็นเจล แต่โมเลกุลของเจลาตินปลาจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้างของเจลาติน เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส โมเลกุลของเจลาตินปลาที่กระจายตัวอยู่นั้นเกิดการรวมตัวกันและเปลี่ยนสถานะจากโซลเป็นเจล ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเป็น 2 ช่วงเช่นเดียวกับการลดอุณหภูมิ โดยการหลอมเหลวในเฟสแรกเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเป็นการหลอมเหลวของเจลาตินปลา และในเฟสที่สองหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส ซึ่งน่าจะเป็นการหลอมเหลวของวุ้น โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shrinivas *et al.* (2009) ทำการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติกของเจลผสมระหว่าง พอลิเมอร์สองชนิด คืออะกาโรสและเจลาติน พบว่าในระหว่างการหลอมเหลวของเจลาติน เจลผสมระหว่างอะกาโรสร้อยละ 1 และเจลาตินร้อยละ 5 มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสองเฟส ซึ่งในเฟสแรกเจลาตินปลาจะเกิดการหลอมเหลวก่อน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และอะกาโรสจะไม่เกิดการหลอมเหลวในเฟสของเจลาติน แต่การหลอมเหลวยังคงเป็นไปอย่างต่อเนื่องจนถึงอุณหภูมิของการหลอมเหลวของอะกาโรส และเมื่อความเข้มข้นของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้น มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเฟสเดียวที่น่าจะเป็นเฟสของเจลาตินปลา โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารก่อเจล 2 ชนิดดังกล่าวนี้ อาจมีโครงสร้างของเจลเป็นแบบ interpenetrating networks (IPN) หรือ เจลที่มีลักษณะโครงร่างตาข่ายของพอลิเมอร์ 2 ชนิด สอดแทรกกันอยู่ภายในระบบ แล้วเกิดเป็นโครงสร้างของเจล โดยพอลิเมอร์ชนิดแรกมีบทบาทในการเกิดการเชื่อมระหว่างโมเลกุลมากกว่า เกิดเป็นโครงสร้างของเจลได้เร็วกว่า ในขณะที่สายโซ่ของพอลิเมอร์ชนิดที่สองจะเข้าไปแทรกสอดแล้วสร้างเป็นโครงร่างตาข่ายขึ้นมาอีกครั้งแต่ช้ากว่าการเกิดเจลของพอลิเมอร์ชนิดที่หนึ่ง (Sperling, 1994)

สารผสมที่มีปริมาณเจลาตินปลาสูงขึ้น (สัดส่วน 1:10-1:25) มีการเปลี่ยนแปลงสถานะในลักษณะเฟสเดียว เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้นทำให้วุ้นมีบทบาทในการรวมตัวกันเป็น junction zone เป็นไปได้ยาก ส่งผลให้ความสามารถในการรวมตัวกันเป็น

โครงสร้างร่างแหเจล 3 มิติลดลง (Morris, 1995) เนื่องจาก ค่า G' และ G'' มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ เจลาตินปลาอย่างเดียว

สำหรับเจลผสมระหว่าง As และ Fg (รูปที่ 4.11) ในระหว่างการลดและเพิ่มอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงค่า G' และ G'' ในลักษณะเดียวกับ Ac แต่เจลผสมระหว่าง As กับ Fg มีค่า G' และ G'' ต่ำกว่าเจลผสมระหว่าง Ac กับ Fg ความแตกต่างของค่า G' และ G'' ระหว่าง เจลผสมระหว่างวุ้น Ac กับ Fg และ เจลผสมระหว่างวุ้น As กับ Fg ที่สัดส่วนเท่ากัน เนื่องจากเจลผสมระหว่างวุ้น As กับ Fg มีผลมาจาก As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลเข้าไปทำลายโครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้นให้มีขนาดสั้นและเล็กลง ทำให้ความสามารถในการจับตัวกันของสายโมเลกุลลดลง ส่งผลให้ค่า

G' ลดลง (Zhou and Ma, 2006)

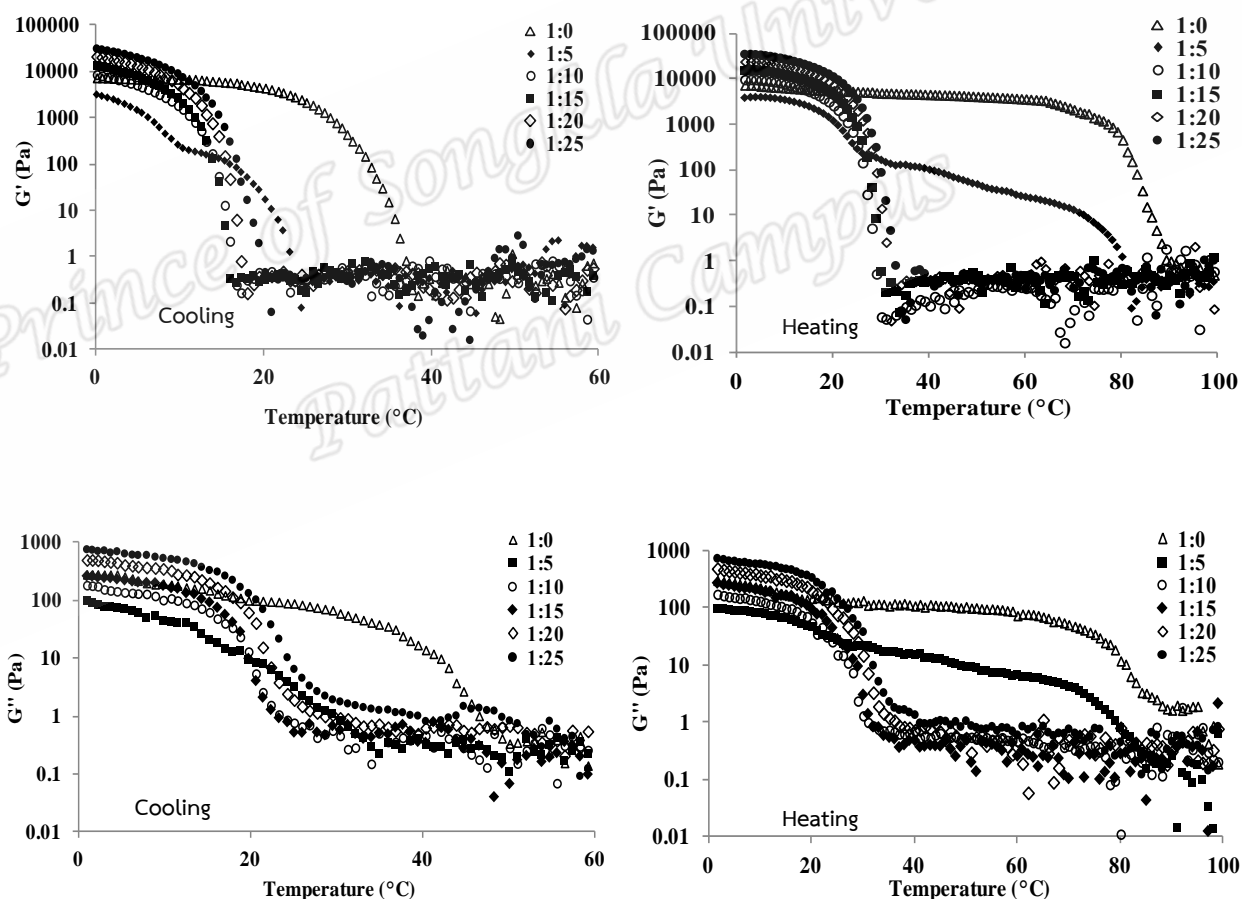


Figure 4.10 Storage modulus (G') and loss modulus (G'') of mixed gel between 1% Ac and 5, 10, 15, 20 and 25 % Fg.

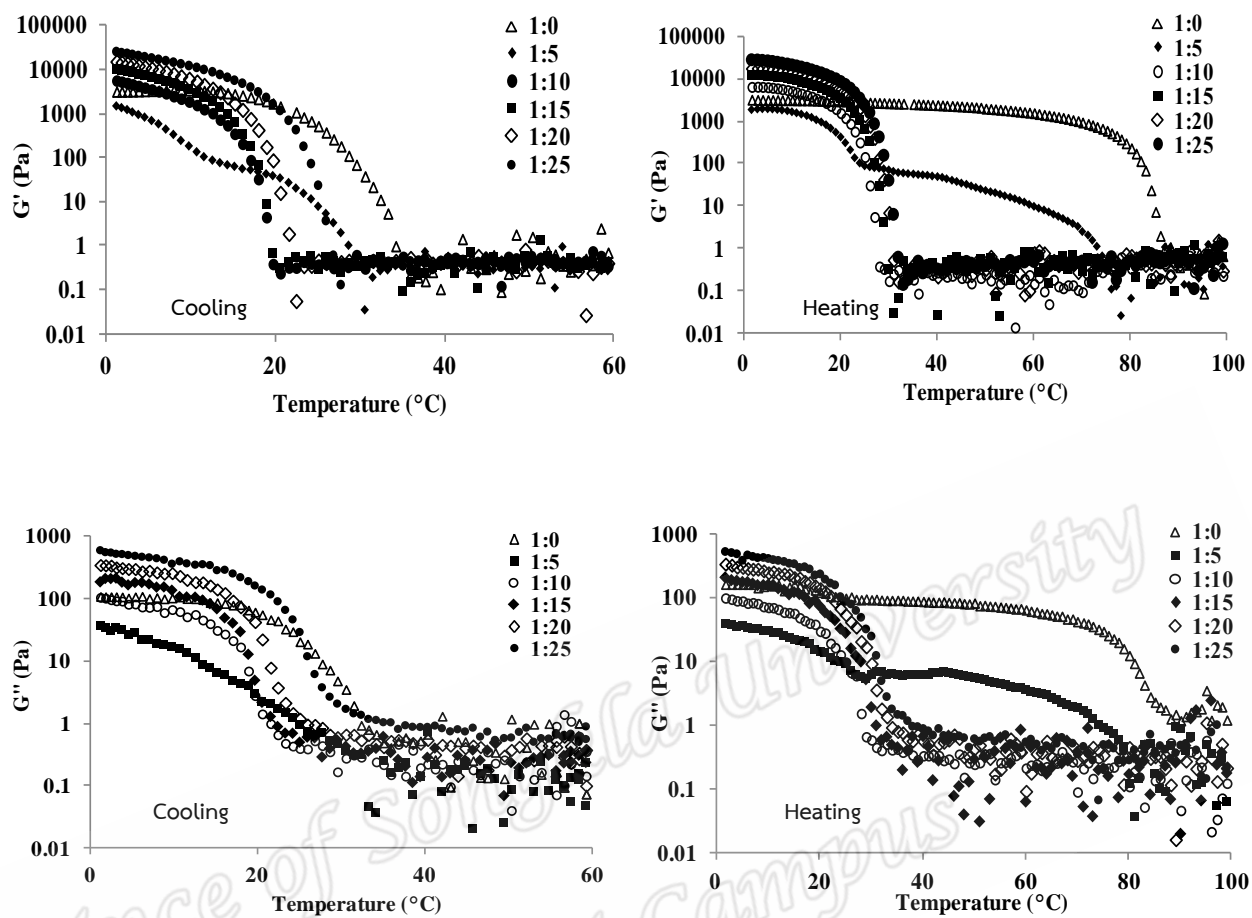


Figure 4.11 Storage modulus (G') and loss modulus (G'') of mixed gel between 1% As and 5, 10, 15, 20 and 25 % Fg.

4.1.1.2 อุณหภูมิในการเกิดเจล (T_{gel}) และอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_m) ที่ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G''

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติวิสโคอิลาสติกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสามารถหาอุณหภูมิในการเกิดเจล (T_{gel}) ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G'' ในระหว่างการลดอุณหภูมิจาก 60 องศาเซลเซียส ถึง 0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการหลอมเหลวของเจล (T_m) ได้จากค่าจุดตัดระหว่าง G' และ G'' ในระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิจาก 0 องศาเซลเซียส ถึง 100 องศาเซลเซียส (Gudmundsson, 2002)

ผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของเจลผสมระหว่างวุ้น (Ac และ As) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 กับเจลาตินปลาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 มีผลต่อค่า T_{gel} และ T_m ของเจลผสมอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.4)

เจลผสมระหว่างวุ้นกับเจลาตินปลา มี T_{gel} และ T_m ต่ำกว่าเจลวุ้นทุกสัดส่วนที่ทำการศึกษาในสัดส่วน 1:5 มีค่า T_{gel} และ T_m ใกล้เคียงกับวุ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของเจลาตินปลา (สัดส่วน 1:10) พบว่า T_{gel} และ T_m ลดลงอย่างมาก และมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเจลผสมสัดส่วนอื่นๆ เมื่อปริมาณเจลาตินปลาในเจลผสมสูงขึ้นเป็นร้อยละ 15, 20, และ 25 ค่าดังกล่าวก็สูงขึ้น และมีค่าเข้าใกล้กับค่าของเจลาตินปลาเดี่ยวๆ ที่ความเข้มข้นเดียวกัน (ตารางที่ 4.1)

ค่า T_{gel} และ T_m ระหว่างเจลผสมกับเจลาตินปลาเดี่ยวๆ (ที่มีปริมาณเจลาตินปลาที่ระดับเดียวกัน) พบว่าค่าดังกล่าวของเจลผสมสูงกว่าเจลาตินปลาเดี่ยวๆ แต่ความแตกต่างจะน้อยลงเมื่อปริมาณเจลาตินปลาเพิ่มขึ้น ที่ระดับร้อยละ 20 และ 25 ค่า T_{gel} และ T_m ของเจลผสมมีค่าดังกล่าวเกือบเท่ากับเจลาตินปลาเดี่ยวๆ ทั้งนี้เจลผสมระหว่าง Ac:Fg และ As:Fg ให้ผลไปในทางเดียวกันเพียงแต่ As:Fg มีค่า T_{gel} และ T_m ต่ำกว่า Ac:Fg อย่างมีนัยสำคัญ

เจลผสมระหว่างวุ้นร้อยละ 1 กับเจลาตินปลาร้อยละ 5 บทบาทในการเกิด cross-linking ระหว่างโมเลกุลของวุ้นยังคงมีประสิทธิภาพสูง และเนื่องด้วยคุณสมบัติทางกายภาพของวุ้น คือวุ้นมีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูง แม้จะใช้วุ้นที่ระดับความเข้มข้นต่ำ จึงส่งผลให้มีค่า T_{gel} และ T_m สูงขึ้น แต่เมื่อระดับความเข้มข้นของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการเกิดรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลของวุ้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 เป็นไปได้ยาก ส่งผลให้เจลาตินปลามีบทบาทในการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลในเจลผสมเพิ่มขึ้น การเกิดเจลจึงเป็นไปในลักษณะของการเกิดเจลของ

เจลาตินปลามากกว่ารูปแบบของการเกิดเจลของวุ้น (Shrinivas *et al.*, 2009) และเจลผสมระหว่าง Ac กับ Fg มีค่า T_{gel} และ T_m สูงกว่าเจลผสมระหว่าง As กับ Fg ซึ่งมีผลมาจาก As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป (Toubal *et al.*, 2003) ส่งผลให้ค่า T_{gel} และ T_m ต่ำกว่าเจลผสมระหว่าง Ac กับ Fg

Table 4.4 T_{gel} and T_m of Ac, As and Fg extracted from cross over point between storage modulus (G') and loss modulus (G'') at various concentrations.

Agar:Fg	T_{gel} (°C)		T_m (°C)	
	Ac:Fg	As:Fg	Ac:Fg	As:Fg
1:0	37.25±0.34 ^{fA}	34.57±0.56 ^{fB}	87.12±0.18 ^{fA}	85.53±0.4 ^{fB}
1:5	30.60±0.46 ^{eA}	28.50±0.26 ^{eB}	81.50±0.26 ^{eA}	73.24±0.10 ^{eB}
1:10	19.23±0.44 ^{aA}	16.53±0.35 ^{aB}	29.61±0.35 ^{aA}	27.39±0.27 ^{aB}
1:15	21.79±0.28 ^{bA}	18.51±0.34 ^{bB}	30.49±0.34 ^{bA}	29.52±0.35 ^{bB}
1:20	22.80±0.30 ^{cA}	20.38±0.26 ^{cB}	31.30±0.26 ^{cA}	30.46±0.46 ^{cB}
1:25	24.78±0.62 ^{dA}	23.39±0.19 ^{dB}	33.22±0.19 ^{dA}	31.31±0.23 ^{dB}

Mean value ± standard deviation of triplicates.

- Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).
- Different capital letters between column, in comparison between Ac/Fg and As/Fg are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.2.3 อุณหภูมิ (T_{gel-C}) และระยะเวลาในการเกิดเจล

จากการศึกษาอุณหภูมิ (T_{gel-C}) และระยะเวลาในการเกิดเจลของเจลผสม (รูปที่ 4.12a และ b) พบว่าสัดส่วนของเจลผสมระหว่างวุ้น (Ac และ As) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 กับเจลาตินปลาที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 5, 10, 15, 20 และ 25 มีผลต่อ T_{gel-C} และระยะเวลาในการเกิดเจลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งค่า T_{gel-C} ผลการศึกษาเป็นในทำนองเดียวกับ T_{gel} (ข้อ 4.2.2) กล่าวคือ เจลผสมระหว่าง Ac:Fg มีค่า T_{gel-C} ต่ำกว่าเจลวุ้นทุกสัดส่วนเจลผสม และในสัดส่วน 1:5 มีค่า T_{gel-C} เท่ากับ 27.60 ± 1.14 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับวุ้นมากกว่า สัดส่วนเจลผสมอื่นๆ แต่เมื่อปริมาณของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้น พบว่าที่สัดส่วน 1:10 T_{gel-C} ลดลงอย่างมาก (18.20 ± 0.83 องศาเซลเซียส) และเมื่อสัดส่วนของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 15, 20, และ 25 ค่า T_{gel-C} ก็สูงขึ้น ซึ่งมีค่าเข้าใกล้กับค่าของเจลาตินปลาเดี่ยวๆ แต่ค่า T_{gel-C} ของเจลผสมสูงกว่าเจลาตินปลาเดี่ยวๆ

ระยะเวลาในการเกิดเจลให้ผลแปรผกผันกับ T_{gel-C} กล่าวคือ หากมีค่า T_{gel-C} สูง จะมีระยะเวลาในการเกิดเจลสั้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ที่สัดส่วน 1:10 ใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลนานที่สุด (6.00 ± 0.62 นาที) ทั้งนี้เจลผสมระหว่าง Ac:Fg และ As:Fg ให้ผลไปในทำนองเดียวกัน เพียงแต่ As:Fg มีค่า T_{gel-C} ต่ำกว่าแต่ใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลนานกว่า Ac:Fg อย่างมีนัยสำคัญ ความแตกต่างของ T_{gel-C} และระยะเวลาในการเกิดเจล ระหว่างเจลผสม Ac กับ Fg และเจลผสม As กับ Fg ที่สัดส่วนของเจลผสมเท่ากัน เนื่องจาก เจลผสมระหว่าง As กับ Fg มีผลมาจาก As เพราะผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีผลเข้าไปทำลายโครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้นให้มีขนาดสั้นและเล็กลง ทำให้มีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนไปจากเดิม (Zhou and Ma, 2006) ส่งผลให้มี T_{gel-C} ต่ำกว่าและใช้ระยะเวลาในการเกิดเจลมากกว่าต่ำกว่าเจลผสมระหว่าง Ac กับ Fg

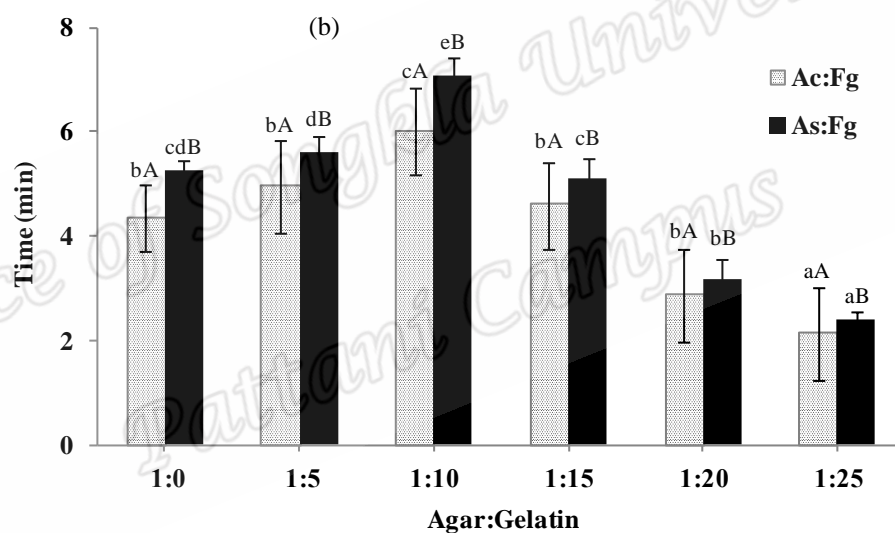
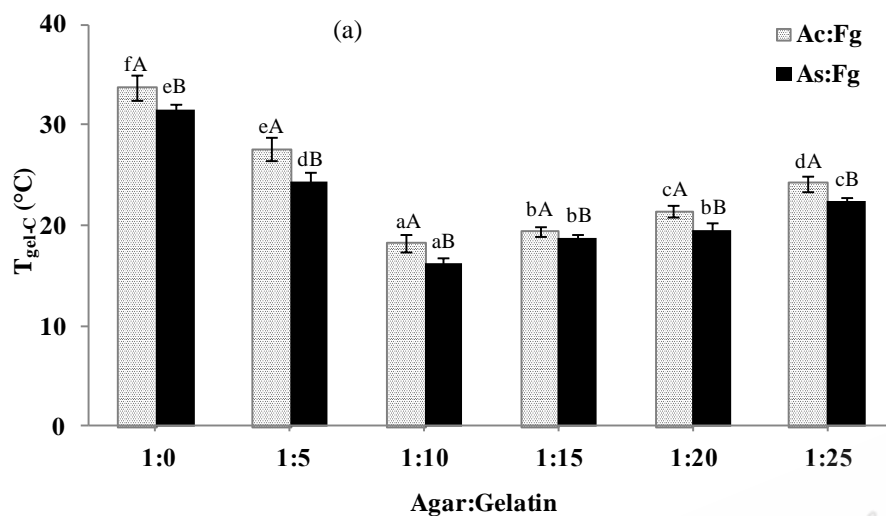


Figure 4.12 T_{gel-C} (a) and gelling time (b) of mixed gel between Ac and As with Fg

- Different small letters at various proportions are significantly different ($p \leq 0.05$).

- Different capital letters at the same proportion of mixed gels, in comparison between Ac/Fg and As/Fg are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.2.4 ลักษณะเนื้อสัมผัส

4.2.4.1 ความแข็งของเจล

การทดสอบความแข็งของเจลผสม (รูปที่ 4.13a) พบว่าสัดส่วนของเจลผสม มีผลต่อความแข็งของเจลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ ค่าความแข็งของเจลของวุ้นอย่างเดียว มีค่า 1178 ± 61.39 กรัม เมื่อผสมเจลาตินปลาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งของเจล ลดลง ให้ผลสอดคล้องกับค่า G' และ G'' โดยที่สัดส่วน 1:5 มีค่าความแข็งของเจลลดลงต่ำสุดเท่ากับ 445.81 ± 35.17 กรัม เนื่องจากเมื่อมีโมเลกุลของเจลาตินปลาในระบบเจลผสมทำให้เกิดพันธะของเจลวุ้นมีบทบาทน้อยลง แต่เมื่อความเข้มข้นของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วนที่มีเจลาตินปลามากที่สุด (อัตราส่วน 1:25) มีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากับ 2541.62 ± 33.12 กรัม เนื่องจากความเข้มข้นของสารที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความสามารถในการรวมตัวกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มและแน่นขึ้น (Nickerson *et al.*, 2004) และค่าความแข็งของเจลผสม มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเจลาตินปลาเพียงอย่างเดียว เนื่องจากวุ้นยังคงมีบทบาทในการเชื่อมข้ามระหว่างสายโมเลกุล จัดเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายแม้จะเป็นไปอย่างยากลำบาก ส่งผลให้เจลาตินปลา มีค่าความแข็งของเจลสูงขึ้น สำหรับเจลผสมระหว่าง As:Fg มีค่าความแข็งของเจลเป็นไปในทิศทางเดียวกับเจลผสมระหว่าง Ac:Fg แต่มีค่าต่ำกว่า Ac:Fg และค่าความแข็งของเจลผสม สอดคล้องกับค่า G' คือที่สัดส่วน 1:5 มีความแข็งของเจลต่ำกว่าที่สัดส่วน 1:0 (วุ้นอย่างเดียว) เนื่องจากโมเลกุลที่สอดแทรกตัวอยู่ในโครงสร้างนั้นเข้าไปสกัดกั้นการรวมตัวกันของ junction zone ของวุ้น ทำให้ความแข็งของเจลลดลง (Hang *et al.*, 2004)

4.2.4.2 ความยืดหยุ่น

การทดสอบความยืดหยุ่นของเจลผสม (รูปที่ 4.13b) ผลการทดลองพบว่าสัดส่วนของเจลผสมมีผลต่อค่าความยืดหยุ่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ เจลผสมระหว่าง Ac:Fg ค่าความยืดหยุ่นของเจลของวุ้นอย่างเดียว มีค่า 20.10 ± 0.29 มิลลิเมตร การผสมเจลาตินปลาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน 1:25 มีค่าเพิ่มเป็น 50.70 ± 0.15 มิลลิเมตร

สำหรับเจลผสมระหว่าง As: Fg มีค่าความยืดหยุ่นของเจลเป็นไปในทิศทางเดียวกับเจลผสมระหว่าง Ac กับ Fg แต่มีค่าสูงกว่า Ac กับ Fg กล่าวคือ ค่าความยืดหยุ่นของเจลของวุ้นอย่างเดียว มีค่าร้อยละ 22.93 ± 0.40 การผสมเจลาตินปลาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่น

เพิ่มขึ้น โดยที่อัตราส่วน 1:25 มีค่าเพิ่มเป็นร้อยละ 56.13 ± 0.37 ซึ่งเมื่อระดับความเข้มข้นของเจลาตินเพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้ค่าความยืดหยุ่นของเจลผสมสูงขึ้น เนื่องจากคุณสมบัติเจลาตินปลาที่มีความยืดหยุ่นสูง และเมื่อความเข้มข้นของเจลาตินปลาสูงขึ้นจึงทำให้เจลมีความยืดหยุ่นสูงขึ้น (Karim and Rajeev, 2009) และเจลผสมของวุ้น As กับ Fg มีค่าความยืดหยุ่นสูงกว่าเจลผสมของวุ้น Ac กับ Fg เนื่องจาก As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น Ac ยังไม่ถูกทำลายจึงทำให้เจลที่ได้มีลักษณะแข็งและแตกหักง่าย แต่วุ้น As เป็นวุ้นที่ผ่านการตัดแปรทำให้ขนาดโมเลกุลของวุ้นสั้นลงและเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ส่งผลให้การจับตัวกันเป็นโครงสร้างตาข่ายขณะเกิดเจลนั้นเป็นไปในลักษณะที่หลวม ทำให้เจลผสมของวุ้น As กับ Fg มีความอ่อนตัวกว่า เจลที่ได้จึงมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเจลผสมระหว่างวุ้น Ac กับ Fg

Prince of Songkla University
Pattani Campus

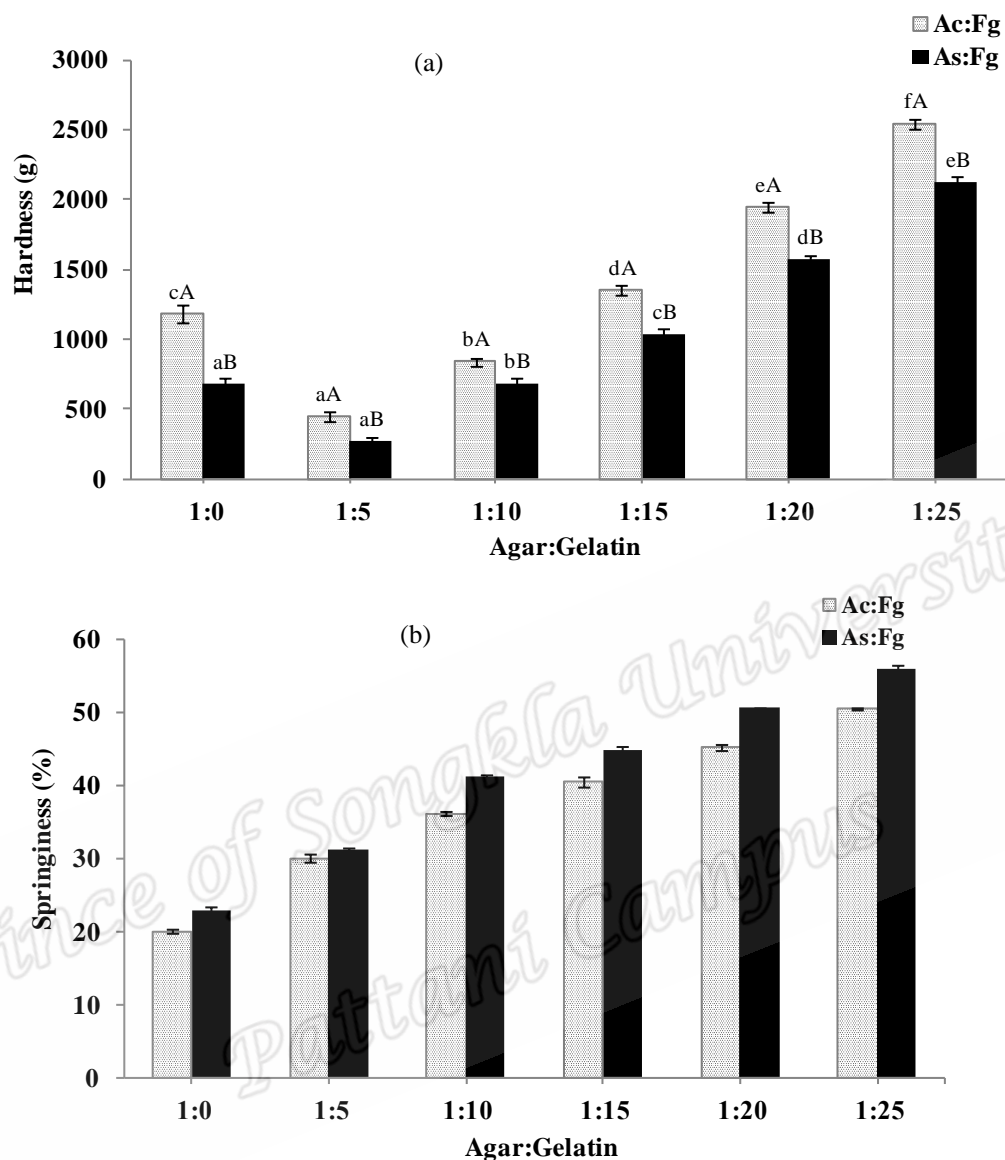


Figure 4.13 Hardness (a) and springiness (b) of mixed gel between Ac and As with Fg.

- Different small letters at various proportions are significantly different ($p \leq 0.05$).

- Different capital letters at the same proportion of mixed gels, in comparison between Ac/Fg and As/Fg are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.2.5 การขับน้ำออกจากเจล

การขับน้ำออกจากเจลเป็นสมบัติที่ไม่พึงประสงค์ ทำให้เกิดลักษณะด้อยต่อผลิตภัณฑ์อาหาร (Wang *et al.*, 2010) จากผลการศึกษาการขับน้ำออกจากเจล (รูปที่ 4.14) พบว่าสัดส่วนของเจลผสมมีผลต่อการขับน้ำออกจากเจลอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเจลผสมมีค่าการขับน้ำต่ำกว่าเจลของวุ้นอย่างเดิยว เมื่อปริมาณของเจลาตินปลาเพิ่มขึ้นค่าการขับน้ำยิ่งลดลง โดยที่สัดส่วนเจลาตินปลาร้อยละ 15 ถึง 25 มีค่าการขับน้ำออกจากเจลที่ต่ำมาก (ร้อยละ 0.06-0.02) เนื่องจากเมื่อปริมาณของเจลาตินเพิ่มขึ้นน้ำอิสระจะถูกยึดไว้ภายในโครงสร้างร่างแหโปรตีน ทำให้กักเก็บน้ำไว้ภายในโครงสร้างได้มากขึ้นเกิดการอุ้มน้ำได้ดี น้ำที่อยู่ภายในจึงซึมผ่านออกมาได้ยาก (Banerjee and Bhattacharya, 2011)

สำหรับเจลผสมระหว่าง As:Fg มีค่าการขับน้ำออกจากเจลเป็นไปในทิศทางเดียวกับเจลผสมระหว่าง Ac:Fg แต่มีการขับน้ำออกจากเจลสูงกว่าเจลผสมของวุ้น Ac:Fg เนื่องจากการที่ As ผ่านการตัดแปรโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงทำให้โครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As เปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ขนาดโมเลกุลของวุ้นสั้นลง (Nickerson *et al.*, 2004) การจับตัวกันเป็นโครงสร้างตาข่ายขณะเกิดเจลนั้นน่าจะเป็นแบบหลวมๆ มีความสามารถในการอุ้มน้ำไว้ภายในโครงสร้างต่ำ เมื่อทำการเก็บรักษาเจลในระยะเวลาที่นานขึ้น ส่งผลให้เจลผสมของวุ้น As:Fg มีการขับน้ำออกจากเจลสูงกว่าเจลผสมระหว่างวุ้น Ac กับ Fg (Banerjee and Bhattacharya, 2011) จากการศึกษาของ Shrinivas *et al.*, 2009 ที่ได้บันทึกโครงสร้างตาข่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของเจลผสมระหว่างอะกาโรสร้อยละ 1 ผสมกับเจลาตินร้อยละ 2.5, 5, 10, 15 และ 25 พบว่าเจลผสมที่มีความเข้มข้นของเจลาตินต่ำ (ร้อยละ 2.5) มีขนาดช่องว่างในโครงสร้างตาข่ายที่ใหญ่ ส่งผลให้เกิดการกักเก็บน้ำไว้มาก เมื่อเก็บรักษาเจลในระยะเวลาที่นานขึ้นทำให้เกิดการปลดปล่อยน้ำออกมาในระหว่างการเก็บรักษาในปริมาณมาก แต่เมื่อความเข้มข้นของเจลาตินสูงขึ้น (ร้อยละ 5-25) ขนาดช่องว่างโครงสร้างตาข่ายจะเล็กลง การขับน้ำออกจากเจลในระหว่างการเก็บรักษาจึงลดลง

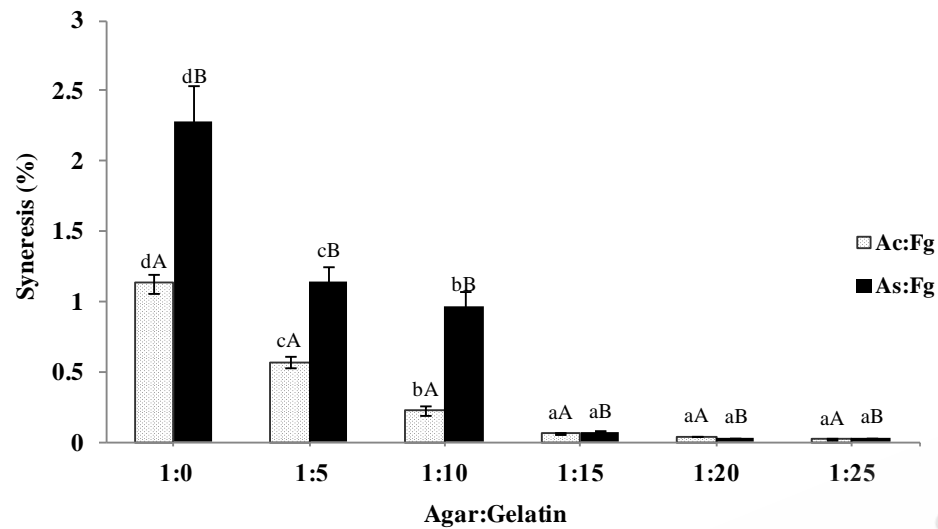


Figure 4.14 Syneresis of mixed gel between Ac and As with Fg.

- Different small letters at various proportions are significantly different ($p \leq 0.05$).

- Different capital letters at the same proportion of mixed gels, in comparison between Ac/Fg and As/Fg are significantly different ($p \leq 0.05$).

4.2.5 ค่าการดูดกลืนแสง

การวัดค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของเจลเป็นการตรวจสอบความใสหรือขุ่นของ เจลพอลิเมอร์ (Vardhanabhuti *et al.*, 2001) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร จากผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนของเจลผสมระหว่างวุ้นกับเจลาตินปลา มีผลต่อค่าการดูดกลืนแสงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ วุ้น Ac อย่างเดียว มีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.3 ± 0.01 นาโนเมตร เมื่อผสมเจลาตินปลาในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.53 ± 0.01 ถึง 0.89 ± 0.01 นาโนเมตร (รูปที่ 4.15) ซึ่งหมายถึงเจลมีความขุ่นเพิ่มขึ้นหรือความใสน้อยลง ทั้งนี้ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้มีการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น และมีความหนาแน่นขึ้น จึงสามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้น (Lau *et al.*, 2000) และ Antonov and Goncalves (1999) กล่าวว่าความขุ่นของเจลผสมขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเก็บรักษาเจล เนื่องจาก หากใช้ระยะเวลาในการเก็บรักษาเจลดานขึ้น จะทำให้การเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลเพิ่มขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างตาข่ายที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เจลมีความขุ่นเพิ่มขึ้นมากกว่าสถานะสารละลาย

Hang *et al.* (2004) ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงของเจลผสมระหว่าง คาราจีแนนความเข้มข้น คองที่ร้อยละ 1 และเจลาตินปลาที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-10 แล้วตั้งไว้ให้เกิดเจลที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบโดยการวัดความ ชุ่มโดยการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ความยาวคลื่นที่ 450 นาโนเมตร พบว่า ในการเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้องนั้นเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง จึงยากที่จะทำให้เจลาตินปลาเกิด การก่อเจล ขณะที่การเจนนนั้นมีสมบัติในการเกิดเจลได้ดีกว่า เจลาตินปลา ส่งผลให้เกิดการ แยกชั้นของระบบเจลผสมเกิดขึ้น เนื่องจากส่วนของคาราจีแนนเกิดเป็นเจล แต่มีบางส่วนของ เจลาตินปลายังคงเป็นสารละลาย ส่วนเจลที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และที่ระดับ ความเข้มข้นของเจลาตินสูงจะมีความชุ่มสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสนั้น ทั้งคาราจีแนนและเจลาตินปลาสามารถเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลได้ดีขึ้น เกิดเป็นโครงสร้าง ตาข่ายที่สมบูรณ์มากขึ้น ส่งผลให้เจลมีความชุ่มเพิ่มขึ้นมากกว่าการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

สำหรับเจลผสมระหว่าง As:Fg มีค่าการดูดกลืนแสงเป็นไปในทิศทางเดียวกับเจลผสม ระหว่าง Ac: Fg แต่มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากโครงสร้างทางโมเลกุลของวุ้น As น่าจะมีขนาด โมเลกุลสั้นลง (Nickerson *et al.*, 2004) การเชื่อมกันระหว่างสายโมเลกุลรวมตัวเป็นโครงสร้าง ตาข่ายขณะเกิดเจลเป็นไปในลักษณะที่หลวม (Banerjee and Bhattacharya, 2011) ส่งผลให้เจลผสม As:Fg มีการดูดกลืนของแสงได้น้อยกว่า ทำให้ความชุ่มของเจลด้อยกว่าเจลผสมระหว่าง Ac: Fg

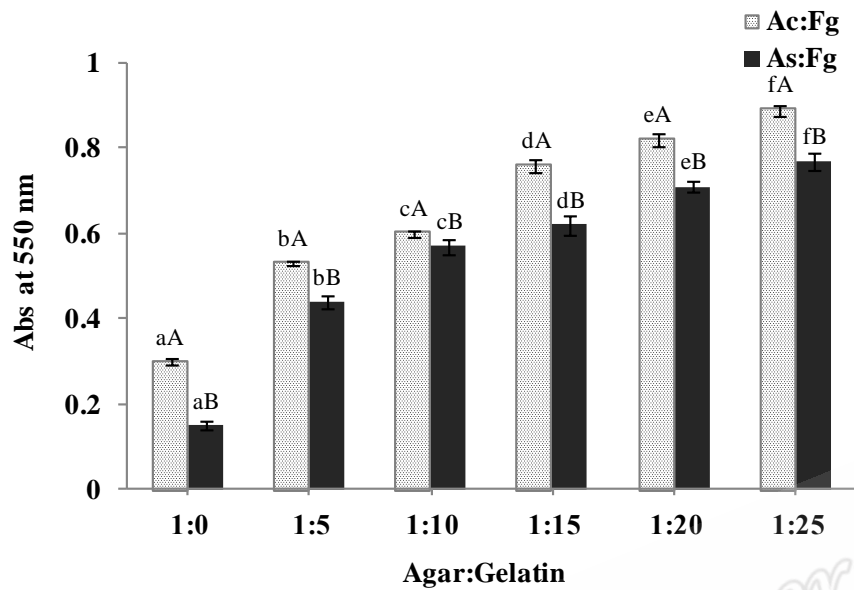


Figure 4.15 Absorbance of mixed gel between Ac and As with Fg

- Different small letters at various proportions are significantly different ($p < 0.05$).

- Different capital letters at the same proportion of mixed gels, in comparison between Ac/Fg and As/Fg are significantly different ($p < 0.05$).

4.3 ผลของน้ำตาลต่อสมบัติของเจลผสม

จากการศึกษาในข้อ 4.2 พบว่าที่สัดส่วน 1:5 มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวที่สูง (Ac:Fg เท่ากับ 81.50 ± 0.26 องศาเซลเซียส และ As:Fg เท่ากับ 73.24 ± 0.10 องศาเซลเซียส) และมีค่าการจับน้ำออกจากเจลลดลง จึงได้พิจารณาเลือกสารผสมที่สัดส่วน 1:5 เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสและกลูโคสไซรัปที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 ต่อสมบัติวิสโคอิลาสติกของเจลผสมระหว่าง Ac กับ Fg และ เจลผสมระหว่าง As กับ Fg พบว่าระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสมีผลต่อค่า G' , T_{gel} และ T_m ของเจลผสม Ac:Fg ที่สัดส่วน 1:5 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กล่าวคือทำให้ค่าดังกล่าวสูงขึ้น เมื่อเทียบกับที่เจลไม่ได้เติมน้ำตาล และเมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นค่าดังกล่าวสูงขึ้น (ตารางที่ 4.5) สำหรับ As:Fg ให้ผลทำนองเดียวกับ Ac:Fg แต่มีค่าดังกล่าวต่ำกว่า Ac:Fg

สำหรับกลูโคสไซรัป ผลการศึกษาเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ระดับความเข้มข้นของกลูโคสไซรัปมีผลต่อค่า G' , T_{gel} และ T_m ของเจลผสม Ac:Fg ที่สัดส่วน 1:5 อย่างมีนัยสำคัญ

($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 4.6) แต่พบว่าค่าดังกล่าวสูงกว่าการเติมน้ำตาลซูโครส (ที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน)

เมื่อมีการผสมน้ำตาล โมเลกุลของน้ำตาลจะสร้างพันธะกับน้ำที่อยู่ในโครงสร้างตาข่ายของเจล ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระลดลง (Normand *et al.*, 2003) ทำให้สายโมเลกุลขยับชิดกันมากขึ้นเกิดการเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลได้ดีขึ้น ส่งผลให้เจลมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น (Nordqvist and Vilgis, 2011) นอกจากนี้ Nishinari *et al.* (1997) กล่าวว่า น้ำตาลซูโครสมีความสามารถในการช่วยสร้างพันธะไฮโดรเจนภายในโครงสร้างของเจล ทำให้เกิดการเชื่อมข้ามระหว่างสายโมเลกุลมากขึ้น ส่งผลให้ได้โครงสร้างของเจลแข็งแรงขึ้น ขณะที่ Normand *et al.* (2003) พบว่าน้ำตาลซูโครสมีผลต่ออุณหภูมิในการเกิดและหลอมเหลวของเจลอะกาโรสที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสที่ร้อยละ 60 ส่งผลให้มีอุณหภูมิในการเกิดและหลอมเหลวของเจลอะกาโรสสูงสุด เท่ากับ 36.42 และ 91.00 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในขณะที่เจลของอะกาโรสที่ไม่ได้เติมน้ำตาลมีค่าดังกล่าวเท่ากับ 33.92 และ 80.40 องศาเซลเซียสตามลำดับ น้ำตาลจึงผลต่อการเปลี่ยนแปลงจากสารละลายไปสู่การจับตัวกันระหว่างสายโซ่ของอะกาโรส (coil-to-helix) โดยที่ซูโครสจะแทรกเข้าไปอยู่ในร่างแหของเจลมากขึ้น จึงช่วยเร่งให้เกิดกลไกการเกิดเจลเร็วขึ้นส่งผลให้มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น และยังช่วยให้มีอุณหภูมิในการเกิดเจลสูงขึ้น เนื่องจากสายฮีลิกซ์มีความเสถียรมากขึ้น ทำให้เกิดความทนต่อความร้อนมากขึ้น แต่ที่ระดับความเข้มข้นของซูโครสมากกว่าร้อยละ 60 การเกิดเจลลดลงเนื่องจากที่ความเข้มข้นของน้ำตาลสูง ทำให้เกิดอาจทำให้เกิดการตกผลึกของน้ำตาลได้ง่าย ส่งผลให้การจับตัวกันระหว่างสายโซ่เป็นไปได้ยาก

Table 4.5 Effect of sucrose at various concentrations on mixed gels properties.

Concentration (%)	Ac:Fg			As:Fg		
	G' (Pa)*	T _{gel} (°C)	T _m (°C)	G' (Pa)*	T _{gel} (°C)	T _m (°C)
0	2728.00±34.11 ^a	30.60±0.46 ^a	81.50±0.26 ^a	1853.00±21.67 ^a	28.50±0.26 ^a	73.24±0.10 ^a
10	2852.33±43.68 ^b	30.71±0.28 ^a	83.09±0.33 ^b	2140.33±45.08 ^b	28.34±0.76 ^a	75.42±0.57 ^b
20	3079.33±18.33 ^c	31.02±0.34 ^b	83.76±0.11 ^b	2551.66±27.75 ^c	28.41±0.11 ^a	75.71±0.38 ^{bc}
30	3446.00±36.51 ^d	31.65±0.33 ^b	84.25±0.24 ^c	2960.00±16.70 ^d	29.45±0.16 ^b	76.25±0.16 ^{bc}
40	3556.33±31.89 ^e	32.17±0.06 ^c	85.21±0.10 ^d	3257.66±22.89 ^e	29.79±0.49 ^{bc}	76.60±0.17 ^c
50	4454.33±39.24 ^f	32.66±0.35 ^c	85.61±0.38 ^d	3564.33±35.85 ^f	30.55±0.19 ^c	77.81±0.27 ^d

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

* Storage modulus (G') at 0 °C

Table 4.6 Effect of glucose syrup at various concentrations on mixed gels properties.

Concentration (%)	Ac:Fg			As:Fg		
	G' (Pa)*	T _{gel} (°C)	T _m (°C)	G' (Pa)*	T _{gel} (°C)	T _m (°C)
0	2728.00±34.11 ^a	30.60±0.46 ^a	81.50±0.26 ^a	1853.00±21.67 ^a	28.50±0.26 ^a	73.24±0.10 ^a
10	2939.66±42.06 ^a	30.77±0.61 ^a	83.84±0.16 ^a	2361.66±12.50 ^a	28.87±0.10 ^a	76.18±0.12 ^a
20	4057.66±31.64 ^b	31.22±0.17 ^{ab}	84.13±0.06 ^b	3254.33±32.02 ^b	29.05±0.05 ^a	76.86±0.13 ^b
30	4939.33±41.78 ^c	31.55±0.18 ^b	84.63±0.16 ^c	3560.00±23.64 ^c	29.87±0.08 ^b	77.20±0.09 ^c
40	5540.33±24.58 ^d	32.60±0.13 ^c	85.77±0.18 ^d	4627.33±24.78 ^d	30.28±0.14 ^c	77.66±0.29 ^d
50	6537.66±27.68 ^e	32.82±0.14 ^c	86.29±0.21 ^e	4838.00±22.62 ^e	30.90±0.30 ^d	78.06±0.05 ^e

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

* Storage modulus (G') at 0 °C

4.4 การประยุกต์ใช้สารก่อเจลผสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่

จากการศึกษาในข้อ 4.2 พบว่าเจลผสมระหว่าง Ac:Fg มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูงกว่า และมีค่าการจับน้ำออกจากเจลต่ำกว่า As:Fg และจากการศึกษาผลของน้ำตาลในข้อ 4.3 พบว่าการเติมน้ำตาลต่างชนิดกันจะส่งผลให้ลักษณะปรากฏของเจลที่ได้มีความแตกต่างกัน ซึ่งการเติมกลูโคสไซรัปจะให้เจลที่มีลักษณะใส เนื้อเจลละเอียดไม่หยาบคล้ายทราย และมีความยืดหยุ่นสูงกว่าเจลที่เติมน้ำตาลซูโครส และจากการทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ทางการค้า 3 ยี่ห้อ คือ โยโย่ โอกิโอะ และควีน โดยใช้แบบทดสอบ hedonic scale 9 ระดับ และใช้ผู้ทดสอบจำนวน 30 คน พบว่าผู้ทดสอบชิมชอบกลิ่นรส ความหวาน ความยืดหยุ่น และให้คะแนนความชอบโดยรวมกับยี่ห้อโยโย่มากที่สุด (รูปที่ 4.16) และเมื่อเปรียบเทียบความยืดหยุ่นระหว่างกัมมี่เยลลี่ทางการค้ากับเจลผสม Ac:Fg พบว่าที่สัดส่วน 1:5 มีค่าความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับกัมมี่เยลลี่ทางการค้ายี่ห้อโยโย่มากที่สุด (รูปที่ 4.17) ดังนั้นการศึกษาในส่วนของการประยุกต์ใช้สารก่อเจล จึงเลือกสารก่อเจลผสมระหว่าง Ac:Fg ที่ 1:5 อัตราส่วนเจลผสมที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่

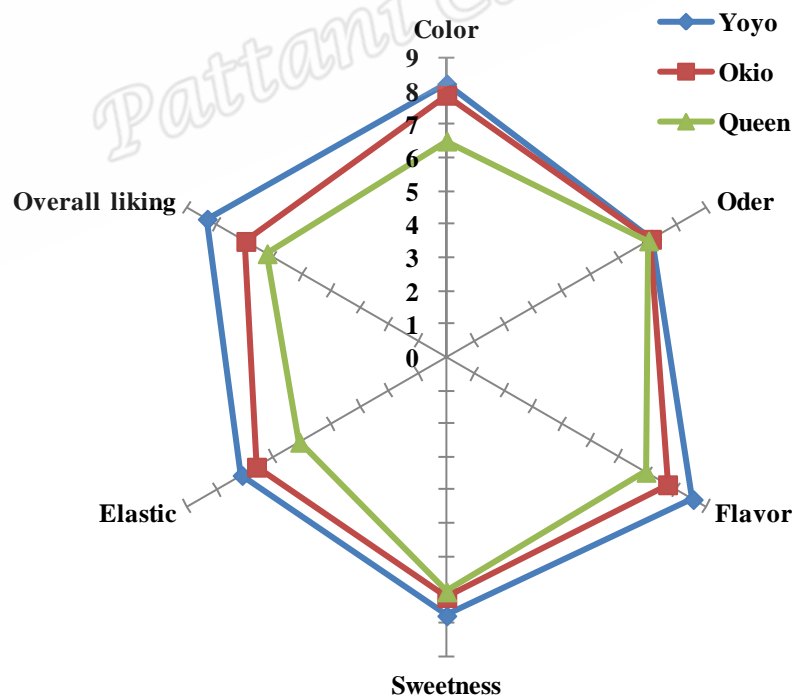


Figure 4.16 Sensory evaluation of 3 commercial gummy jelly products

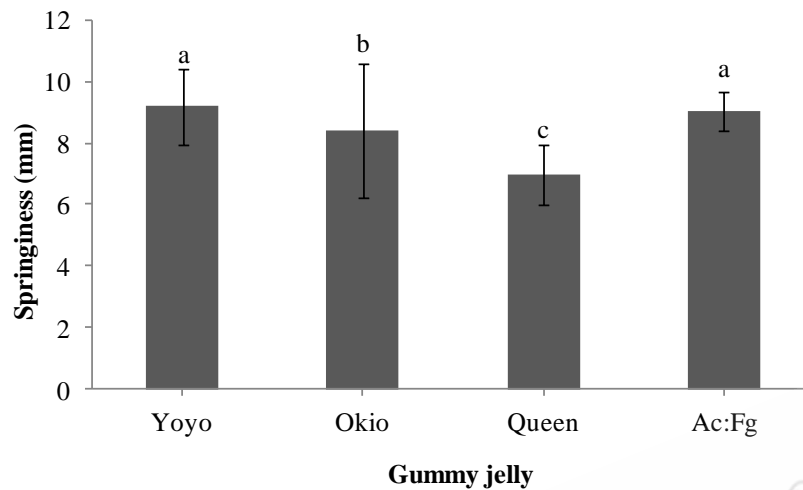


Figure 4.17 Springiness of 3 commercial gummy jelly and Ac:Fg mixed gels at 1:5 ratio.

จากการศึกษาการประยุกต์ใช้เจลผสมในผลิตภัณฑ์กัมมี่เยลลี่กลิ่นกาแฟ โดยทำการศึกษาสมบัติของเจลผสมระหว่างวุ้น Ac และ Fg ที่อัตราส่วน 1:5 โดยผลิตกัมมี่เยลลี่ทั้งหมด 3 สูตร คือ สูตร A, B และ C โดยมีส่วนผสมดังตารางที่ 4.7 ทำการศึกษาสมบัติวิสโคอิลาสติก ลักษณะเนื้อสัมผัส และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัส ซึ่งกัมมี่เยลลี่ที่ได้จากทั้ง 3 สูตรนั้น มีสีที่ไม่แตกต่างกันมากนัก (แสดงดังรูปที่ 4.18) และกัมมี่เยลลี่ทั้ง 3 สูตรสามารถตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) โดยไม่เกิดการหลอมเหลว



Figure 4.18 Gummy gelly products (A, B and C formula).

Table 4.7 Ingredients of gummy jelly product.

Formula	Ac:Fg	Sucrose (%)	Glucose syrup (%)
A	1:5	30	20
B	1:5	10	40
C	1:5	0	50

4.4.1 การเปลี่ยนแปลงค่า G' , T_{gel} และ T_m ของกัมมี่เยลลี่

ผลการศึกษาพบว่ากัมมี่เยลลี่ทั้ง 3 สูตร มีค่า G' , T_{gel} และ T_m แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยที่กัมมี่เยลลี่สูตร A มีค่าดังกล่าวต่ำกว่าสูตร B และ C ตามลำดับ (ตารางที่ 4.8) โดยสอดคล้องกับ Al-Ruqaie *et al.* (1997) ที่ศึกษาผลของน้ำตาลซูโครสและกลูโคสไซรัปต่อสมบัติของเจลาตินเจล โดยใช้เจลาตินที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ผสมซูโครสกับกลูโคสไซรัปที่สัดส่วนละ 50/0, 50/8 และ 50/16 พบว่าที่ความเข้มข้นของน้ำตาลผสมที่สัดส่วน 50/0 มีค่า T_{gel} และ T_m เท่ากับ 25 และ 34 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นของน้ำตาลผสมที่สัดส่วน 50/16 มีค่า T_{gel} และ T_m สูงขึ้นเท่ากับ 37 และ 41 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การผสมกันระหว่างน้ำตาลซูโครสและกลูโคสไซรัปกับเจลาตินนั้น หากเพิ่มปริมาณของกลูโคสไซรัปส่งผลให้ค่า G' เพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำตาลเข้าไปจับกับน้ำ ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างสายโมเลกุลแต่ละสายของเจลาตินจับตัวกันเป็นเกลียวสามสายเพิ่มขึ้น นำไปสู่โครงสร้างของการเกิดเจลได้ดีขึ้น (Oakenfull and Scott, 1986) และนอกจากนี้ Jackson (2000) กล่าวว่าเมื่อน้ำตาลซูโครสและกลูโคสไซรัปอยู่ร่วมกันจะทำให้ค่าความเป็นของแข็งเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งกลูโคสไซรัปจะช่วยป้องกันการตกผลึกของน้ำตาลซูโครสทำให้เจลมีลักษณะยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น และกลูโคสไซรัปยังช่วยป้องกันการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ได้อีกด้วย เนื่องจากมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณน้ำอิสระภายในโครงสร้างของเจลลดลง

Table 4.8 G', T_{gel} and T_m of gummy jelly product.

Formula	G' (Pa)	T _{gel} (°C)	T _m (°C)	Aw
A	6301.66±47.07 ^a	33.98±0.61 ^a	86.14±0.07 ^a	0.67±0.36 ^a
B	6849.33±24.70 ^b	34.13±0.12 ^a	86.84±0.15 ^b	0.61±0.43 ^a
C	7076.66±29.87 ^c	35.45±0.47 ^b	87.08±0.11 ^c	0.63±0.71 ^a

Mean value ± standard deviation of triplicates.

Different small letters in the same column are significantly different ($p \leq 0.05$).

* Storage modulus (G') at 0 °C

4.4.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส

สำหรับค่าความแข็งของเจลพบว่ากัมมีเยลลี่สูตร A, B และ C ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (รูปที่ 4.19a) ซึ่งกัมมีเยลลี่ทั้ง 3 สูตรมีค่าความแข็งของเจลอยู่ในช่วง 618.59±29.90 ถึง 631.77±6.91 กรัม สำหรับค่าความยืดหยุ่นพบว่าเยลลี่ทั้ง 3 สูตร มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยมีความยืดหยุ่นอยู่ในช่วง 9.31±0.10 ถึง 9.56±0.04 มิลลิเมตร (รูปที่ 4.19b)

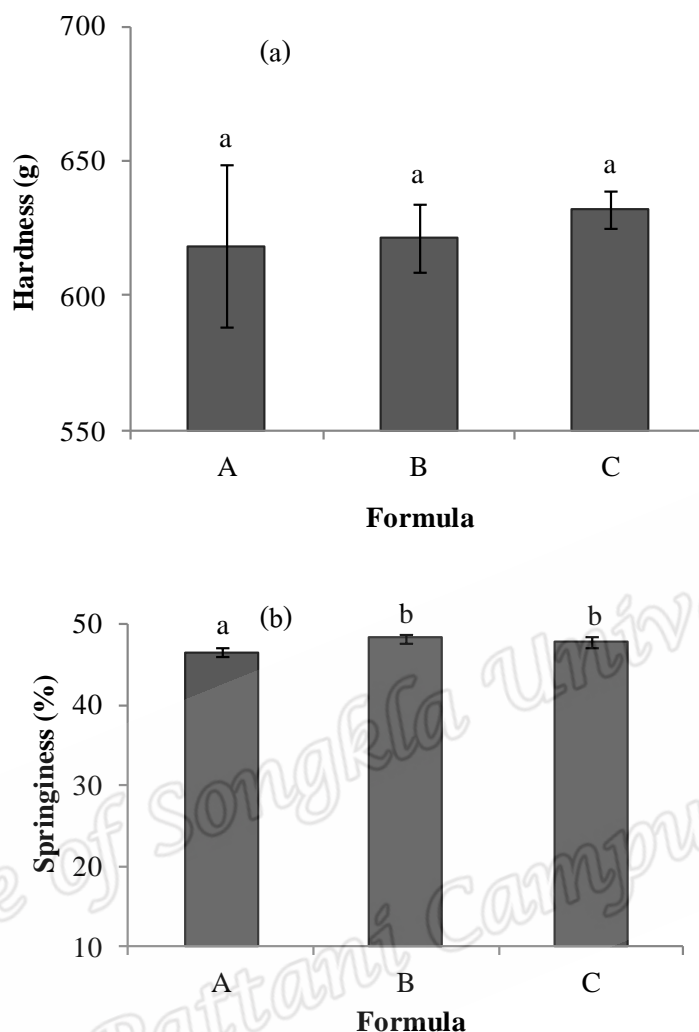


Figure 4.19 Hardness (a) and springiness (b) of gummy jelly product.

4.4.2 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

จากการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัส ได้แก่ สี กลิ่น กลิ่นรส ความหวาน เนื้อสัมผัส (ความยืดหยุ่น) และระดับความชอบโดยรวม ของกัมมี่เยลลี่ 3 สูตร คือ สูตร A, B และ C โดยใช้แบบทดสอบ hedonic scale 9 ระดับ และใช้ผู้ทดสอบจำนวน 100 คน พบว่าผู้ทดสอบชิมมีความชอบด้านสี กลิ่น กลิ่นรส และความยืดหยุ่นในผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 สูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ความยืดหยุ่นผู้ทดสอบชิมมีความชอบเล็กน้อยถึงปานกลาง และให้คะแนนความชอบรสหวานในสูตร A สูงกว่าสูตร B และสูตร C อย่างมีนัยสำคัญ และมีผลเช่นเดียวกับความชอบโดยรวม คือ ชอบสูตร A (7.25 ± 0.66) มากที่สุด รองลงมาคือสูตร B

(6.50 ± 0.55) และสูตร C (5.86 ± 0.97) แสดงผลดังรูปที่ 4.20 จึงบ่งชี้ได้ว่าความหวานเป็นตัวชี้วัดสำคัญที่มีผลต่อระดับความชอบของผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค

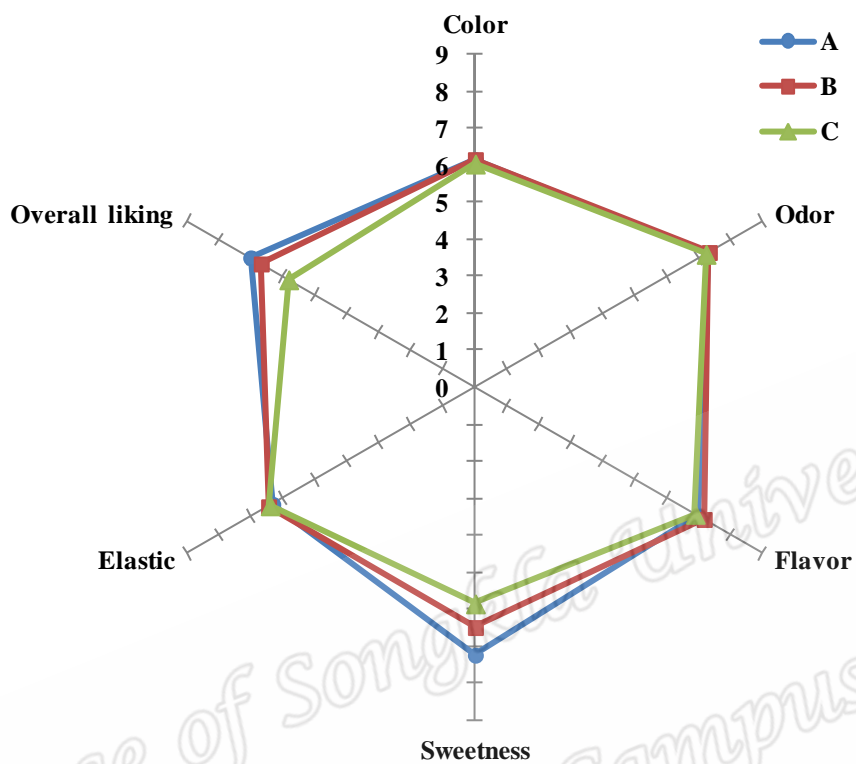


Figure 4.20 Sensory evaluation of gummy jelly product (A, B and C formula).