

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ระดับการแทนที่ของแป้งดัดแปรและประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา

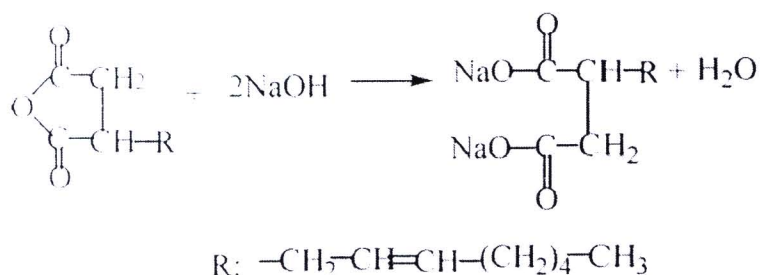
งานวิจัยนี้เลือกสถานะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาโดยอ้างอิงจากรายงานของ Song และคณะ (2006) ที่ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งข้าว (สายพันธุ์ อินดิกา) ดัดแปรด้วยออกทินิลซัคซินิคแอนไฮไดรด์ (OSA) และพบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้ง คือ ใช้แป้งที่ความเข้มข้น 35% ปริมาณ OSA 3% (w/w แป้ง) ทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมงที่ pH 8.5 ทำให้ได้ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด นอกจากนี้ยังมีรายงานของ Hui และคณะ (2009) ที่ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งมันฝรั่งดัดแปรด้วย OSA พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้ง คือ ใช้แป้งที่ความเข้มข้น 35% ปริมาณ OSA 3% (w/w แป้ง) เจือจาง OSA 5 เท่า ทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงที่ pH 8.0 จะได้แป้ง OSA ที่มีระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด

สำหรับการดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วย OSA ในงานวิจัยนี้จะเตรียมแป้งที่ความเข้มข้น 35% โดยใช้ความเข้มข้น OSA 1% และ 3% (w/w แป้ง) ที่มีการเจือจาง 5 เท่าด้วย isopropyl alcohol กำหนดระยะเวลาในการดัดแปรที่ 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่ 35 องศาเซลเซียส และ pH อยู่ในช่วง 8.0-8.5 สำหรับแป้งพุทธรักษาดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (HMT starch) จะเลือกเตรียมแป้งที่สถานะเดียวกับ Watcharatewinkul และคณะ (2009) คือ เตรียมแป้งพุทธรักษาดัดแปรโดยมีความชื้น 25% ใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการดัดแปร 16 ชั่วโมง นำแป้งที่ได้มาทำการดัดแปรต่อด้วย OSA 3% (w/w แป้ง) ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง แป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัดแปร (แป้ง OSA) และแป้งพุทธรักษาดัดแปรด้วยความร้อนชื้นดัดแปรต่อด้วย OSA (แป้ง HOSA) ผลการวิเคราะห์ระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา (RE) แสดงดังตารางที่ 4.1

จากการศึกษาผลของความเข้มข้น OSA 1% และ 3% (w/w แป้ง) ในการดัดแปรแป้งพุทธรักษาที่มีต่อระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้งพุทธรักษากับหมู่ออกทินิลซัคซินิค โดยทำปฏิกิริยาตามสถานะข้างต้น พบว่าเมื่อใช้ปริมาณ OSA 1% ปฏิกิริยาการแทนที่เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ภายในเวลา 2 ชั่วโมง ($RE = 98 \pm 4\%$) ดังนั้นการเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยาเป็น 3 หรือ 4 ชั่วโมง จึงไม่ทำให้ค่า DS สูงขึ้น นอกจากนี้มีงานวิจัยของ Bhosale และ Singhal (2007) ศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวและแป้งอามาแรนที่ดัดแปรด้วย OSA 1%

พบว่าแป้งทั้งสองชนิดมีค่า DS 0.0062 และ 0.0072 ซึ่งต่ำกว่าแป้งพุทธรักษาตัดแปรในงานวิจัยนี้ (DS 0.0081) อาจเนื่องจากงานวิจัยนี้มีการเจือจาง OSA ด้วยแอลกอฮอล์ทำให้มีการกระจายตัวของ OSA อย่างสมบูรณ์และการเติมสารละลาย OSA อย่างช้าๆ ทำให้โอกาสในการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงลดลง

เมื่อเพิ่มปริมาณการใช้ OSA จาก 1% เป็น 3 % (w/w แป้ง) พบว่าแป้งตัดแปรมีระดับการแทนที่มีค่าสูงขึ้น (0.0117-0.0156) แต่ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยากลับลดลงมาก (51-68%) เช่นที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง จะมีค่า DS เพิ่มขึ้นจาก 0.0075 เป็น 0.0117 แต่มีค่า RE ลดลงจาก 98% เป็น 51% ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของ OSA ส่งผลให้ปริมาณของหมู่ออกทิลิลซัคซินิกที่ซึมผ่านเข้าไปในเม็ดแป้งและเกิดปฏิกิริยาการแทนที่ที่หมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของแป้งมากขึ้นทำให้ได้ค่า DS สูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาลดลงอาจเนื่องจาก 1) การซึมผ่านเข้าเม็ดแป้งไม่เร็วพอทำให้มี OSA ที่ค้างอยู่ในสารละลาย ซึ่ง OSA บางส่วนอาจเกิดปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังรูปที่ 4.1 ทำให้สูญเสีย OSA ไปบางส่วน 2) ในช่วงแรกปฏิกิริยาจะเกิดที่ส่วนออสัญฐานที่ OSA เข้าถึงได้ง่ายก่อน ส่วนที่เหลือจะเป็นส่วนที่เข้าถึงยากขึ้นเรื่อยๆ ทำให้เกิดปฏิกิริยาช้าลง การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาน่าจะช่วยให้ RE สูงขึ้นได้ 3) OSA ที่ความเข้มข้นสูงขึ้นอาจมีการละลายไม่สมบูรณ์ บางส่วนอาจอยู่ในสภาพ droplet ทำให้ผ่านเข้าเม็ดแป้งได้ยาก



รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาข้างเคียงระหว่างแป้งกับโซเดียมไฮดรอกไซด์

ที่มา: Song และคณะ (2006)

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Shogren และคณะ (2000) และ Song และคณะ (2006) ที่พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ OSA จากร้อยละ 3 เป็น 15 โดยน้ำหนักแห้ง ทำให้ระดับการแทนที่ของหมู่ออกทิลิลซัคซินิกในแป้งข้าว (สายพันธุ์ อินดิกา) ตัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Bhosale และ Singhal (2007) ศึกษาผลของความเข้มข้นของ OSA จาก 1% เป็น 3% (w/w แป้ง) ทำให้ระดับการแทนที่ในแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจาก 0.0062 เป็น 0.0206 และแป้งอามาแรนซ์เพิ่มขึ้นจาก 0.0072 เป็น 0.0203 และยังพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับการแทนที่ลดลง

เมื่อใช้ปริมาณ OSA เพิ่มสูงขึ้น นั่นคือ การใช้ปริมาณ OSA มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาลดลง

ตารางที่ 4.1 ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้ง OSA1% และ 3% และแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

แป้งพุทธรักษาดัดแปร	ระยะเวลาดัดแปร (ชั่วโมง)	DS	RE (%)
OSA 1%	2	0.0075 ± 0.0003 ^c	97.5 ± 4.3 ^a
	3	0.0080 ± 0.0004 ^c	104.0 ± 5.7 ^a
	4	0.0081 ± 0.0005 ^c	104.7 ± 6.5 ^a
OSA 3%	2	0.0117 ± 0.0005 ^d	50.7 ± 2.3 ^c
	3	0.0142 ± 0.0003 ^{bc}	61.5 ± 1.2 ^{cd}
	4	0.0156 ± 0.0008 ^b	67.6 ± 3.7 ^c
HOSA 3%	2	0.0123 ± 0.0016 ^{cd}	56.2 ± 6.9 ^{dc}
	3	0.0175 ± 0.0024 ^b	70.3 ± 10.2 ^c
	4	0.0205 ± 0.0008 ^a	85.0 ± 7.1 ^b

a, b, c ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวนั่ง แสดงถึงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.005)

ที่ปริมาณ OSA3 % (w/w แป้ง) การเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปรแป้งจาก 2 ชั่วโมง เป็น 3 และ 4 ชั่วโมง ส่งผลให้แป้งดัดแปรมีค่า DS และ RE สูงขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้น โดยแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 3 และ 4 ชั่วโมง มีค่า DS เท่ากับ 0.0142 และ 0.0156 และ RE เท่ากับ 61 และ 68% ตามลำดับ การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 4 ชั่วโมง แม้จะทำให้ได้ค่า DS สูงขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยายังมีค่าค่อนข้างต่ำ กล่าวคือ ยังมี OSA มากกว่า 30% ที่ยังคงเหลืออยู่หรือเปลี่ยนรูปไป ซึ่งอาจเกิดจากข้อจำกัดต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น

4.2 การเพิ่มระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา

แนวทางในการเพิ่มค่า RE อาจทำได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือหาวิธีการที่ช่วยให้ OSA ผ่านเข้าไปในเม็ดแป้งให้ได้มากขึ้นและเร็วขึ้น ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น (แป้ง HMT) เป็นวัตถุดิบเริ่มต้น เนื่องจาก Watcharatwinkul และคณะ (2009) รายงานว่าหลังการดัดแปรแป้งพุทธรักษาด้วยความร้อนชื้นจะสังเกตเห็นช่องว่างภายในเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้พื้นผิวเม็ดแป้งอาจเปลี่ยนไปทำให้ OSA ผ่านเข้าไปในเม็ดแป้งและเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลแป้งได้ดีขึ้น

การดัดแปรแป้ง HMT

จากการศึกษาการดัดแปรแป้ง HMT ในสถานะเดียวกันกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร (แป้ง native) โดยใช้ OSA3% (w/w แป้ง) พบว่าที่ระยะเวลาในการดัดแปรเท่ากัน แป้ง HMT ดัดแปร (HOSA3%) มีค่า DS และ RE สูงกว่าแป้ง native ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง แป้ง HOSA3% มีค่า DS และ RE เท่ากับ 0.0205 และ 85% ตามลำดับ (ตารางที่ 4.1) ดังนั้นผลการทดลองนี้จึงเป็นการยืนยันสมมุติฐานที่ว่าเม็ดแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีช่องว่างภายในเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้นหรือมีลักษณะพื้นผิวเม็ดแป้งที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้หม้อออกทิตินิลซัคซินิคสามารถซึมผ่านเข้าไปถึงโมเลกุลของแป้งได้ดีขึ้น ส่งผลให้ระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2010) ที่ศึกษาการดัดแปรแป้งข้าวโดยนำแป้งไปบดก่อนด้วยวิธี ball milling แล้วนำไปดัดแปรต่อด้วย OSA พบว่าแป้งที่ผ่านการบดแล้วดัดแปรด้วย OSA มีระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นจาก DS 0.01700 และ RE 73.46% เป็น DS 0.02037 และ RE 88.03%

การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา

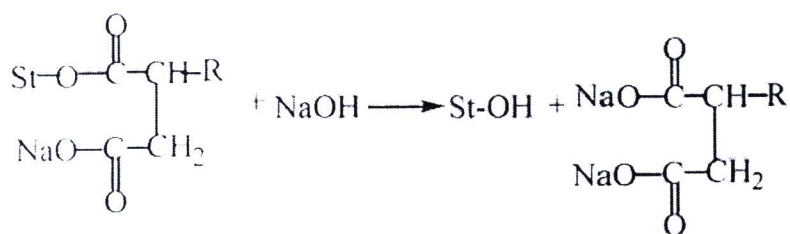
จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปรแป้งทำให้ค่า DS และ RE เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาต่อว่าระยะเวลาใดในการดัดแปรแป้งจะทำให้แป้ง OSA3% และแป้ง HOSA3% มีค่า DS และ RE มีค่าสูงสุด ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้ง OSA3% และแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลาต่างๆ

แป้งพุทธรักษา ดัดแปร	ระยะเวลาดัดแปร (ชั่วโมง)	DS	RE (%)
OSA3%	2	0.0118 ± 0.0010 ^h	51.2 ± 4.4 ^h
	3	0.0141 ± 0.0013 ^{ef}	60.8 ± 5.5 ^{ef}
	4	0.0160 ± 0.0006 ^d	69.3 ± 2.5 ^d
	5	0.0146 ± 0.0010 ^c	63.0 ± 4.1 ^c
	6	0.0136 ± 0.0004 ^{efg}	58.9 ± 1.8 ^{efg}
	7	0.0128 ± 0.0007 ^{fgh}	55.3 ± 2.9 ^{fgh}
HOSA3%	2	0.0125 ± 0.0006 ^{gh}	54.1 ± 2.6 ^{gh}
	3	0.0167 ± 0.0006 ^{cd}	72.0 ± 2.6 ^{cd}
	4	0.0197 ± 0.0011 ^b	85.3 ± 4.8 ^b
	5	0.0209 ± 0.0006 ^{ab}	90.4 ± 2.6 ^{ab}
	6	0.0212 ± 0.0006 ^a	91.7 ± 2.6 ^a
	7	0.0175 ± 0.0008 ^c	75.7 ± 3.3 ^c

a, b, c ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวนั่ง แสดงถึงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.005)

จากการศึกษาผลของการเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปรแป้งที่มีต่อระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของแป้งพุทธรักษา กับ OSA โดยกำหนดระยะเวลาในการดัดแปรแป้งเพิ่มมากขึ้น พบว่าทั้งแป้ง OSA3% และแป้ง HOSA3% มีแนวโน้มเดียวกันคือ การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ได้แป้งดัดแปรที่มีระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่ระยะเวลานึ่ง ซึ่งถ้าเพิ่มเวลาการทำปฏิกิริยาต่อไปอีกจะทำให้ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยามีค่าลดลง โดยแป้ง OSA3% มีค่า DS และ RE สูงสุดที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง (DS เท่ากับ 0.0160 และ RE เท่ากับ 69%) ส่วนแป้ง HOSA3% มีค่า DS และ RE สูงสุดที่ระยะเวลา 5-6 ชั่วโมงโดยมีค่า DS เท่ากับ 0.0209-0.0212 และ RE เท่ากับ 90-92% การเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปรแล้วทำให้ระดับการแทนที่ลดลงอาจเกิดจากปฏิกิริยาข้างเคียง โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification เอสเทอร์ที่เกิดขึ้นจึงถูกย่อยสลายทำให้ OSA มีปริมาณลดลง (รูปที่ 4.2)



รูปที่ 4.2 ปฏิกิริยาข้างเคียงระหว่างแป้งกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดปฏิกิริยาสaponification
ที่มา: Song และคณะ (2006)

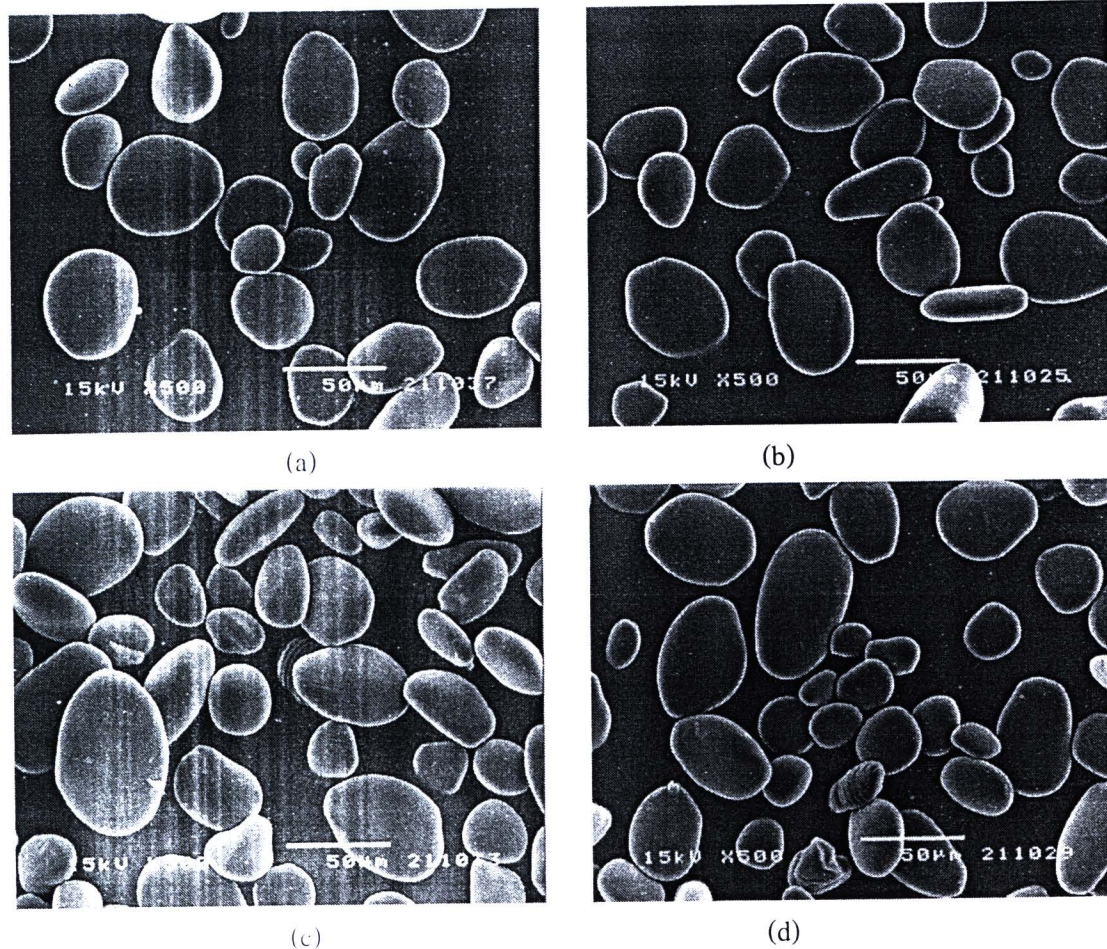
เช่นเดียวกับการทดลองของ Song และคณะ (2006) ที่ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งอินดิคาไรซ์ดัดแปรด้วย OSA 3% พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งคือ 4 ชั่วโมง ทำให้ได้แป้งดัดแปรที่มีค่า DS 0.018 และ RE 78% การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 5 และ 6 ชั่วโมงพบว่า DS และ RE จะมีค่าลดลง

แป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 1 และ 3% (w/w แป้ง) นี้ จัดเป็นแป้งชนิดที่มีระดับการแทนที่ต่ำ (DS ไม่เกิน 0.023) ซึ่งเป็นแป้งที่อนุญาตให้นำไปใช้ในอาหารได้ตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม (2535)

4.3 ลักษณะของเม็ดแป้งศึกษาโดย scanning electron microscope

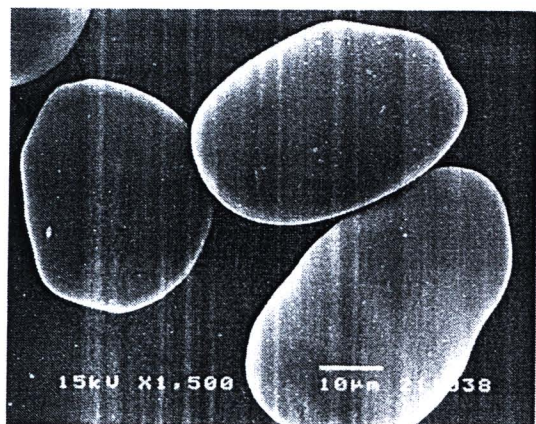
เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปร , แป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 3% (w/w แป้ง) ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง, แป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วยความร้อนชื้น และแป้งพุทธรักษาผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นตัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 3% (w/w แป้ง) ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ไปศึกษาลักษณะเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 500 และ 1500 เท่า ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3 – 4.6 พบว่า เม็ดแป้ง native มีลักษณะกลมแบนหรือเป็นรูปไข่ มีขนาด 10-100 μm พื้นผิวเรียบ ส่วนแป้งพุทธรักษาตัดแปรทั้ง แป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วย OSA, แป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วยความร้อนชื้น และแป้งพุทธรักษาผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนชื้นตัดแปรด้วย OSA พบว่าลักษณะเม็ดแป้งโดยทั่วไปไม่แตกต่างจากแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปร คือ ยังคงสภาพของเม็ดแป้ง รูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่แป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วย OSA ที่ตัดแปรโดยใช้เวลานานขึ้น (3-4 ชั่วโมง) พื้นผิวของเม็ดแป้งบางส่วนจะมีลักษณะขรุขระและอาจมีรอยแตกบ้างเล็กน้อย

Liu และคณะ (2008) ศึกษาลักษณะเม็ดแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวที่ตัดแปรด้วย OSA ด้วย SEM พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร เช่นเดียวกับรายงานของ Wang และคณะ, 2010 ที่ศึกษาลักษณะเม็ดแป้งมันฝรั่งตัดแปรด้วย OSA พบว่าลักษณะทางสัณฐานของเม็ดแป้งไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่การศึกษาของ Song และคณะ (2006) ที่รายงานถึงลักษณะของเม็ดแป้งข้าว (สายพันธุ์ อินดิกา) ที่ผ่านการตัดแปรด้วย OSA ด้วย SEM พบว่าลักษณะรูปร่างเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไปบ้างเล็กน้อย และลักษณะรูพรุนจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของระดับการแทนที่ของหมู่ออกซิเจนลิกซินิก เช่นเดียวกับการทดลองของ Hui และคณะ (2009) ที่ศึกษาลักษณะของเม็ดแป้งมันฝรั่งที่ตัดแปรด้วย OSA พบว่า การตัดแปรแป้งด้วย OSA ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ผิวของเม็ดแป้งโดยพบว่ามีรอยขรุขระเล็กน้อยนอกจากนี้ในงานวิจัยอื่นๆ ส่วนใหญ่จะพบว่าการตัดแปรแป้งด้วย OSA ที่ระดับการแทนที่ต่ำ ไม่ทำให้ลักษณะของเม็ดแป้งหลังการตัดแปรเปลี่ยนแปลงไป

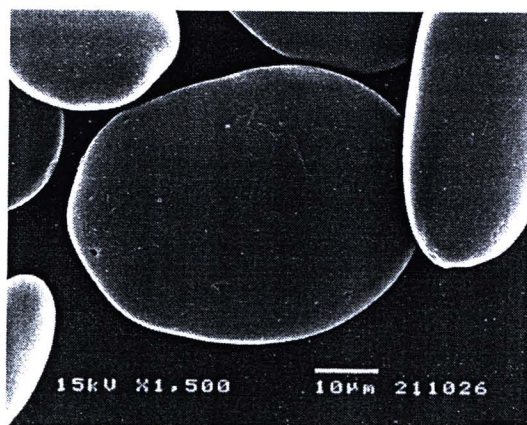


รูปที่ 4.3 ลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งดัดแปรด้วย OSA3% ที่ระยะเวลาต่างๆ จาก SEM กำลังขยาย 500 เท่า

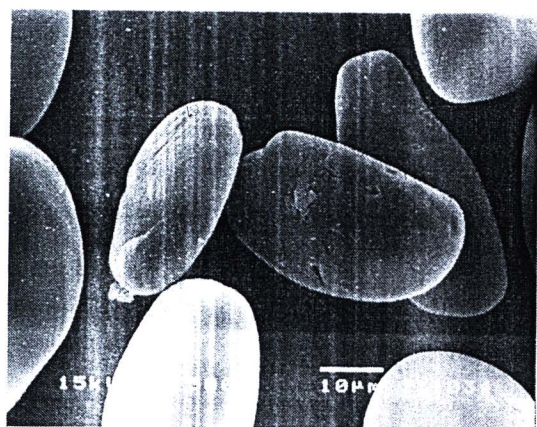
- (a) เม็ดแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร
- (b) เม็ดแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เม็ดแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เม็ดแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



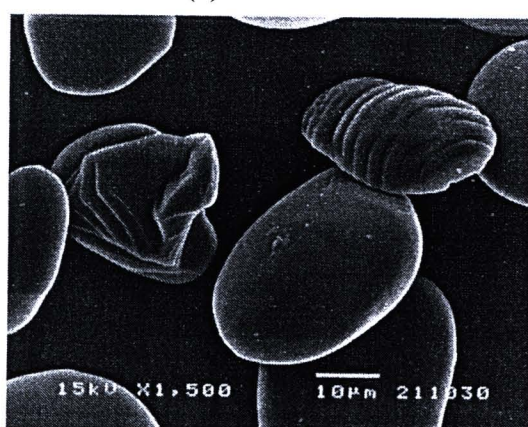
(a)



(b)



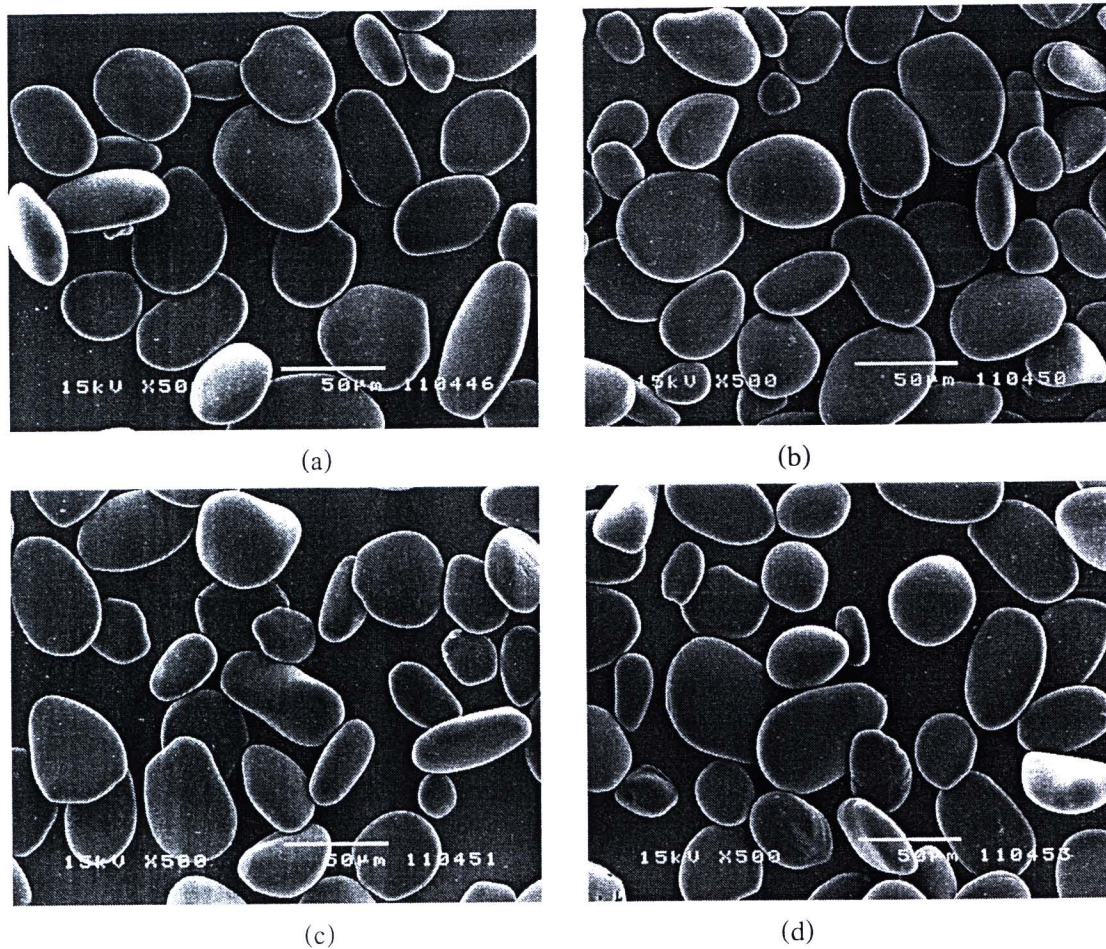
(c)



(d)

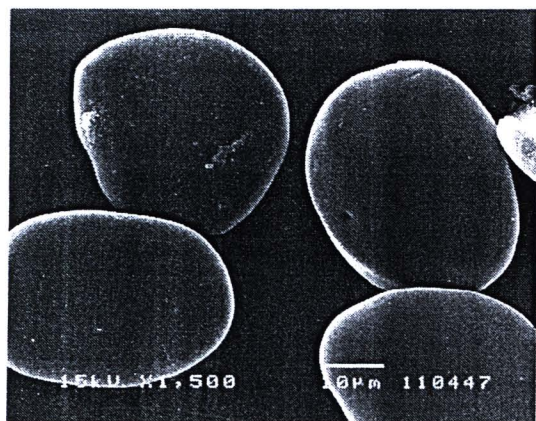
รูปที่ 4.4 ลักษณะของเม็ดแป้งพวกรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งดัดแปรด้วย OSA3% ที่ระยะเวลาต่างๆ จก SEM กำลังขยาย 1500 เท่า

- (a) เม็ดแป้งพวกรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร
- (b) เม็ดแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เม็ดแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เม็ดแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

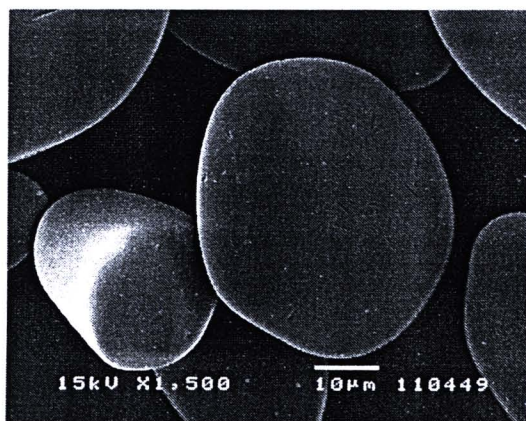


รูปที่ 4.5 ลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วยความร้อนชื้นและแป้ง HOSA3% ตัดแปรที่ระยะเวลาต่างๆ จาก SEM กำลังขยาย 500 เท่า

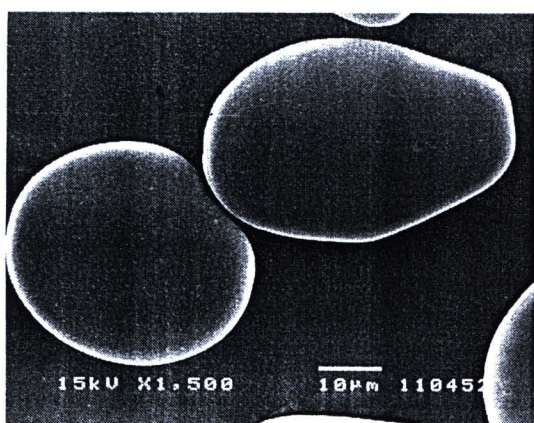
- (a) เม็ดแป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วยความร้อนชื้น
- (b) เม็ดแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เม็ดแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เม็ดแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



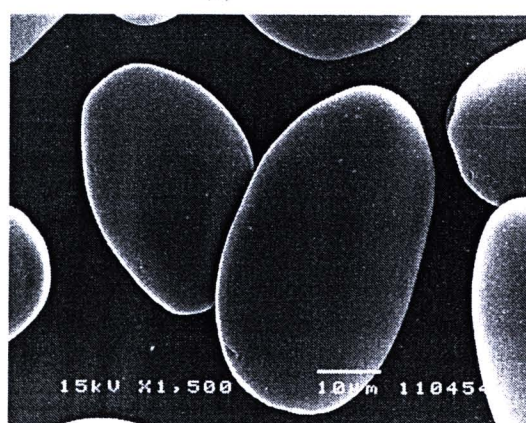
(a)



(b)



(c)



(d)

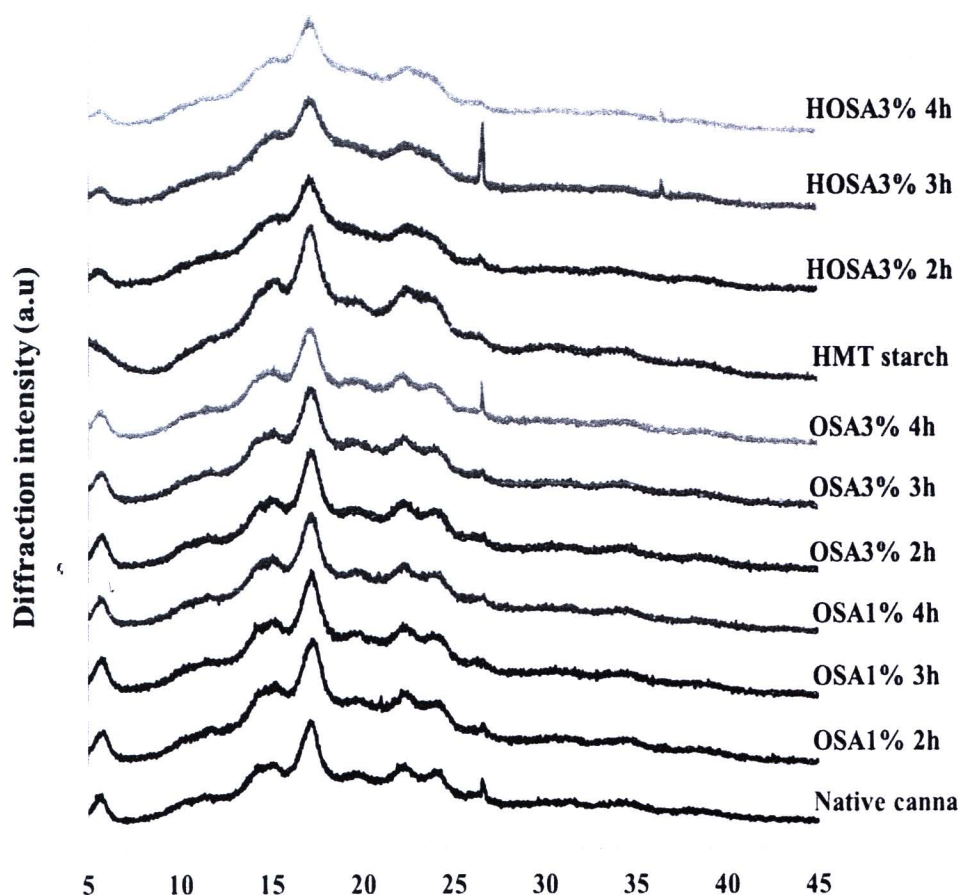
รูปที่ 4.6 ลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วยความร้อนชื้นและแป้ง HOSA3% ตัดแปรที่ระยะเวลาต่างๆ จาก SEM กำลังขยาย 1500 เท่า

- (a) เม็ดแป้งพุทธรักษาตัดแปรด้วยความร้อนชื้น
- (b) เม็ดแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เม็ดแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เม็ดแป้ง HOSA3% ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

4.4 ลักษณะโครงสร้างผลึกศึกษาด้วย X-ray powder diffractometer

เมื่อนำแป้งพุดรรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร, แป้งพุดรรักษาดัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 1 และ 3% (w/w แป้ง) ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง แป้งพุดรรักษาดัดแปรด้วยความร้อนชื้นและแป้งพุดรรักษาผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นดัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 3% (w/w แป้ง) ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกโดยใช้เครื่อง X-ray powder diffractometer ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่า แป้งพุดรรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรมีพิกขนาดเล็ที่ 5.6° พิกเดี่ยวที่ 17° และพิกคู่ที่ 22° และ 24° ซึ่งเป็นลักษณะของแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ B การดัดแปรแป้งด้วย OSA ที่สภาวะต่างๆ พบว่าไม่ทำให้ลักษณะพิกของแป้งเปลี่ยนไป แต่แป้งพุดรรักษาที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นมีรูปแบบของพิกเปลี่ยนไป โดยพิกที่ 5.6° จะมีขนาดเล็กลง และพิกคู่ที่ 22° และ 24° จะรวมตัวเป็นพิกเดี่ยว สำหรับแป้งพุดรรักษาผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นดัดแปรด้วย OSA ก็มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับแป้งพุดรรักษาที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนชื้น ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่าการดัดแปรด้วยความร้อนชื้นส่งผลให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้ง โดยเฉพาะในส่วนเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินภายในเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Watcharatewinkul และคณะ (2009) ที่ศึกษาการดัดแปรแป้งพุดรรักษาด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส และมีความชื้นไม่เกิน 25% พบว่าลักษณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย การดัดแปรแป้งในสภาวะที่มีอุณหภูมิและความชื้นสูงมากขึ้นอาจทำให้โครงสร้างผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงจากแบบ B เป็น A หรือ B+A ได้ (Vermeulen และคณะ, 2006; Kawabata และคณะ, 1994; Gunaratne และ Hoover, 2002; Hoover และ Vasanthan, 1994; Genkina และคณะ, 2004)

จากการศึกษาในครั้งนี้อาจสรุปได้ว่าการแทนที่ของหมู่ออกทินิลซัคซินิคไม่ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งดัดแปรยังคงเป็นแบบ B-type เหมือนกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งบ่งชี้ว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันน่าจะเกิดขึ้นในส่วนอัดฐานของเม็ดแป้งทำให้โครงสร้างผลึกไม่เปลี่ยนแปลง (Shorgen และคณะ, 2000; Wang และคณะ, 2006; Song และคณะ, 2006a, 2006b; Hui และคณะ, 2009; Bhosale และ Singhal, 2007)

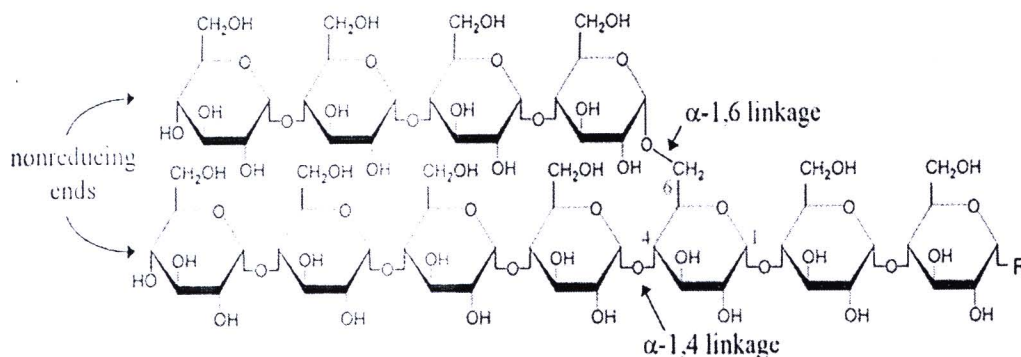


รูปที่ 4.7 ลักษณะโครงสร้างผลึกของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งที่ผ่านการดัดแปร

4.5 หมู่ฟังก์ชันภายในโครงสร้างของแป้งดัดแปร

เมื่อพิจารณาจากโครงสร้างภายในโมเลกุลแป้ง (รูปที่ 4.8) ไม่ว่าจะเป็นอะไมโลสหรืออะไมโลเพคตินซึ่งประกอบด้วยหน่วยย่อยกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกจะเห็นว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบในโมเลกุลแป้ง คือ หมู่ -OH โดยฟังก์ชันหลักๆ ที่พบในสเปกตรัมของแป้งมีดังนี้ (Song และคณะ, 2006a)

- ฟังก์ชันที่ $3428-3436\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงหมู่ -OH
- ฟังก์ชันที่ $1155, 1080, 1021$ และ 930 cm^{-1} เกี่ยวข้องกับ C-O bond stretching
- ฟังก์ชันที่ 1638 cm^{-1} คาดว่าน่าจะมาจากโมเลกุลน้ำที่จับกับแป้ง (tightly bound water)
- ฟังก์ชันที่ 2928 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ C-H stretching

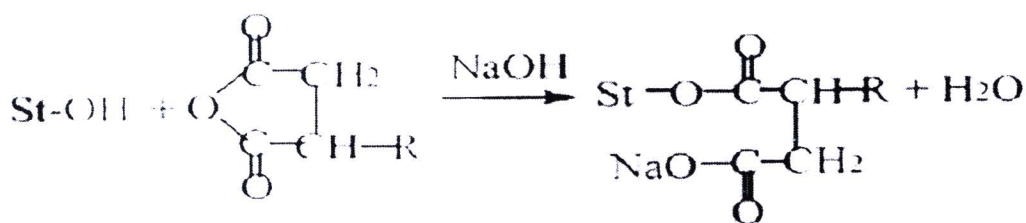


รูปที่ 4.8 ลักษณะของโมเลกุลกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกในโมเลกุลของแป้ง

ที่มา: <http://guweb2.gonzaga.edu/faculty/cronk/biochem/G-index.cfm?definition=glycogen>

เมื่อเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับ OSA จะเกิดพันธะเอสเทอร์ (-C(=O)-O-) เกิดขึ้น (รูปที่ 4.9) ดังนั้นหมู่คาร์บอนิล (C=O) ในพันธะเอสเทอร์จึงเป็นตัวบ่งชี้ว่ามีปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นในแป้งก็ผ่านการดัดแปรด้วย OSA ดังนั้นพีคที่จะพบได้มีดังนี้

- พีคที่ 1572 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ carboxylate RCOO^-
- พีคที่ 1724 cm^{-1} แสดงถึงหมู่ ester carbonyl group



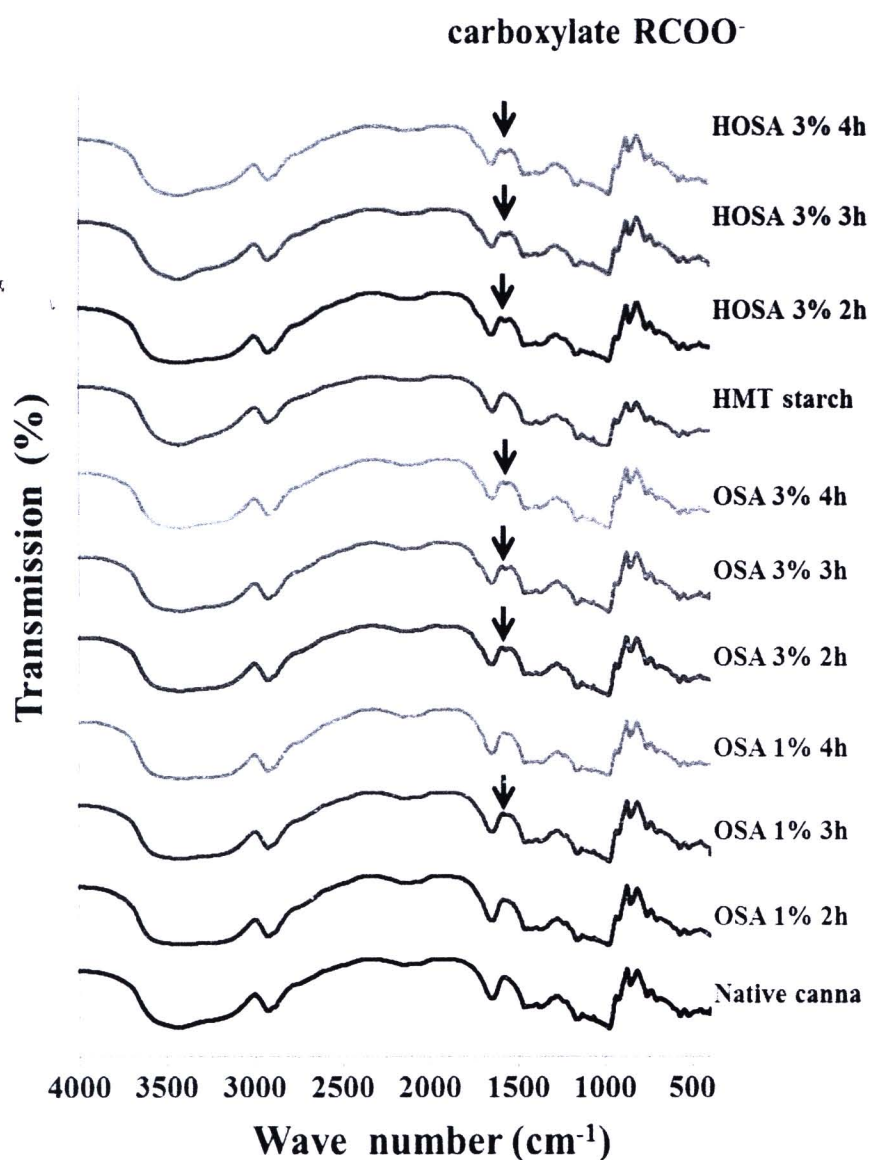
รูปที่ 4.9 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับ OSA

โดยมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ที่มา: Song และคณะ (2006)

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในแป้งพืชรักษาศึกษาด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR) แสดงดังรูปที่ 4.10 พบว่าแป้งดัดแปร OSA1% 3h, แป้งดัดแปร OSA3% และแป้งดัดแปร HOSA3% มีพีคใหม่ที่ช่วง $1564\text{--}1568\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงว่าแป้งดัดแปรมีหมู่ RCOO^- (ester carbonyl group) เพิ่มขึ้นจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน อย่างไรก็ตามไม่พบพีคนี้ในแป้งดัดแปร OSA1% 2h และ OSA1% 4h อาจเนื่องมาจากมีระดับการแทนที่ต่ำทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นพีคนี้ได้

ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Hui และคณะ (2009), Song และคณะ (2006), Bai และคณะ (2009), Wang และคณะ, (2009) ที่รายงานว่าพบพีคของหมู่ RCOO^- ที่ตำแหน่ง 1572 cm^{-1} นอกจากนี้ยังรายงานว่ามีพีคใหม่เกิดขึ้นที่ 1724 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงหมู่เอสเทอร์คาร์บอนิล (Fang และคณะ, 2004; Marcazzan และคณะ, 1999; Thygesen และคณะ, 2003) แต่ในงานวิจัยนี้ไม่พบพีคใหม่นี้

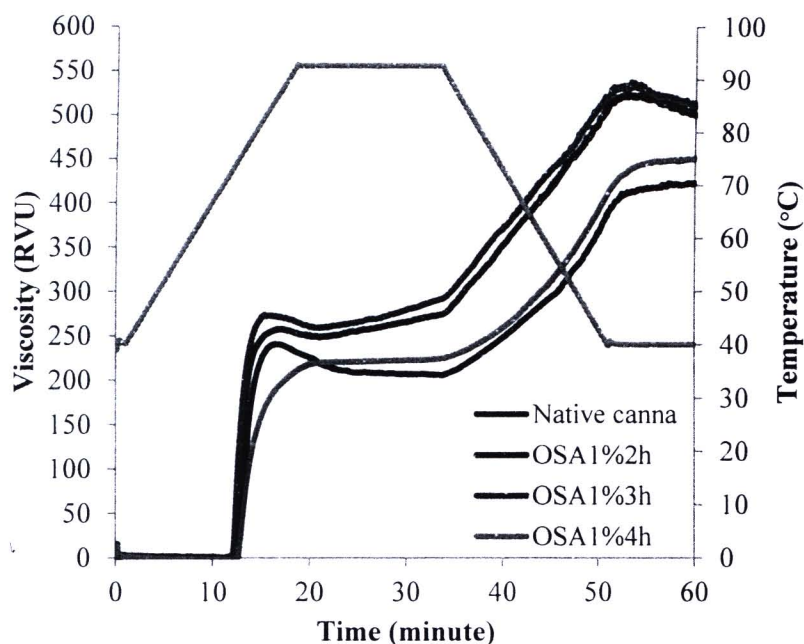


รูปที่ 4.10 สเปกตรัมของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งที่ผ่านการดัดแปร

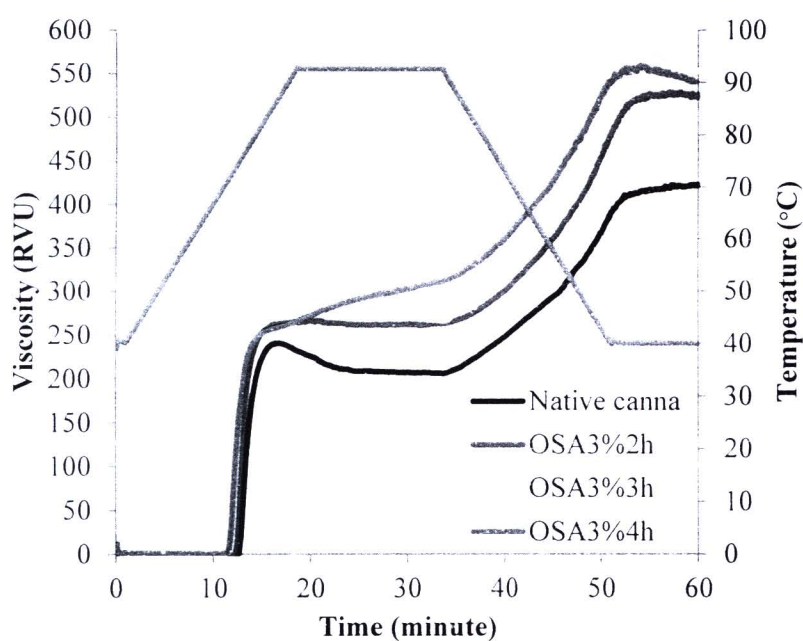
4.6 พฤติกรรมความหนืดของแป้งศึกษาโดย RVA

เมื่อนำแป้งพวทรักษาไปศึกษาสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer ที่ความเข้มข้นแป้ง 8% (โดยน้ำหนัก) อะไมโลแกรมของแป้งพวทรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปร และแป้งที่ผ่านการตัดแปร (แป้ง OSA, แป้ง HMT และ แป้ง HOSA) แสดงดังรูปที่ 4.11 และค่าพารามิเตอร์ความหนืดต่างๆ ที่ได้จากอะไมโลแกรมแสดงในตารางที่ 4.3 แป้งพวทรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีความหนืดสูงสุด 243.8 RVU แป้งมีค่า breakdown ที่ค่อนข้างต่ำคือ 39.2 RVU แต่มีค่า setback ที่สูง (216.1 RVU) อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเท่ากับ 74.0 องศาเซลเซียส เมื่อทำการตัดแปร แป้งด้วย OSA 1% และ 3% พบว่าอะไมโลแกรมมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปดังรูปที่ 4.11A และ รูปที่ 4.11B ตามลำดับ แป้งที่ตัดแปรด้วย OSA 1% มีความหนืดสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการตัดแปรแป้ง 2 และ 3 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 4 ชั่วโมง แป้งตัดแปรกลับมีความหนืดลดลงโดยมีค่าใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร สำหรับแป้งที่ตัดแปรด้วย OSA 3% การเพิ่มขึ้นของความหนืดเมื่อใช้เวลาในการตัดแปรแป้ง 2 และ 3 ชั่วโมง มีแนวโน้มเช่นเดียวกับแป้งที่ตัดแปรด้วย OSA 1% ส่วนแป้งที่ตัดแปรเป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีความหนืดที่ใกล้เคียงกับแป้งตัดแปรที่ 3 ชั่วโมง การเพิ่มขึ้นของความหนืดของแป้งตัดแปรอาจเนื่องมาจากแป้งพองตัวได้มากขึ้นเนื่องจากหมู่แทนที่ OSA มีขนาดใหญ่และมีหมู่คาร์บอกซิลอิสระทำให้น้ำสามารถผ่านเข้าเม็ดแป้งได้มากขึ้น และ/หรืออาจเนื่องจากโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (ที่กระจายออกมาจากเม็ดแป้ง) ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจากการแทนที่ด้วยหมู่ออกซิเจนิกซินิกทำให้มีความต้านทานการไหลมากขึ้น นั่นคือ จะทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น สำหรับแป้งชนิดอื่นๆ เช่น แป้งข้าว (He และคณะ, 2006; Song และคณะ, 2006; Thirathumthavorn และ Charoenrein, 2006), แป้งมันสำปะหลัง (Thirathumthavorn และ Charoenrein, 2006), แป้งข้าวโพดข้าวเหนียว (Bhosale และ Singhal, 2007; Liu และคณะ, 2008), แป้งมันฝรั่ง (Bao และคณะ, 2003; Hui และคณะ, 2009; Wang และคณะ, 2010) ก็มีรายงานว่ามีความหนืดสูงขึ้นเช่นกัน เมื่อผ่านการตัดแปรด้วย OSA Thirathumthavorn และ Charoenrein, 2006 ได้ให้เหตุผลว่าการที่แป้ง OSA มีความหนืดสูงอาจเนื่องจากเหตุผล 3 ประการคือ 1) แป้ง OSA มีการพองตัวสูงซึ่งเป็นผลมาจาก steric hindrance 2) เกิด hydrophobic interaction ระหว่างโมเลกุล และ 3) อาจเกิด amylose OSA inclusion complex ระหว่างหมู่ OSA ในโมเลกุลของอะไมโลสกับอะไมโลเพคตินที่อยู่ใกล้กัน

A



B



รูปที่ 4.11 อะไมโลแกรมของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งดัดแปรด้วย OSA1% (A) และ 3% (B)

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) ของแป้งที่ดัดแปรด้วย OSA 1% และ 3% ต่ำกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร และอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของแป้งมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของ OSA ที่เพิ่มขึ้น โดยแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร

มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด 74.0 องศาเซลเซียส ส่วนแป้งที่ดัดแปรด้วย OSA1% ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลงอยู่ในช่วง 72.2-74.0 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ OSA เป็น 3% (w/w แป้ง) ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง ทำให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลงเป็น 72.1, 71.2 และ 71.6 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hui และคณะ (2009) ที่พบว่าแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA มีอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดลดลง การลดลงของอุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดเป็นผลจากการเติมหมู่ออกทีนิลซัคซินิกเข้าไปแทนที่ในโมเลกุลของแป้ง โดยเฉพาะในส่วนออสเทนฐานของเม็ดแป้ง ทำให้การยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของแป้งมีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากหมู่ออกทีนิลซัคซินิกไปขัดขวางการยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล (Rutenberg, 1980) ส่งผลให้บริเวณออสเทนฐานของเม็ดแป้งมีความแข็งแรงลดลง ดังนั้นเมื่อให้ความร้อนแก่แป้ง OSA จะพองตัวได้เร็วกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร (Rutenberg และ Solarck, 1984)

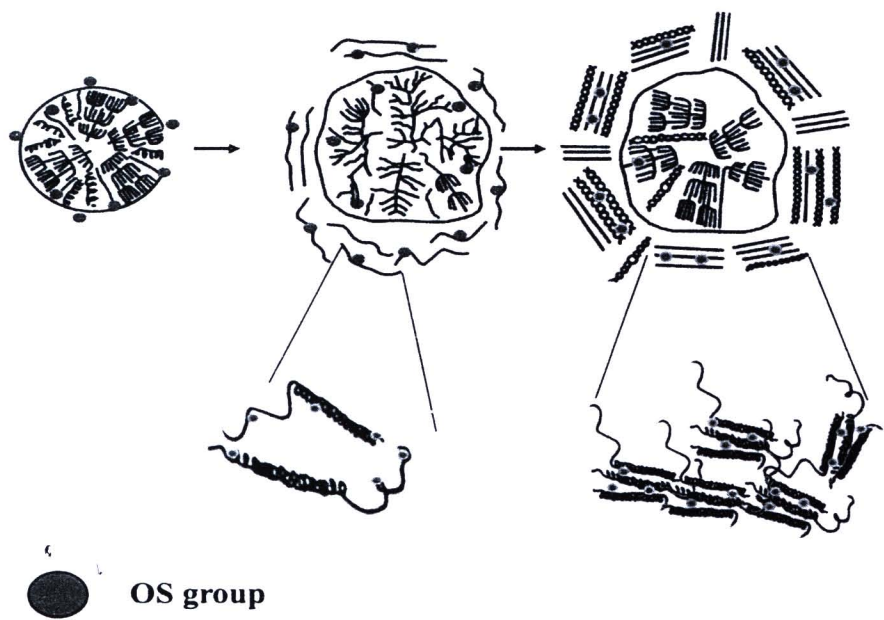
ตารางที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ทางด้านความหนืดของแป้งพุทธรักษา

Parameters	Peak viscosity (RVU)	Breakdown (RVU)	Setback (RVU)	Pasting Temperature (°C)
Native canna	243.8 ± 4.6	39.3 ± 5.8	216.1 ± 1.4	74.0 ± 0.0
OSA1%2h	256.5 ± 1.4	ND	237.2 ± 21.0	72.7 ± 0.2
OSA1%3h	275.8 ± 2.7	20.4 ± 7.7	249.5 ± 1.5	72.2 ± 0.0
OSA1%4h	ND	ND	ND	74.0 ± 0.0
OSA3%2h	267.3 ± 2.0	12.3 ± 10.1	256.3 ± 12.1	72.1 ± 0.5
OSA3%3h	289.0 ± 0.1	20.6 ± 3.8	287.0 ± 1.3	71.2 ± 0.0
OSA3%4h	ND	ND	ND	71.6 ± 0.0
HOSA3%2h	ND	ND	ND	89.7 ± 1.4
HOSA3%3h	ND	ND	ND	88.0 ± 4.5
HOSA3%4h	ND	ND	ND	90.2 ± 0.7

*หมายเหตุ ตัวอักษร ND (Non detect) คือ ไม่สามารถหาค่าได้

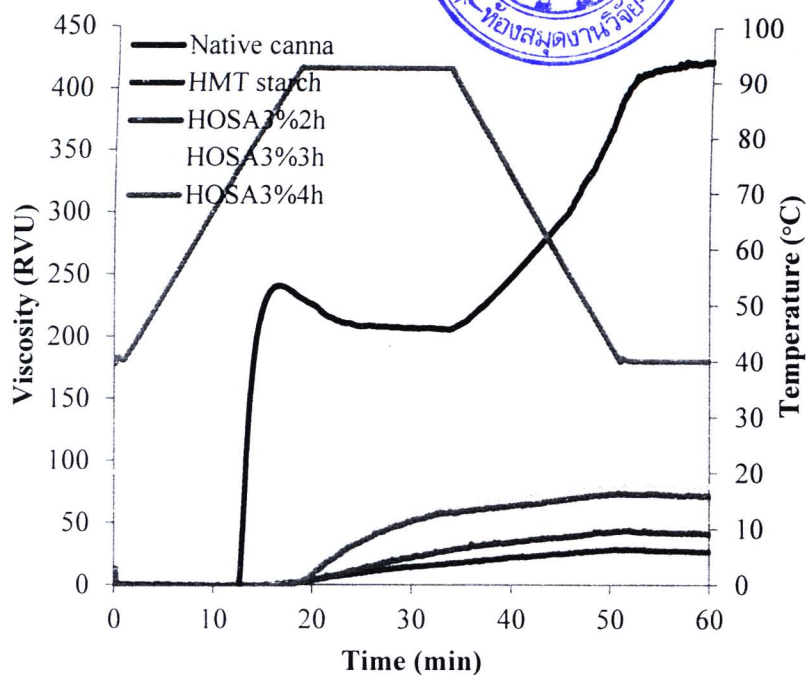
สำหรับค่า breakdown (ตารางที่ 4.3) ของแป้งที่ดัดแปรด้วย OSA พบว่ามีค่าลดลงจากแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร โดยค่า Breakdown ลดลงจาก 39.2 RVU มาอยู่ในช่วง 4.9-20.6 RVU สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bhosale & Singhal (2007) ที่พบว่าแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA เมื่อความเข้มข้น OSA สูงขึ้น ทำให้แป้งมีการพองตัวเพิ่มขึ้น ความหนืดของแป้งเพิ่มขึ้นและค่า breakdown ลดลง

พารามิเตอร์ทางด้านการหนืดของแป้งอีกประการหนึ่งที่น่าสนใจคือ ค่า setback ซึ่งปกติจะใช้บ่งบอกถึงความสามารถในการคืนตัวของแป้ง (การจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลสทำให้เกิดสภาพ gel network) ซึ่งคาดว่า การเติมหมู่ออกทิลซัคซินิคที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้เกิดความระเกะระกะของโครงสร้าง (steric hindrance) ทำให้แป้งเกิดการคืนตัวยากขึ้นส่งผลให้ setback มีค่าลดลง แต่จากการทดลองพบว่า แป้งดัดแปรด้วย OSA มีค่า setback สูงขึ้น โดยในแป้งดัดแปร OSA1% ที่ระยะเวลา 2, 3 และ 4 ชั่วโมง จะมีค่า setback เพิ่มขึ้นจาก 216.1 RVU เป็น 237.2, 249.5 และ 248.4 RVU และในแป้งดัดแปร OSA3% มีค่า setback เท่ากับ 256.2, 287.0 และ 269.7 RVU การที่แป้งพุทธรักษาดัดแปร มีค่า setback เพิ่มขึ้น อาจอธิบายได้ว่า เมื่อแป้งได้รับความร้อนจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น จนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสจะกระจายออกมา (ดังรูปที่ 4.10) เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติที่อุ้มน้ำได้ดี ทำให้ความหนืดสูงขึ้น ในกรณีของแป้งดัดแปรที่มีการแทนที่ด้วยหมู่ต่างๆ เช่น หมู่แอซิติล หมู่ไฮดรอกซีโพรพิล ซึ่งมีโครงสร้างระเกะระกะทำให้อะไมโลสกลับมาจับกันได้ยาก มักพบว่า setback มีค่าลดลง (Saartrat และคณะ, 2005; Chuenkamol และคณะ, 2007) หมู่ออกทิลซัคซินิคก็เป็นหมู่แทนที่ที่มีขนาดใหญ่ (ใหญ่กว่าหมู่แอซิติลและหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลมาก) จึงน่าจะขัดขวางการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของอะไมโลสได้ดี (setback ควรมีค่าลดลง) แต่กลับพบว่าแป้ง OSA มีค่า setback สูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากหมู่ออกทิลซัคซินิคมีสายไฮโดรคาร์บอนที่ยาว (8C) ทำให้มีสภาพความเป็นไฮโดรโฟบิกสูง เมื่อโมเลกุลอะไมโลสที่มีหมู่ออกทิลซัคซินิคมาอยู่ใกล้กัน อาจมีแรงกระทำ hydrophobic interaction ระหว่างกันดังรูปที่ 4.12 ดังนั้นจึงเป็นแรงที่เสริมกับพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหสามมิติได้ดีขึ้น ส่งผลให้มีค่า setback สูงขึ้น Thirathumthavorn และ Charoenrein (2006) ก็พบเช่นเดียวกันว่า แป้งข้าวและแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการดัดแปรด้วย OSA มีค่า setback สูงกว่าแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร



รูปที่ 4.12 ลักษณะการเกิดเจลตาตินซ์ของเม็ดโพรพิลีนดัดแปรด้วย OSA

สำหรับอะโมโลแกรมของโพรพิลีนดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นและแป่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นดัดแปรด้วย OSA แสดงดังรูปที่ 4.13 พบว่าโพรพิลีนดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีความหนืดลดลงอย่างมาก อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดอยู่ที่ประมาณ 90 องศาเซลเซียส และไม่มีค่า Breakdown เนื่องจากการดัดแปรด้วยความร้อนส่งผลให้โมเลกุลโพรพิลีนจัดเรียงตัวใหม่ทำให้เม็ดโพรพิลีนมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อนำแป่งที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นดัดแปรด้วย OSA พบว่าแป่ง HOSA มีความหนืดเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแป่งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นโดยความหนืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการดัดแปร อย่างไรก็ตามความหนืดของแป่ง HOSA ก็ยังต่ำกว่าแป่งที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป่งดัดแปรด้วย OSA มากทั้งๆที่แป่งมีค่า DS สูงกว่า จากการศึกษาคุณสมบัติของแป่ง HOSA พบว่าแป่งมีความหนืดต่ำ เม็ดแป่งมีความแข็งแรงมาก ดังนั้นแป่งชนิดนี้จึงมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด (thickener) แต่อาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการแป่งที่มีความไม่ชอบน้ำสูง มีความแข็งแรง ทนต่อความร้อนได้ดี เช่น แป่งที่ใช้เคลือบถุงมือทางการแพทย์และอาจพัฒนาแป่งชนิดนี้ต่อไปให้มีคุณสมบัติเรียบลื่น มีลักษณะ free flowing ซึ่งอาจนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางได้ เช่น ใช้ในแป่งฟูลอดแข็งที่มีคุณสมบัติด้านการดูดซับความมันบนใบหน้า



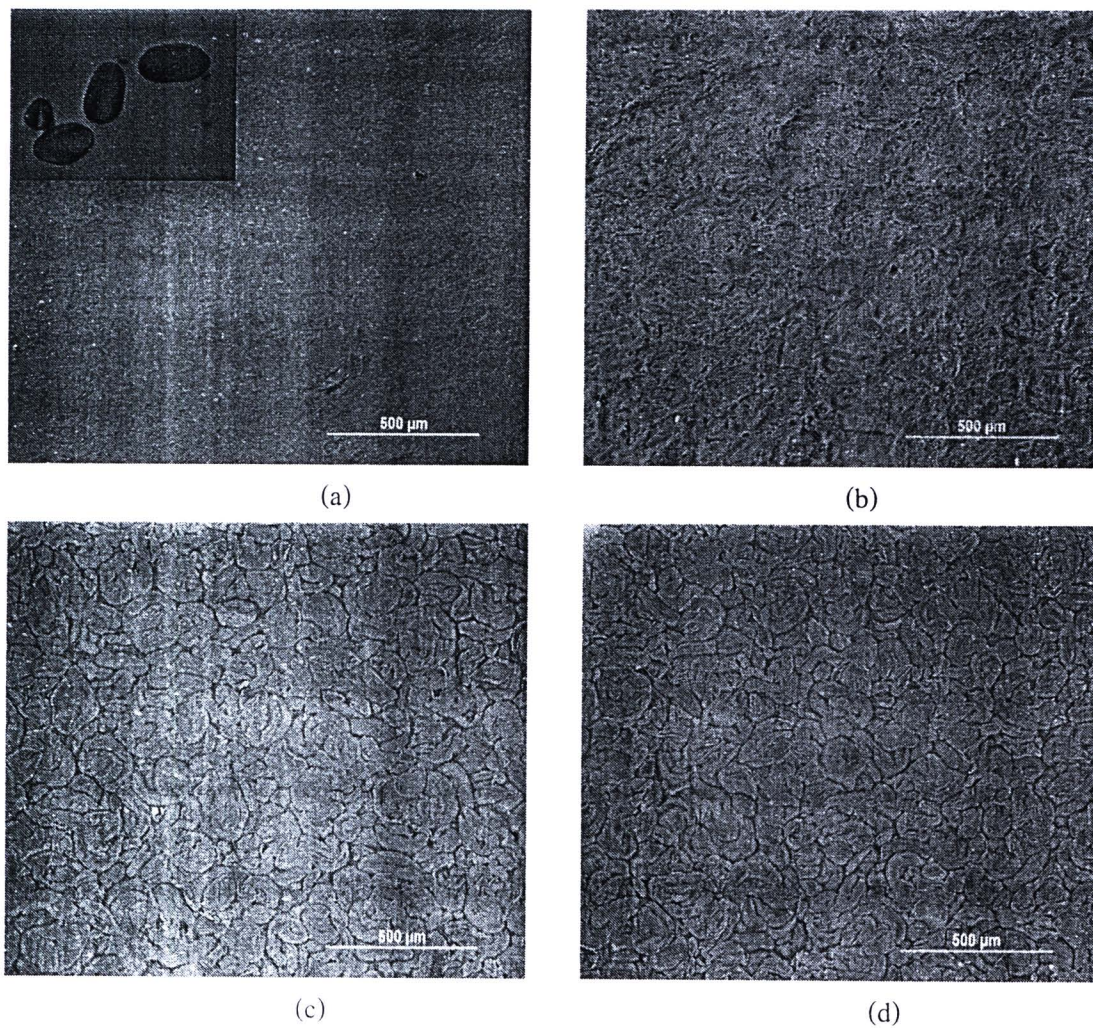
รูปที่ 4.13 อะมิโลแกรมของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร, แป้ง HMT และแป้ง HOSA3%

4.7 ลักษณะของเจลแป้ง

เมื่อนำเจลของแป้งพุทธรักษาที่ได้จากการวิเคราะห์อะมิโลแกรมด้วยเครื่อง RVA มาศึกษา รูปร่างและลักษณะของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเมื่อให้ความร้อนกับเม็ดแป้งในสถานะที่มี น้ำมากเกินไป เม็ดแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรจะเกิดการพองตัวและแตกออก เกิดการสูญเสีย สภาพของเม็ดแป้งอย่างสมบูรณ์ (รูปที่ 4.14 a) ส่วนลักษณะของเจลแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 1% (w/w แป้ง) พบว่าเม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและแตกออก แต่ยังคงสภาพของเม็ดแป้ง ไว้ได้ การคงสภาพของเม็ดแป้งจะดีขึ้นตามลำดับเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปรมากขึ้น (รูปที่ 4.14 b-d) แป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 3% (w/w แป้ง) ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันคือ เม็ด แป้งจะคงสภาพได้ดีขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปร (รูปที่ 4.15 a-d) อย่างไรก็ตามไม่สามารถ สังเกตเห็นความแตกต่างของเม็ดแป้งได้ชัดเจนระหว่างแป้งที่ดัดแปรด้วย OSA ที่ความเข้มข้น 1% และ 3%

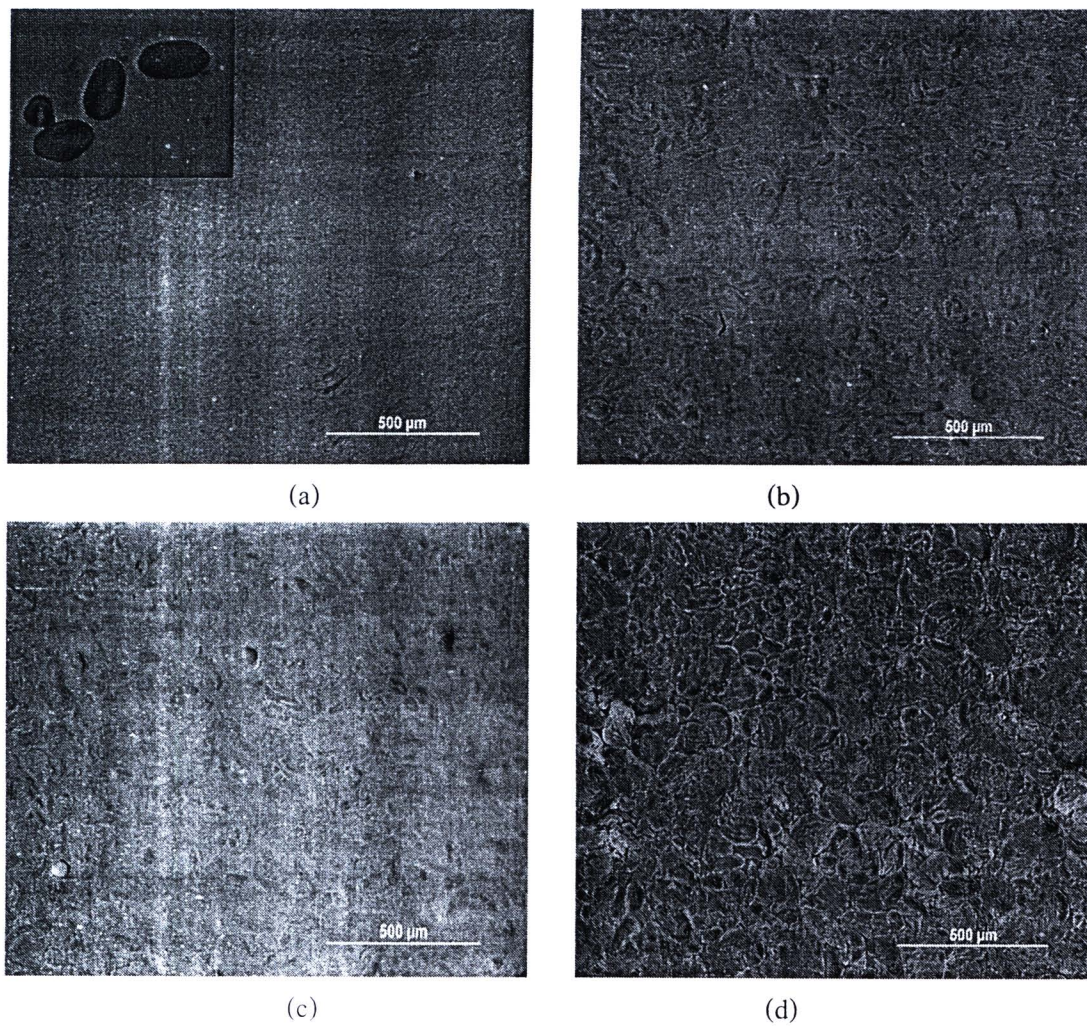
สำหรับลักษณะของเจลแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น (รูปที่ 4.16 a) พบว่าเม็ดแป้ง มีการพองตัวมากขึ้นแต่ไม่แตกออก และสังเกตเห็นช่องว่างภายในเม็ดแป้งที่ขยายใหญ่ขึ้น เมื่อนำ เจลแป้งพุทธรักษาผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นดัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 3% (w/w แป้ง) ที่ ระยะเวลาต่างๆ (รูปที่ 4.16 b-d) พบว่าลักษณะของเม็ดแป้งจะคล้ายกับแป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัด

แปรด้วยความร้อนขึ้นอย่างเฉียบ การเพิ่มระยะเวลาในการดัดแปรไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างของเม็ดแป้งได้อย่างชัดเจน การที่เม็ดแป้งพุทธรักษาผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นมีการพองตัวแต่ไม่แตกออกและมีช่องว่างภายในเม็ดแป้งเพิ่มมากขึ้น อาจเกิดจากการดัดแปรแป้งในสภาพที่แป้งมีความชื้นและใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดความดันไอล้นภายในเม็ดแป้ง ซึ่งอาจทำให้สายอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและมีโอกาสเกิดอันตรกิริยากับโมเลกุลของอะไมโลสในบริเวณออสซิลูมได้ ทำให้โครงสร้างภายในเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง (Kawabata และคณะ, 1994; Hoover และ Manuel, 1996a,b) เช่นเดียวกับรายงานของ Watcharatwinkul และคณะ (2009) ที่ได้กล่าวถึงลักษณะของเม็ดแป้งพุทธรักษาที่ดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นว่าเม็ดแป้งจะมีการพองตัวมากขึ้นและมีช่องว่างภายในเม็ดแป้งเกิดขึ้น



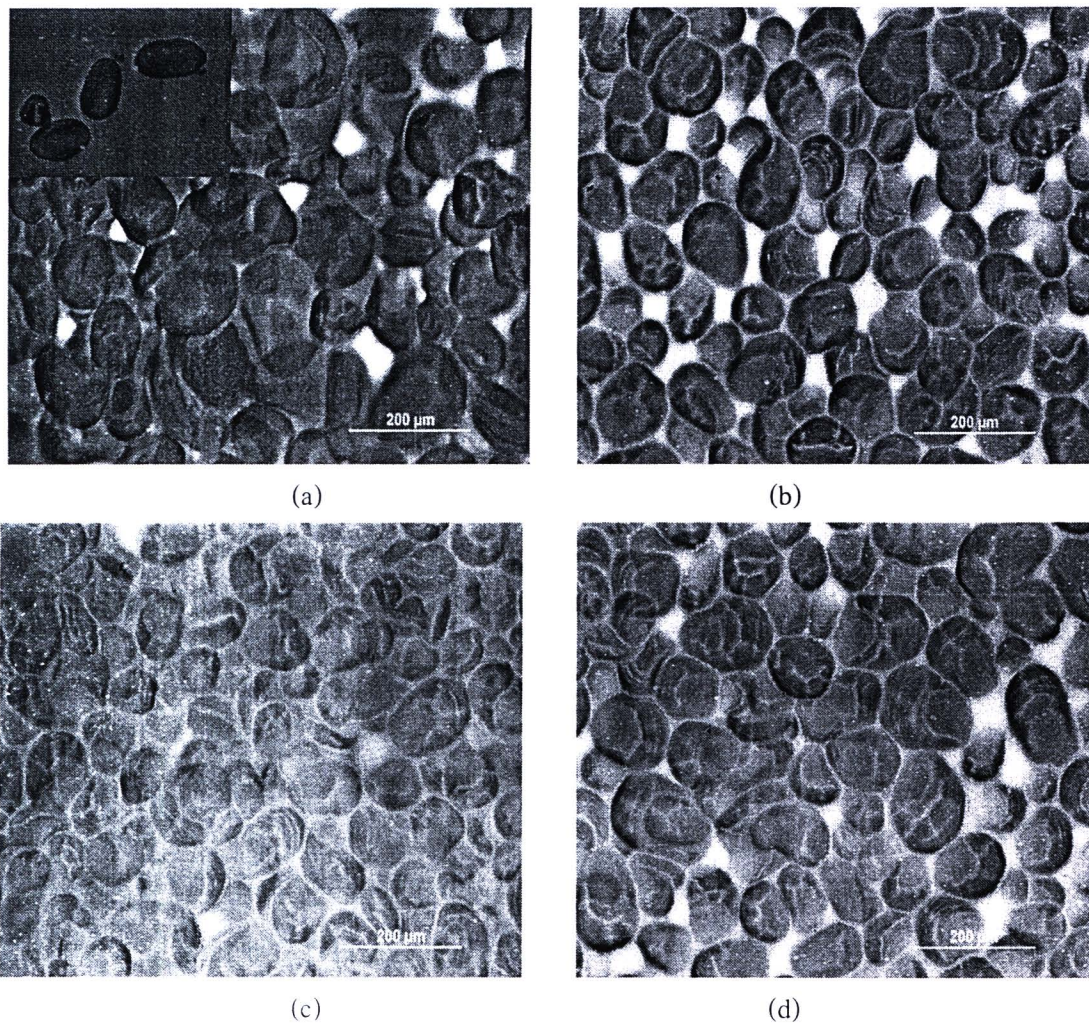
รูปที่ 4.14 ลักษณะของเจลแป็งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรและแป็ง OSA1% ที่ระยะเวลาต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า

- (a) เจลแป็งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปร
- (b) เจลแป็ง OSA ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เจลแป็ง OSA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เจลแป็ง OSA ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 4.15 ลักษณะของเจลแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้ง OSA3% ที่ระยะเวลาต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า

- (a) เจลแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปร
- (b) เจลแป้ง OSA ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เจลแป้ง OSA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เจลแป้ง OSA ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



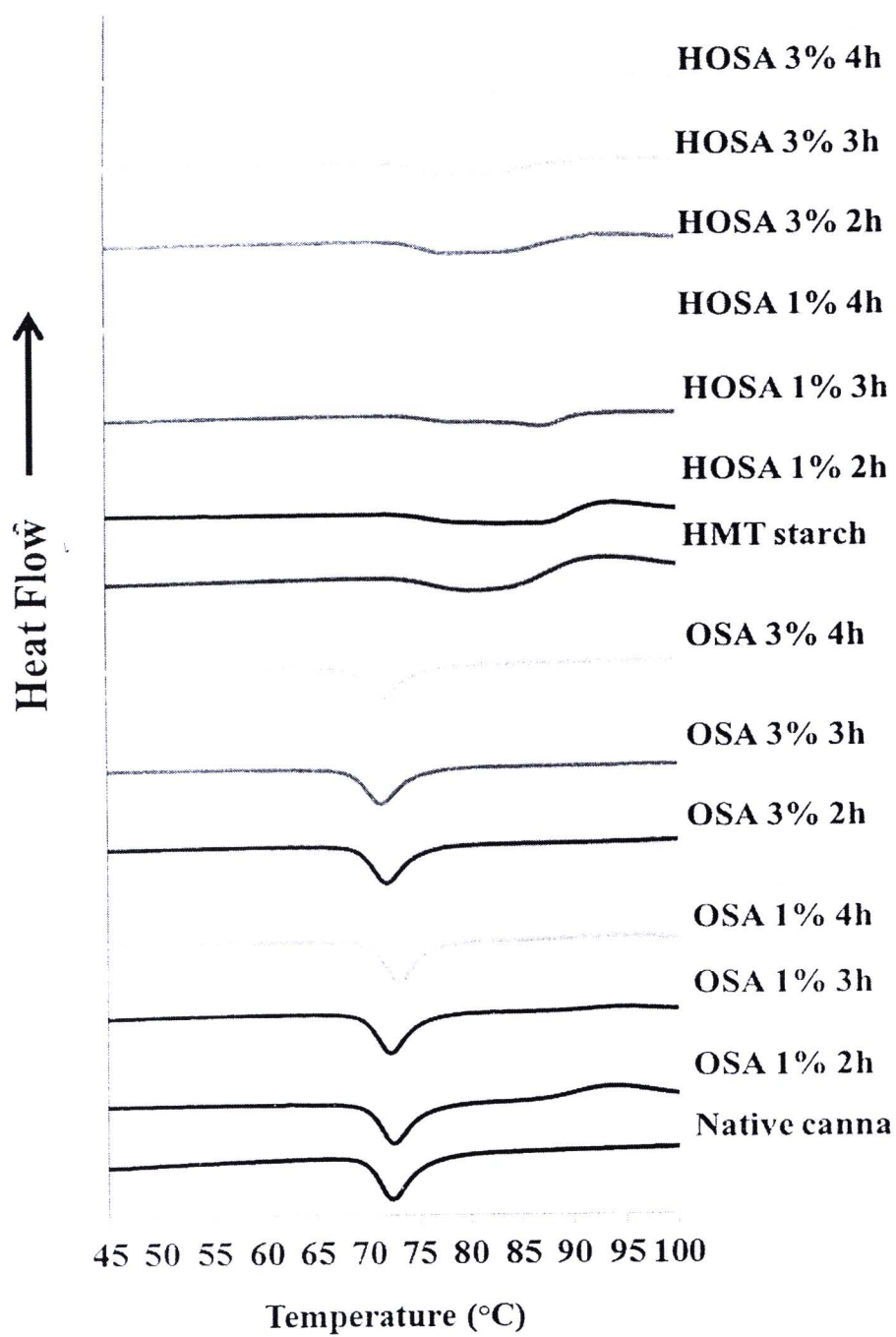
รูปที่ 4.16 ลักษณะของเจลแป็งพุทรรักษาตัดแปรด้วยความร้อนขึ้นและแป็ง HOSA3% ที่ระยะเวลาต่างๆ จากกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 100 เท่า

- (a) เจลแป็งพุทรรักษาที่ผ่านการตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น
- (b) เจลแป็ง HOSA ที่ระยะเวลา 2 ชั่วโมง
- (c) เจลแป็ง HOSA ที่ระยะเวลา 3 ชั่วโมง
- (d) เจลของแป็ง HOSA ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

4.8 สมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติในเซชันของแป้งศึกษาโดยใช้เครื่อง differential scanning calorimetry

การตรวจวัดสมบัติทางความร้อนโดย DSC เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงที่บอกถึงพลังงานที่ต้องให้กับตัวอย่างในการเปลี่ยนสถานะหรือในการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งในกรณีของแป้งทำได้โดยการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมของแป้งกับน้ำจนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงการเกิดเจลลาติในเซชัน จะได้ thermogram ระหว่าง heat flow กับอุณหภูมิ ค่าเอนทัลปีในการเกิดเจลลาติในเซชัน (J/g) ที่ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งจะบ่งบอกถึงความแข็งแรงของโครงสร้างภายในเม็ดแป้ง โดยเฉพาะในส่วนเกลียวคู่ของเม็ดแป้ง จากการศึกษาสมบัติทางความร้อนในการเกิดเจลลาติในเซชันของแป้งพุทธรักษาที่ผ่านและไม่ผ่านการดัดแปรโดยเครื่อง DSC พบว่าได้ thermogram ดังรูปที่ 4.17 และอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาติในเซชันของแป้งสรุปไว้ในตารางที่ 4.4 จากรูปจะเห็นว่าแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและผ่านการดัดแปรด้วย OSA มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก โดยแป้งพุทธรักษาดัดแปรด้วย OSA 3% (w/w แป้ง) มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันต่ำกว่าแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรเล็กน้อย ส่วนค่าเอนทัลปีของแป้งพุทธรักษาดัดแปรด้วย OSA ก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร เนื่องจากการแทนที่ด้วยหมู่ออกซิเจนชนิดซิกซ์ทำให้โครงสร้างในส่วนอสัณฐานและส่วนผลึกของเม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลง พันธะไฮโดรเจนภายในถูกทำลาย ความแข็งแรงภายในเม็ดแป้งจึงลดลงทำให้ใช้อุณหภูมิในการทำลายพันธะไฮโดรเจนต่ำลง (Bao และคณะ, 2003; Rutenberg, 1980)

สำหรับแป้งพุทธรักษาที่ผ่านการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นจะมีลักษณะ thermogram ที่แตกต่างออกไป กล่าวคือ endotherm จะเลื่อนไปทางอุณหภูมิที่สูงกว่าและความสูงของพีคลดลง โดยอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาติในเซชันจะเพิ่มขึ้นและช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันกว้างขึ้น ค่าเอนทัลปีมีค่าใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร ลักษณะ endotherm ที่กว้างขึ้นบ่งบอกถึงความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างภายใน (inhomogeneity) ที่เพิ่มขึ้นจากการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ผลของการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นต่อลักษณะ endotherm ของแป้งพุทธรักษาจะคล้ายกับแป้งจากธัญพืชและพืชหัวอื่นๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า (Khunae และคณะ, 2007) แป้งข้าวโพด (Hoover และ Manuel, 1996) แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง (Gunaratne และ Hoover, 2002) เมื่อนำแป้งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นดัดแปรต่อด้วย OSA พบว่าแป้งที่ได้มี thermogram ที่คล้ายกับแป้งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น โดยค่าเอนทัลปีมีแนวโน้มลดลงเมื่อดัดแปรด้วย OSA โดยใช้ระยะเวลาขึ้น (ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติในเซชันและค่าเอนทัลปีที่อ่านจาก thermogram ของแป้งดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นอาจมีความผิดพลาดได้มากเนื่องจากขึ้นกับการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของ endotherm



รูปที่ 4.17 Thermogram ของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการดัดแปรและแป้งที่ผ่านการดัดแปร

ตารางที่ 4.4 ค่าพารามิเตอร์ทางด้านความร้อนในการเกิดเจลลาติไนเซชันของแป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรและแป้งที่ผ่านการตัดแปร

ตัวอย่างแป้ง	อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนเซชัน (องศาเซลเซียส)				
	T _o	T _p	T _c	T _c -T _o	ค่าเอนทาลปี (J/g)
Native canna	69.66	72.3	75.52	5.86	25.08
OSA1%2h	69.77	72.38	75.66	5.89	24.9
OSA1%3h	69.46	72.13	75.04	5.58	19.91
OSA1%4h	70.33	72.96	75.93	5.60	19.38
OSA3%2h	68.95	71.72	75.06	6.11	21.66
OSA3%3h	68.26	71.13	74.67	6.42	21.48
OSA3%4h	68.26	71.4	74.99	6.73	21.26
HMT starch	72.66	81.06	88.76	16.10	26.50
HOSA1%2h	73.32	86.97	87.26	13.94	25.22
HOSA1%3h	73.77	87.07	90.74	16.97	16.69
HOSA1%4h	86.48	87.32	91.01	4.53	16.50
HOSA3%2h	73.24	82.82	84.63	11.39	25.03
HOSA3%3h	72.70	77.98	78.95	6.25	20.22
HOSA3%4h	72.77	77.48	88.65	15.88	20.40

4.9 ความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้งตัดแปร

เมื่อนำแป้งพุทธรักษาที่ผ่านและไม่ผ่านการตัดแปรไปศึกษาสมบัติด้านความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsification capacity, EC) โดยวัดปริมาณการแยกชั้นของน้ำกับน้ำมันที่เวลา 1, 2 และ 5 วัน โดยมีผลิตภัณฑ์ทางการค้า Hi-cap100 ซึ่งเป็นแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวตัดแปรเป็นตัวอ้างอิง จากการทดลองเบื้องต้นโดยใช้แป้งพุทธรักษาดิบพบว่าไม่สามารถเตรียมของผสม (แป้ง น้ำและน้ำมัน) ให้เป็นเนื้อเดียวกันได้ ดังนั้นจึงได้ต้มตัวอย่างแป้งทั้งหมดในน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที ก่อนนำไปทดสอบ ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่า Hi-cap100 มีค่า EC เท่ากับ 100% ตลอดช่วงเวลาการทดลอง (5 วัน) แสดงว่า Hi-cap100 มีความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีมาก ทำให้อิมัลชันมีความคงตัวไม่แยกชั้นออกมา การที่ Hi-cap100 เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีอาจเนื่องจากผลิตภัณฑ์ไม่ได้อยู่ในสภาพที่เป็นเม็ดแป้ง แต่เป็น โมเลกุลแป้งที่กระจายตัวและอาจมีการ

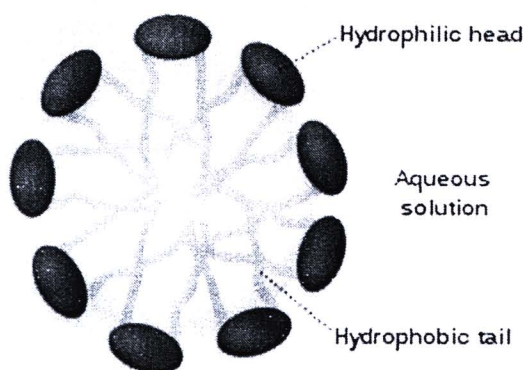
ไฮโดรไลซ์ให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลง สังเกตได้จากที่ Hi-cap100 มีการละลายในน้ำเย็นได้ดี และเมื่อนำไปศึกษาการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง RVA พบว่าไม่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดได้ การที่ Hi-cap100 มีขนาดเล็กและกระจายตัวดีทำให้สามารถถูกดูดซับที่บริเวณ interface ของน้ำกับน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.5 ค่าความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้ง Hi-cap 100 แป้งพุทธรักษาที่ไม่ผ่านการคัดแปรและแป้งที่ผ่านการคัดแปร

ตัวอย่างแป้ง*	Emulsification capacity (%)					
	1 วัน		2 วัน		5 วัน	
Hi-cap100	100.0	± 0.0 ^a	100.0	± 0.0 ^a	100.0	± 0.0 ^a
Native canna	26.7	± 6.4 ^c	15.0	± 3.7 ^f	15.0	± 3.7 ^f
OSA1%2h	71.3	± 4.5 ^b	69.5	± 2.9 ^b	66.2	± 3.1 ^b
OSA1%3h	72.3	± 4.0 ^b	71.0	± 4.7 ^b	68.0	± 4.6 ^b
OSA1%4h	73.2	± 3.8 ^b	72.2	± 3.2 ^b	66.8	± 6.5 ^b
OSA3%2h	75.0	± 0.0 ^b	72.0	± 3.2 ^b	69.0	± 2.2 ^b
OSA3%3h	76.0	± 2.2 ^b	68.3	± 4.1 ^b	61.0	± 5.2 ^c
OSA3%4h	76.3	± 4.0 ^b	53.7	± 5.1 ^c	49.0	± 4.4 ^d
HMT starch	28.3	± 7.5 ^c	20.3	± 5.1 ^c	12.7	± 3.7 ^g
HOSA1%2h	37.7	± 2.2 ^d	35.7	± 2.8 ^c	33.3	± 0.0 ^f
HOSA1%3h	35.7	± 1.9 ^d	34.3	± 0.9 ^c	33.3	± 0.0 ^f
HOSA1%4h	35.3	± 3.0 ^d	33.3	± 0.0 ^c	32.7	± 1.5 ^f
HOSA3%2h	47.0	± 4.2 ^c	46.0	± 4.4 ^d	39.7	± 3.6 ^c
HOSA3%3h	49.3	± 1.5 ^c	48.0	± 3.6 ^d	41.7	± 5.0 ^c
HOSA3%4h	49.2	± 1.4 ^c	47.2	± 4.0 ^d	43.2	± 4.2 ^c

หมายเหตุ: *ตัวอย่างที่ทดสอบเป็นตัวอย่างที่ผ่านการต้มในน้ำเดือดนาน 5 นาที
a, b, c ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดัง แสดงถึงความไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.005)

สำหรับแป้งพวทรักษาที่ไม่ผ่านการตัดแปรพบว่ามีค่า EC ต่ำมาก คือ 26.7% ในวันแรก และลดลงเป็น 15% ในวันที่ 2 โดยของผสมมีการแยกชั้นอย่างชัดเจน แสดงว่าแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปรมีความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ต่ำ เมื่อนำแป้งพวทรักษาไปตัดแปรด้วย OSA ที่ความเข้มข้น 1% พบว่าค่า EC ของแป้งพวทรักษามีมากกว่า 70% ในวันแรก (75-76%) โดยค่า EC ลดลงเล็กน้อยเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 5 วัน สำหรับการเพิ่มระยะเวลาในการตัดแปรแป้งจาก 2 ชั่วโมงเป็น 4 ชั่วโมงไม่ส่งผลต่อค่า EC มากนัก การเพิ่มความเข้มข้นของ OSA ในการตัดแปรแป้งเป็น 3% พบว่าทำให้ค่า EC เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในวันแรก แต่เมื่อตั้งทิ้งไว้ 2-5 วัน ค่า EC ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยแป้งที่ตัดแปรด้วย OSA ที่ความเข้มข้น 3% นาน 3-4 ชั่วโมง (OSA3% 3h และ OSA3% 4h) กลับพบว่ามีค่า EC ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งที่ตัดแปรนาน 2 ชั่วโมง (OSA3%2h) ผลทดลองที่ได้นี้ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Bhosale และ Singhal (2006) ที่ศึกษาการตัดแปรแป้งด้วย OSA พบว่าแป้งข้าวโพดและแป้งอามาเรนท์ที่ตัดแปรด้วย OSA ความเข้มข้น 1, 2 และ 3% มีค่า EC อยู่ในช่วง 75-81% และงานวิจัยอื่นๆ (Nilsson และ Bergenstahl, 2007; Bhosale และ Singhal, 2006) ก็รายงานว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วย OSA มีคุณสมบัติการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีเช่นกัน การที่แป้งตัดแปรด้วย OSA มีความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เนื่องจากโมเลกุลของแป้งตัดแปรด้วย OSA จะมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ เมื่อนำแป้งตัดแปรด้วย OSA มาให้ความร้อนนาน 5 นาที แล้วเติมน้ำมัน จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์แล้วตั้งทิ้งไว้ โมเลกุลแป้งในส่วนที่ชอบน้ำมันจะหันเข้าหาน้ำมันและส่วนที่ชอบน้ำจะหันเข้าหาน้ำเกิดการจัดเรียงตัวเป็นไมเซลล์ (micelles) ดังรูปที่ 4.18

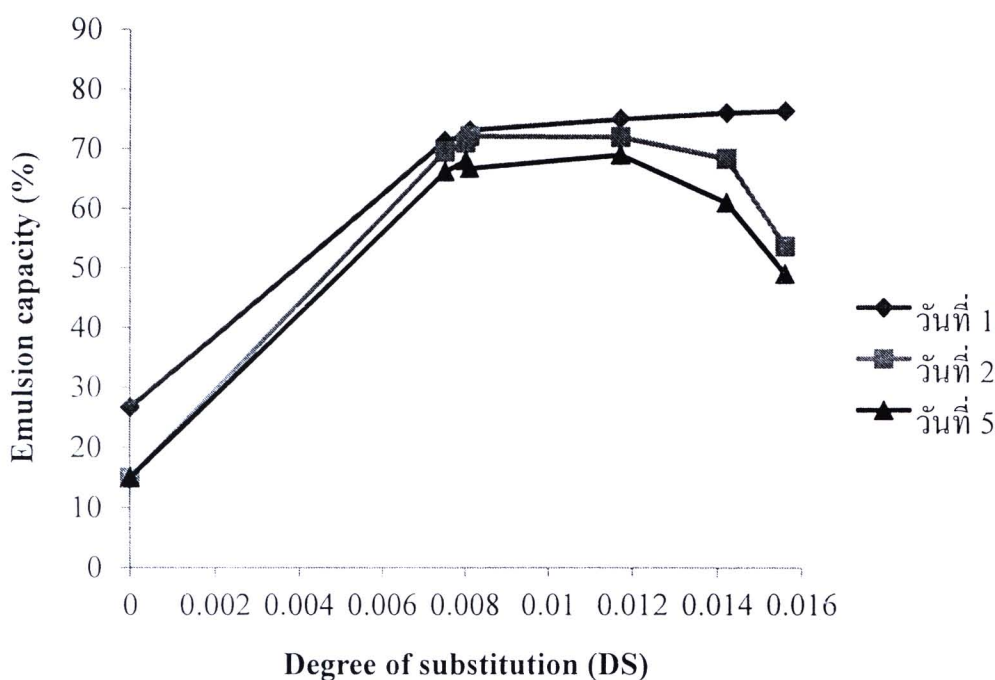


รูปที่ 4.18 ลักษณะของไมเซลล์

ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Micelle>

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้งตัดแปรกับค่า DS (ดังรูปที่ 4.19) พบว่าความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear function) กับค่า DS โดยเมื่อ DS มีค่าสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง การเพิ่มขึ้นของค่า DS ต่อไป

อีกกลับส่งผลให้ความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้งดัดแปรลดลงหรือค่อนข้างคงที่ ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Viswanathan (1999) ที่ทดสอบความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟของแป้งข้าวโพดข้าวเหนียวดัดแปรด้วย OSA ที่ระดับการแทนที่ (DS) และความเข้มข้นต่างๆ พบว่าความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า DS ของแป้ง OSA เสมอไป โดยความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้งดัดแปรด้วย OSA ที่เตรียมในตัวอย่างที่เป็นน้ำมีแนวโน้มลดลงเมื่อ DS มีค่าสูงขึ้น การเพิ่มความเข้มข้นของแป้ง OSA ที่เตรียมในตัวอย่างที่เป็นน้ำจาก 0.01% เป็น 0.5% ไม่ทำให้ความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากแป้งยังอยู่ในสภาพที่เป็นเม็ด แต่ในกรณีของแป้ง OSA ที่เตรียมในตัวอย่างที่เป็นสารอินทรีย์พบว่าความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์จะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแป้ง OSA มากขึ้นเนื่องจากเม็ดแป้งแตกออกระหว่างการดัดแปร



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ของแป้งดัดแปรกับค่าระดับการแทนที่

สำหรับแป้งที่ผ่านการดัดแปรแป้งด้วยความร้อนชั้นมีค่า EC ต่ำเช่นเดียวกับแป้งไม่ผ่านการดัดแปรเนื่องจากโมเลกุลแป้งไม่มีส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก การดัดแปรแป้ง HMT ด้วย OSA ทำให้ได้แป้งที่มีค่า EC สูงขึ้น โดยแป้ง HOSA1% และ แป้ง HOSA 3% (w/w แป้ง) มีค่า EC อยู่ในช่วง 35.7-37.7% และในแป้ง HOSA3% มีค่า EC อยู่ในช่วง 47.0-49.3% เมื่อตั้งทิ้งไว้ 1 วัน และมีค่าลดลงเมื่อตั้งทิ้งไว้นานขึ้นตามลำดับ โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปรด้วย OSA ที่ดัดแปรในสภาวะเดียวกัน

พบว่าแป้ง HOSA มีค่า EC ต่ำกว่ามากทั้งๆ ที่มีค่า DS สูงกว่า อาจเนื่องจากแป้ง HOSA มีความ
 แข็งแรงมาก การต้มนาน 5 นาที ไม่เพียงที่จะทำให้เม็ดแป้งแตกกระจายออกมา ดังนั้นหมู่
 ออกทิลซัลซินิกส่วนหนึ่งจึงยังคงอยู่ด้านในของเม็ดแป้ง ทำให้หมู่ออกทิลซัลซินิกที่จะไปดูดซับที่
 บริเวณ inter-phase ระหว่างน้ำกับน้ำมันมีน้อยลง จึงมีประสิทธิภาพในการเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่ไม่
 ดี