



บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 สมบัติทางเคมีกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

4.1.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (ตารางที่ 4.1) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักมากที่สุด คือ ร้อยละ 98.95 โดยน้ำหนักแห้ง รองลงมา คือ เส้นใยหยาบ ไขมัน เถ้า และโปรตีน ร้อยละ 0.64, 0.27, 0.10 และ 0.04 โดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ และจากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลส พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละ 64.61 ของสตาร์ช ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะจัดได้ว่าเป็นสตาร์ชที่มีปริมาณแอมิโลสอยู่ในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐปันจาบ ประเทศอินเดีย ที่วิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีการวัดการดูดกลืนแสงของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแอมิโลสกับไอโอดีน พบว่ามีปริมาณแอมิโลสเท่ากับร้อยละ 28.40 (Sandhu และ Lim, 2008) ปริมาณแอมิโลสที่ได้จากการทดลองนี้มีค่าค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณแอมิโลสด้วยวิธีการเกิดสีกับไอโอดีนนั้นมีข้อจำกัด กล่าวคือ โมเลกุลแอมิโลเพกตินสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีนได้เช่นเดียวกับกับแอมิโลส ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนของไอโอดีนกับแอมิโลเพกตินสามารถดูดซับแสงได้ที่ความยาวคลื่นที่ใกล้เคียงกับสารประกอบเชิงซ้อนของไอโอดีนกับแอมิโลส ส่งผลให้การวัดค่าปริมาณแอมิโลสอาจมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Julaino, 1984) และอาจเนื่องมาจากสารมาตรฐานแอมิโลสที่ใช้ในการทดลองคือแอมิโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง type 3 ซึ่งทำให้วิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสได้มากกว่าความเป็นจริง



ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
ความชื้น (% wb)	12.96 ± 0.08
คาร์โบไฮเดรต (% db)	98.95 ± 0.02
เส้นใยหยาบ (% db)	0.64 ± 0.01
ไขมัน (% db)	0.27 ± 0.01
เถ้า (% db)	0.10 ± 0.01
โปรตีน (% db)	0.04 ± 0.00
แอมิโลส (% of starch)	64.61 ± 0.93

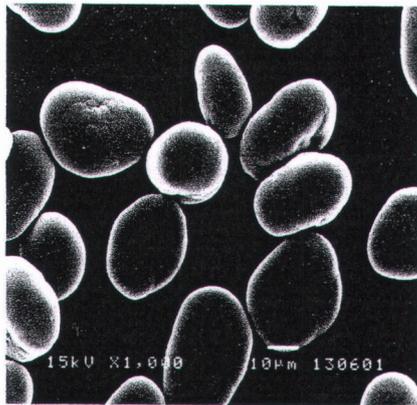
4.1.2 สมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

4.1.2.1 ค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

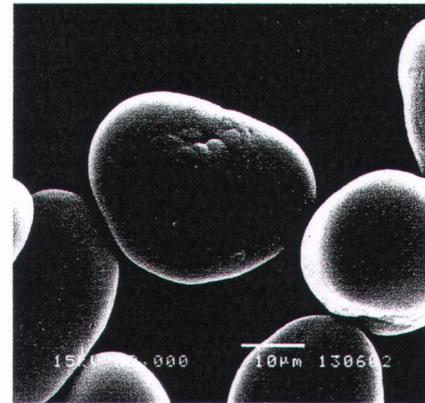
จากการวัดค่าสีของสตาร์ชถั่วมะแฮะด้วยเครื่อง Chroma meter พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า L (ความสว่าง) a (+ สีแดง, - สีเขียว) และ b (+ สีเหลือง, - สีน้ำเงิน) เท่ากับ 76.09 ± 0.42 , -0.61 ± 0.10 และ 1.16 ± 0.06 ตามลำดับ และมีค่าดัชนีความขาวเท่ากับ 76.05 ± 0.42 ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะตามธรรมชาติจะมีสีขาวนวล และมีค่าความสว่างค่อนข้างสูง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการสกัดสตาร์ชด้วยสารละลายต่างอ่อนและการร่อนอาจทำให้ส่วนของโปรตีน เส้นใย และไขมันบางส่วนถูกกำจัดออกไป จึงเป็นการลดสิ่งปนเปื้อนในเม็ดสตาร์ช ทำให้สตาร์ชมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น

4.1.2.2 รูปร่าง ลักษณะพื้นผิว ลักษณะ birefringence รูปแบบโครงสร้างผลึก ขนาด และการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษารูปร่างและลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้กล้อง SEM (รูปที่ 4.1) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรี มีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ และเม็ดสตาร์ชยังคงมีความสมบูรณ์



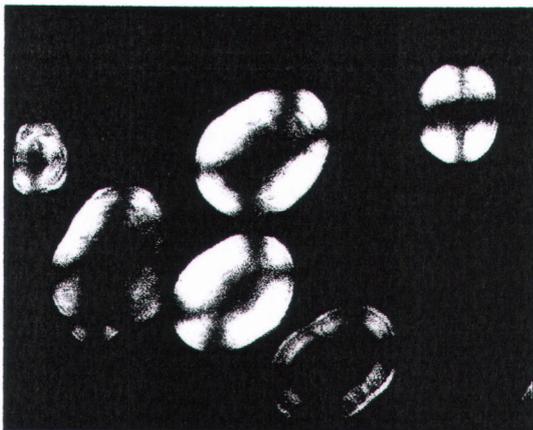
(1000x)



(2000x)

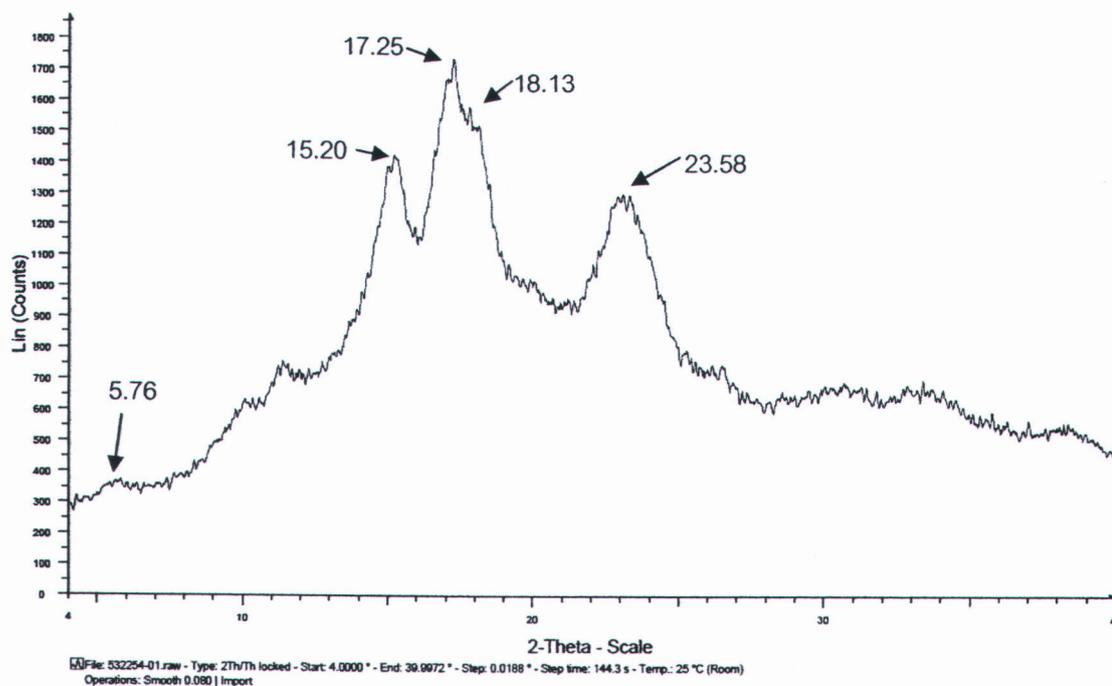
รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการวิเคราะห์รูปร่างของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ (รูปที่ 4.2) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีรูปร่างกลมและรีคล้ายเมล็ดถั่ว เช่นเดียวกับเม็ดสตาร์ชของถั่วเขียว (Liu และ Shen, 2007) และจากการวิเคราะห์ลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่า มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช แสดงว่าการสร้างสายพอลิเมอร์ของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินเริ่มจากจุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ชและขยายออกตามแนวรัศมีของสตาร์ช และการเห็นลักษณะ birefringence ที่ชัดเจนนี้เป็นการชี้ให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชไม่เกิดความเสียหาย กล่าวคือ จากการสกัดโปรตีนออกด้วยสารละลายต่างอ่อนนั้นไม่ทำให้เกิดการสลายโครงสร้างผลึกของแอมิโลเพกตินในเม็ดสตาร์ช ส่วนการที่เม็ดสตาร์ชเกิด birefringence เมื่อปิดระนาบแสงโพลาไรซ์แสดงว่าเม็ดสตาร์ชมีสภาพเป็น semi-crystalline โดยส่วนที่เป็น birefringence เกิดจาก crystalline region ในเม็ดสตาร์ช (Gallant, Bouchaet และ Baldwin, 1997)



รูปที่ 4.2 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะโดยใช้ Wide Angle X-Ray Diffraction พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีพีค (peak) เกิดขึ้นที่ 5.76, 15.20, 17.25, 18.13 และ 23.58 องศา (รูปที่ 4.3) ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว โดยเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A ที่พบในสตาร์ชจากธัญพืช ซึ่งมีโครงสร้างผลึกเรียงตัวแบบหนาแน่น และโครงสร้างผลึกแบบ B ที่พบในสตาร์ชจากพืชหัว ซึ่งมีการเรียงตัวแบบหลวม ๆ (Donald, 2004) และมี degree of crystallinity เท่ากับ 39.84% ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ที่พบว่า degree of crystallinity ของสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐบันจาบ ประเทศอินเดียมีค่าเท่ากับ 33.40%



รูปที่ 4.3 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

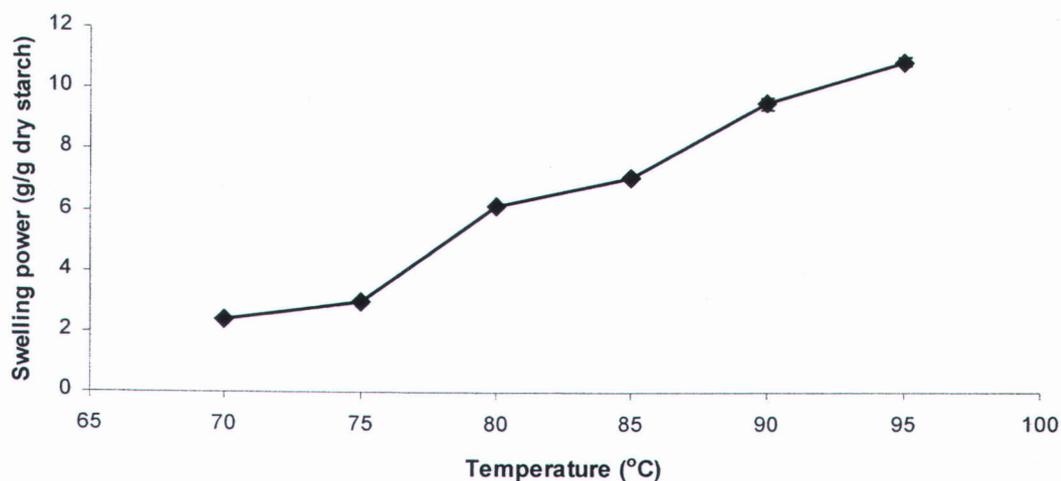
จากการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง Multi-wavelength Particle Size Analyzer with Tornado (Dry Powder Module) System (รูปที่ ข.1) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะมีขนาดอยู่ในช่วง 10.78 ถึง 43.67 ไมครอน โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 27.32 ± 0.01 ไมครอน ซึ่งสตาร์ชถั่วมะแฮะสามารถจัดอยู่ในกลุ่มของสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากมีขนาดเฉลี่ยมากกว่า 25 ไมครอนขึ้นไป (Lindeboom และคณะ, 2004)

4.1.2.3 ความสามารถในการจับน้ำ (Water binding capacity) ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

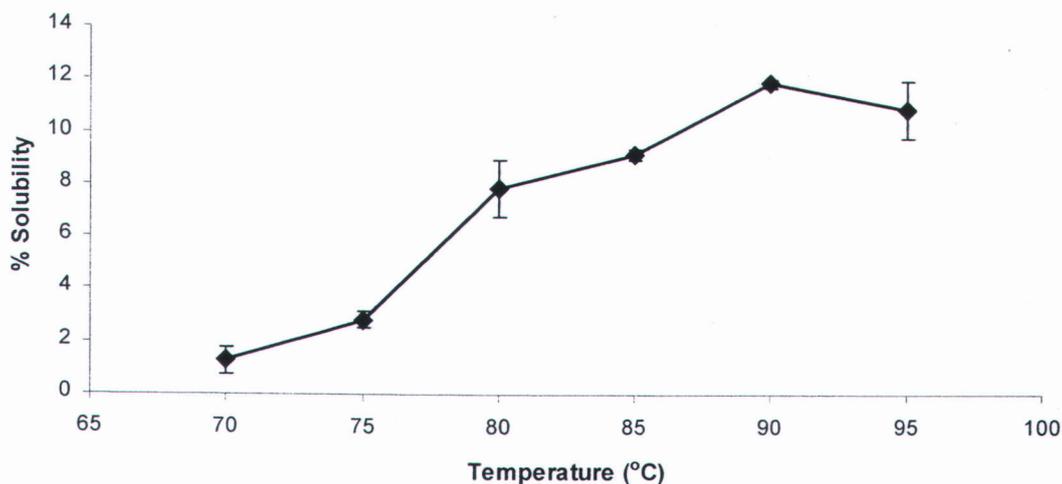
โดยทั่วไปสตาร์ชไม่สามารถละลายในน้ำเย็นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชัน เมื่อเติมน้ำลงในสตาร์ชและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) จากการศึกษาค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะ พบว่า มีค่าความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 0.74 ± 0.01 กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง ซึ่งมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ ผลการทดลองที่ได้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยกับผลการทดลองของ Sandhu และ Lim (2008) ที่พบว่าสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐบีนจาบ ประเทศอินเดีย ซึ่งมีปริมาณแอมิโลสเท่ากับร้อยละ 28.40 มีความสามารถในการจับน้ำเท่ากับ 1.04 กรัม น้ำ / กรัม สตาร์ชแห้ง

4.1.2.4 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

กำลังการพองตัวสามารถบ่งบอกความหนืดของสตาร์ชสุกได้ โดยสตาร์ชที่มีกำลังการพองตัวสูงเมื่อสตาร์ชสุกก็จะมีความหนืดที่สูงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ ส่งผลให้มีการเคลื่อนที่ได้น้อยลงหรือเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลน้ำอิสระที่อยู่รอบ ๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง จึงเกิดความหนืดขึ้น ส่วนการละลายจะมีความสัมพันธ์กับกำลังการพองตัว กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้น ทำให้แอมิโลสบางส่วนหลุดออกมาจากเม็ดสตาร์ช ส่งผลให้มีการละลายที่สูงขึ้นด้วย (Mondragón และคณะ, 2006) จากการศึกษากำลังการพองตัวและการละลาย (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่า กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น พันธะไฮโดรเจนภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย น้ำจึงสามารถเข้าไปทำพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้น เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวมากขึ้นก็จะส่งผลให้โมเลกุลของแอมิโลสที่อยู่ภายในเม็ดสตาร์ชสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้นด้วย (Hoover, 2001)



รูปที่ 4.4 กำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C



รูปที่ 4.5 การละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะในช่วงอุณหภูมิ 70 ถึง 95 °C

4.1.2.5 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ (Starch granule growth kinetics)

จากการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์การขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะ (ตารางที่ 4.2) พบว่า อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อให้ความร้อนกับสตาร์ชที่อุณหภูมิสูงขึ้น จะส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีอัตราการพองตัวที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tattiyakul (1997) ที่ได้ศึกษาจลนศาสตร์การขยายขนาดของสตาร์ชมันสำปะหลังหลังความเข้มข้น 2.6 % พบว่า อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ชมันสำปะหลังมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นกัน และเมื่อพิจารณาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (activation energy, E_a) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตีในเซชันในช่วงอุณหภูมิ 69 °C ถึง 79 °C เท่ากับ $343.76 \text{ kJ mole}^{-1}$

ตารางที่ 4.2 อัตราการขยายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า E_a

อุณหภูมิ (°C)	อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช		E_a (kJ mole ⁻¹)
	K_p (min ⁻¹)	R^2	
69	0.0008 ± 0.0000	0.6558 – 0.7861	
74	0.0054 ± 0.0000	0.8863 – 0.9149	343.76 ± 6.67
79	0.0237 ± 0.0025	0.9519 – 0.9676	

พลังงานก่อกัมมันต์คือ ระดับพลังงานขั้นต่ำที่โมเลกุลของสารตั้งต้นจะต้องมี เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ (ดวงกมล ณ ระนอง, 2551) สตาร์ชต่างชนิดกันจะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตินในเซชันแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.3 โดยสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A ได้แก่ สตาร์ชจากข้าวโพดและข้าว มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตินในเซชันต่ำกว่าสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ B ได้แก่ สตาร์ชจากมันฝรั่งและมันสำปะหลัง ส่วนสตาร์ชที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ได้แก่ สตาร์ชจากถั่วมะแฮะและ cowpea ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกผสมระหว่างโครงสร้างผลึกแบบ A และ B จะมีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตินในเซชันอยู่ระหว่างค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A และ B นั้นเอง และจากตารางที่ 4.3 พบว่า เมื่อศึกษาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของสตาร์ชมันฝรั่งในช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชันต่างกันจะได้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์แตกต่างกัน ดังนั้นถ้าต้องการเปรียบเทียบค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชชนิดใดก็ตาม ควรที่จะเปรียบเทียบในช่วงอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตินในเซชันเดียวกัน

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่า E_a ของสตาร์ชชนิดต่าง ๆ ในช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตินในเซชัน

ชนิดของสตาร์ช	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	E_a (kJ mole^{-1})	วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์	ที่มา
ข้าวโพด	70-85	62.00	Particle size analysis	Okechukwu และ Rao (1996a)
ข้าวโพด	70-90	76.00	Alkali solubility	Cabrera และคณะ (1984)
Cowpea	67-86	233.60	Particle size analysis	Okechukwu และ Rao (1996b)
Cowpea	73-85	198.00	Thermal scanning rigidity monitor	Okechukwu และคณะ (1991)
มันฝรั่ง	60-63	963.00	Viscometry	Kubota และคณะ (1979)
มันฝรั่ง	< 67.5	821.00	DSC	Pravisani, Califano และ Calvedo (1985)
	> 67.5	244.00	DSC	
ข้าว	70-85	59.00	Viscometry	Kubota และคณะ (1979)
ข้าว	< 100	80.00	Parallel plate plastometers	Suzuki และคณะ (1976)
มันสำปะหลัง	61-70	395.60	Particle size analysis	Tattiyakul (1997)
ถั่วมะแฮะ	69-79	343.76	Particle size analysis	ในงานวิจัยนี้

4.1.2.6 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

ความหนืดเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่สำคัญของสตาร์ช เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหนืดของสตาร์ช ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช และการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีต่าง ๆ (กล้านรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) จากการศึกษาสมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ (ตารางที่ 4.4) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดสูง คือ 81.28°C มีความหนืดสูงสุด $4,106.5\text{ cP}$ มีช่วง breakdown ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการทนต่อแรงกวนที่อุณหภูมิ 95°C เท่ากับ $1,082.5\text{ cP}$ และมีค่า setback ซึ่งแสดงถึงแนวโน้มในการคืนตัวหรือเกิดรีโทรเกรเดชันเท่ากับ $2,812.5\text{ cP}$ เจลของสตาร์ชถั่วมะแฮะหลังจากผ่านการทดสอบสมบัติทางด้านการเกิดเพสต์ด้วยเครื่อง RVA แล้ว พบว่า มีลักษณะเป็นเจลขุ่น และเป็นแบบ short gel เนื่องจากสตาร์ชถั่วมะแฮะมีปริมาณแอมิโลสสูง และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกำลังการพองตัวกับค่า pasting temperature จะเห็นได้ว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงอุณหภูมิ 75 ถึง 90°C และค่า pasting temperature ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเช่นกัน

ตารางที่ 4.4 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

Pasting properties*	ค่าที่ได้
Peak viscosity (cP)	$4,106.50 \pm 3.54$
Trough (cP)	$3,024.00 \pm 11.31$
Breakdown (cP)	$1,082.50 \pm 7.78$
Final viscosity (cP)	$5,836.50 \pm 60.10$
Setback (cP)	$2,812.50 \pm 48.79$
Pasting temperature ($^{\circ}\text{C}$)	81.28 ± 0.53
Peak time (minute)	4.67 ± 0.00

หมายเหตุ: * ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบประกอบด้วยสตาร์ช 3 กรัม และน้ำ 25 กรัม

4.1.2.7 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะด้วยเครื่อง DSC ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 ถึง 95°C ได้ค่า onset temperature (T_0), peak temperature (T_p), conclusion temperature (T_c), enthalpy of gelatinization (ΔH) และช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติเนชัน (ΔT) ดังตารางที่ 4.5 พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติเน-

เซชัน (gelatinization temperature range; $T_c - T_o$) เท่ากับ 70.95 ถึง 83.95 °C เมื่อพิจารณาค่า T_o และค่า pasting temperature ที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง RVA พบว่า ค่า T_o ของสตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่าต่ำกว่าค่า pasting temperature เนื่องจากค่า pasting temperature เป็นอุณหภูมิที่สารละลายสตาร์ชเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อเม็ดสตาร์ชเริ่มดูดน้ำและพองตัวได้ในระดับหนึ่ง ในขณะที่ T_o วัดจากการเปลี่ยนแปลงด้านความร้อน (heat flux) นั่นคือ เมื่อสตาร์ชเริ่มเกิดเจลต้องมีการดูดความร้อนเข้าไปในระบบโดยความหนืดอาจยังไม่มีเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ค่า T_o ต่ำกว่าค่า pasting temperature (Jane และคณะ, 1999)

ตารางที่ 4.5 สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

สมบัติด้านความร้อน	ค่าที่ได้
T_o (°C)	70.95 ± 0.07
T_p (°C)	77.20 ± 0.28
T_c (°C)	83.95 ± 0.07
ΔH (J / g)	12.97 ± 0.13
ΔT (°C)	13.00 ± 0.00

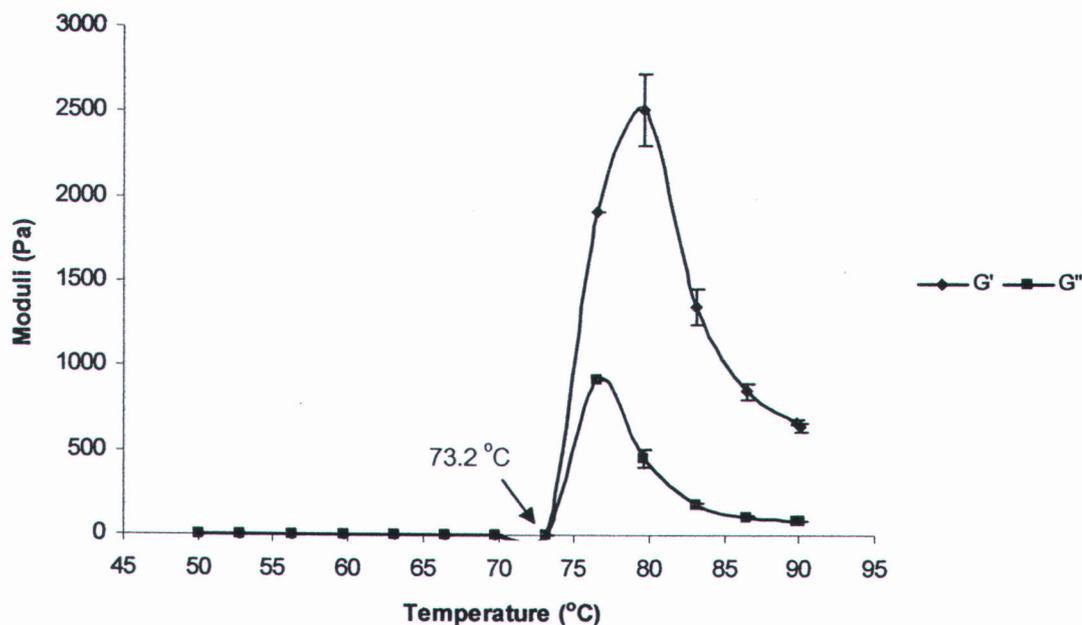
เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลงานวิจัยของ Sandhu และ Lim (2008) ซึ่งศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะจากรัฐบีนจาบ ประเทศอินเดีย (ตารางที่ 4.6) พบว่า ค่า T_o , T_p , T_c และ ΔH ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงกว่าผลการทดลองของ Sandhu และ Lim (2008) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบสูงกว่า ทำให้โครงสร้างร่างแหในเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นและแข็งแรงมากกว่า โดยอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลลาติในเซชันจะบ่งบอกถึงความแตกต่างของโครงสร้างผลึกเม็ดสตาร์ช โดยสตาร์ชที่มีอุณหภูมิและพลังงานในการเกิดเจลลาติในเซชันสูง แสดงว่ามีความเป็นผลึกมากหรือมีโครงสร้างที่คงทนต่อการเกิดเจลลาติในเซชันได้มากกว่า (Barichello และคณะ, 1990)

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

	ปริมาณ แอมิโลส (%)	Degree of crystallinity (%)	อัตราส่วน สตาร์ช:น้ำ (w/w)	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	ΔH (J/g)
งานวิจัยนี้	64.61	39.84	1:2.3	70.95	77.20	83.95	12.97
Sandhu และ Lim (2008)	28.40	33.40	1:2.3	69.30	75.50	80.60	7.20

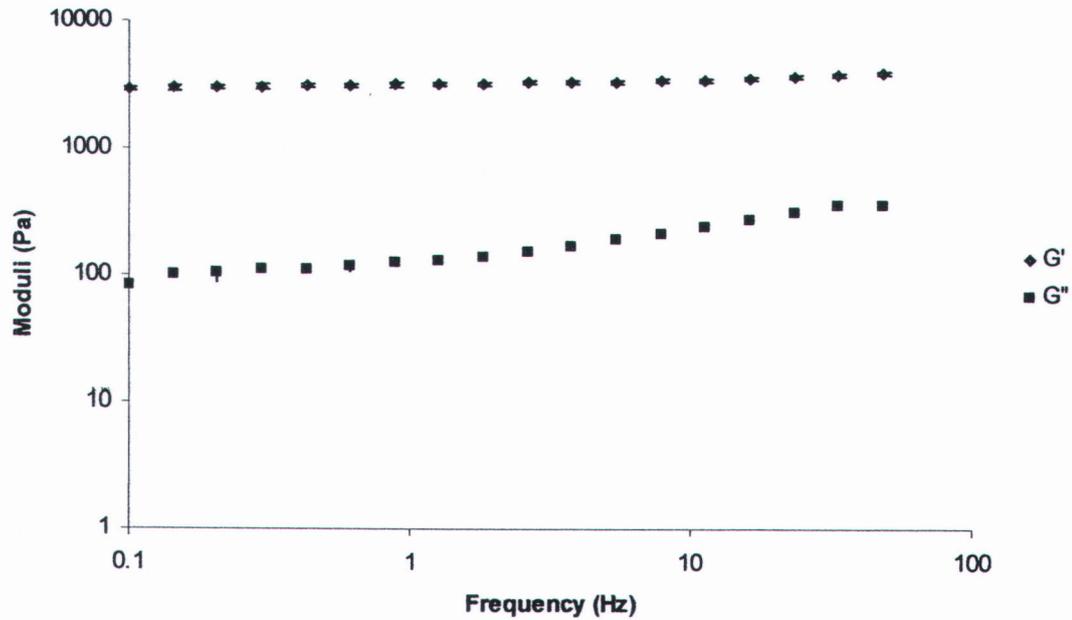
4.1.2.8 สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะ

จากการทดสอบ temperature sweep test ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ความเข้มข้นร้อยละ 12 (w/w) ซึ่งกำหนดค่า Linear viscoelastic range ที่ 40 Pa stress และความถี่ที่ 1 Hz (รูปที่ 4.6) พบว่า เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ช ค่า elastic modulus (G') และ viscous modulus (G'') จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวเพิ่มมากขึ้น เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารละลายสตาร์ชไปสู่สภาพที่เรียกว่า sol (Tsai, Li และ Lii, 1997) สตาร์ชถั่วมะแฮะเริ่มเกิดเจลลิตีในเซชันที่อุณหภูมิ 73.2 °C ซึ่งค่า G' และ G'' มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 79.7 °C และ 76.5 °C ตามลำดับ และเมื่อให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำให้เกิดพีคสูงสุด เม็ดสตาร์ชจะพองตัวเต็มที่และแตกออก โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชถูกทำลาย ส่งผลให้ค่า G' และ G'' มีค่าลดลง (Chiotelli และ Meste, 2002)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 Hz และใช้อุณหภูมิในการทดสอบ ตั้งแต่ 50 °C ถึง 90 °C

จากนั้นนำตัวอย่างเจลสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการทดสอบ temperature sweep test แล้ว มาทดสอบ frequency sweep test ต่อ โดยกำหนดสภาวะการทดสอบที่ 40 Pa stress อุณหภูมิ 25 °C และความถี่อยู่ในช่วง 0.1 Hz ถึง 100 Hz พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะมีค่า G' มากกว่าค่า G'' ที่ทุกความถี่ของการทดลอง (รูปที่ 4.7) ซึ่งแสดงถึงเจลมีความแข็งแรงและคงทนต่อแรงกระทำ และเป็นการชี้ให้เห็นว่าเจลมีลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะความเป็นของเหลว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบ ตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz

4.2 ผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่

4.2.1 ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการวิเคราะห์ปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (ตารางที่ 4.7) พบว่า เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Chen และคณะ (2003b) ที่ศึกษาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันฝรั่ง 1 สายพันธุ์ และสตาร์ชมันเทศ 2 สายพันธุ์ จากประเทศเนเธอร์แลนด์ แล้วแยกขนาดออกเป็น 3, 2 และ 2 ขนาด ตามลำดับ พบว่า เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่ได้ศึกษาปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชมันฝรั่ง 4 สายพันธุ์ จากรัฐปันจาบ ประเทศอินเดีย ที่ผ่านการแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด พบว่า ปริมาณแอมิโลสมิแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.7 ขนาดเฉลี่ยของเม็ดสตาร์ชและปริมาณแอมิโลสของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตัวอย่าง	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	ปริมาณแอมิโลส (%)
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที	28.13 ^a ± 0.09	65.50 ^a ± 1.11
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที	26.99 ^b ± 0.22	63.44 ^a ± 0.15
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที	24.50 ^c ± 0.02	61.07 ^b ± 1.92
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที	20.49 ^d ± 0.07	60.63 ^b ± 0.12

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.2 ขนาด และการกระจายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการศึกษาขนาดและการกระจายขนาดของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (รูปที่ ข.2) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และมากกว่า 60 นาที มีขนาดเม็ดสตาร์ชแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 28.13, 26.99, 24.50 และ 20.49 ไมครอน ตามลำดับ (ตารางที่ 4.7) และปริมาณของสตาร์ชที่แยกได้ในแต่ละช่วงเวลาแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ปริมาณของสตาร์ชที่แยกได้ในแต่ละช่วงเวลา

ตัวอย่าง	ปริมาณสตาร์ชที่แยกได้ (%)
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที	45.17 ± 2.11
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที	26.38 ± 1.77
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที	14.24 ± 1.33
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที	2.46 ± 0.85
การสูญเสีย (% loss)	11.75 ± 3.56
รวม	100.00

4.2.3 ค่าสีของสสารที่ถ่วงและที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการวัดค่าสีและค่าดัชนีความขาวของสสารที่ถ่วงและที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (ตารางที่ 4.9) พบว่า เม็ดสสารที่ถ่วงและที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และมากกว่า 60 นาที มีค่า L, a, b และค่าดัชนีความขาวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยเม็ดสสารที่ถ่วงและที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที มีค่าความสว่างมากที่สุด ส่วนเม็ดสสารที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าดัชนีความขาวน้อยที่สุด ถึงแม้ว่าเม็ดสสารทั้ง 4 ขนาด มีค่าสีที่แตกต่างกัน แต่ไม่สามารถสังเกตความแตกต่างด้วยตาเปล่าได้

ตารางที่ 4.9 ค่าสี L, a, b และค่าดัชนีความขาวของสสารที่ถ่วงและที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

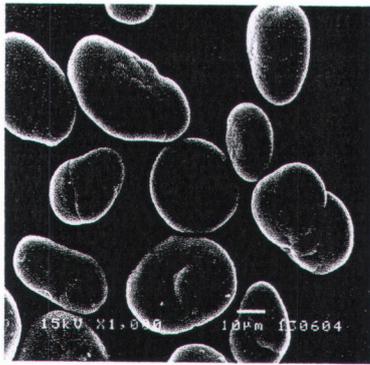
ตัวอย่างสสารที่ตกตะกอนที่เวลา	ค่าสี			ค่าดัชนีความขาว
	L	a	b	
15 นาที	76.43 ^c ± 0.09	-0.66 ^a ± 0.03	1.14 ^a ± 0.08	76.52 ^b ± 0.54
30 นาที	77.56 ^a ± 0.04	-0.78 ^b ± 0.06	1.07 ^b ± 0.04	77.52 ^a ± 0.04
60 นาที	77.32 ^b ± 0.02	-0.79 ^b ± 0.02	0.93 ^c ± 0.02	77.29 ^a ± 0.02
มากกว่า 60 นาที	77.29 ^b ± 0.05	-0.62 ^a ± 0.03	0.88 ^d ± 0.01	77.27 ^a ± 0.05

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสมมติเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.4 รูปร่างและลักษณะพื้นผิวของสสารที่ถ่วงและที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

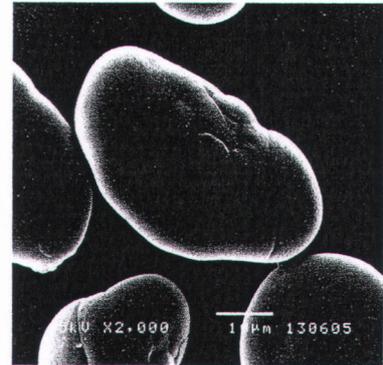
จากการศึกษารูปร่างและลักษณะพื้นผิวของเม็ดสสารที่ถ่วงและที่ผ่านการแยกขนาดแล้วโดยใช้เครื่อง SEM (รูปที่ 4.8) พบว่า เม็ดสสารที่ถ่วงและที่ผ่านการแยกขนาดทั้ง 4 ขนาด มีรูปร่างและลักษณะพื้นผิวไม่แตกต่างกัน โดยเม็ดสสารจะมีรูปร่างกลมและรี และมีลักษณะสภาพพื้นผิวที่เรียบ





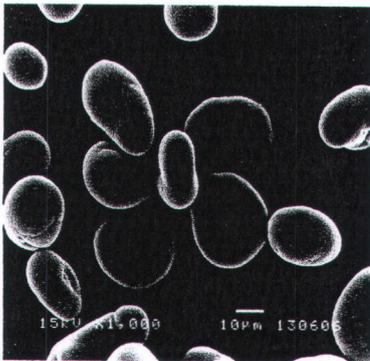
(1000x)

15 นาที



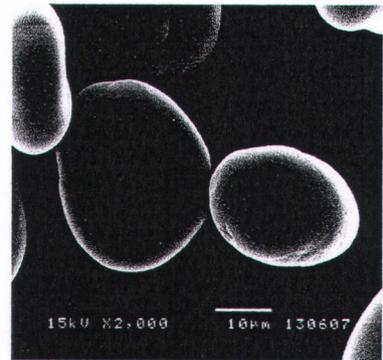
(2000x)

15 นาที



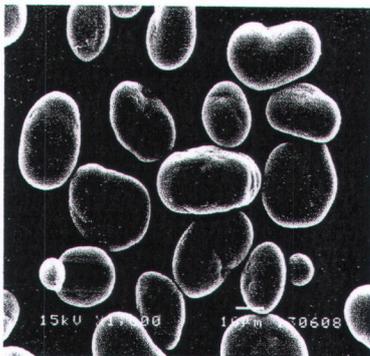
(1000x)

30 นาที



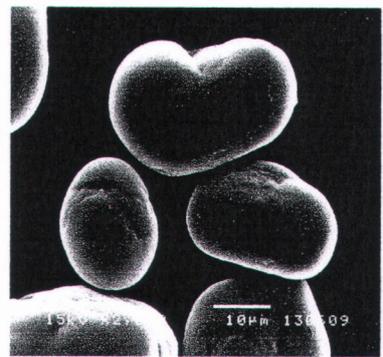
(2000x)

30 นาที



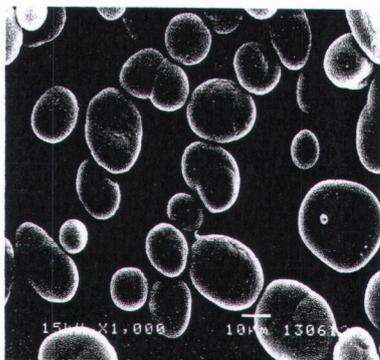
(1000x)

60 นาที



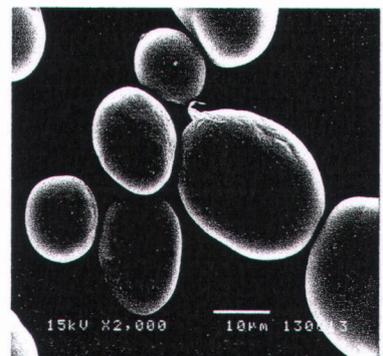
(2000x)

60 นาที



(1000x)

มากกว่า 60 นาที



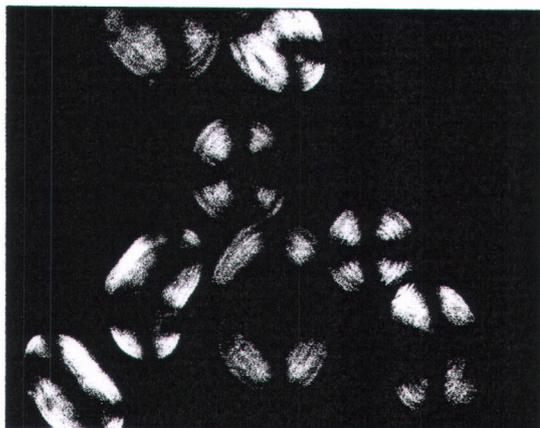
(2000x)

มากกว่า 60 นาที

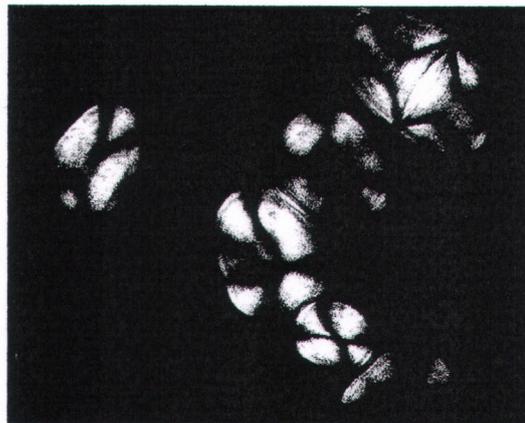
รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจาก SEM แสดงลักษณะพื้นผิวของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่แยกที่เวลาต่าง ๆ

4.2.5 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

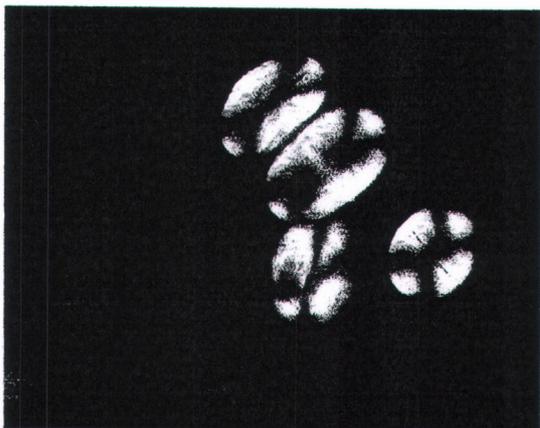
จากการวิเคราะห์รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของเม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (รูปที่ 4.9) พบว่า เม็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีรูปร่างกลม และรีคล้ายเมล็ดถั่ว มีลักษณะ birefringence ที่ชัดเจน และมีตำแหน่งไฮลัม (hilum) อยู่ที่จุดศูนย์กลางของเม็ดสตาร์ช



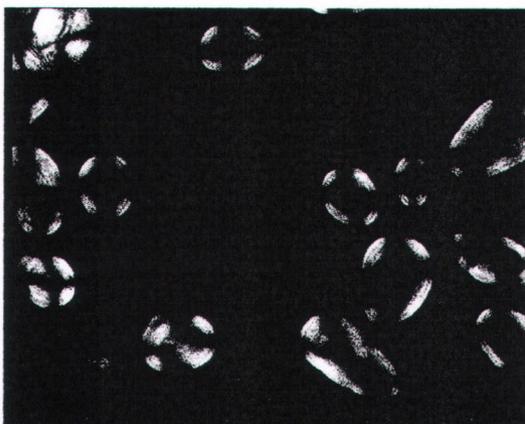
สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที



สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที



สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 60 นาที

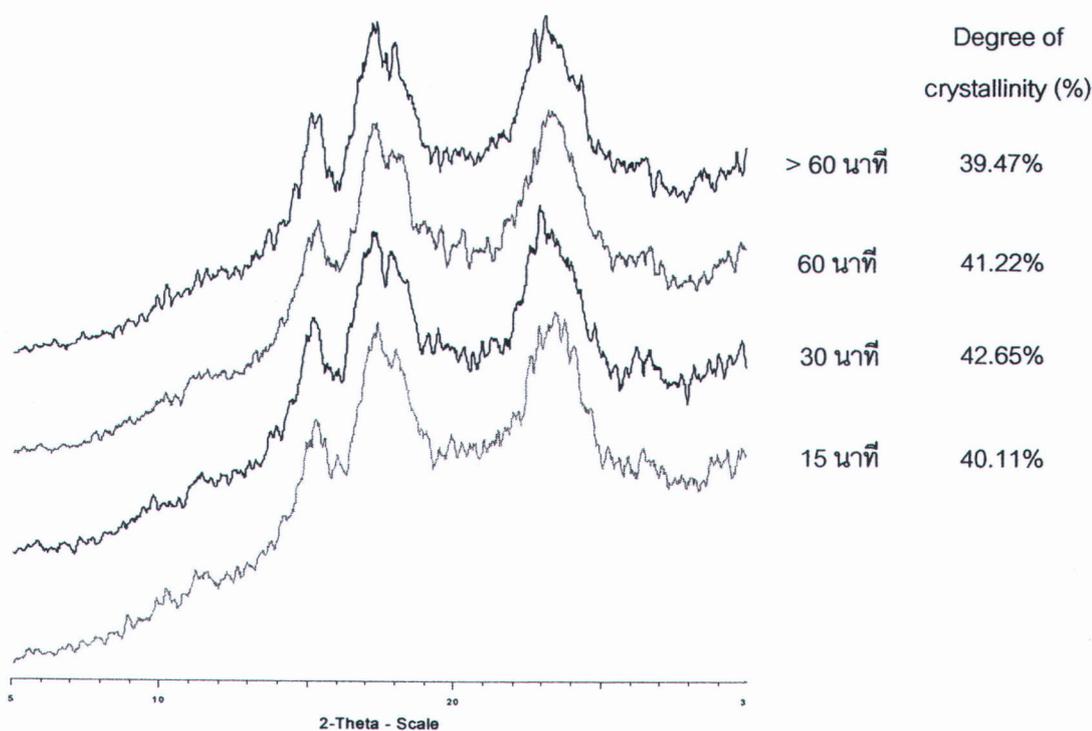


สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลามากกว่า 60 นาที

รูปที่ 4.9 รูปร่าง และลักษณะ birefringence ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

4.2.6 รูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการศึกษารูปแบบและโครงสร้างผลึกของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (รูปที่ 4.10) พบว่า สตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีรูปแบบ X-ray diffraction pattern ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ C ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากพืชตระกูลถั่ว ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang และคณะ (2002) ที่ได้ศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของ normal และ waxy barley starch จากประเทศญี่ปุ่น ซึ่งผ่านการแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด พบว่า เม็ดสตาร์ชของ normal และ waxy barley starch ทั้ง 3 ขนาด มีรูปแบบ X-ray diffraction pattern ไม่แตกต่างกัน โดยมีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึกแบบ A ที่มักพบในโครงสร้างของสตาร์ชจากธัญพืช และในการวิเคราะห์ degree of crystallinity ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที, 30 นาที, 60 นาที และมากกว่า 60 นาที พบว่า มีค่าเท่ากับ 40.11%, 42.65%, 41.22% และ 39.47% ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 X-ray diffraction pattern ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

4.2.7 ความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว พบว่า ค่าความสามารถในการจับน้ำจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่เล็กลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบอยู่สูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ซึ่งแอมิโลสที่มีอยู่ในปริมาณมากกว่านี้จะจับกันเกิดพันธะที่แข็งแรงภายในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช จึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการจับน้ำที่ลดลง (Chen, Schols และ Voragen, 2003a) และอาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กสามารถจับน้ำได้มากกว่านั่นเอง ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Wootton และ Bamunuarachchi (1978) ที่พบว่า ค่าความสามารถในการจับน้ำของ maize starch มีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Tang และคณะ (2001) ที่พบว่า waxy barley starch ที่มีเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กมีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ เช่นเดียวกันกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่พบว่า ค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชมันฝรั่งมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง

ตารางที่ 4.10 ค่าความสามารถในการจับน้ำของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตัวอย่างสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา	ค่าความสามารถในการจับน้ำ (กรัม/กรัมสตาร์ชแห้ง)
15 นาที	0.64 ^d ± 0.00
30 นาที	0.67 ^c ± 0.00
60 นาที	0.69 ^b ± 0.00
มากกว่า 60 นาที	0.72 ^a ± 0.00

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสดมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2.8 กำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

ตารางที่ 4.11 และ 4.12 แสดงให้เห็นว่า กำลังการพองตัวและการละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาผลของขนาดเม็ดสตาร์ชต่อค่ากำลังการพองตัวและการละลาย พบว่า ค่ากำลังการพองตัวมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ส่วนค่า

การละลายมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น (รูปที่ ข.3 และ ข.4) เนื่องจากปริมาณแอมิโลสที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในเม็ดสตาร์ช เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบอยู่สูงกว่า จึงมีความสามารถในการจับน้ำที่ต่ำกว่า ส่งผลให้กำลังการพองตัวมีค่าต่ำกว่า (Kerr และคณะ, 2000) แต่มีค่าการละลายมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tang และคณะ (2002) ที่พบว่ากำลังการพองตัวของ normal และ waxy barley starch มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Huang และคณะ (2007) ที่พบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ช yellow pea, chickpea และ cowpea มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่ได้ทำการทดลองหาค่ากำลังการพองตัว และการละลายของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว พบว่า กำลังการพองตัวมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ส่วนการละลายมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.11 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชที่ ตกตะกอนที่เวลา	ขนาดเฉลี่ย					
	70 °C	75 °C ^{ns}	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C
สตาร์ชที่ยังไม่ได้อ่านการแยกขนาด	27.32 ± 0.01	3.00 ± 0.00	6.12 ± 0.03	7.09 ± 0.01	9.52 ± 0.21	10.89 ± 0.15
15 นาที	28.13 ^a ± 0.09	2.97 ± 0.03	5.53 ^b ± 0.01	8.38 ^c ± 0.32	9.20 ^c ± 0.14	10.64 ^b ± 0.09
30 นาที	26.99 ^b ± 0.22	3.01 ± 0.04	5.56 ^b ± 0.12	8.60 ^{bc} ± 0.33	9.25 ^c ± 0.04	10.99 ^a ± 0.01
60 นาที	24.50 ^c ± 0.02	3.19 ± 0.21	6.19 ^a ± 0.19	9.34 ^{ab} ± 0.55	9.57 ^b ± 0.11	11.19 ^a ± 0.24
> 60 นาที	20.49 ^d ± 0.07	3.21 ± 0.13	6.35 ^a ± 0.35	9.39 ^a ± 0.32	9.80 ^a ± 0.06	11.23 ^a ± 0.00

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสตมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในสตมภ์เดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.12 การละลายที่อุณหภูมิ 70 °C ถึง 95 °C ของสตาร์ทแก้วมะเยะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชที่	ขนาดเฉลี่ย (ไมครอน)	การละลาย (%)					
		70 °C	75 °C	80 °C	85 °C	90 °C	95 °C
ตกตะกอนที่เวลา							
สตาร์ชที่ยังไม่ได้อ่าน	27.32 ± 0.01	1.29 ± 0.52	2.83 ± 0.33	7.84 ± 1.08	9.15 ± 0.19	11.86 ± 0.16	10.84 ± 1.20
ผ่านการแยกขนาด							
15 นาที	28.13 ^a ± 0.09	2.66 ^a ± 0.11	5.15 ^a ± 0.33	9.70 ^a ± 0.06	11.12 ^a ± 0.15	11.52 ^a ± 0.18	12.28 ^a ± 0.02
30 นาที	26.99 ^b ± 0.22	1.64 ^b ± 0.44	4.06 ^b ± 0.60	9.08 ^b ± 0.01	10.29 ^b ± 0.20	11.34 ^{ab} ± 0.07	10.95 ^b ± 0.01
60 นาที	24.50 ^c ± 0.02	1.25 ^b ± 0.03	2.38 ^c ± 0.20	8.80 ^c ± 0.14	10.22 ^b ± 0.43	11.21 ^b ± 0.07	10.79 ^b ± 0.46
> 60 นาที	20.49 ^d ± 0.07	1.23 ^b ± 0.02	1.58 ^d ± 0.04	7.21 ^d ± 0.06	9.79 ^b ± 0.60	11.17 ^b ± 0.16	9.75 ^c ± 0.49

หมายเหตุ: a-d หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในเสตมภ์เดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)



4.2.9 จลนศาสตร์การขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการวิเคราะห์จลนศาสตร์การขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว (ตารางที่ 4.13) พบว่า อัตราการขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น แต่สตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที 60 นาที และมากกว่า 60 นาที นั้น อุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นไม่ได้มีผลต่ออัตราการขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชอย่างชัดเจน ซึ่งสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาติโนเซชันมากที่สุด แสดงถึงอุณหภูมิจึงมีผลต่ออัตราการขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชค่อนข้างมาก นั่นคือการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจึงเล็กน้อยจะทำให้อัตราการขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชเพิ่มขึ้นอย่างมากนั่นเอง ส่วนสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา 30 นาที และ 60 นาที มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาติโนเซชันค่อนข้างต่ำ แสดงถึงอัตราการขยายขนาดของเมล็ดสตาร์ชอาจไม่มีการเปลี่ยนแปลงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยมากถึงแม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิก็ตาม และจากผลการทดลองที่พบว่าสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ตกตะกอนที่เวลา 15 นาที มีค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาติโนเซชันมากที่สุดนั้น อาจเนื่องมาจากเมล็ดสตาร์ชมีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบที่สูงกว่าเมล็ดสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลาอื่น ๆ ดังนั้นจึงต้องใช้พลังงานจำนวนมากกว่าในการเกิดเจลลาติโนเซชัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Freitas และคณะ (2004) ที่ได้ศึกษาจลนศาสตร์การเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชมันเสา (*Dioscorea alata*) และสตาร์ชมันสำปะหลัง พบว่าสตาร์ชมันเสามีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง ทำให้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของการเกิดเจลลาติโนเซชันของสตาร์ชมันเสามีค่าสูงกว่าสตาร์ชมันสำปะหลัง

ตารางที่ 4.13 อัตราการขยายขนาดของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่อุณหภูมิต่าง ๆ และค่า E_a

ตัวอย่างสตาร์ชที่ ตกตะกอนที่เวลา	อุณหภูมิ (°C)	อัตราการขยายขนาดของเม็ดสตาร์ช		E_a (kJ mole ⁻¹)
		(K_p) (min ⁻¹)	R^2	
15 นาที	69	0.0023 ± 0.0000	0.9416 – 0.9445	162.89 ± 1.80
	74	0.0037 ± 0.0001	0.9637 – 0.9810	
	79	0.0117 ± 0.0002	0.9163 – 0.9421	
30 นาที	69	0.0023 ± 0.0001	0.9848 – 0.9898	9.96 ± 4.50
	74	0.0033 ± 0.0001	0.9423 – 0.9887	
	79	0.0024 ± 0.0003	0.7238 – 0.9386	
60 นาที	69	0.0007 ± 0.0000	0.8877 – 0.8966	21.23 ± 12.04
	74	0.0004 ± 0.0000	0.9237 – 0.9285	
	79	0.0008 ± 0.0002	0.6162 – 0.9490	
มากกว่า 60 นาที	69	0.0044 ± 0.0000	0.8583 – 0.9062	-
	74	-0.0102 ± 0.0006	0.7881 – 0.8308	
	79	-0.0265 ± 0.0012	0.7146 – 0.7700	

หมายเหตุ: - หมายถึง ไม่สามารถหาค่าได้

4.2.9 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีขนาดต่างกันจะมีค่า peak viscosity, trough, final viscosity, setback และ pasting temperature แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.14 แต่มีค่า breakdown และ peak time แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยจะเห็นได้ว่าค่า pasting temperature หรืออุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดจะมีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง แสดงให้เห็นถึงเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ความหนืดเพิ่มมากขึ้นเพราะโมเลกุลแอมิโลสละลายออกมาจากเม็ดสตาร์ชที่เกิดการพองตัว (Ghiasi, Varriano-Marston และ Hoseneý, 1982) ซึ่งเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบมากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก อาจทำให้โมเลกุลแอมิโลสละลายออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ชได้มากกว่า จึงทำให้ความหนืดของระบบเพิ่มขึ้นมากกว่าด้วย นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่เมื่อได้รับความร้อนจะ

ดูหนาและเกิดการขยายขนาดเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดการเบียดเสียดกับเม็ดสตาร์ชข้างเคียงได้มากกว่า เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ทำให้ความหนืดของเพสต์เพิ่มขึ้นสูงมากกว่า ดังนั้นจึงเริ่มเห็นการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้เร็วกว่านั่นเอง ซึ่งเหตุผลดังกล่าวข้างต้นนี้จึงส่งผลให้เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีค่า peak viscosity หรือค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก และการที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีค่า peak viscosity ต่ำที่สุดนั้น อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กมีเอมิโลสในปริมาณที่ต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ การที่มีปริมาณเอมิโลสต่ำจะส่งผลให้โครงสร้างของสตาร์ชง่ายต่อการแตกออกเมื่อได้รับความร้อน (Hermansson และ Svegmak, 1996) ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Noda และคณะ (2005) ที่พบว่าค่า peak viscosity ของสตาร์ชมันฝรั่งที่ผ่านการแยกขนาดออกเป็น 3 ขนาด มีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง และเมื่อพิจารณาค่า setback พบว่า ค่า setback มีแนวโน้มสูงขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น แสดงว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่จะสามารถเกิดรีโทรเกรเดชันได้มากกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ซึ่งการเกิดรีโทรเกรเดชันจะเกิดเมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลในไซซัน และเมื่อให้ความร้อนต่อไปอีกก็จะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มมากขึ้น จนกระทั่งพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของเอมิโลสขนาดเล็กจะหลุดออกมา ทำให้ความหนืดลดลง เมื่อลดอุณหภูมิให้สตาร์ชเย็นตัวลง โมเลกุลของเอมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดร่างแหสามมิติ มีความหนืดและความคงตัวมากขึ้น ทำให้เกิดลักษณะเป็นเจล (กล้าณรงค์ ศิริรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2550) ดังนั้นจากการทดลองที่พบว่า เม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่เกิดรีโทรเกรเดชันได้ดีกว่านั้น อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่มีปริมาณเอมิโลสมากกว่า เมื่อเม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวและแตกออก ก็จะมีปริมาณเอมิโลสหลุดออกมาได้มากกว่า จึงเกิดเจลได้ดีกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กที่มีปริมาณเอมิโลสต่ำกว่า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Collado และ Corke (1997) ที่พบว่าเอมิโลสในปริมาณที่สูงจะทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า setback มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ส่วนค่า trough และ final viscosity มีค่าเพิ่มมากขึ้นตามขนาดของเม็ดสตาร์ชที่ใหญ่ขึ้น

ตารางที่ 4.14 สมบัติด้านการเกิดเพสต์ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่ระดับความเข้มข้น 12% (w/w)

ค่าที่ได้จาก เครื่อง RVA	ตัวอย่างสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา			
	15 นาที	30 นาที	60 นาที	> 60 นาที
Peak viscosity (cP)	4,147.50 ^a ± 17.68	4,072.50 ^b ± 14.85	4,154.00 ^a ± 4.24	3,322.00 ^c ± 31.11
Trough (cP)	3,150.50 ^a ± 38.89	3,096.50 ^a ± 28.99	3,094.00 ^a ± 7.07	2,290.00 ^b ± 4.24
Breakdown (cP) ^{ns}	997.00 ± 56.57	976.00 ± 43.84	1,060.00 ± 11.31	1,032.00 ± 35.36
Final viscosity (cP)	6,184.00 ^a ± 63.64	6,084.00 ^{ab} ± 19.80	6,003.50 ^b ± 38.89	4,186.50 ^c ± 43.13
Setback (cP)	3,033.50 ^a ± 24.75	2,987.50 ^{ab} ± 48.79	2,909.50 ^b ± 45.96	1,896.50 ^c ± 47.38
Pasting temperature (°C)	80.80 ^b ± 0.00	81.70 ^a ± 0.00	81.66 ^a ± 0.04	82.06 ^a ± 0.53
Peak time (minute) ^{ns}	4.73 ± 0.00	4.73 ± 0.00	4.77 ± 0.05	4.77 ± 0.05

หมายเหตุ: a-c หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2.10 สมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

สตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีขนาดต่างกันจะมีค่า conclusion temperature (T_c), enthalpy of gelatinization (ΔH) และช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินในเซชัน (ΔT) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.15 แต่มีค่า onset temperature (T_o) และ peak temperature (T_p) แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยพบว่าค่า enthalpy of gelatinization หรือพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลิตินในเซชันจะมีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง ทั้งนี้เนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่มีปริมาณแอมิโลสเป็นองค์ประกอบที่สูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก ทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากกว่า จึงต้องใช้พลังงานสูงขึ้นในการทำให้เกิดเจล ส่งผลให้ค่า enthalpy of gelatinization มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย Sasaki และคณะ (2000) ได้อธิบายว่าค่า ΔH อาจมีความสัมพันธ์กับปริมาณของส่วนผลึกของแอมิโลเพกตินด้วย เนื่องจาก ΔH คือพลังงานที่ใช้ในการหลอมโครงสร้างผลึกในการเกิดเจล ซึ่งพลังงานที่ใช้ในการหลอมโครงสร้างผลึกส่วนที่เป็นแอมิโลเพกตินสูงกว่าแอมิโลส ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่อาจมีแอมิโลเพกตินสูงกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็ก นอกจากนี้อาจเนื่องมาจากปัจจัยด้านอื่น ๆ ได้อีก เช่น การกระจายตัวของความยาวสายโซ่แอมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวของแอมิโลสและแอมิโลเพกติน ขนาดของเม็ดสตาร์ช เป็นต้น ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Tang และคณะ (2001) ที่ได้แยกขนาด waxy barley

starch ออกเป็นขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดเล็ก พบว่า ค่า enthalpy of gelatinization มีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับผลการทดลองของ Singh และ Kaur (2004) ที่ได้แยกขนาดสตาร์ชมันฝรั่งออกเป็น 3 ขนาด พบว่าค่า enthalpy of gelatinization มีค่าลดลงตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลงเช่นกัน และเมื่อพิจารณาช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน พบว่า ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กจะมีช่วงกว้างกว่าเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดใหญ่ อาจเนื่องมาจากเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กอาจมีส่วนของโครงสร้างผลึกในเม็ดสตาร์ชที่มีความเสถียรแตกต่างกันค่อนข้างมาก ทำให้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันมีช่วงที่ค่อนข้างกว้าง (Hoover, Li และ Senanayake, 1997) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tang และคณะ (2001) ที่ได้แยกขนาดของ normal barley starch จากประเทศญี่ปุ่นออกเป็น 3 ขนาด แล้วพบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันจะมีช่วงกว้างขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง เช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Tang, Mitsunaga และ Kawamura (2004) ที่ได้แยกขนาดของ waxy และ normal barley starch จากประเทศญี่ปุ่นออกเป็น 3 ขนาด แล้วพบว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันจะมีช่วงกว้างขึ้นตามขนาดเม็ดสตาร์ชที่เล็กลง

ตารางที่ 4.15 สมบัติด้านความร้อนของสารละลายสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้วที่มีอัตราส่วนของสตาร์ช:น้ำ เท่ากับ 1:2.3 ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

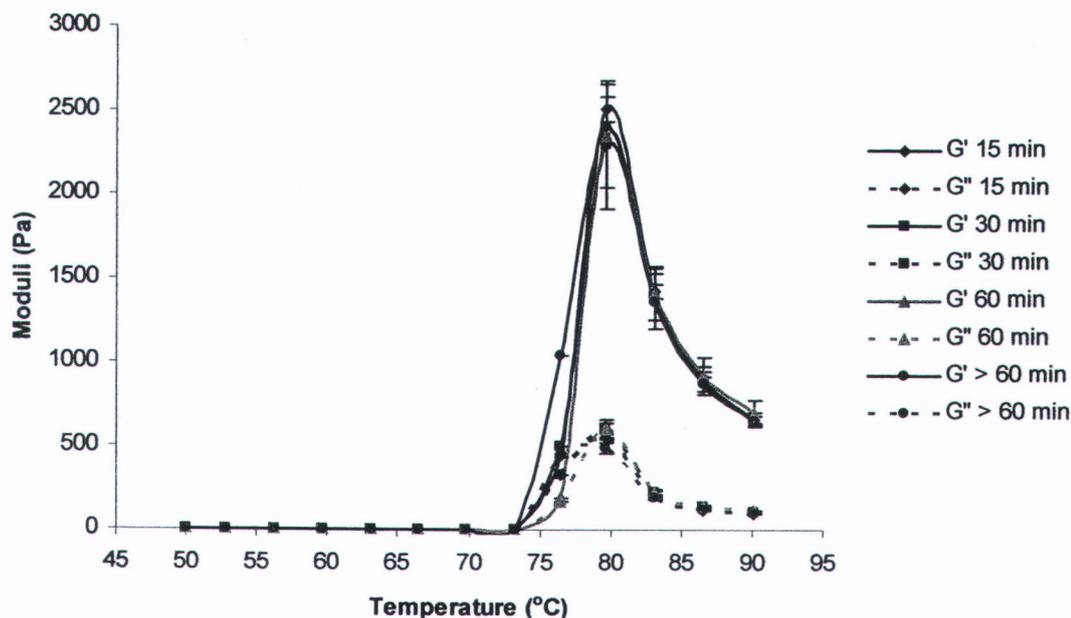
ค่าที่ได้จาก เครื่อง DSC	ตัวอย่างสตาร์ชที่ตกตะกอนที่เวลา			
	15 นาที	30 นาที	60 นาที	> 60 นาที
T_o (°C) ^{ns}	71.20 ± 0.14	71.45 ± 0.07	71.10 ± 0.42	70.35 ± 0.49
T_p (°C) ^{ns}	77.30 ± 0.00	77.45 ± 0.07	77.05 ± 0.49	77.75 ± 0.21
T_c (°C)	83.05 ^b ± 0.07	83.30 ^b ± 0.14	83.10 ^b ± 0.00	84.30 ^a ± 0.42
ΔH (J/g)	14.41 ^a ± 0.78	14.44 ^a ± 0.18	13.90 ^a ± 0.05	11.75 ^b ± 0.32
ΔT (°C)	11.85 ^a ± 0.21	11.85 ^a ± 0.07	12.00 ^a ± 0.42	13.95 ^b ± 0.92

หมายเหตุ: a-b หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันกันที่มีตัวอักษรกำกับต่างกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns หมายถึง ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่อยู่ในแถวเดียวกันที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

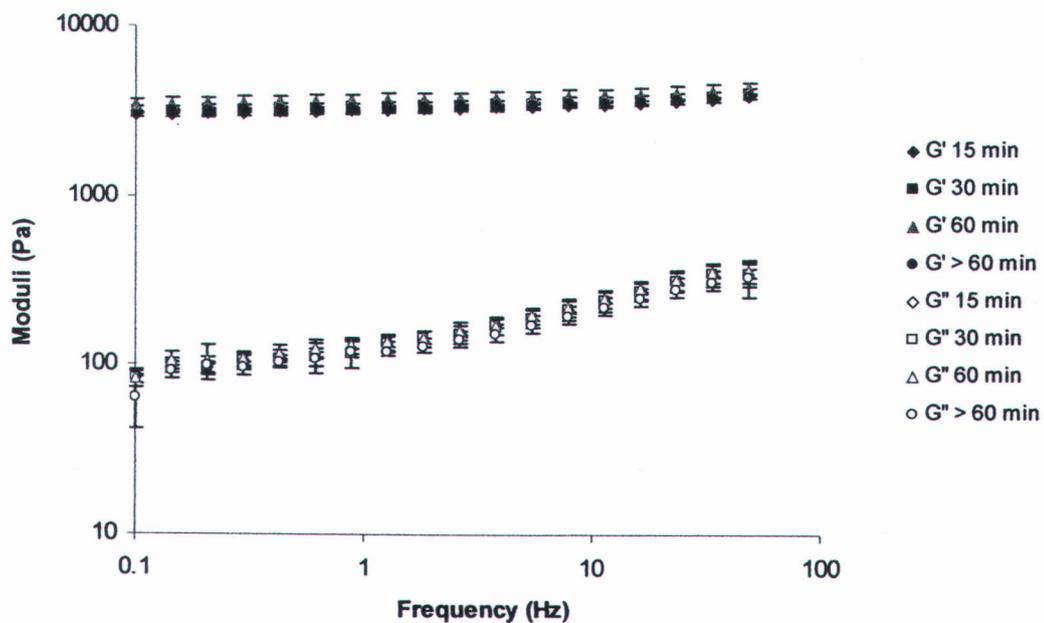
4.2.11 สมบัติทางการไหลของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่ผ่านการแยกขนาดแล้ว

จากการทดสอบ temperature sweep test ของสตาร์ชถั่วมะแฮะที่มีขนาดต่างกัน (รูปที่ 4.11) พบว่า รูปแบบกราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยสตาร์ชทั้ง 4 ขนาด มีอุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลาติไนเซชันเท่ากับ 73.2°C ค่า G' และ G'' มีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิเท่ากับ 79.7°C



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับอุณหภูมิของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 4 ขนาด ที่ความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, ความถี่ 1 Hz และใช้อุณหภูมิในการทดสอบตั้งแต่ 50°C ถึง 90°C

จากนั้นนำตัวอย่างเจลสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด ที่ผ่านการทดสอบ temperature sweep test แล้ว มาทดสอบ frequency sweep test ต่อ (รูปที่ 4.12) ซึ่งพบว่า รูปแบบกราฟที่ได้มีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด มีค่า G' มากกว่าค่า G'' ที่ทุกความถี่ของการทดลอง ซึ่งแสดงถึงลักษณะของความเป็นของแข็งมากกว่าลักษณะของเหลวของตัวอย่าง จากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นได้ว่าการทดสอบสมบัติทางการไหลด้วยเครื่อง rheometer ไม่สามารถแยกความแตกต่างของสตาร์ชถั่วมะแฮะทั้ง 4 ขนาด ได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลแอมิโลสที่ละลายออกมาในเฟสต่อเนื่องอาจมีปริมาณไม่แตกต่างกันมากพอที่จะส่งผลให้สมบัติทางการไหลแตกต่างกันเมื่อทดสอบด้วยวิธีดังกล่าว



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า moduli กับความถี่ของสตาร์ชถั่วมะแฮะ 4 ขนาด ที่ความเข้มข้น 12% (w/w) ทดสอบโดยกำหนด stress เท่ากับ 40 Pa, อุณหภูมิ 25 °C และใช้ความถี่ในการทดสอบตั้งแต่ 0.1 Hz ถึง 100 Hz