บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังทางการค้า

แป้งมันสำปะหลังทางการค้า ได้จาก บริษัทสงวนวงษ์อุตสาหกรรมจำกัด อ.เมือง จ.นครราชสีมา ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีตามวิธีของ AOAC (1990) พบว่ามีปริมาณโปรตีน (Protein Content;%); 0.12%, ปริมาณไขมัน (Fat Content;%); 0.02%, ปริมาณเส้นใย (Fiber Content;%); 0.12%, ปริมาณเถ้า (Ash Content;%); 0.25 และปริมาณความชื้น (Moisture Content; %); 11.24%

4.2 ผลของร้อยละของหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่และร้อยละของประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต

ร้อยละของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิล ระดับการแทนที่ และประสิทธิภาพของการทำปฏิกิริยาของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตแสดงได้ในตารางที่ 3 พบว่าปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดที่ใส่ลงไปมีค่าระหว่าง 0.007 - 0.028 โมลต่อโมลแอนไฮโดรกลูโคส โดยร้อยละของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลจะอยู่ในช่วง 0.75 – 1.99 ระดับการแทนที่จะอยู่ในช่วง 0.005 – 0.015 ส่วนประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาอยู่ที่ร้อยละ 68.86-76.74 และพบว่าปริมาณหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลและระดับการแทนที่ (DS) จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดที่เติมลงไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ซึ่งได้สมการ y = 0.7143x - 0.0003 โดยมีค่า regression coefficient (r^2) เท่ากับ 0.986 (ภาพที่ 8) สอดคล้องกับงานวิจัยของนพภาภรณ์ (2550) ที่กล่าวว่าเมื่อเพิ่มปริมาณออกเทนนิลซัคซิเนตจะทำให้เพิ่มอัตราการซึมผ่านของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลเข้าไปในโมเลกุลของแป้งทำให้ระดับการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลมีค่าสูงขึ้น

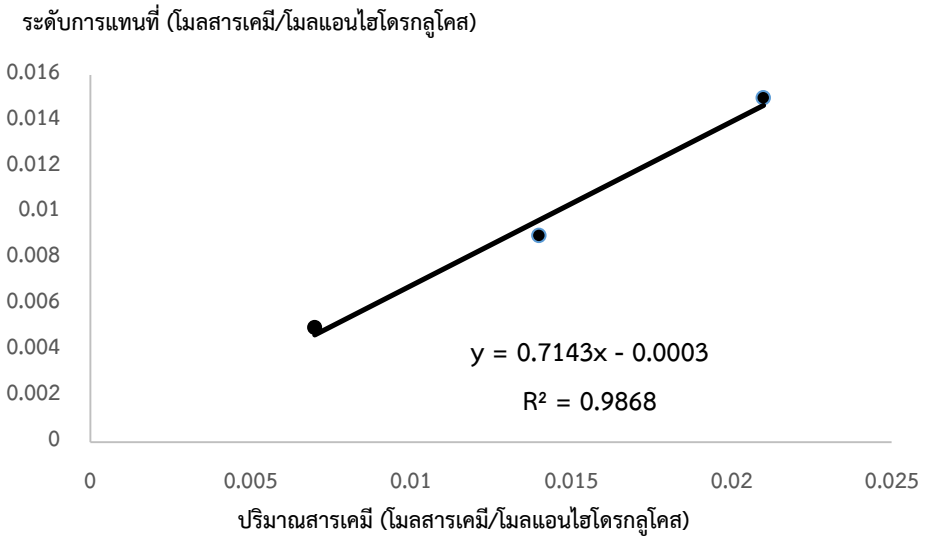
ค่าระดับการแทนที่จากการทดลองมีความใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Song *et al*. (2006) ที่ทำการดัดแปรแป้งข้าวเจ้าด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดร้อยละ 3 (ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.5 ความเข้มข้นของแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 35 โดยน้ำหนัก และเวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมงพบว่าได้ระดับการแทนที่ประมาณ 0.018 แป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ด ใช้ปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ

3 (ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) นี้จัดเป็นแป้งที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (ระดับแทนที (DS) น้อยกว่า 0.02) ซึ่งเป็นแป้งที่อนุญาตให้นำไปใช้ในอาหารได้ตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2535) และตามมาตรฐานขององค์การอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (Trubiano, 1986)

ตารางที่ 3 ร้อยละหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่ และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้ง ออกเทนนิลซัคซิเนต

ชนิดของแป้ง	ปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดที่ทำปฏิกิริยา (ร้อยละต่อน้ำหนักแป้งแห้ง)	ปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ด (mol reagent/mol AGU)	หมู่ออกเทนนิลซัคซินิล (ร้อยละ)	ระดับการแทนที่ (DS)	ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา (ร้อยละ)
แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต	1	0.007	0.75±0.01^{c}	0.005±0.0001^{c}	76.74±1.40^{a}
	2	0.014	1.37±0.00^{b}	0.010±0.0005^{b}	70.49±0.00^{b}
	3	0.021	1.99±0.05^{a}	0.015±0.0004^{a}	68.86±1.95^{b}

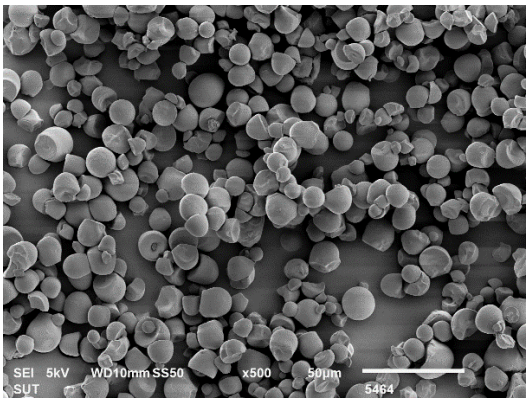
ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)



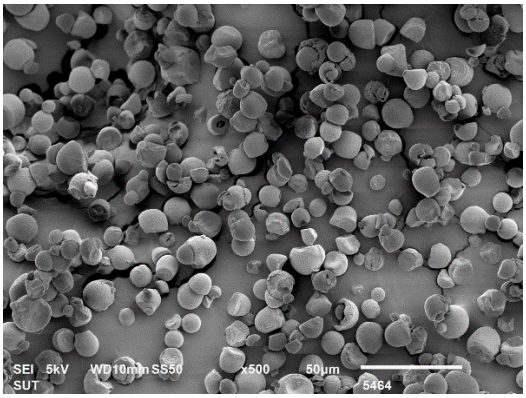
ภาพที่ 8 ผลของปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปรแป้งต่อปริมาณหมู่แทนที่ของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต

4.3 ผลของลักษณะรูปร่างอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต

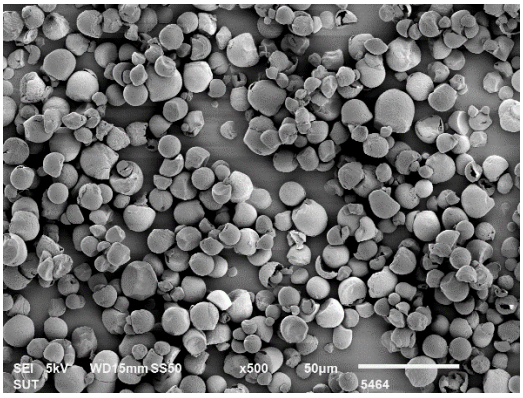
ตรวจสอบลักษณะเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5 กิโลโวลท์ และใช้กำลังขยายที่ 500, 1,000 และ 3,000 เท่า ผลการทดลองพบว่าแป้งมันสำปะหลังนั้นมีลักษณะพื้นผิวเรียบ เป็นรูปไข่ที่ปลายด้านหนึ่งถูกตัดออกและผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าด้านใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอกัน ดังแสดงให้เห็นรอยบุ๋มอย่างชัดเจน (eccentric helium) เมื่อทำการส่องดูเม็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปรที่ค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.005, 0.010 และ 0.015 ดังภาพที่ 9,10 และ 11(b-d) นั้น เห็นว่าพื้นผิวเม็ดแป้งจะขรุขระและเกิดรูเล็กๆเพิ่มขึ้นและเพิ่มมากขึ้นเมื่อระดับการแทนที่สูงขึ้นซึ่งแตกต่างจากพื้นผิวของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง (ภาพที่ 9,10 และ 11(a)) ทั้งนี้อาจเนื่องจากแป้งที่ผ่านการดัดแปรนั้นเกิดการกัดกร่อนของสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่ผิวของเม็ดแป้ง (Napaporn and Saiyavit, 2003; Segura and Sira, 2003) ซึ่งสารเคมีส่วนใหญ่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งในส่วนอสันฐาน ซึ่งอาจเป็นส่วนปลายสายของหมู่ออคเทนิลซัคซิเนตที่เกาะกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Song *et al*., 2006)



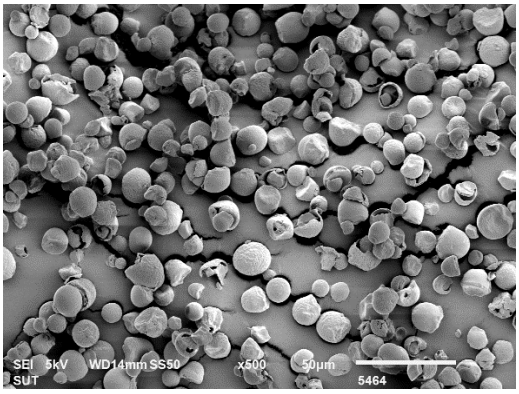
(a)



(b)

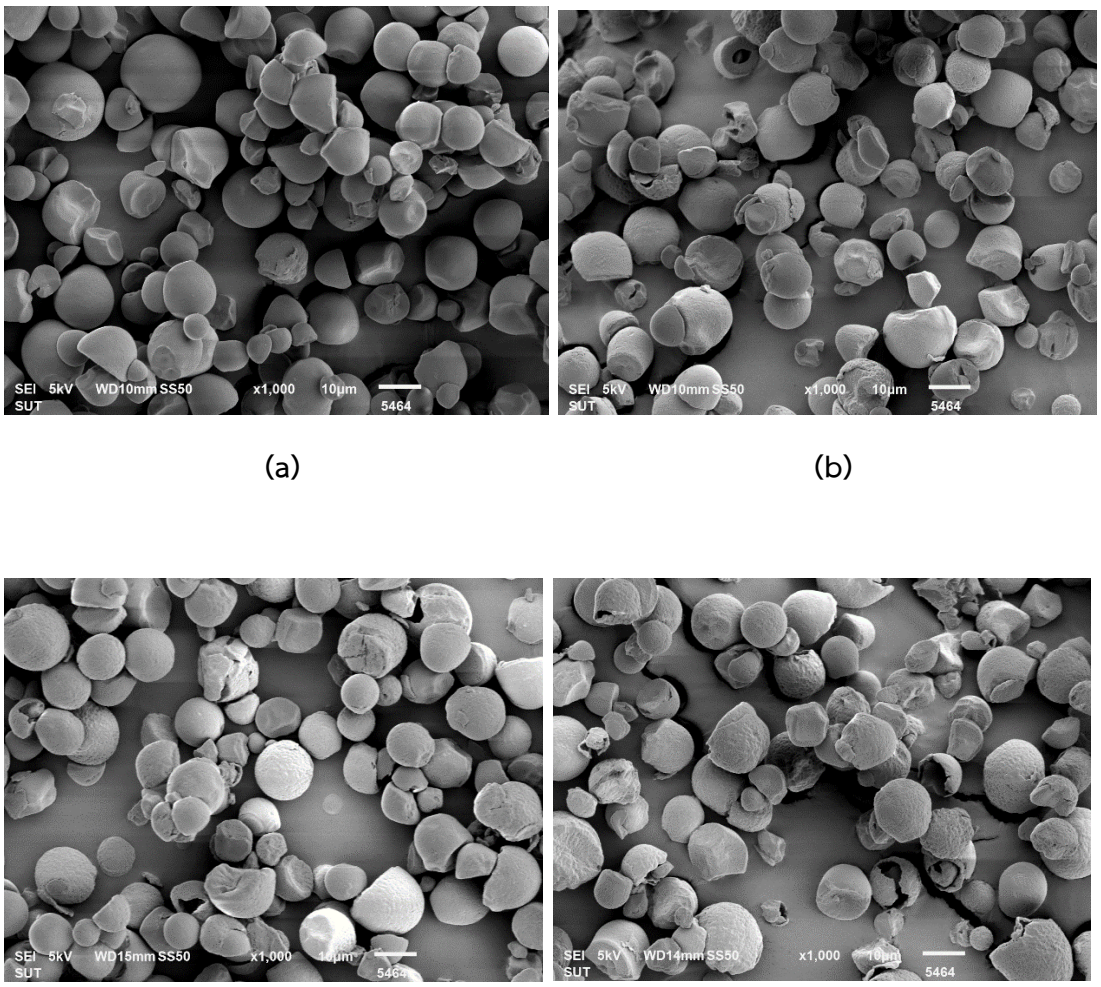


(c)



(d)

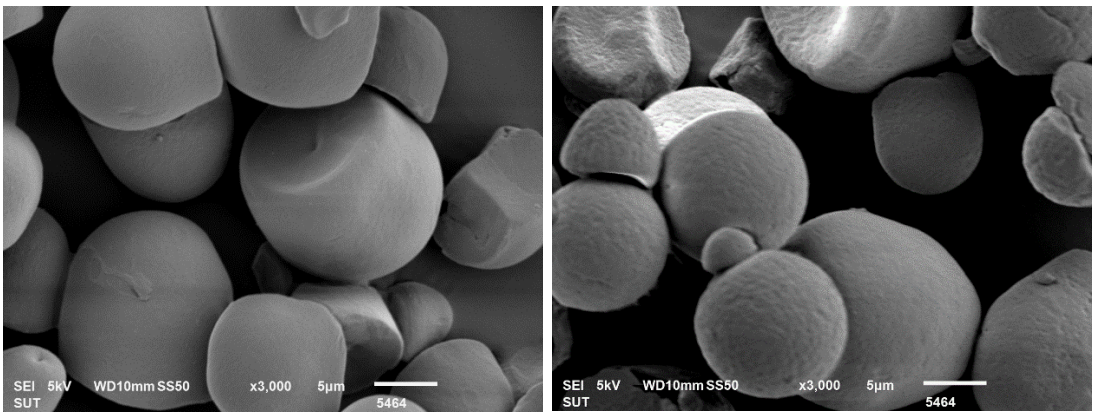
ภาพที่ 9 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต ระดับการแทนที่ 0.005 (c) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.010 (d) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.015



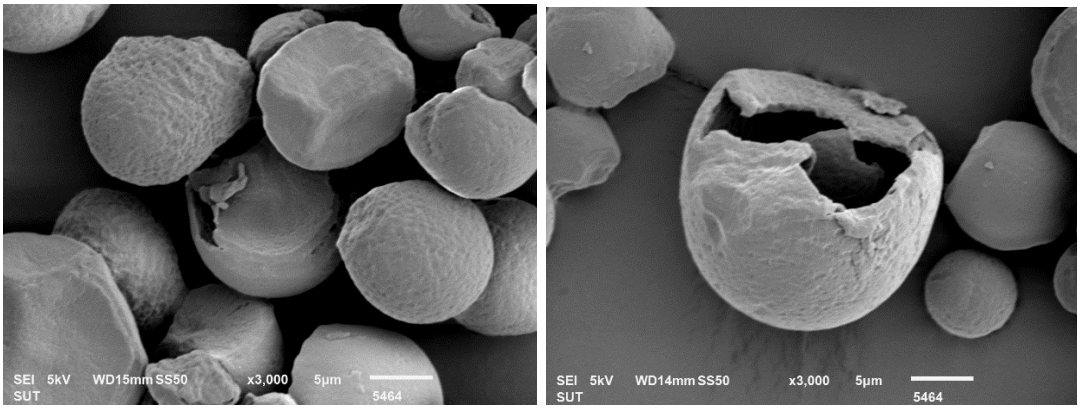
(a) (b)

(c) (d)

ภาพที่ 10 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต ระดับการแทนที่ 0.005 (c) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.010 (d) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.015



(a) (b)

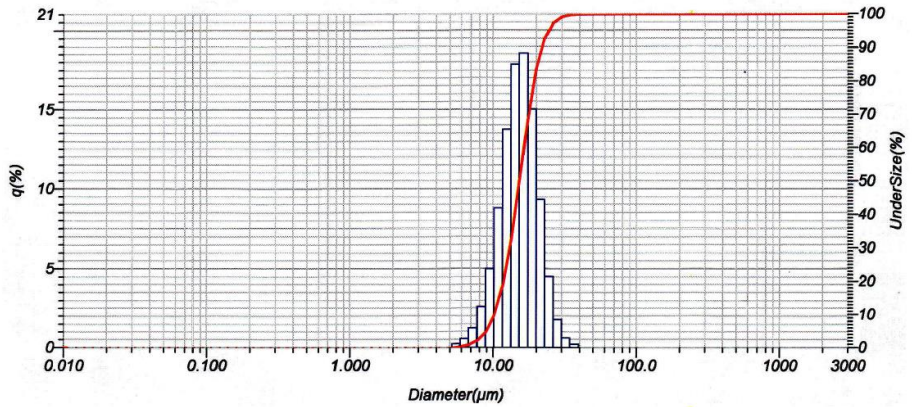


(c) (d)

ภาพที่ 11 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต ระดับการแทนที่ 0.005 (c) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.010 (d) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.015

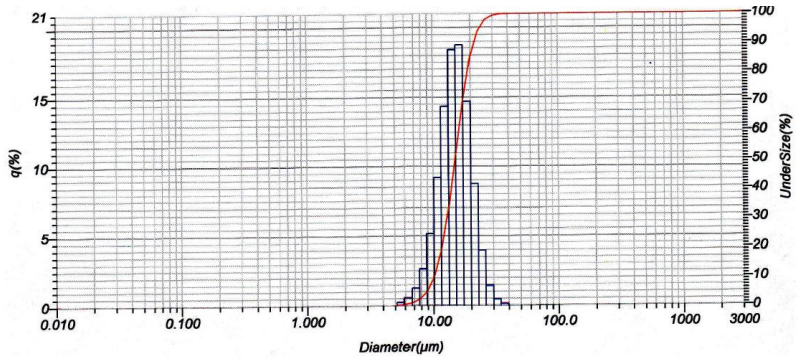
4.4 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต

ตรวจสอบขนาดของเม็ดแป้งที่ได้ด้วยเลเซอร์เพื่อนำไปคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 0.005, 0.010 และ 0.015 ด้วยเครื่อง Laser diffraction Particle size analyzer เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดการกระจายตัวของอนุภาคแป้งมันสำปะหลัง ผลการทดลองแสดงได้ในภาพที่ 12 พบว่าขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเฉลี่ยที่ระดับการแทนที่ต่างๆไม่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังคือเท่ากับ 15.17, 14.96, 14.80 และ 14.68 ไมครอน (ภาพที่ 12 a-d) สำหรับแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.005 สำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.010 สำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.015 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังขัดแย้งกับงานวิจัยของ Timgren *et al*. (2012) ที่กล่าวว่าขนาดของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่เพิ่มระดับการแทนที่ให้มากขึ้นจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแป้งบางส่วนมีระดับของการรวมตัวสูงเนื่องจากมีการเพิ่มของหมู่ไฮโดรโฟบิกในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจเนื่องจากการดัดแปรแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตในการทดลองนี้เป็นการดัดแปรในระดับที่ค่อนข้างต่ำและระดับการแทนที่ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเฉลี่ยที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 0.005, 0.010 และ 0.015 จึงไม่มีความแตกต่างกัน

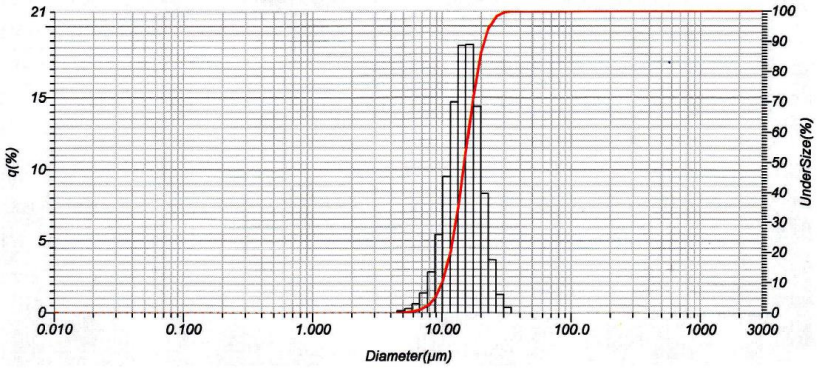


(a)

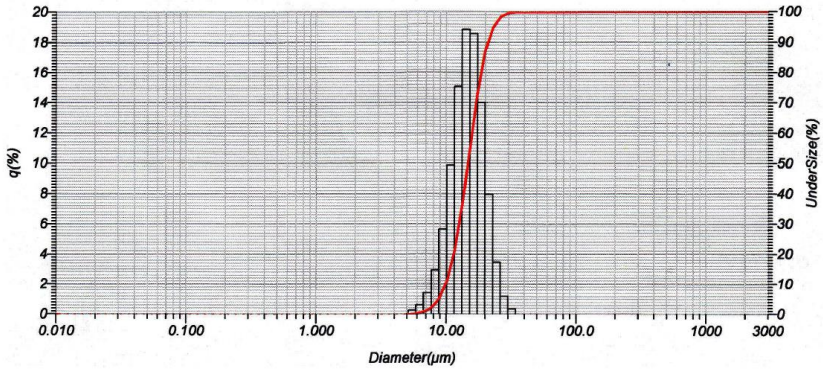
ภาพที่ 12 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ต่างๆ โดย แป้งมันสำปะหลัง (a) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.005 (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.010 (c) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.015 (d)



(b)



(c)



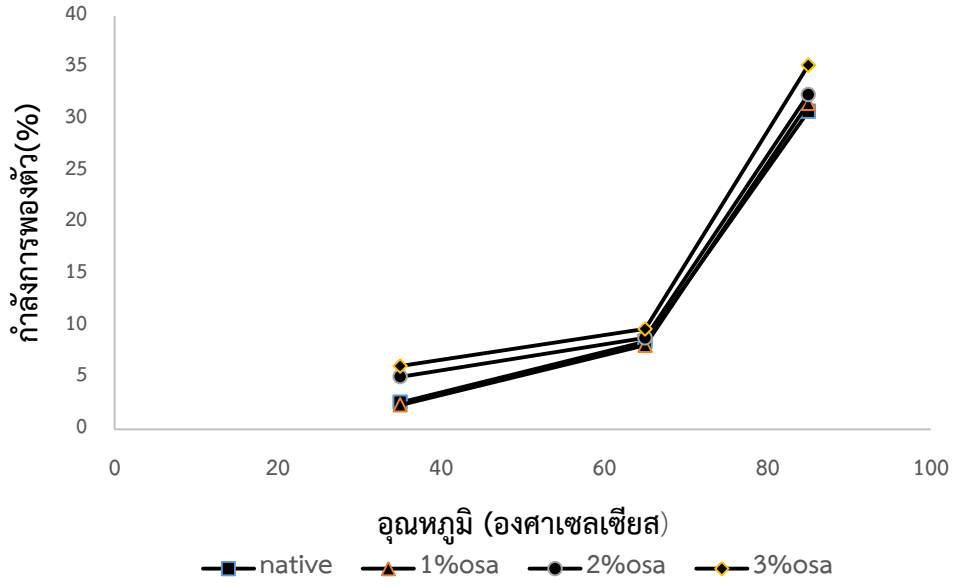
(d)

ภาพที่ 12 (ต่อ) ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ต่างๆ โดย แป้งมันสำปะหลัง (a) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.005 (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.010 (c) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตระดับการแทนที่ 0.015 (d)

4.5 สมบัติของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

4.5.1 ค่ากำลังการพองตัว

กำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 35, 55 และ 85 องศาเซลเซียส มีค่าระหว่างร้อยละ 2.60-30.77 และกำลังการพองตัวของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่พบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นทุกอุณหภูมิทดสอบ การเพิ่มขึ้นของค่ากำลังการพองตัวของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเกิดจากพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งอ่อนแอลงเนื่องจากหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลเข้าไปแทนที่ สอดคล้องกับงานวิจัยของการทำแป้งพุทธรักษาซัคซิเนต (Betancur *et al*., 2002) และแป้งข้าวโพด (Bhandari and Singhal, 2002) สาเหตุเนื่องจากส่วนอสัณฐานของโมเลกุลแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากยิ่งขึ้น และพันธะระหว่างโมเลกุลในส่วนที่เป็นผลึกคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลในส่วนที่คลายตัวจะมีการดูดซับน้ำได้มากขึ้นทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัว ซึ่งกำลังการพองตัวที่เพิ่มขึ้นของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเป็นข้อดีในการนำแป้งไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดแก่ผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 13 ร้อยละการพองตัวที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ต่างๆ

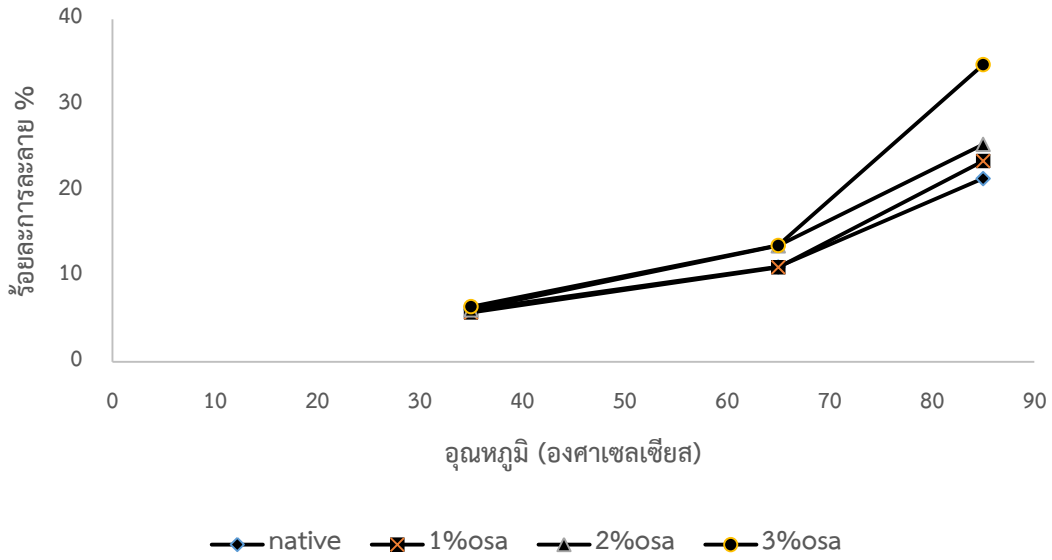
ตารางที่ 4 ร้อยละการพองตัวที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ต่างๆ

ชนิดของแป้ง	ค่ากำลังการพองตัวของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ (ร้อยละ)		
	อุณหภูมิ 35 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 85 °C
Control	2.60 ± 0.08	8.50 ± 0.27	30.77 ± 0.10
OSA 1%	2.36 ± 0.14	8.13 ± 0.12	32.39 ± 1.30
OSA 2%	5.08 ± 1.02	8.85 ± 0.20	31.55 ± 1.85
OSA 3%	6.12 ± 1.06	9.71 ± 0.11	35.72 ± 0.26

4.5.2 ค่าร้อยละการละลาย

ค่าร้อยละการละลายของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 35, 55 และ 85 องศาเซลเซียส มีค่าระหว่างร้อยละ 6.07-21.42 และร้อยละการละลายของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่พบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นทุกอุณหภูมิทดสอบ โดยเมื่อให้ความร้อนกับสารละลาย

แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและเม็ดแป้งบางส่วนจะละลายออกมา ความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กันโดยค่าการละลายจะแปรผันตรงกับกำลังการพองตัว ซึ่งเมื่อดัดแปรแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต มีการนำหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลเข้ามาในโมเลกุลแป้งทำให้ส่วนอสัณฐานของโมเลกุลแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากยิ่งขึ้น และพันธะระหว่างโมเลกุลในส่วนที่เป็นผลึกคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลในส่วนที่คลายตัวจะมีการดูดซับน้ำได้มากขึ้นทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัวทำให้แป้งพองตัวได้มากขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่ ดังนั้นค่าการละลายจึงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย



ภาพที่ 14 ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ต่างๆ

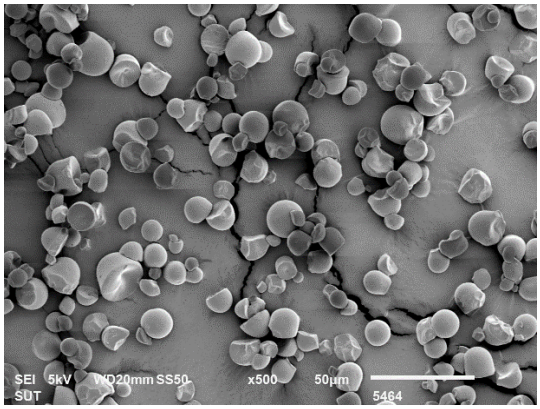
ตารางที่ 5 ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ระดับการแทนที่ต่างๆ

ชนิดของแป้ง	ค่าร้อยละการละลายของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ		
	อุณหภูมิ 35 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 85 °C
Control	6.07 ± 0.52	11.10 ± 0.26	21.42 ± 0.92
OSA 1%	5.78 ± 0.27	11.05 ± 0.13	23.4625 ± 0.38
OSA 2%	6.10 ± 0.33	13.58 ± 0.59	25.41 ± 1.85
OSA 3%	6.45 ± 0.14	13.61 ± 0.20	34.70± 0.26

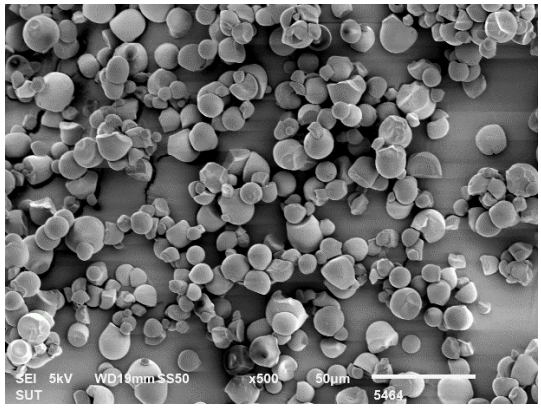
4.6 ผลของลักษณะรูปร่างอนุภาคแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

จากผลการทดลองย่อยมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและกลูโคอะมิเลส จะทำให้ผิวเม็ดแป้งมีการผุกร่อนและมีลักษณะขรุขระไปทั่วทั้งเม็ด แต่เมื่อระดับการย่อยเพิ่มมากขึ้น

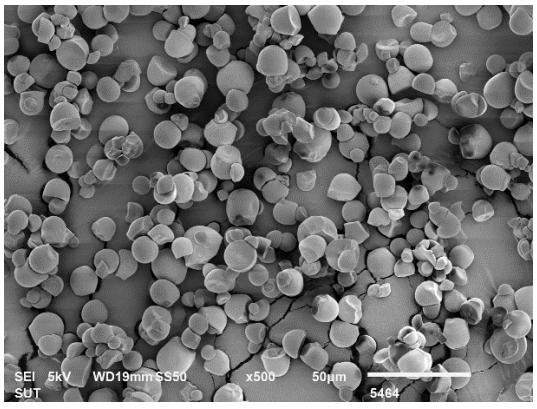
ไปถึงที่เวลาการย่อย 24 ชั่วโมง แสดงได้ในภาพที่ 15, 16 และ 17 รูปแบบการถูกย่อยของเม็ดแป้งจะเปลี่ยนแปลงไปจากการสึกกร่อนที่ผิวนอกไปเป็นการขุดลึกลงไปภายในเม็ดแป้ง เนื่องจากเอนไซม์สามารถแทรกตัวผ่านรูพรุนบนผิวเม็ด ผ่านช่องอสัณฐาน ทำให้เกิดรูที่เปิดกว้างอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อทำการย่อยด้วยเอนไซม์เป็นเวลานานจนระดับการย่อยเกิดเต็มที่ เม็ดแป้งบางเม็ดจะเกิดการสึกกร่อนภายในเม็ดแป้งเป็นบริเวณกว้างโดยเฉพาะบริเวณรอบส่วน hilum ของเม็ด เหลือไว้เพียงเปลือกนอกของเม็ดแป้งเพียงอย่างเดียวที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (ภาพที่ 15, 16 และ 17 d) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองย่อยเม็ดแป้งสาคูด้วยเอนไซม์ (Wang *et al*., 1995)



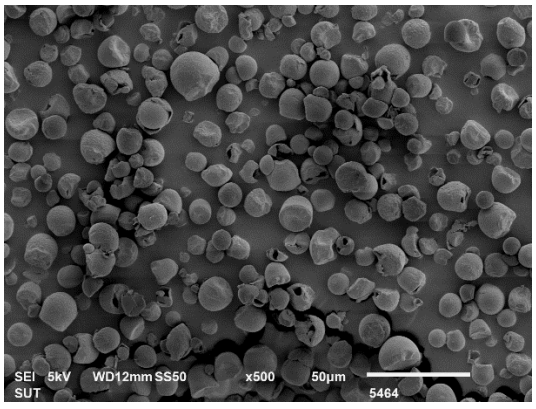
(a)



(b)

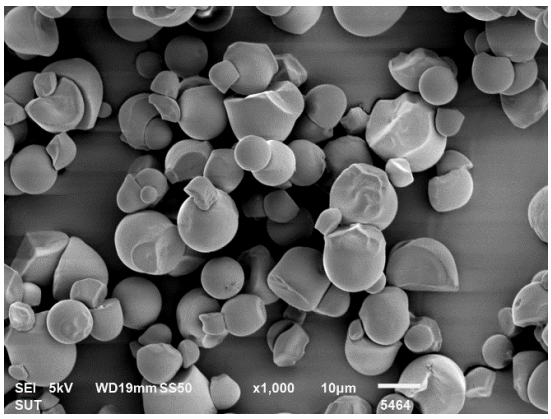


(c)

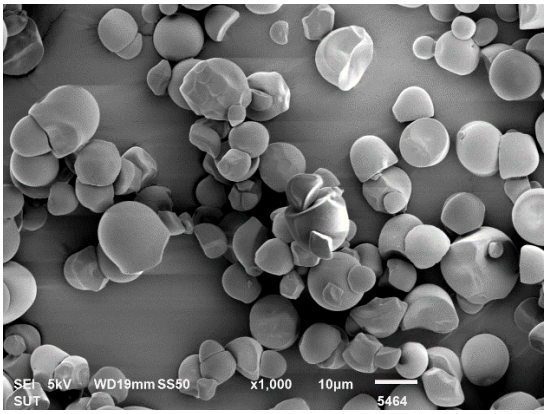


(d)

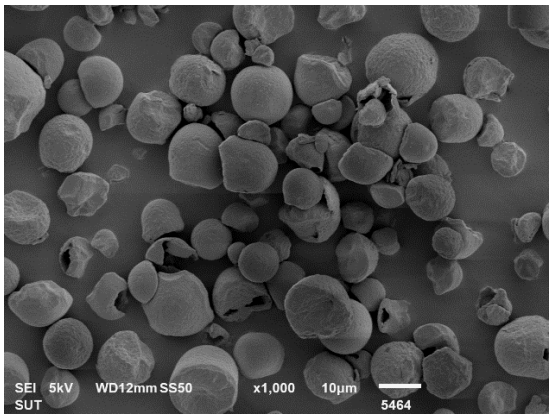
ภาพที่ 15 ลักษณะของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 500 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 6 ชั่วโมง (c) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 12 ชั่วโมง (d) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง



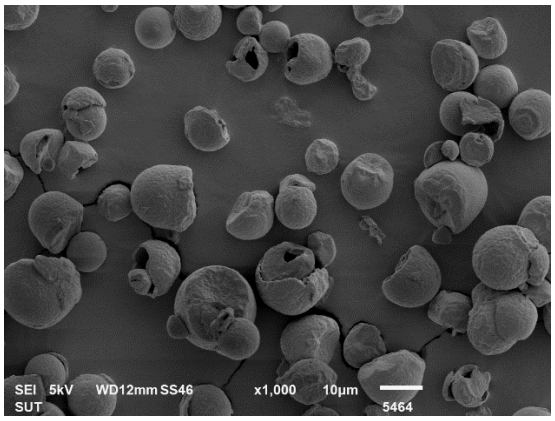
(a)



(b)

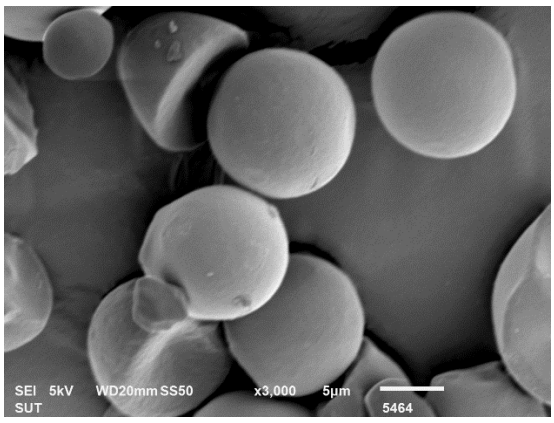


(c)

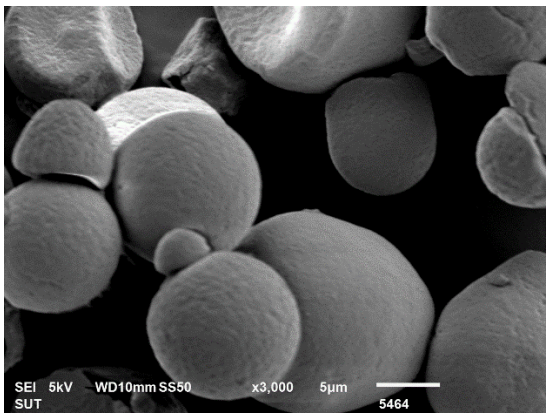


(d)

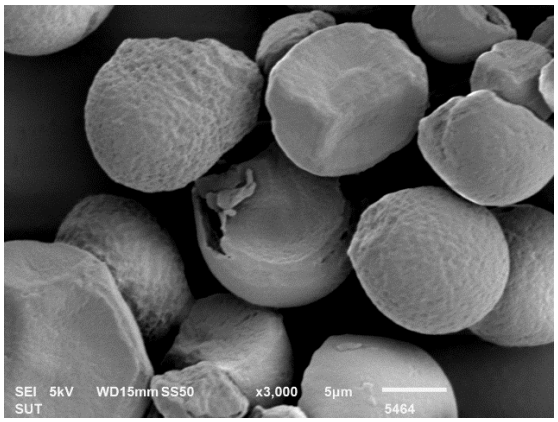
ภาพที่ 16 ลักษณะของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 6 ชั่วโมง (c) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 12 ชั่วโมง (d) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง



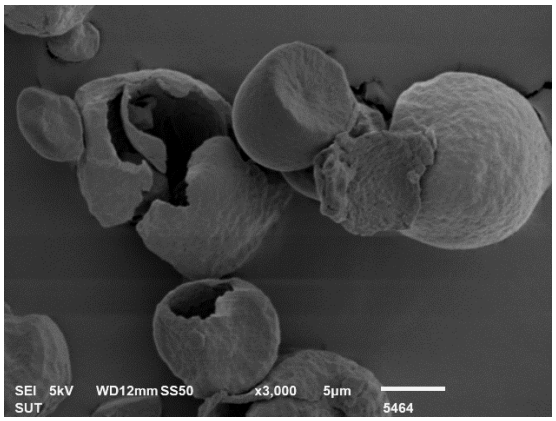
(a)



(b)



(c)

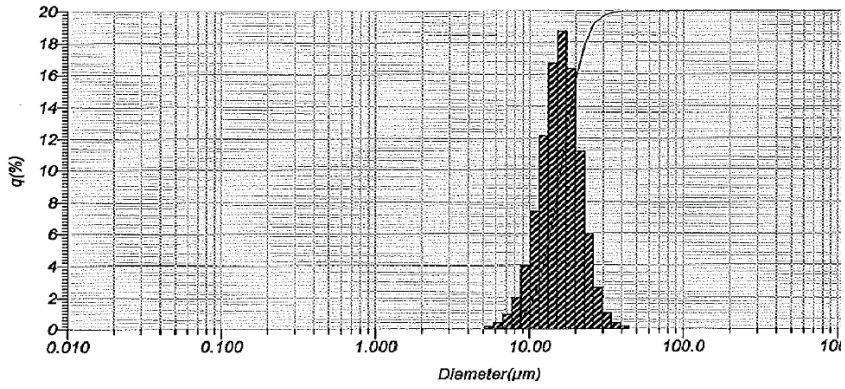


(d)

ภาพที่ 17 ลักษณะของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 6 ชั่วโมง (c) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 12 ชั่วโมง (d) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง

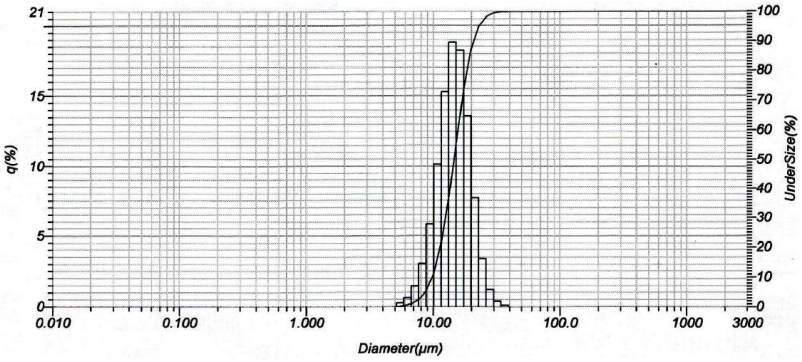
4.7 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

แป้งมันสำปะหลังดิบมีขนาดเม็ดแป้งอยู่ในช่วง 3-30 ไมครอน โดยมีร้อยละการกระจายตัวเฉลี่ยของเม็ดแป้งอยู่ที่ 12-15 ไมครอน จากการทดลองวัดขนาดการกระจายตัวของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยแตกต่างกันเปรียบเทียบกับเม็ดแป้งมันสำปะหลังผลแสดงได้ในภาพที่ 18 (a-d) พบว่าขนาดของอนุภาคแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เฉลี่ยที่เวลาการย่อยต่างๆแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังเล็กน้อยคือเท่ากับ 15.88, 14.52, 14.62 และ 14.52 ไมครอน (ภาพที่ 18 a-d) สำหรับแป้งมันสำปะหลัง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อย 6 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อย 12 ชั่วโมง และแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อย 24 ชั่วโมง ตามลำดับพบว่าเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีขนาดเล็กลงตั้งแต่ระยะแรกของการย่อย (ประมาณ 6 ชั่วโมง) และเริ่มคงที่เมื่อทำการย่อยเป็นเวลานานขึ้น สาเหตุเกิดจากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ ในระยะแรกเอนไซม์จะเข้าทำปฏิกิริยาบนผิวเม็ดแป้งก่อน พื้นที่ผิวเม็ดแป้งจะถูกย่อยออกไปเล็กน้อย มีผลทำให้ขนาดของเม็ดแป้งเล็กลงได้ตั้งแต่ระยะแรกของการย่อย หลังจากนั้นเอนไซม์จะเข้าทำปฏิกิริยาภายในเม็ดแป้ง การย่อยจะเกิดขึ้นจากส่วนกลางเม็ดออกมา เม็ดแป้งจึงยังมีขนาดใกล้เคียงเดิมเมื่อทำการย่อยนานขึ้น

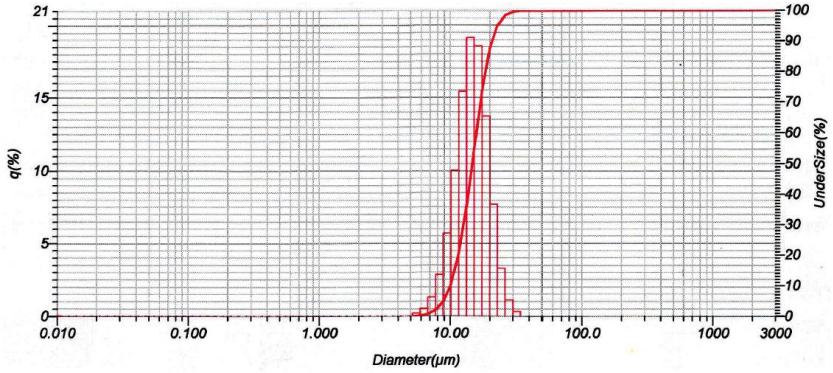


(a)

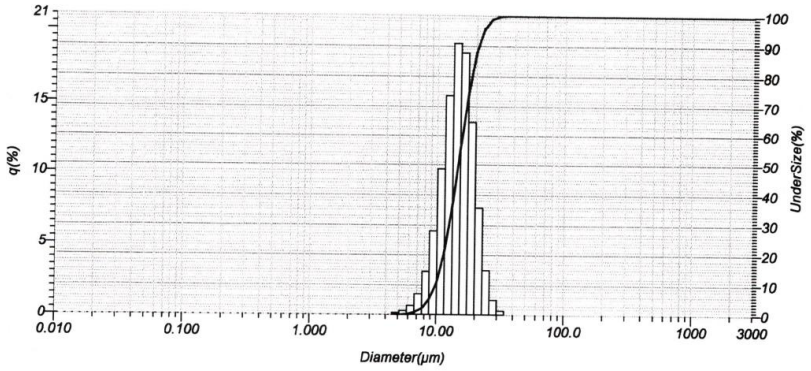
ภาพที่ 18 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยต่างๆ โดย แป้งมันสำปะหลัง (a) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 6 ชั่วโมง (b) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 12 ชั่วโมง (c) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (d)


q(%)
UnderSize(%)
Diameter(μm)
0.010
0.100
1.000
10.00
100.0
1000
3000

(b)


q(%)
UnderSize(%)
Diameter(μm)
0.010
0.100
1.000
10.00
100.0
1000
3000

(c)


q(%)
UnderSize(%)
Diameter(μm)
0.010
0.100
1.000
10.00
100.0
1000
3000

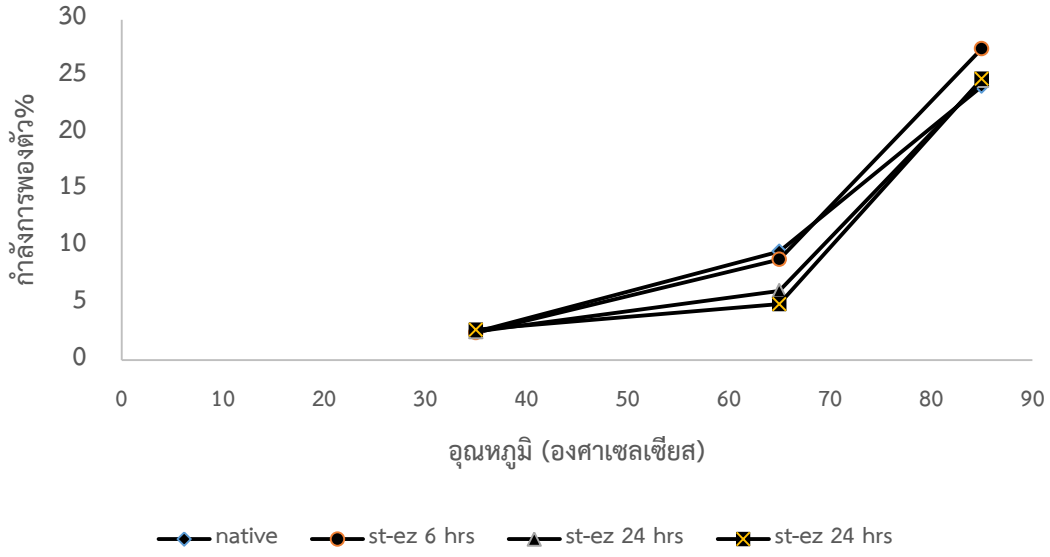
(d)

ภาพที่ 18 (ต่อ) ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยต่างๆ โดย แป้งมันสำปะหลัง (ก) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 6 ชั่วโมง (ข) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 12 ชั่วโมง (ค) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (ง)

4.8 สมบัติของเม็ดแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

4.8.1 ค่าร้อยละการพองตัวและร้อยละการละลาย

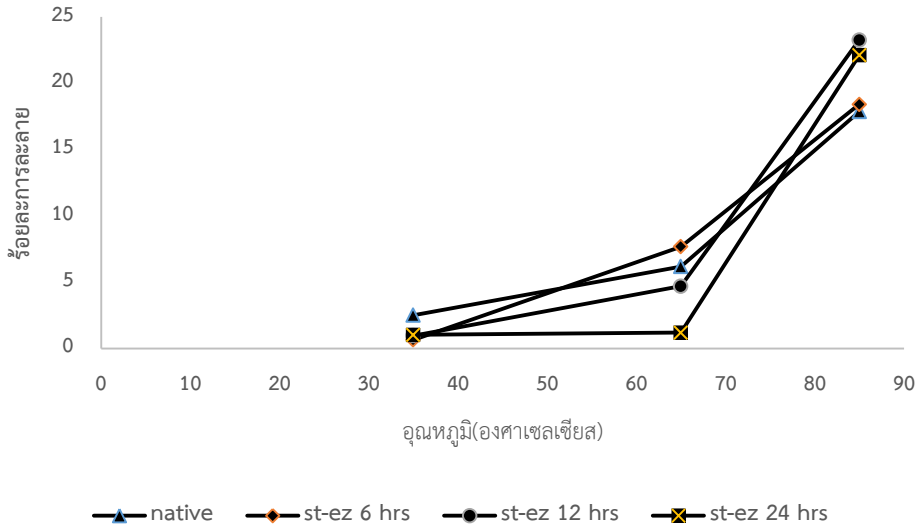
ค่าร้อยละการพองตัวและการละลายของเม็ดแป้งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งที่อุณหภูมิหนึ่งๆได้ ค่าร้อยละการพองตัวและการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยแตกต่างกันแสดงได้ในภาพที่ 19, 20 และตารางที่ 6, 7 พบว่าค่าร้อยละการพองตัวและการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ระยะเวลาต่างๆจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยแป้งมันสำปะหลังมีร้อยละการพองตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 2.48 -24.13 และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาต่างๆร้อยละการพองตัวอยู่ระหว่างร้อยละ 2.39 -24.46 ส่วนร้อยละการละลายของแป้งมันสำปะหลังมีร้อยละการละลายอยู่ระหว่างร้อยละ 2.52 -17.86 และแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาต่างๆร้อยละการละลายอยู่ระหว่างร้อยละ 0.66 -23.25



ภาพที่ 19 ร้อยละการพองตัวที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยต่างๆ

ตารางที่ 6 ร้อยละการพองตัวที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยต่างๆ

ชนิดของแป้ง	ค่าร้อยละการพองตัวของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ		
	อุณหภูมิ 35 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 85 °C
Control	2.48 ±0.002	9.57 ±0.055	24.13 ±0.033
Condition 6 hrs.	2.39 ±0.077	8.86 ±0.986	24.46 ±0.093
Condition 12 hrs.	2.50 ±0.19	6.09 ±1.029	24.65 ±1.545
Condition 24 hrs.	2.67 ±0.031	4.93 ±0.079	24.79 ±2.459



ภาพที่ 20 ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยต่างๆ

ตารางที่ 7 ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยต่างๆ

ชนิดของแป้ง	**ค่าร้อยละการละลายของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ**		
	อุณหภูมิ 35 °C	**อุณหภูมิ 65 °C**	**อุณหภูมิ 85 °C**
Control	2.52 ±0.085	6.18 ±0.103	17.86 ±0.089
Condition 6 hrs.	0.66 ±0.249	7.68 ±0.020	23.25 ±0.758
Condition 12 hrs.	0.97 ±0.037	4.70 ±1.058	18.40 ±0.131
Condition 24 hrs.	1.05 ±0.022	1.20 ±0.088	22.10 ±0.384

4.9 ผลของร้อยละของหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่และร้อยละของประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตและแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

ผลการทดลองแสดงได้ในตารางที่ 8 โดยจะพบว่าร้อยละของหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่และร้อยละของประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าสูงกว่าแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีร้อยละของหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่และร้อยละของประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 2.32±0.0001, 0.018±0.0001 และ 80.15±0.06 ตามลำดับ ส่วนแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีร้อยละของหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่และร้อยละของประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1.94±0.132, 0.015±0.0010 และ 68.86±1.90 ตามลำดับ สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อทำการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสร่วมกับอะมิโลกลูโคซิเดสร้อยละ 0.139 ที่เวลาการย่อย 24 ชั่วโมงจะทำให้ผิวเม็ดแป้งมีการผุกร่อนและมีลักษณะขรุขระไปทั่วทั้งเม็ด หลังจากนั้นดัดแปรร่วมด้วยการใช้ออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดร้อยละ 3 (ต่อน้ำหนักแป้งแห้ง) ซึ่งผิวของเม็ดแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ดังกล่าวมีลักษณะรูพรุนทำให้สารเคมีออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดสามารถแทรกตัวผ่านรูพรุนบนผิวเม็ดและเข้าไปทำปฏิกิริยาในส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งได้ดีขึ้น จึงทำให้ระดับการแทนที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าสภาวะที่ใช้สารเคมีออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดทำปฏิกิริยาเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang *et al*. (2010) ที่ทำการบดแป้งด้วยวิธี Ball milling เป็นเวลา 25 ชั่วโมงร่วมกับการดัดแปรต่อด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ด โดยพบว่าค่าระดับการแทนที่มีค่าเท่ากับ 0.020 ซึ่งมีค่ามากกว่าการดัดแปรต่อด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดเพียงอย่างเดียวโดยมีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.012 เนื่องจากเมื่อทำการบดแป้งทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็กลงและทำให้หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของเม็ดแป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมีออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดได้ง่ายขึ้น

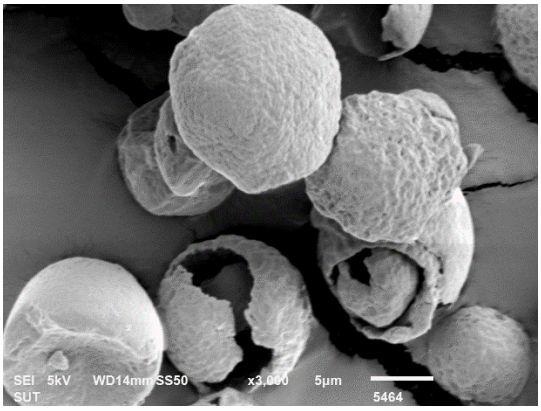
ตารางที่ 8 ร้อยละหมู่แทนที่ ระดับการแทนที่ และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต และแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

ชนิดของแป้ง	ปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดที่ทำปฏิกิริยา (ร้อยละต่อน้ำหนักแป้งแห้ง)	ปริมาณออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ด (mol reagent/mol AGU)	หมู่ออกเทนนิลซัคซินิล (ร้อยละ)	ระดับการแทนที่ (DS)	ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา (ร้อยละ)
แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต	3	0.021	1.94±0.132[b]	0.015±0.0010[b]	68.86±1.90[b]
แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์	3	0.021	2.32±0.0001[a]	0.018±0.0001[a]	80.15±0.06[a]

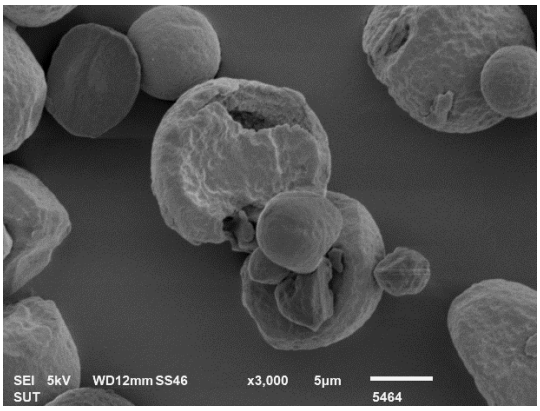
4.10 ผลของลักษณะรูปร่างอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

ตรวจสอบลักษณะเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5 กิโลโวลท์ และใช้กำลังขยายที่ 3,000 และ 5,000 เท่า เห็นว่าพื้นผิวเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จะขรุขระและเกิดรูเล็กๆเพิ่มขึ้นและเพิ่มมากขึ้นมากกว่าพื้นผิวของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต 3% และแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (ภาพที่ 21 และ 22) ทั้งนี้อาจเนื่องจากแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยการย่อยด้วยเอนไซม์ทำให้เม็ดแป้งเกิดรูเล็กๆที่บริเวณพื้นผิวและหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้งง่ายต่อการทำปฏิกิริยากับสารออกเทนนิลซัคซิเนต (Zhang *et al*., 2010) และสารออกเทนนิลซัคซิเนตที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่ผิวของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งเกิดการกัดกร่อนมากขึ้น พื้นผิวของเม็ดแป้งจึงมีลักษณะขรุขระมากยิ่งขึ้น

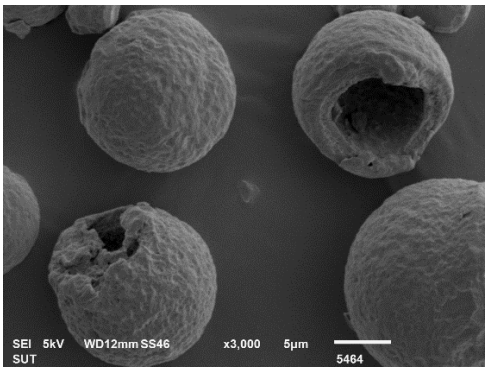
(Napaporn Antichokudomchai, and SaiyavitVaravinit 2003; Segura and Sira, 2003) ซึ่งสารเคมีส่วนใหญ่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งในส่วนอสันฐาน ซึ่งอาจเป็นส่วนปลายสายของหมู่ออคเทนิลซัคซิเนตที่เกาะกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Song *et al*., 2006) จากภาพที่จะเห็นว่าเม็ดแป้งบางเม็ดจะเกิดการสึกกร่อนภายในเม็ดแป้งเป็นบริเวณกว้างโดยเฉพาะบริเวณรอบส่วน hilum ของเม็ด เหลือไว้เพียงเปลือกนอกของเม็ดแป้งเพียงอย่างเดียวที่ทนทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์การทำปฏิกิริยาของออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ด



(a)

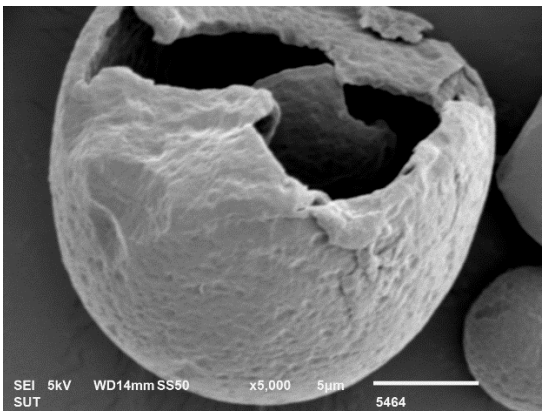


(b)

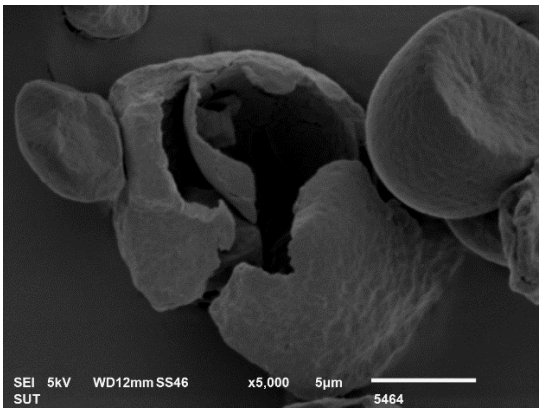


(c)

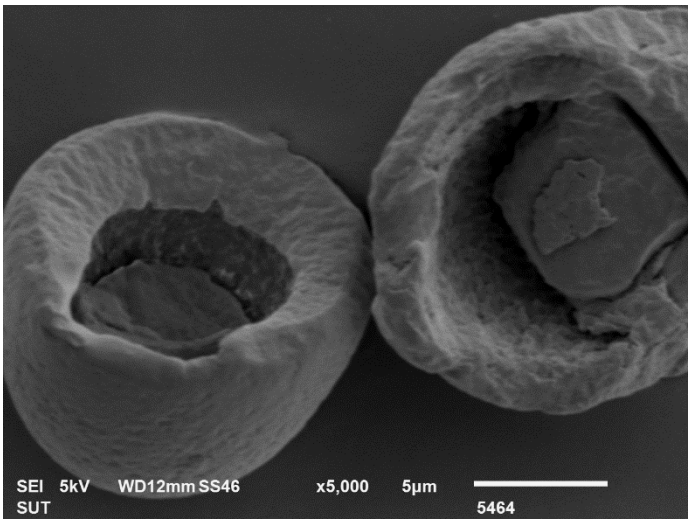
ภาพที่ 21 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต 3% (a) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (b) และ แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต(3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (c) เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า



(a)



(b)

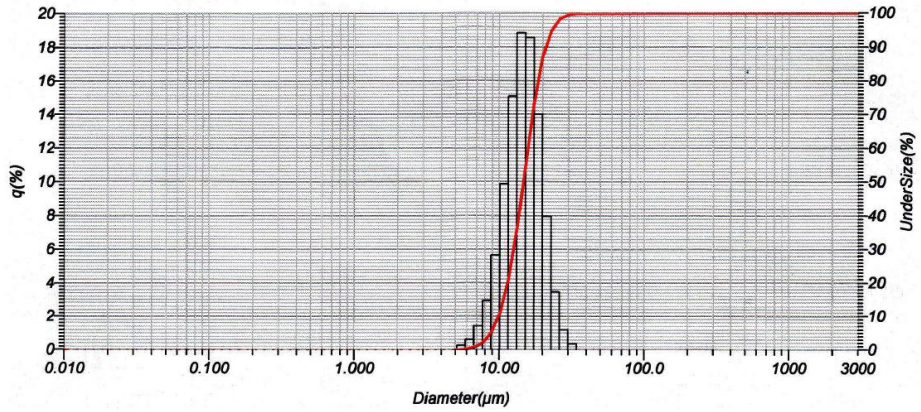


(c)

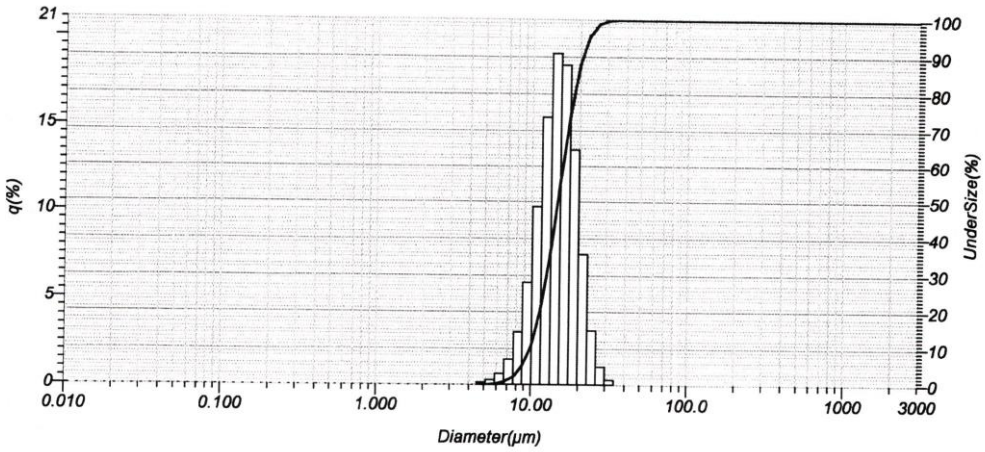
ภาพที่ 22 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต 3% (a) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (b) และ แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต(3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (c) เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

4.11 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

ตรวจสอบขนาดของเม็ดแป้งที่ได้ด้วยเลเซอร์เพื่อนำไปคำนวณหาการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%), แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง ด้วยเครื่อง Laser diffraction Particle size analyzer เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดการกระจายตัวของอนุภาคแป้งภายหลังการดัดแปร ผลการทดลองแสดงได้ในภาพที่ 22 พบว่าขนาดของอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตเฉลี่ยที่ระดับการแทนที่ 0.015 (OSA ร้อยละ 3) มีค่าเท่ากับ 14.68 ไมครอน (ภาพที่ 22 a) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมงมีขนาดของอนุภาคแป้งเฉลี่ยเท่ากับ 14.52 ไมครอน (ภาพที่ 22 b) และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมงมีขนาดของอนุภาคแป้งเฉลี่ยเท่ากับ 15.20 ไมครอน (ภาพที่ 22 c) ซึ่งพบว่าขนาดของอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าแป้งที่ดัดแปรประเภทอื่นๆเพียงเล็กน้อย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Timgren *et al*. (2012) ที่กล่าวว่าขนาดของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่เพิ่มระดับการแทนที่ให้มากขึ้นจะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากแป้งบางส่วนมีระดับของการรวมตัวสูงเนื่องจากมีการเพิ่มของหมู่ไฮโดรโฟบิกในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่อาจเนื่องจากการดัดแปรแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตในการทดลองนี้เป็นการดัดแปรในระดับที่ค่อนข้างต่ำและระดับการแทนที่ที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก (แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) มีระดับการแทนที่เท่ากับ 0.015 และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมงมีระดับการแทนที่เท่ากับ 0.018) ดังนั้นขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เฉลี่ยจึงมีค่าสูงกว่าอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)และแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

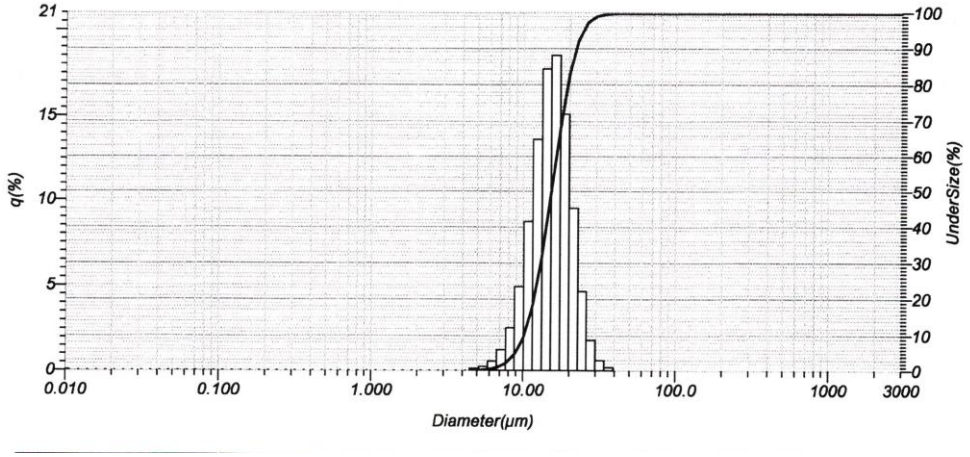


(a)



(b)

ภาพที่ 22 ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง และ แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง โดย แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) (a) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (c)



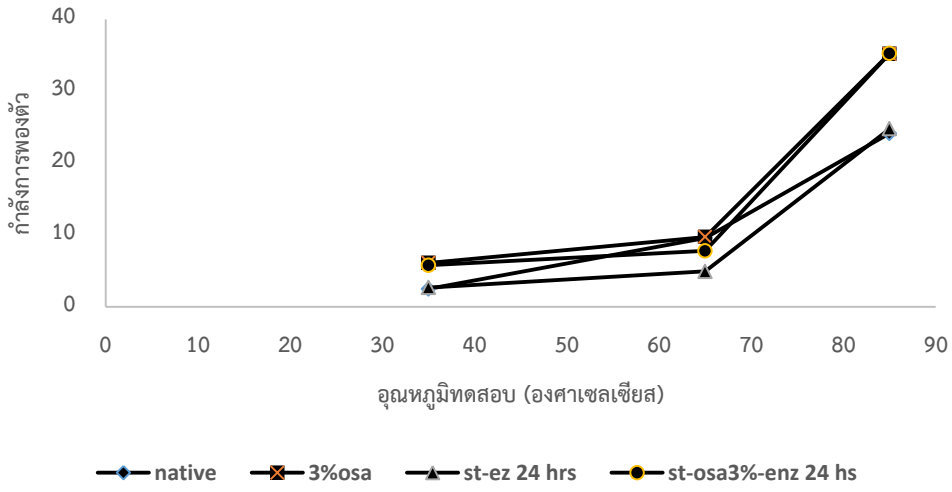
(c)

ภาพที่ 22 (ต่อ) ลักษณะการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง และ แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง โดย แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) (a) แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง (b) แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง (c)

4.12 สมบัติของเม็ดแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำ

4.12.1 ค่ากำลังการพองตัว

ค่ากำลังการพองตัวของเม็ดแป้งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งที่อุณหภูมิหนึ่งๆได้ ค่ากำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังและแป้งที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลาการย่อยแตกต่างกันแสดงได้ในภาพที่ 23 และตารางที่ 9 พบว่าค่ากำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% และ แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมงจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น สาเหตุเนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่วนอสัณฐานของโมเลกุลแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากยิ่งขึ้นและพันธะระหว่างโมเลกุลในส่วนที่เป็นผลึกคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลในส่วนที่คลายตัวจะมีการดูดซับน้ำได้มากขึ้นทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัว ซึ่งกำลังการพองตัวที่เพิ่มขึ้นของแป้งดัดแปรที่เตรียมได้เป็นข้อดีในการนำแป้งไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดแก่ผลิตภัณฑ์ต่างๆ



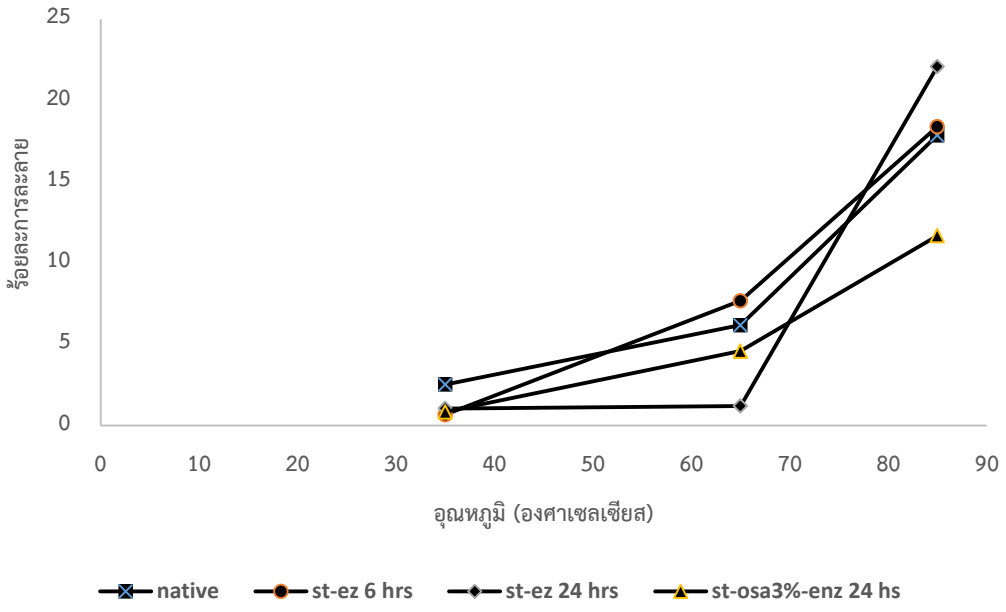
ภาพที่ 23 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% และ แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 9 กำลังการพองตัวที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% และ แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง

ชนิดของแป้ง	**ค่ากำลังการพองตัวของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ**		
	อุณหภูมิ 35 °C	**อุณหภูมิ 65 °C**	**อุณหภูมิ 85 °C**
แป้งมันสำปะหลัง	2.48 ±0.002	9.57 ±0.055	24.13 ±0.033
แป้งย่อยด้วยเอนไซม์ 24 hrs.	2.67 ±0.031	4.93 ±0.079	24.79 ±2.459
OSA 3%	6.45 ± 0.14	13.61 ± 0.20	34.70± 0.26
แป้ง OSA 3%ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง	5.77 ±1.622	7.79 ±0.133	35.24 ±1.454

4.12.2 ค่าร้อยละการละลาย

ค่าร้อยละการละลายของแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 35, 55 และ 85 องศาเซลเซียส มีค่าระหว่างร้อยละ 0.84-11.69 และร้อยละการละลายของแป้งมันสำปะหลังและแป้งดัดแปรที่เตรียมได้ทุกชนิดพบว่ามีค่าเพิ่มมากขึ้นทุกอุณหภูมิทดสอบ โดยเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งนั้น เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและเม็ดแป้งบางส่วนจะละลายออกมา ความสามารถในการละลายจะเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองอย่างนี้มีความสัมพันธ์กันโดยค่าการละลายจะแปรผันตรงกับกำลังการพองตัว



ภาพที่ 24 ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% และ แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 10 ร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 35, 65 และ 85 องศาเซลเซียส ของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เวลา 24 ชั่วโมง แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% และ แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนต 3% ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง

ชนิดของแป้ง	ค่าร้อยละการละลายของแป้งที่อุณหภูมิต่างๆ		
	อุณหภูมิ 35 °C	อุณหภูมิ 65 °C	อุณหภูมิ 85 °C
แป้งมันสำปะหลัง	2.5272 ±0.085	6.1835 ±0.103	17.8648 ±0.089
Condition 24 hrs.	1.0546 ±0.022	1.2091 ±0.088	22.106 ±0.384
OSA 3%	6.45 ± 0.14	13.61 ± 0.20	34.70± 0.26
Enz.+OSA 3%	0.8479 ±0.019	4.5899 ±0.179	11.6961 ±2.124

4.13 สมบัติทางความร้อนของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

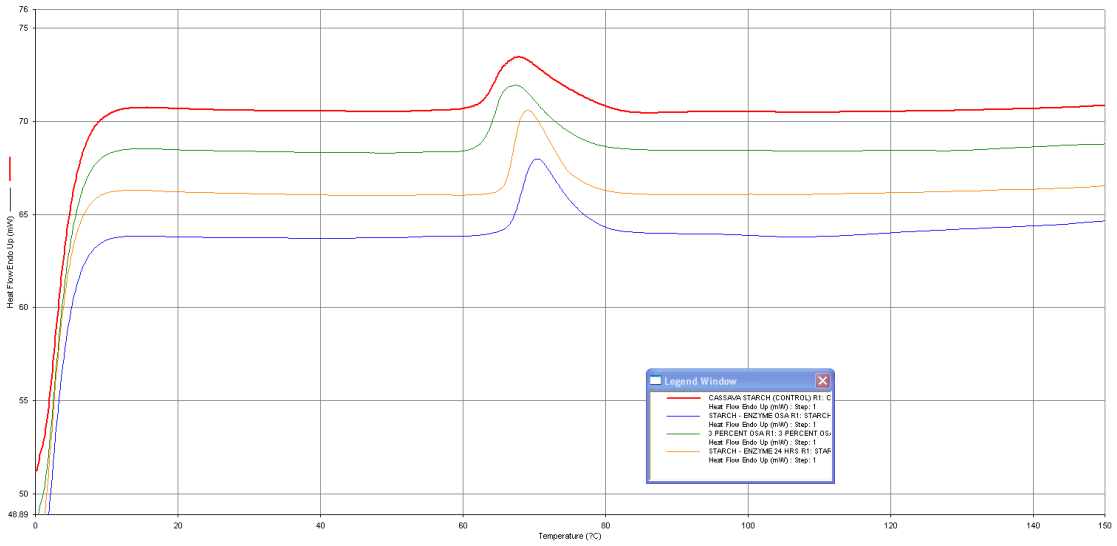
4.13.1 สมบัติการเกิดเจลาติไนเซชั่น

การตรวจวัดสมบัติทางความร้อนเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงที่บอกถึงพลังงานที่ต้องให้กับตัวอย่างในการเปลี่ยนสถานะ พลังงานที่ใช้ไปเรียกว่าเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH) อุณหภูมิที่ตัวอย่างเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเรียกว่า onset temperature (To) ที่อุณหภูมินี้ตัวอย่างจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง และมีการให้หรือรับพลังงานเพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะ จากการทดลองแสดงได้ในภาพที่ 25 และตารางที่ 11 พบว่า ค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temp) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temp) และอุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งมันสำปะหลังมีค่าเท่ากับ 62.21, 67.58 และ 78.27 ตามลำดับ เมื่อดัดแปรแป้งด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดร้อยละ 3 พบว่าอุณหภูมิ

ที่จุดสูงสุด (peak temp) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temp)ในการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งมันสำปะหลังลดลงเป็น 67.25 และ 76.18 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเนื่องจากการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลในโมเลกุลของแป้งทำให้เกลียวคู่ (double helices) คลายเกลียวและพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งอ่อนแอลง ทำให้แป้งถูกทำลายได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง จึงทำให้แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตมีค่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชั่นต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bai *et al*. (2003) ซึ่งพบว่าการดัดแปรด้วยการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิล ทำให้ค่าอุณหภูมิเจลาติไนเซชั่นของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตลดลง และลดลงมากยิ่งขึ้นเมื่อเพิ่มระดับการแทนที่มากขึ้น

เมื่อเม็ดแป้งผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสในการทดลองนี้ รูปแบบของ DSC thermogram แสดงให้เห็นว่า ค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าสูงกว่าของแป้งมันสำปะหลัง โดยค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 คือเท่ากับ 65.53 และ 68.89 องศาเซลเซียสตามลำดับ ทำให้พีคแสดงช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นมีลักษณะแคบลง สาเหตุเนื่องจาก สภาวะที่ใช้ในการย่อยแป้งที่อุณหภูมิดังกล่าว มีผลทำให้เกิดการ Annealing เม็ดแป้งควบคู่ดังกล่าวควบคู่ไปด้วยขณะที่ทำการย่อย การ Annealing จะทำให้เม็ดแป้งมีการจัดระเบียบการเรียงตัวใหม่ในเม็ดแป้ง มีผลทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้น เม็ดแป้งจะเกิดการเจลาติไนเซชั่นได้ยากขึ้น จึงมีอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชั่นเพิ่มขึ้น (Larsson และ Eliasson, 1991) ค่าพลังงานเจลาติไนเซชั่นของแป้ง (ΔH) ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์จะมีค่าต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง ทั้งนี้เนื่องจากเอนไซม์เข้าไปย่อยโครงสร้างต่างๆภายในเม็ดแป้ง ทำให้เกิดช่องว่างภายในและมีผลให้โครงสร้างที่เหลืออยู่มีโอกาสทำปฏิกิริยากับน้ำได้ง่ายขึ้น ค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จึงไม่สูงเท่าในแป้งดิบ

แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชั่นสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต เนื่องจากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ทำให้เกิด annealing มีผลทำให้การจัดระเบียบโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งมีความเป็นระเบียบมากขึ้น อุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชั่นจึงสูงขึ้น นอกจากนี้แล้วเนื่องจากการดัดแปรแป้งด้วยออกเทนนิลซัคซิเนตส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณอสัณฐานมากกว่าบริเวณผลึก ทำให้ไม่เห็นผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชั่นมากนัก (Seow and Thewamarar, 1993) ทำให้ผลของการย่อยด้วยเอนไซม์มีผลต่ออุณหภูมิเจลาติไนเซชั่นมากกว่าการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลดังนั้นอุณหภูมิเริ่มต้นและอุณหภูมิที่จุดสูงสุดที่ใช้ในการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จึงสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต



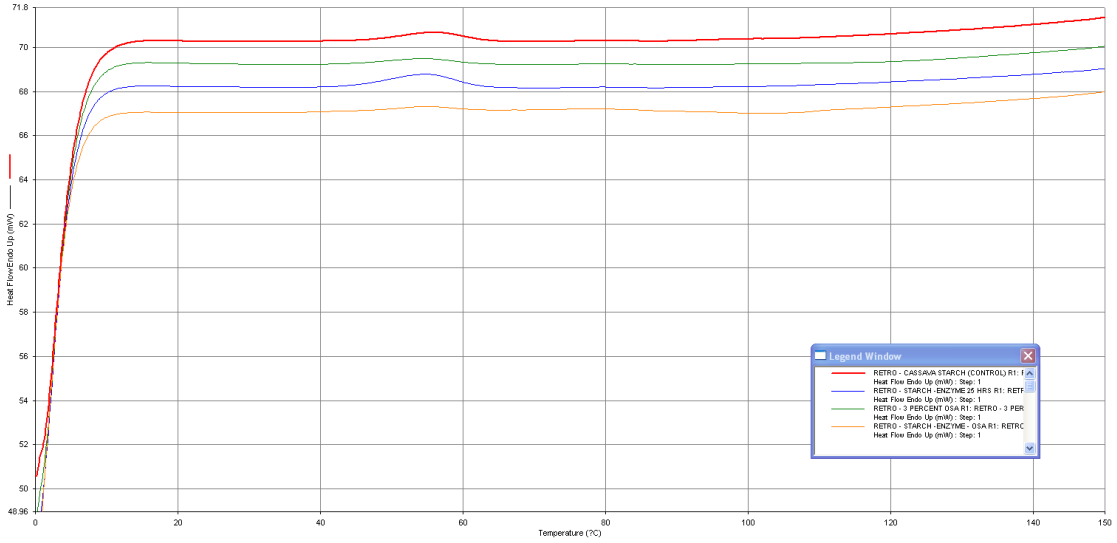
ภาพที่ 25 สมบัติการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ตามลำดับ

ตารางที่ 11 สมบัติการเกิดเจลาติไนเซชั่นของแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ตามลำดับ

Sample (Gelatinization)	Onset temp. (To, °C)	Peak Temp. (Tp, °C)	Conclusion Temp. (Tc, °C)	Enthalpy (ΔH, J/g.)
Cassava Starch (Control) Peak 1	62.21 ± 0.16	67.58 ± 0.35	78.27 ± 0.59	18.18 ± 0.29
Cassava Starch (Control) Peak 2	88.60 ± 1.87	96.42 ± 0.35	105.26 ± 0.84	0.65 ± 0.38
3% OSA Peak 1	62.55 ± 0.35	67.25 ± 0.11	76.18 ± 0.02	19.25 ± 1.73
3% OSA Peak 2	88.92 ± 1.38	99.25 ± 3.65	105.08 ± 3.17	0.20 ± 0.16
Starch – Enzyme 24 hrs Peak 1	65.53 ± 0.28	68.89 ± 0.35	76.40 ± 0.51	17.73 ± 0.69
Starch – Enzyme 24 hrs Peak 2	90.29 ± 0.04	98.00 ± 3.30	104.06 ± 2.02	0.09 ± 0.00
Starch – Enzyme OSA Peak 1	52.41 ± 0.46	70.09 ± 0.12	102.94 ± 0.82	18.43 ± 0.26

4.13.2 สมบัติการคืนตัวของแป้ง

จากผลการทดลองแสดงได้ในภาพที่ 26 และตารางที่ 12 ผลการทดลองแสดงว่าแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีการเกิดการคืนตัวน้อยที่สุด โดยมีค่าการคืนตัวเท่ากับร้อยละ 7.62 ในขณะที่แป้งมันสำปะหลัง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต มีค่าการคืนตัวเท่ากับร้อยละ 18.29, 23.65 และ 10.26 ตามลำดับ



ภาพที่ 26 สมบัติการเกิดการคืนตัวของแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ตามลำดับ

ตารางที่ 12 สมบัติการเกิดการคืนตัวของแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) ตามลำดับ

Sample (Retrogradation)	Onset temp. (To, °C)	Peak Temp. (Tp, °C)	Conclusion Temp. (Tc, °C)	Enthalpy (ΔH, J/g.)	Retrogradation
R - Cassava Starch (Control) Peak 1	43.42 ± 0.14	54.92 ± 0.35	63.35 ± 0.17	3.39 ± 0.11	18.99
R - Cassava Starch (Control) Peak 2	74.68 ± 0.92	79.72 ± 0.25	84.23 ± 0.41	0.18 ± 0.02	
R - 3% OSA Peak 1	43.55 ± 0.14	54.59 ± 0.12	62.83 ± 0.35	1.85 ± 0.08	10.26
R - 3% OSA Peak 2	72.70 ± 0.41	79.42 ± 0.12	85.73 ± 0.59	0.14 ± 0.01	
R - Starch – Enzyme 24 hrs Peak 1	43.62 ± 0.26	54.34 ± 0.47	62.02 ± 0.69	4.03 ± 0.21	23.65
R - Starch – Enzyme 24 hrs Peak 2	74.03 ± 0.75	79.17 ± 0.47	83.56 ± 0.01	0.18 ± 0.06	
R - Starch – Enzyme OSA Peak 1	45.55 ± 0.08	54.59 ± 0.12	61.51 ± 0.11	1.17 ± 0.03	7.62
R - Starch – Enzyme OSA Peak 1	71.46 ± 0.55	79.00 ± 0.24	86.01 ± 0.49	0.25 ± 0.02	

จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งรีโทรเกรดได้แก่ค่าพลังงานที่ใช้สลายโครงร้างผลึกแป้งรีโทรเกรด (△H) ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายผลึกแป้งรีโทรเกรด(onset temperature: *To*) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature: *Tp*) และค่าอุณหภูมิสุดท้ายของการสลายโครงร่างผลึกแป้งรีโทรเกรด (conclusion tempersture: *Tc*) เห็นได้ว่าเส้นกราฟการดูดกลืนความร้อนของการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากรีโทรเกรเดชั่นของอะมิโลเพคทินมีลักษณะและช่วงอุณหภูมิในการเกิดพีคแตกต่างจากเส้นกราฟการดูดกลืนความร้อนของการเกิดเจลาติไนเซชั่นของเม็ดแป้ง เนื่องจากโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นจากการเกิดรีโทรเกรเดชั่นของอะมิโลเพคทินแตกต่างจากโครงสร้างผลึกที่มีอยู่ในแป้งดั้งเดิม (Karim *et al*, 2000) โดยพีคที่เกิดจากการสลายโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการรีโทรเกรเดชั่นของอะมิโลเพคทินเดชั่นมีลักษณะที่กว้างกว่าพีคที่เกิดจากการเจลาติไนเซชั่นอาจเป็นเพราะผลึกที่เกิดขึ้นใหม่มีความสมบูรณ์ ความแข็งแรงความเป็นเนื้อเดียวกันและขนาดแตกต่างกันจึงทำให้พีคมีลักษณะกว้างมากขึ้น (Liu and Thompson, 1998) และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า เนื่องจากผลึกที่เกิดขึ้นใหม่มีโครงสร้างผลึกที่เกิดจากการเรียงตัวกันของโมเลกุลที่เป็นระเบียบน้อยกว่าทำให้ความเป็นผลึกลดลง ไม่แข็งแรงและมีความเสถียรลดลงจึงทำให้สลายตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Ward *et al*., 1994: Sasaki *et al*., 2000)

△H คือ ค่าพลังงานที่ใช้สลายโครงร่างผลึกผลึกแป้งรีโทรเกรด

To คือ ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายโครงร่างผลึกผลึกแป้งรีโทรเกรด

Tc-To คือ ช่วงความแตกต่างของอุณหภูมิสุดท้ายของการสลายโครงร่างผลึกผลึกแป้งรีโทรเกรด (*Tc*) กับ ค่าอุณหภูมิเริ่มสลายโครงร่างผลึกผลึกแป้งรีโทรเกรด (*To*)

$$\text{ร้อยละการคืนตัว} = \frac{\text{พลังงานเอนทาลปีในการสลายโครงร่างผลึกแป้งเริ่มต้น}}{} \times 100$$

พลังงานเอนทาลปีในการสลายโครงร่างผลึกแป้งรีโทรเกรด

เมื่อพิจารณาสมบัติการคืนตัวของแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) แสดงได้ในภาพที่ 26 และตารางที่ 12 จะพบว่าค่าร้อยละการคืนตัวของแป้งดังกล่าวข้างต้นมีค่าเท่ากับร้อยละ 18.99, 23.65, 10.26 และ 7.62 ตามลำดับ โดยพบว่าในแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จะปรากฏพีคของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกของโมเลกุลอะมิโลเพคทินที่น้อยมาก เนื่องจากหมู่ออกเทนนิลซัคซินิลที่มีมากที่สุด (ร้อยละ 2.94) ในแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์สามารถทำหน้าที่ในการขัดขวางการกลับมาจัดเรียงตัวกันของโมเลกุลของแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้พบว่าที่สภาวะเจลแป้งเปียกที่มีปริมาณน้ำร้อยละ 50 หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกของเจลแป้งมันสำปะหลัง แป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%)ที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง แป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมง และแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต (3%) 3.39, 4.03, 1.85 และ 1.17 18.99, 23.65, 10.26 และ 7.62 จูลต่อกรัมของแป้งตามลำดับ ซึ่งค่าพลังงานที่ใช้สลายโครงร่างผลึกแป้งรีโทรเกรด (△H) ซึ่งวิเคราะห์จากเครื่อง DSC เป็นค่าที่แสดงระดับของการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลเพคทินในตัวอย่างแป้ง ซึ่งจากผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ Doungjai and Sanguansri (2006) ที่พบว่าค่าพลังงานความร้อนของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตมีค่าต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง บ่งชี้ว่าแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตมีหมู่ออกเทลนิลซัคซินิลซึ่งมีลักษณะเป็นหมู่ใหญ่เข้ามาแทนหมู่ไฮดรอกซิลภายในโมเลกุลแป้งโดยหมู่ออกเทลนิลซัคซินิลนั้นจะอยู่บริเวณกิ่งของอะมิโลเพคทินเป็นส่วนใหญ่ (Shogren *et al*., 2000) และทำหน้าที่ในการขัดขวางการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะมิโลสและอะมิโลเพคทินทำให้แป้งมีสมบัติมีความคงตัวต่อการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (Wurzburg, 1987) ส่วนแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์นั้นเกิดการ Annealing เม็ดแป้งควบคู่ขณะที่ทำการย่อย การ Annealing จะทำให้เม็ดแป้งมีการจัดระเบียบการเรียงตัวใหม่ในเม็ดแป้ง มีผลทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีความเสถียรเพิ่มมากขึ้นกว่าแป้งมันสำปะหลัง เม็ดแป้งจึงเกิดการคืนตัวได้ง่ายกว่าแป้งมันสำปะหลัง

4.14 การใช้แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เป็นสารทดแทนน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงในผลิตภัณฑ์น้ำสลัด

การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์แอลฟาอะมิเลสและกลูโคอะมิเลสร้อยละ 0.139 น้ำหนักเอนไซม์ต่อน้ำหนักแป้งแห้งนั้น จากผลการทดลองพบว่าทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็กลงเล็กน้อย (ขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรเฉลี่ยประมาณ 15.88 ไมครอนและเมื่อผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ 24 ชั่วโมงจะมีขนาดลดลงเล็กน้อยเท่ากับ 14.52 ไมครอน) ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวยังไม่เป็นที่พอใจแก่ผู้วิจัยเนื่องจากต้องการให้เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดที่เล็กลงประมาณ 2-10 ไมครอนเท่ากับไมเซลล์ของเม็ดไขมัน ดังนั้นในการทำวิจัยครั้งต่อไปจึงต้องหาวิธีการดัดแปรแป้งวิธีใหม่เพื่อลดขนาดของเม็ดแป้งให้มีขนาดเล็กลง เช่น การบดเม็ดแป้งด้วยวิธี Ball mill เป็นต้น

เพื่อทำการทดสอบว่าขนาดของเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ยังมีขนาดใหญ่ไม่เหมาะสมกับการทดแทนน้ำมันพืชเพื่อผลิตน้ำสลัดไขมันต่ำ จึงได้นำมาทดลองต่อไปโดยนำสมบัติของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มาทดแทนในส่วนน้ำมันถั่วเหลือง หลังจากนั้นดัดแปรแป้งต่อด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดเพื่อให้ได้เป็นแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ จะทำให้แป้งมีสมบัติพิเศษคือเป็นอิมัลซิฟลายเออร์ระหว่างน้ำกับน้ำมันซึ่งทำให้สามารถใช้ทดแทนไข่แดงได้ จากสมบัติทั้งสองประการที่กล่าวมาข้างต้นจึงนำแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มาใช้เป็นสารทดแทนน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงในผลิตภัณฑ์น้ำสลัด โดยลดปริมาณน้ำมันพืชและไข่แดงลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60 ส่วนสูตรน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มจะมีระดับการลดปริมาณไข่แดงและน้ำมันถั่วเหลืองร้อยละ 0 ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ปริมาณส่วนประกอบในน้ำสลัดสูตรลดปริมาณไข่แดงและน้ำมันถั่วเหลืองด้วยแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์

ระดับการลดปริมาณไข่แดงและน้ำมันถั่วเหลือง (ร้อยละ)	น้ำมัน (กรัม)	แป้ง(กรัม)	น้ำ (กรัม)	ไข่ไก่ (กรัม)	น้ำส้มสายชูกลั่น (กรัม)	น้ำตาลทราย (กรัม)	เกลือ (กรัม)
0	60	0	0	10	9	20	1
10	54	1.4	5.6	9	9	20	1
20	48	2.8	11.2	8	9	20	1

30	42	4.2	14.8	7	9	20	1
40	36	5.6	22.4	6	9	20	1
50	30	7	28	5	9	20	1
60	24	8	32	4	9	20	1

4.14.1 การทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของน้ำสลัดไขมันต่ำสูตรต่างๆ

ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสของน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงที่ได้จากการทดลองข้อ 4.14 โดยใช้กลุ่มผู้บริโภคเป้าหมายทั้งหมด 30 คน คือเป็นบุคคลทั่วไปที่นิยมรับประทานน้ำสลัด โดยวิธีการให้ค่าคะแนนความชอบ (9- point hedonic scaling test, 1-ไม่ชอบมากที่สุดถึง 9 -ชอบมากที่สุด) ในคุณลักษณะของน้ำสลัดพื้นฐานที่เป็นสิ่งที่ต้องการศึกษาคือ สี กลิ่น กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส ความชอบรวม ทำ 2 ซ้ำ สุ่มตัวอย่างแบบง่ายในการเสิร์ฟโดยเปิดตารางสุ่ม ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสแสดงได้ในตารางที่ 14 จากผลการทดลองพบว่าผู้บริโภคยอมรับทางประสาทสัมผัสกับน้ำสลัดลดน้ำมันพืชและไข่แดงที่ร้อยละ 20 มากที่สุด โดยจะให้คะแนนด้านลักษณะปรากฏ (สี) กลิ่น และเนื้อสัมผัสเมื่อรับประทานมากที่สุด ส่วนอันดับรองลงมาคือน้ำสลัดลดน้ำมันพืชและไข่แดงที่ร้อยละ 10 และสูตรไขมันเต็มตามลำดับ สำหรับสูตรไขมันเต็มที่ได้การยอมรับทางประสาทสัมผัสเป็นอันดับที่ 3 นั้น ผู้บริโภคให้ความเห็นว่าน้ำสลัดมีความเลี่ยนมันมากเกินไป จึงไม่ชอบรับประทาน อาจเป็นเพราะผู้บริโภคเป็นนักศึกษาจึงมักชอบรับประทานอาหารที่ไม่เลี่ยนและมีส่วนประกอบที่มีน้ำมันมากเกินไป นอกจากนี้จากการสอบถามผู้บริโภคเกี่ยวกับเนื้อสัมผัสของน้ำสลัดเมื่อเพิ่มปริมาณการใช้แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มากขึ้น พบว่าผู้บริโภครู้สึกเหมือนมีเม็ดแป้งเล็กๆละลายอยู่ในน้ำสลัดในสภาวะของน้ำสลัดตั้งแต่สูตรลดปริมาณน้ำมันและไข่แดงตั้งแต่ร้อยละ 30 ไปจนถึงร้อยละ 60 อาจเกิดเนื่องจากขั้นตอนการลดขนาดด้วยการใช้เอนไซม์ยังทำให้เม็ดแป้งมีขนาดเล็กไม่เพียงพอ จึงทำให้ Mouthfeel ของน้ำสลัดดังกล่าวยังเป็นที่ไม่พอใจต่อผู้บริโภค

จากผลการทดลองข้างต้น แสดงว่าการนำแป้งมันสำปะหลังและแป้งที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ระดับการลดน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงที่ร้อยละ 20 นั้น ได้รับการยอมรับทางประสาท

สัมผัสจากผู้บริโภคมากที่สุด ซึ่งเมื่อรับประทานแล้ว สามารถลดปริมาณไขมันและคลอเรสเตอรอลได้ในระดับหนึ่งซึ่งยังไม่มากจนเป็นที่พอใจแก่นักวิจัยนัก อาจเกิดเนื่องจากเม็ดแป้งยังมีขนาดที่ใหญ่เมื่อใช้ทดแทนน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงในปริมาณสูง (ร้อยละ 30 ขึ้นไป) ทำให้ผู้บริโภครู้สึกถึงเนื้อสัมผัสที่เป็นผงแป้งละลายในผลิตภัณฑ์ จึงไม่ยอมรับทางประสาทสัมผัส ดังนั้น งานวิจัยขั้นต่อไป นักวิจัยต้องปรับปรุงวิธีที่จะทำให้เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีขนาดเล็กลงเพื่อเมื่อผสมลงในผลิตภัณฑ์ในระดับสูงแล้ว ผู้บริโภคจะให้การยอมรับทางประสาทสัมผัสได้มากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 14 ผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคจำนวน 30 คนต่อน้ำสลัดไขมันเต็มและน้ำสลัดลดปริมาณน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10 ถึงร้อยละ 60

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	คะแนนความชอบ						
	รหัส 148 ลด 0%	รหัส 565 ลด10%	รหัส 579 ลด 20%	รหัส 254 ลด 30%	รหัส 732 ลด 40%	รหัส 111 ลด50%	รหัส 325 ลด 60%
ความชอบรวม	238	243	242	235	219	225	219
ลักษณะปรากฏ (สี)	223	227	234	224	217	224	210
กลิ่น	209	217	219	212	208	209	210
เนื้อสัมผัสเมื่อทาน	231	230	232	218	202	203	207
รสชาติ (ความกลมกล่อม)	233	238	233	229	218	225	220
คะแนนรวม	1134	1155	1160	1118	1064	1086	1066

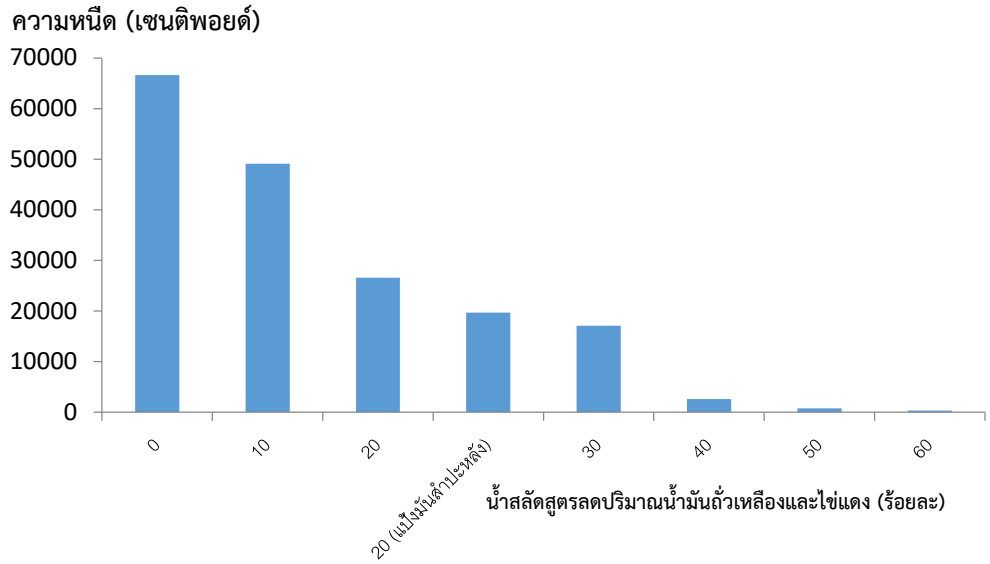
4.14.2 การทดสอบสมบัติของน้ำสลัดสูตรไขมันต่ำ

4.14.2.1 ค่าความหนืดของน้ำสลัด โดยใช้เครื่องวัดความหนืด viscometer ยี่ห้อ Brookfield ประเทศสหรัฐอเมริกา รุ่น DV-II+ หัววัด RV spindle #5 อุณหภูมิที่วัด 25 C ความเร็วรอบ 5 rpm หน่วยความหนืดเป็นเซนติพอยด์ (cP) แสดงค่าได้ในตารางที่ 15 และภาพที่ 27 ดังนี้

ตารางที่ 15 ค่าความหนืดของน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มและน้ำสลัดสูตรไขมันต่ำ (น้ำสลัดที่ลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 60 ตามลำดับ) เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer

น้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดง ร้อยละ	**ความหนืด (cP)**
0	66,640±226[a]
10	49,120±452[b]
20	26,560±226[c]
20 (แทนที่ด้วยแป้งมันสำปะหลัง)	19,720±169[d]
30	17,080±169[e]
40	2,600±56[f]
50	760±56[g]
60	320±45[h]

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)



ภาพที่ 27 ค่าความหนืดของน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มและน้ำสลัดสูตรไขมันต่ำ (น้ำสลัดที่ลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงลงตั้งแต่ร้อยละ 10 ถึง 60 ตามลำดับ) เมื่อวิเ คราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer

การลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงตั้งแต่ร้อยละ 10 ไปจนถึงร้อยละ 60 และแทนที่ด้วยแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์และน้ำจะมีผลต่อสมบัติด้านความหนืดของน้ำสลัดเป็นอย่างมาก ค่าความหนืดของน้ำสลัดจะลดต่ำลงอย่างต่อเนื่องเมื่อทำการลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 ด้วยน้ำแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ โดยมีค่าความหนืดลดต่ำอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เป็นผลเนื่องมาจากน้ำสลัดดังกล่าวมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นน้ำในเฟสตัวกลางเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่น้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงซึ่งให้คุณสมบัติด้านความหนืดแก่น้ำสลัดนั้นลดน้อยลง และเมื่อพิจารณาค่าความหนืดของสภาวะการลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงร้อยละ

20 และแทนที่ด้วยแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เปรียบเทียบกับแทนที่ด้วยแป้งมันสำปะหลังพบว่า ค่าความหนืดของน้ำสลัดที่แทนที่ด้วยแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีค่าสูงกว่าค่าความหนืดของน้ำสลัดที่แทนที่ด้วยแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สาเหตุเนื่องจากแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีสมบัติของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ให้ค่าความหนืดสูง (Trubiano, 1986) ถึงแม้จะมีการย่อยด้วยเอนไซม์จะทำให้ความหนืดลดลงไปบ้างแต่ก็ยังให้ค่าความหนืดที่สูงกว่าแป้งมันสำปะหลังอยู่ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มาใช้ทดแทนน้ำมันพืชและไข่แดงในน้ำสลัดเนื่องจากจะช่วยเพิ่มความหนืดของผลิตภัณฑ์ให้มีมากยิ่งขึ้น และสามารถนำแป้งดังกล่าวมาทดแทนเนยและไข่แดงในผลิตภัณฑ์เบกอรี่ได้เช่น ทำไส้เอแคลร์ เป็นต้น

4.14.2.2 ค่าสี L^* a^* และ b^* วิเคราะห์ค่าสีของน้ำสลัด 50 กรัม โดยนำน้ำสลัดใส่จานแก้วสำหรับวัดสีของเหลว และวิเคราะห์ค่าสีด้วยเครื่องวัดค่าสี Color spectrometer ยี่ห้อ HunterLab ผลของค่าสีน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้, น้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง) แสดงได้ในตารางที่ 16 โดยพบว่าอนุภาคแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เมื่อนำมาผลิตเป็นน้ำสลัด จะได้น้ำสลัดที่มีเนื้ออ่อนปุยมากยิ่งขึ้น ค่าสี L^* a^* และ b^* จากตารางที่ 16 มีค่าเป็นบวกจะแสดงความขาว ค่าสีแดง และสีเหลืองตามลำดับ จากการทดลองสามารถเห็นได้ชัดว่า น้ำสลัดทุกสูตรมีสีเหลืองขาวแกมแดง และสีของน้ำสลัดที่ได้จะขาวขึ้น ซึ่งสีขาวน่าจะมาจากสีของแป้ง เนื่องจากมีปริมาณแป้งมากขึ้นและมีปริมาณน้ำมันน้อยลง จากการทดลองสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่าน้ำสลัดจะมีค่า L^* หรือค่าความขาวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 ตามลำดับ โดยเพิ่มจาก 62.42, 77.75, 80.91 และ 83.39 ส่วนน้ำสลัดที่ลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงร้อยละ 40, 50 และ 60 จะมีค่า L^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อเปรียบกับน้ำสลัดที่ลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงร้อยละ 0, 10, 20 และ 30 แต่เมื่อเปรียบเทียบกันเองจะมีค่าความขาวไม่แตกต่างกันคือมีค่าเท่ากับ 83.86, 83.97 และ 83.70 ตามลำดับ

จากผลการทดลองเรื่องค่าสีในตารางที่ 16 ทำให้สามารถบอกได้ว่าน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงจะมีความขาวจากปริมาณแป้งดัดแปรที่เพิ่มขึ้นและมีค่าสี

แดงจากไข่แดงและค่าสีเหลืองจากน้ำมันถั่วเหลืองลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงลงตั้งแต่ระดับร้อยละ 0 ไปจนถึงร้อยละ 60 นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในเรื่องสีขาว สีเหลือง และสีแดงของน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงร้อยละ 20 ที่ใช้แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ทดแทนกับใช้แป้งมันสำปะหลัง พบว่าค่าสีทั้งหมดได้แก่ สีขาว สีแดง และสีเหลืองของน้ำสลัดที่มีการใช้แป้งที่แตกต่างกันทั้งสองชนิดไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ซึ่งแสดงว่าสีของแป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ไม่มีความแตกต่างจากสีของแป้งมันสำปะหลัง

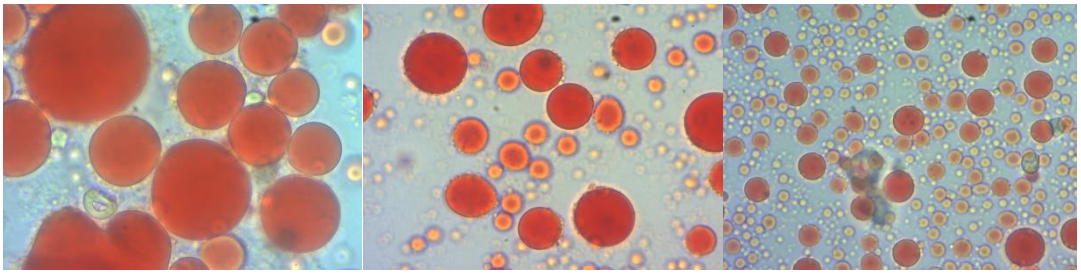
ตารางที่ 16 ค่าสี L^*, a^* และ b^* ของน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้, น้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง)

สูตรน้ำสลัด	L^*	a^*	b^*
สูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้	62.42 ± 0.14^{e}	4.98 ± 0.08^{a}	30.92 ± 0.33^{a}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10	77.75 ± 0.05^{d}	4.73 ± 0.01^{b}	25.41 ± 0.04^{b}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20	80.91 ± 0.08^{c}	3.94 ± 0.01^{c}	21.89 ± 0.07^{c}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง)	81.15 ± 0.01^{c}	3.97 ± 0.01^{c}	21.96 ± 0.09^{c}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 30	83.39 ± 0.19^{b}	3.15 ± 0.07^{d}	19.11 ± 0.06^{d}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 40	83.86 ± 0.11^{a}	3.05 ± 0.01^{e}	18.89 ± 0.05^{e}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 50	83.97 ± 0.11^{a}	2.71 ± 0.00^{f}	18.12 ± 0.04^{f}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 60	83.70 ± 0.11^{a}	2.56 ± 0.01^{g}	17.54 ± 0.06^{g}

ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแต่ละคอลัมน์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($P \leq 0.05$)

4.14.2.3 รูปร่างและการกระจายตัวของเม็ดน้ำมันในน้ำสลัด ตรวจสอบรูปร่างและการกระจายตัวของเม็ดน้ำมันในน้ำสลัดภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดา โดยการย้อมสีเม็ดน้ำมันด้วยสารละลายสี sudan IV ผลการทดลองแสดงได้ดังภาพที่ 28 ซึ่งอธิบายได้ว่า การ

แทนที่เม็ดน้ำมันถั่วเหลืองด้วยอนุภาคแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ระดับการแทนที่ที่ต่างกันนั้น ทำให้ขนาดของเม็ดน้ำมันในน้ำสลัดที่ได้แตกต่างกัน เม็ดน้ำมันส่วนใหญ่ในน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 60 จะมีขนาดเล็กกว่าน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 30 และ น้ำสลัดสูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้จะมีขนาดเม็ดน้ำมันที่ใหญ่ที่สุดอย่างเห็นได้ชัด (ภาพที่ 28 a, b และ c) แสดงให้เห็นว่า ปริมาณอนุภาคแป้งประกอบกับน้ำที่เติมเข้าไปแทนที่น้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงมีผลต่อการเกิดการเกาะกลุ่มและรวมตัวของเม็ดน้ำมันซึ่งทำให้เม็ดน้ำมันมีขนาดเปลี่ยนแปลงไปได้



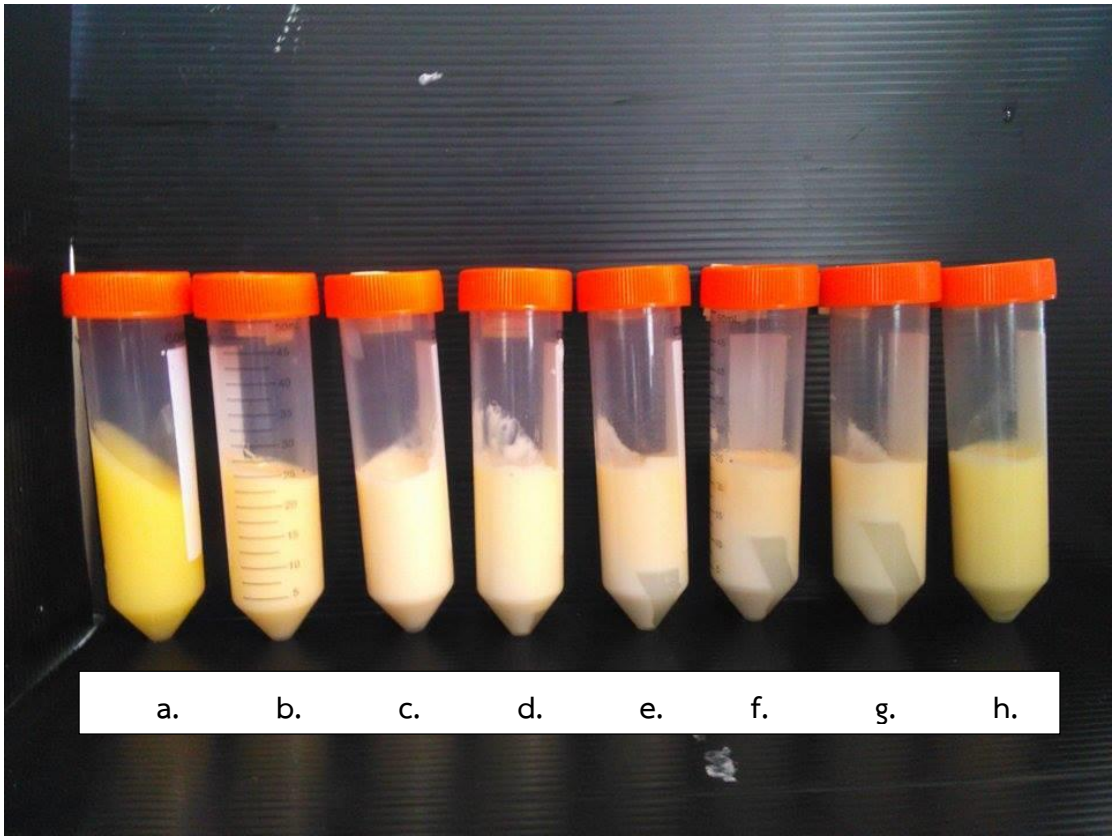
a. **b.** **c.**

ภาพที่ 28 รูปร่างและการกระจายตัวของเม็ดน้ำมันภายในน้ำสลัดสูตรต่างๆที่เตรียมได้ เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดาที่กำลังขยาย 40 เท่า โดยการย้อมสีเม็ดน้ำมันด้วยสารละลายสี Sudan IV

a. สูตรไขมันเต็ม
b. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 30
c. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 60

4.14.2.4 การแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ (percent serum loss, %SL) (ดัดแปลงจากวิธีการของ Yuan *et al*. (1998), Thitipraphunkul *et al*. (2003) และ Yasumatsu *et al*.(1997) นำน้ำสลัดทุกสูตรที่เตรียมได้มาใส่สารป้องกันการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์เนื่องจากต้องเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน โดยการเติมโซเดียมเบนโซเอต (Sodium Benzoate) and โปตัสเซียมซอร์เบท (Potassium Sorbate) ในอัตราส่วนร้อยละ 0.063, 0.012 (ต่อปริมาตร) ตามลำดับ เก็บรักษาน้ำสลัดทุกสูตรไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 เดือน (30 วัน) โดยทุกๆวันที่ 0, 15, 30 จะนำตัวอย่างน้ำสลัดทุกสูตรมาหาค่าการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์ (Percent Serum Loss, %SL) ภาพที่ 29 แสดงลักษณะการแยกชั้นของแป้งจากอิมัลชั่นน้ำสลัดสูตรต่างๆที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 30 วัน

ผลการแยกชั้นของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดสูตรไขมันเต็ม น้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ น้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ใช้แป้งมันสำปะหลังทดแทน) แสดงได้ในตารางที่ 17 และภาพที่ 29, 30 และ 31



ภาพที่ 29 ลักษณะการแยกชั้นของแป้งจากอิมัลชั่นน้ำสลัดสูตรต่างๆหลังการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,500 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

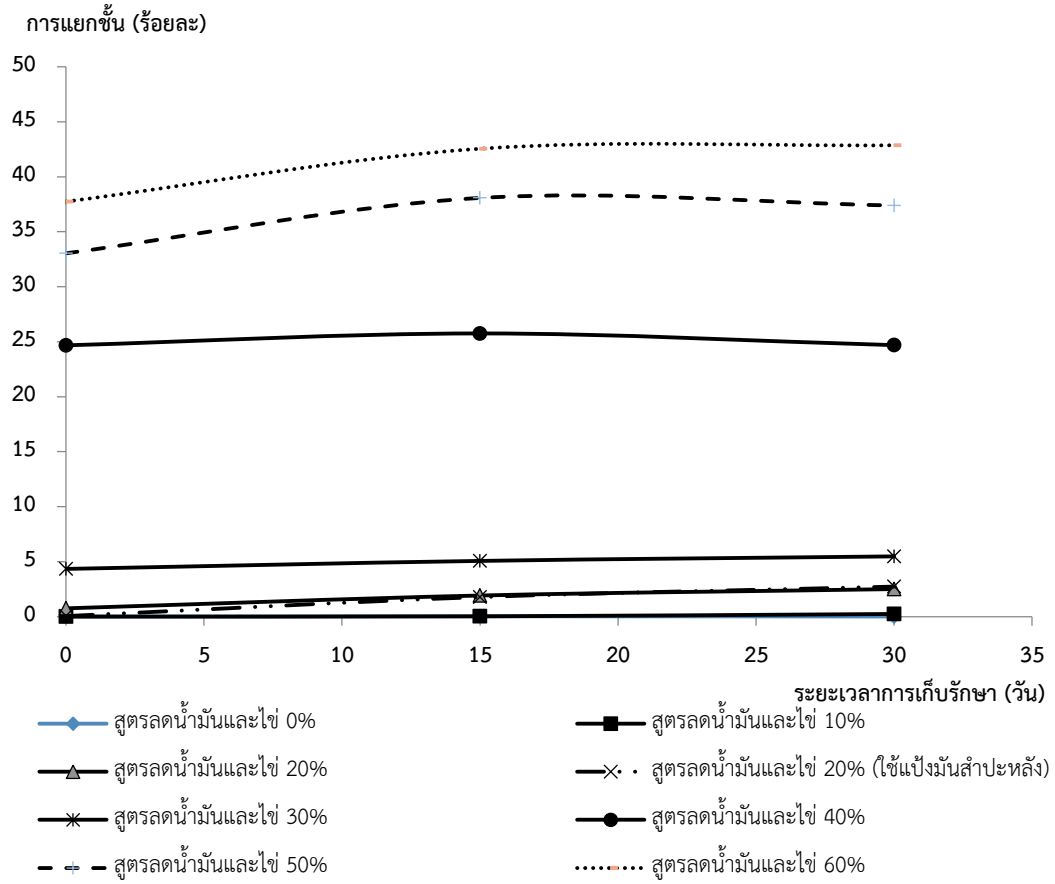
a. สูตรไขมันเต็ม
b. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10
ฃ. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20
c. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 30
d. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 40
e. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 50
f. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 60
g. สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง)

a. **b.**

ภาพที่ 30 ลักษณะการแยกชั้นของแป้งจากอิมัลชั่นน้ำสลัด (a.) สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 และ (b.) สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง) หลังการปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3500 รอยต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 17 ร้อยละการแยกชั้น (%SL) ของน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้, น้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง)

สูตรน้ำสลัด	**ค่าร้อยละการแยกชั้นของน้ำสลัด (%SL)**		
	ระยะเวลาการเก็บรักษา 0 วัน	**ระยะเวลาการเก็บรักษา 15 วัน**	**ระยะเวลาการเก็บรักษา 30 วัน**
สูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้	0.010±0.009 ^{e}	0.0*196*±0.0*13* ^{f}	0.018± 0.019 ^{f}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10	0.011±0.007 ^{e}	0.033±0.060 ^{f}	0.247±0.011 ^{f}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20	0.075±0.137 ^{e}	1.924±0.331 ^{e}	2.508±0.308 ^{e}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง)	0.053±0.0*05* ^{e}	1.783±0.692 ^{e}	2.*3*34±0.217 ^{e}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 30	4.343±0.407 ^{d}	5.071±0.283 ^{d}	5.483±0.450 ^{d}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 40	24.671±1.327 ^{c}	25.753±0.132 ^{c}	24.688±0.136 ^{c}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 50	33.039±2.631 ^{b}	38.072±2.520 ^{b}	37.387±0.551 ^{b}
สูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 60	38.47±0.474 ^{a}	42.*49±1.075* ^{a}	42.861±1.966 ^{a}



ภาพที่ 31 ร้อยละการแยกชั้น (%SL) ของน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้, น้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 60 และน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 20 (ทดแทนด้วยแป้งมันสำปะหลัง)

ความเสถียรของน้ำสลัดสามารถวัดได้โดยการกระตุ้นการเกาะกลุ่มและการรวมตัวของเม็ดที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วยการให้แรงหนีศูนย์กลาง โดยทำการปั่นเหวี่ยงน้ำสลัดด้วยความเร็ว 3,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ภายหลังการปั่นเหวี่ยงน้ำสลัดสูตรไขมันเต็มและสูตรลดน้ำมันพืชและไข่แดงร้อยละ 10 จะพบร้อยละการแยกชั้นน้อยมากคือมีค่าระหว่าง 0.010 ±0.009 ถึง 0.247±0.011 และเมื่อลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงลงตั้งแต่ร้อยละ 20, 30, 40, 50 และ 60 พบว่าร้อยละการแยกชั้นของระยะเวลาการเก็บรักษา 1 วันจะมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 0.053±0.082, 4.343±0.407, 24.671±1.327, 33.039±2.631 38.473±0.474 ตามลำดับ และเมื่อเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 วัน พบว่าน้ำสลัดทุกสูตรจะมีร้อยละการแยกชั้นเพิ่มมากขึ้น โดยน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงลงร้อยละ 60 มีร้อยละการแยกชั้นมากที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บรักษาทั้ง 15 วันคือเท่ากับร้อยละ 42.49±1.075 และที่เวลาการเก็บรักษา 30 วันพบว่าน้ำสลัดทุกสูตรเริ่มมีค่าการแยกชั้นที่ไม่เปลี่ยนแปลงจากวันที่ 15 มากนัก ส่วนน้ำ

สลัดสูตรไขมันเต็มที่เตรียมได้มีร้อยละการแยกชั้นน้อยที่สุดที่ระยะเวลาการเก็บรักษาทั้ง 15 และ 30 วันคือเท่ากับร้อยละ 0.0196±0.013 และร้อยละ 0.018±0.019ตามลำดับ สาเหตุเนื่องจากว่าอิมัลชั่นน้ำสลัดที่ไม่มีความเสถียรจะเกิดการแยกชั้นโดยเม็ดน้ำมันที่เบากว่าจะรวมกลุ่มกันและลอยตัวขึ้นด้านบน ในขณะที่เฟสตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะแยกชั้นลงด้านล่าง ดังเช่นลักษณะการแยกชั้นของน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันถั่วเหลืองและไข่แดงลงร้อยละ 30 เป็นต้นไป เม็ดแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่เติมลงแทนน้ำมันและไข่แดงในน้ำสลัดและเพิ่มปริมาณน้ำในอิมัลชั่น เมื่อผ่านการปั่นเหวี่ยงจะตกตะกอนลงมาด้านล่างสุดเห็นเป็นชั้นแป้งสีขาวชัดเจน (ภาพที่ 29 d, e, f, และ g) ส่วนน้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันและไข่แดงร้อยละ 0, 10 และ 20 จะไม่พบการแยกชั้นหรือเกิดการแยกชั้นน้อยมาก เนื่องจากน้ำในระบบมีน้อย น้ำสลัดมีความเสถียร นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบร้อยละการแยกชั้นของน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันและไข่แดงลงร้อยละ 20 และเติมแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์และน้ำเข้าไปแทนที่กับน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันและไข่แดงลงร้อยละ 20 และเติมแป้งมันสำปะหลังกับน้ำเข้าไปแทนที่ พบว่าร้อยละการแยกชั้นของน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันและไข่แดงลงร้อยละ 20 และเติมแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 15 และ 30 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.924±0.331 และ 2.508±0.308 ตามลำดับ ส่วนร้อยละการแยกชั้นของน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันและไข่แดงลงร้อยละ 20 และเติมแป้งมันสำปะหลังที่ระยะเวลาการเก็บรักษาที่ 15 และ 30 วันมีค่าเท่ากับร้อยละ 1.783±0.692 และ 2.334±0.217 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าน้ำสลัดสูตรลดน้ำมันและไข่แดงลงร้อยละ 20 และเติมแป้งมันสำปะหลังมีค่าร้อยละการแยกชั้นมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากว่าแป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์มีสมบัติในการเป็นอิมัลซิฟลายเออร์ที่ดีระหว่างน้ำกับน้ำมันจึงทำให้การแยกชั้นมีค่าน้อยกว่าสูตรที่มีการใช้แป้งมันสำปะหลังทดแทน แต่เมื่อเปรียบเทียบเทียบกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างน้ำสลัดทั้ง 2 สูตร ($p \geq 0.05$) อาจเนื่องจากว่าระยะเวลาในการเก็บรักษายังน้อยเกินไปและปริมาณแป้งที่ใส่ลงไปในสูตรลดปริมาณน้ำมันและไข่แดงน้อยมากคือประมาณ 2.8 กรัมต่อน้ำสลัดที่เตรียมได้ 100 กรัม ดังนั้นจึงยังไม่สามารถมองเห็นความแตกต่างของการใช้แป้งออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แทนแป้งมันสำปะหลังจากการทดลองหาร้อยละการแยกชั้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาน้ำสลัดที่ได้หลังจากการปั่นเหวี่ยงในภาพที่ 30 พบว่าน้ำสลัดสูตรใช้แป้งมันสำปะหลังออกเทนนิลซัคซิเนตที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (ภาพที่ 30 a.) มีความกลมกลืนของเนื้ออิมัลชั่นของน้ำสลัดมากกว่าน้ำสลัดสูตรใช้แป้งมันสำปะหลังทดแทน (ภาพที่ 30 b.) ซึ่งจะเห็นตะกอนสีขาวของแป้งตกลงที่ก้นหลอด จากผลการทดลองการแยกชั้นดังกล่าวข้างต้น สามารถอภิปรายผลได้ว่า น้ำสลัดสูตรลดปริมาณน้ำมันและไข่แดงที่ร้อยละ 30 ขึ้นไปอาจยังไม่เหมาะสมกับการนำไปผลิตเป็นน้ำสลัดไขมันต่ำเนื่องจากผู้บริโภคยังไม่ยอมรับ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่าการแยกชั้นจะพบว่ามีการแยก

ชั้นที่มากขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน ซึ่งผู้วิจัยเห็นว่าเกิดเนื่องจากขั้นตอนการทำให้เม็ดแป้งเล็กลงยังไม่ประสบผลสำเร็จ เม็ดแป้งที่ได้มีขนาดเล็กลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (จากผลการทดลองที่ 4.6) ดังนั้นควรมีการปรับปรุงวิธีการดัดแปรแป้งให้ได้เม็ดแป้งที่มีขนาดเล็กลงเพื่อที่จะสามารถแขวนลอยในอิมัลชั่นของน้ำสลัดเพื่อให้น้ำสลัดมีความคงตัวมากยิ่งขึ้น ส่วนการดัดแปรเพื่อให้แป้งมีสมบัติเป็นอิมัลซิฟลายเออร์ที่ดีระหว่างน้ำกับน้ำมันถือว่าประสบความสำเร็จ ดังนั้นวิธีการดัดแปรที่จะศึกษาในโครงการวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์น้ำสลัดไขมันต่ำต่อไปคือ การดัดแปรแป้งด้วยออกเทนนิลซัคซินิคแอนไฮไดร์ดร่วมกับการบดด้วยวิธี Ball milling ซึ่งจะได้ทำการศึกษาในโครงการวิจัยต่อไป