

การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังแอมโฟเทอริกที่มีกลุ่มประจุลบแตกต่างกัน

นางนพภาภรณ์ โพธิ์อ่อนตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2550

**MODIFICATION OF AMPHOTERIC TAPIOCA STARCH
CONTAINNING DIFFERENT ANIONIC GROUPS**

Noppaporn Po-oonta

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Science in Food Technology
Suranaree University of Technology
Academic Year 2007**

การตัดแปรแป้งมันสำปะหลังแอมโฟเทอริกที่มีกลุ่มประจุลบแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยะวรรณ กาสลัก)
ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทา ทองทา)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวัดน์ ยงสวัสดิกุล)
กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)
รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุเวทย์ นิงสานนท์)
คณบดีสำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

นพภรณ์ โพธิ์อ่อนตา : การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังแอมโฟเทอริกที่มีกลุ่มประจุลบแตกต่างกัน (MODIFICATION OF AMPHOTERIC TAPIOCA STARCH CONTAINING DIFFERENT ANIONIC GROUPS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทา ทองทา, 97 หน้า.

การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยการแทนที่ของกลุ่มประจุลบ 3 กลุ่ม ได้แก่ แป้งออกเทนนิล ซัคซิเนต แป้งคาร์บอกซิลเมทิล และแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ซึ่งแป้งออกเทนนิล ซัคซิเนต เป็นการดัดแปรแป้งในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง 8-10 และ ออกเทนนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์ร้อยละ 1-3 ในระยะเวลา 60-300 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าตั้งแต่ร้อยละ 19.83-75.52 โดยตัวแปรที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งออกเทนนิลซัคซิเนต ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง 8 ปริมาณออกเทนนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์ร้อยละ 3 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 300 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.52 ความหนืดสูงสุดจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

แป้งคาร์บอกซิลเมทิล ได้จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอกซิเมทิลชันระหว่างแป้งที่กระจายตัวในสารละลายไอโซโพรพานอลที่มีน้ำร้อยละ 7-23 ในสภาวะด่างที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2-10 กับโซเดียม โมโนคลอโรอะซิเตตร้อยละ 5-20 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 1.36-15.09 ขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการผลิต โดยสภาวะที่ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15.09 เมื่อใช้ตัวกลางปฏิกิริยาที่มีน้ำร้อยละ 1.54 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 6 และปริมาณโซเดียม โมโนคลอโรอะซิเตตร้อยละ 12.50 นอกจากนี้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าการละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น

แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ถูกผลิตขึ้นจากปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชันในสภาวะกึ่งแห้งระหว่างแป้งและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตในสภาวะที่มีปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 3-12 ความเป็นกรด-ด่าง 4.5-9.0 ในการทำปฏิกิริยา 60-240 นาที ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดคือร้อยละ 23.42 เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.5 ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 ในเวลา 150 นาที ความหนืดสูงสุดและความใสของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตเพิ่มขึ้น และความเป็นกรด-ด่างลดลง จากนั้นแป้งประจุลบที่มีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดจะถูกคัดเลือกเพื่อนำไปดัดแปรร่วมกับแป้งประจุบวก (Cat) เพื่อผลิตเป็นแป้งแอมโฟเทอริก (amphoteric starch)

แป้งแอมโฟเทอริกเป็นแป้งดัดแปรที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ การแทนที่ประจุบวกเตรียมโดยใช้ 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียมครอไรด์ร้อยละ 6 ทำปฏิกิริยากับแป้งในสถานะความเป็นด่าง 11 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ประจุลบหมู่ออกเทนิลซัลโฟเนต (OSA) คาร์บอกซิลเมทิล (CMS) และกลุ่มฟอสเฟต (PPS) ถูกนำมาศึกษาทั้งการผลิตประจุบวกก่อนประจุลบและการผลิตประจุลบก่อนประจุบวก จากการศึกษาพบว่า ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของทั้งประจุบวกและประจุลบลดลงทั้ง 2 กระบวนการ โดยระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตประจุลบก่อนประจุบวกลดลงมากกว่า นอกจากนี้ยังพบค่าความหนืดสูงสุด เบรกคาวน์ และการพองตัวของ Cat-OSA สูงที่สุด แต่อุณหภูมิเริ่มเกิดเพสต์และเซตเบคของแป้งดัดแปรดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้ง OSA ส่วนแป้งแอมโฟเทอริก Cat-CMS และ Cat-PPS แสดงค่าความหนืดสูงสุด เบรกคาวน์ และการพองต่ำกว่าแป้ง CMS และแป้ง PPS เอนทัลปีของการเกิดเจลลาตินเซชันลดลงทั้ง 2 กระบวนการ ส่วนลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้งแอมโฟเทอริกที่ได้จากการแทนที่ด้วยกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลและฟอสเฟตถูกดัดแปรเล็กน้อย

NOPPAPORN PO-OONTA : MODIFICATION OF AMPHOTERIC TAPIOCA STARCH CONTAINING DIFFERENT ANIONIC GROUPS. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUNANTA TONGTA, Ph.D. 97 PP.

MODIFIED STARCH/OCTENYL SUCCINATE STARCH/CARBOXYLMETHYL STARCH/STARCH PHOSPHATEMONOESTER/AMPHOTERIC TAPIOCA STARCH

The modification of tapioca starch with anionic substitution, octenyl succinate starch (OSA starch), carboxymethyl starch (CMS), and starch phosphatemonoester (PPS) was studied. The OSA starch was prepared in aqueous alkali slurry system pH 8-10 with octenyl succinic anhydride concentration of 1-3 % and reaction time of 60-300 min at the temperature of 30°C. The reaction efficiency (RE) was obtained from 19.83 to 75.52 % depending on reaction conditions. The optimum condition of OSA starch preparation was 3 % OSA at pH 8 for 300 min. At this condition, the maximum RE of 75.52 % was obtained. From Rapid Visco Analyzer, peak viscosity was higher as pH and reaction time increased.

CMS was prepared by carboxymethylation of starch in alkali medium of isopropanol containing 7-23 % water, 5-20 % sodium monochloroacetate (SMCA), 2-10 % sodium hydroxide (NaOH) at 40 °C for 3 h. From these reaction conditions, the RE was different in the range of 1.36-15.09 %. The maximum RE (15.09 %) was found at aqueous medium containing 1.54 % water, 6.00 % NaOH, and 12.50 % SMCA. The cold water solubility of CMS increased with increasing NaOH concentration.

PPS was prepared by phosphorylation in semidry reaction at 130°C with 3-12 % sodium tripolyphosphate (STP) and pH 4.5-9.0 for 60-240 min. The maximum RE was found to be 23.42 % at the reaction conditions of pH 6.5, 7.5 % STP, and 180 min. The peak viscosity and paste clarity increased with increasing STP, but decreasing pH. The anionic modified tapioca starches with the highest RE were selected for further modification of amphoteric starch.

Amphoteric starch is modified starch containing both cationic and anionic charges. Cationic substitution was prepared using aqueous alkaline processes (pH 11) with cationic reagent of 2-epoxypropyl 3-trimethylammonium chloride at 40 °C for 24 h. Anionic charges with different groups including octenyl succinate, carboxymethyl, and phosphate were studied in both before and after cationic substitution processes. The DS and RE of either cationic (Cat) or anionic charges decreased in both amphoteric modified processes. The DS and RE of the anionic-cationic process decreased to a higher extent than those of the cationic-anionic process. The peak viscosity, breakdown, and swelling power of Cat-OSA were the highest, but its pasting temperature and setback were lower than those of OSA starch. The Cat-CMS and Cat-PPS showed lower peak viscosity, breakdown and swelling power than CMS and PPS. The enthalpies of amphoteric starches decreased in both processes. The morphology of amphoteric starch granules with CMS and PPS was slightly modified.

School of Food Technology

Student's Signature _____

Academic Year 2007

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนันทาทองทา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำสั่งสอน เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดจนชี้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้น จนถึงการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ กราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวชื่อมา ณ ที่นี้ ที่ให้ความรู้ในด้านวิชาการตลอดระยะเวลา 5 ปีที่ศึกษาอยู่ในรั้ว มทส.

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่อาคารศูนย์เครื่องมือ 3 ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านอุปกรณ์ เครื่องมือต่าง ๆ ในงานวิจัย ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ และน้อง ๆ ทุกคน ที่ร่วมทุกข์ ร่วมสุข คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กันตลอดระยะเวลา 5 ปี ขอขอบคุณนายนิพล โพธิ์อ่อนตา ที่คอยให้กำลังใจทุก ๆ เรื่อง ทั้งผลักดันให้ตั้งใจทำงานจนมีวันนี้ในที่สุด

ขอขอบพระคุณ บริษัท สนวนงษ์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนตลอดงานวิจัย และขอขอบคุณ นายทศพล ดันติวงศ์ นางธิดารัตน์ รอดอนันต์ ที่ให้โอกาสในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิด ให้ความรัก การเลี้ยงดูอย่างดีเสมอมา และญาติ ๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยดี

นพภาภรณ์ โพธิ์อ่อนตา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.6 รายการอ้างอิง.....	5
2 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 แป้งมันสำปะหลัง.....	9
2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี.....	10
2.2.1 อะมิโลส.....	10
2.2.2 อะมิโลเพคติน.....	10
2.3 วิธีการตัดแปรแป้ง.....	12
2.3.1 การตัดแปรทางเคมี.....	12
2.3.2 การตัดแปรทางกายภาพ.....	13
2.3.3 การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ.....	13
2.4 การตัดแปรทางเคมี.....	13
2.5 การตัดแปรแป้งด้วยการแทนที่ของประจุลบ.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.1	แข่งออกเทนนิส ชัคชินเนต.....	15
2.5.2	แข่งคาร์บอคซิลเมทิล.....	17
2.5.3	แข่งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์.....	20
2.6	การตัดแปรแข่งด้วยการแทนที่ของกลุ่มประจุบวก.....	22
2.7	แข่งแอมโฟเทอริก.....	24
2.8	รายการอ้างอิง.....	25
3	การตัดแปรแข่งด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ของประจุลบ.....	30
3.1	บทคัดย่อ.....	30
3.2	บทนำ.....	31
3.3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	36
3.3.1	การเตรียมแข่งออกเทนนิส ชัคชินเนต.....	36
3.3.2	การเตรียมแข่งคาร์บอคซิลเมทิล.....	36
3.3.3	การเตรียมแข่งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์.....	37
3.3.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแข่งประจุลบ.....	37
3.4	การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	41
3.5	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	44
3.5.1	แข่งออกเทนนิส ชัคชินเนต.....	44
3.5.2	แข่งคาร์บอคซิลเมทิล.....	52
3.5.3	แข่งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์.....	58
3.6	สรุปผลการทดลอง.....	67
3.7	รายการอ้างอิง.....	68
4	การตัดแปรแข่งแอมโฟเทอริก.....	73
4.1	บทคัดย่อ.....	73
4.2	บทนำ.....	73
4.3	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง.....	76
4.3.1	การเตรียมแข่งแคทไอออนนิค.....	76
4.3.2	การเตรียมแข่งออกเทนนิส ชัคชินเนต.....	76
4.3.3	การเตรียมแข่งคาร์บอคซิลเมทิล.....	76

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3.4	การเตรียมแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์.....	77
4.3.5	การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิน ซักซิเนต.....	77
4.3.6	การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล.....	77
4.3.7	การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต.....	78
4.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งแอมโฟเทอริก.....	78
4.4.1	การวิเคราะห์ระดับการแทนที่แคทไอออนนิค.....	78
4.4.2	การวิเคราะห์ระดับการแทนที่กลุ่มออกเทนิน ซักซิเนต.....	79
4.4.3	การวิเคราะห์ระดับการแทนที่กลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล.....	79
4.4.4	การวิเคราะห์ระดับการแทนที่กลุ่มฟอสเฟต.....	79
4.4.5	ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา.....	79
4.4.6	ความหนืด.....	79
4.4.7	ลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้ง.....	79
4.4.8	กำลังการพองตัว.....	79
4.4.9	สมบัติทางความร้อน.....	80
4.5	การเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล.....	80
4.6	ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	80
4.6.1	ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา.....	80
4.6.2	ความหนืด.....	83
4.6.3	ลักษณะโครงสร้างเม็ดแป้ง.....	85
4.6.4	กำลังการพองตัว.....	86
4.6.5	สมบัติทางความร้อน.....	89
4.7	สรุปผลการทดลอง.....	91
4.8	รายการอ้างอิง.....	91
5	สรุปผลการทดลอง.....	95
	ประวัติผู้เขียน.....	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	แผนการทดลองตามวิธี Central composite Design (CCD) สำหรับการทดลอง แป้งมันสำปะหลังคัดแปรประจุลบที่มี 3 ปัจจัย.....43
3.2	ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและค่าความหนืดของแป้งออกเทนนิล ซัคซิเนต.....45
3.3	แสดงการทดสอบสัมประสิทธิ์รีเกรชันของสมการการเตรียมแป้ง ออกเทนนิล ซัคซิเนตจากแป้งมันสำปะหลัง.....46
3.4	ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพของแป้งคาร์บอกซิลเมทิล.....56
3.5	แสดงการทดสอบสัมประสิทธิ์รีเกรชันของสมการการเตรียม แป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งมันสำปะหลัง.....62
3.6	ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพของ แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์.....61
3.7	แสดงการทดสอบสัมประสิทธิ์รีเกรชันของสมการการเตรียม แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์จากแป้งมันสำปะหลัง.....62
4.1	ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้ง แอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต.....82
4.2	ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโฟเทอริก ด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิล.....82
4.3	ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโฟเทอริก ด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต.....83
4.4	ค่าความหนืดของแป้งแอม โฟเทอริกจากประจุและกระบวนการที่แตกต่างกัน.....85
4.5	กำลังการพองตัวของแป้งแคทไอออนิก แป้งประจุลบ และแป้งแอมโฟเทอริก ที่อุณหภูมิ 55-85 องศาเซลเซียส.....89
4.6	สมบัติทางความร้อนของแป้งแคทไอออนิก แป้งประจุลบและแป้งแอมโฟเทอริก.....91

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอะมิโลส.....11
2.2	โครงสร้างของอะมิโลเพคติน.....11
2.3	แบบจำลองของอะมิโลเพคติน.....12
2.4	ตำแหน่งของคาร์บอนบนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส.....14
2.5	ปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์รีฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง.....16
2.6	สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งออกเทนนิล ซัคซิเนต.....16
2.7	ปฏิกิริยาคาร์บอกซีเมทิลเลชัน.....18
2.8	สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งคาร์บอกซิลเมทิล.....18
2.9	ปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชัน.....21
2.10	สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์.....21
2.11	ปฏิกิริยาแคโทไอออนนิคด้วย 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไทรเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์.....23
2.12	สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งแคโทไอออนนิค.....24
2.13	สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งแอมโฟเทอริก.....25
3.1	พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time) กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (RE) ที่ปริมาณออกเทนนิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 1.75.....47
3.2	พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Time) และปริมาณ ออกเทนนิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (OSA) กับประสิทธิภาพ การเกิดปฏิกิริยา (RE) ที่ความเป็นกรด-ด่าง 8.0.....48
3.3	การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียงของ แป้งออกเทนนิล ซัคซิเนต.....48
3.4	พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time) กับค่าความหนืดสูงสุดที่ปริมาณ ออกเทนนิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 1.75.....50

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.5 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังตัดแปรแบบการแทนที่ด้วยออกเทนิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 1.75 นานเป็นระยะ 180 นาทีที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.30 และ 10.70.....	51
3.6 ความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังตัดแปรแบบการแทนที่ด้วยออกเทนิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 3.0 นาน ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 และ 300 นาที.....	52
3.7 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนิล ซัคซินेट เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....	53
3.8 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนิล ซัคซินेट ที่ระดับการแทนที่ 0.0132 เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 4,500 เท่า.....	54
3.9 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water) และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับประสิทธิภาพปฏิกิริยา (RE) ที่ปริมาณโซเดียมโมโนคลอไรด์ร้อยละ 5.0.....	58
3.10 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณของโซเดียมโมโนคลอไรด์กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาที่ปริมาณน้ำร้อยละ 7.....	59
3.11 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water) และปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความสามารถการละลายในน้ำเย็น.....	60
3.12 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ที่ความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 10.0.....	63
3.13 การเกิดปฏิกิริยาของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 9.0.....	63
3.14 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time) กับประสิทธิภาพปฏิกิริยา (RE) ที่ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.0.....	65

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.15	พื้นที่ผิวดอบบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (STP) กับความหนืดสูงสุด (peak) ที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที.....66
3.16	พื้นที่ผิวดอบบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณไฮดรอกไซด์ไอออน (STP) กับค่าความใส (transmittance).....67
4.1	ปฏิกิริยาข้างเคียงเบี่ยงออกเทนิต ซัคซิเนต.....84
4.2	ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....87
4.3	ลักษณะของเม็ดแป้งแอมโพเทอริกเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า.....88

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มางานวิจัย

บรรจุภัณฑ์กระดาษมีการพัฒนาและมีบทบาทสำคัญต่อภาคการผลิตและการตลาดอย่างมาก ปัจจุบันผลผลิตทางภาคอุตสาหกรรมและภาคการเกษตรของไทยมากกว่าร้อยละ 70 ต้องใช้บรรจุภัณฑ์ โดยมีอัตราส่วนการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษสูงสุดถึงร้อยละ 40 ของการใช้บรรจุภัณฑ์ทุกชนิดรวมกัน เหตุที่บรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นที่นิยมเนื่องด้วยมีเอกลักษณ์และจุดเด่นเหนือบรรจุภัณฑ์ประเภทอื่น เช่น สามารถพิมพ์ลวดลาย ตราสินค้า ข้อความ ลงบนกล่องได้ดีและชัดเจน มีน้ำหนักเบา และมีการทรวงตัวที่ดี สะดวกต่อการบรรจุและการขนย้าย ราคาไม่แพง นอกจากนี้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ง่ายต่อการย่อยสลายและสามารถนำมาใช้ใหม่ได้ (recycle) ทำให้บรรจุภัณฑ์กระดาษได้รับความนิยมมากขึ้นเรื่อยๆ โดยที่แนวโน้มการส่งออกบรรจุภัณฑ์มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 16.16 (กรมส่งเสริมการค้าส่งออก, 2547) และมีแนวโน้มที่จะขยายตัวอย่างต่อเนื่องโดยอัตราการบริโภคนี้ส่วนใหญ่อยู่ที่ประเทศจีน ซึ่งวัตถุดิบหลักในการผลิตบรรจุภัณฑ์กระดาษนั้น คือ กระดาษ โดยใช้เยื่อกระดาษมาผลิตเป็นกระดาษชนิดต่างๆ

การผลิตกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่าง ๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเชื้อเพลิง ๑ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวจากแป้งทำให้กระดาษเรียบและยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษเพื่อช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึก เวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี นอกจากนั้นกาวจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น แป้งดิบ (native starch) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษนั้นมีข้อจำกัดได้แก่ การจับตัวกับเยื่อกระดาษได้ต่ำ และทำให้กระดาษเปราะไม่แข็งแรง ดังนั้นการดัดแปรแป้ง (starch modification) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบที่ไม่เหมาะสมได้ แป้งประจุบวก (cationic starch) เป็นแป้งที่นิยมใช้ผสมกับเยื่อกระดาษเนื่องจากประจุบวกของแป้งสามารถเกิดพันธะไอออนอนิกกับประจุลบของเยื่อกระดาษได้ดี นอกจากนี้แล้วแป้งประจุบวกยังมีสมบัติที่ละลายน้ำได้สูง พองตัวในน้ำเย็นได้ดี มีอัตราการคืนตัวต่ำ และมีความเสถียร (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ, 2543) การผลิตแป้งประจุบวกโดยทำนั้นเป็นปฏิกิริยาระหว่างแป้งและสารเคมีจำพวกเทอร์ติเออริเอมิโน (tertiary amino) และควอเทอร์นารี แอมโมเนียม (quaternary ammonium) ในสภาวะต่างการแทนที่ของ

กลุ่มประจุบวกต่อจำนวนหน่วยกลูโคสภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าระดับการแทนที่ (degree of substitution, DS) แป้งประจุบวกที่ผลิตโดยส่วนใหญ่จะมี DS ประมาณ 0.01-0.05 (Misha, 2003) การใช้แป้งประจุบวกมีข้อจำกัดในอุตสาหกรรมกระดาศ คือ การเติมแป้งประจุบวกที่มากเกินไปทำให้ประจุบวกของแป้งที่เกิดพันธะกับประจุลบของเยื่อกระดาศเหลืออยู่ จึงทำให้สารละลายเยื่อกระดาศส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นประจุบวกด้วย ส่งผลให้การเกิดพันธะได้ต่ำกับสารเติมแต่งประจุบวก (cationic additive) เช่น สี สารเคลือบผิว สารคงรูปต่างๆ และเรซิน นอกจากนี้พบว่า สารละลายเยื่อกระดาศที่มีสมบัติเป็นประจุบวกยังทำให้เกิดฟองระหว่างกระบวนการผลิตส่งผลให้ผิวหน้ากระดาศไม่เรียบ ดังนั้นการใช้แป้งประจุบวกจึงต้องใช้ปริมาณจำกัด โดยทั่วไปปริมาณแป้งประจุบวกที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาศประมาณร้อยละ 0.5-2.5 โดยน้ำหนักแห้งของเยื่อกระดาศ (Handel, Donald, Constance, and John, 2002) ซึ่งปริมาณการใช้แป้งนั้นขึ้นอยู่กับความเป็นประจุลบของเยื่อกระดาศและความเป็นประจุบวกของแป้งประจุบวก จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการใช้แป้งแอมโฟเทอริก (amphoteric starch) แทนแป้งประจุบวก

แป้งแอมโฟเทอริกที่ผลิตในอุตสาหกรรมใช้ประจุบวกจากเทอร์เทียรี อะมิโน (tertiary amino) และ ควอเทอร์นารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium) ส่วนประจุลบนั้นเป็นกลุ่มฟอสเฟต (phosphate) (Kirby, 1992) ในผลิตแป้งแอมโฟเทอริก ได้ทั้งจากแป้งข้าวโพด ข้าวโพด ข้าวเหนียวและมันฝรั่ง โดยเฉพาะในแป้งมันฝรั่งซึ่งมีประจุลบจากฟอสเฟตถึงร้อยละ 0.08 นั้นสามารถผลิตแป้งแอมโฟเทอริกได้โดยการเติมเฉพาะกลุ่มประจุบวกเข้าไปในโมเลกุลเท่านั้น ส่วนแป้งชนิดอื่นนั้นต้องมีการเติมทั้งสองประจุเข้าไปในโมเลกุล แป้งแอมโฟเทอริกโดยส่วนใหญ่มีปริมาณกลุ่มประจุบวกมากกว่ากลุ่มของประจุลบ โดยกลุ่มประจุบวกในแป้งแอมโฟเทอริกนั้นมีปริมาณในโตรเจนร้อยละ 0.20-0.33 (Kirby, 1992) ส่วนกลุ่มประจุลบบมีปริมาณเพียง 0.07-0.18 โมลต่อโมลของกลุ่มประจุบวก (Rutenberg and Solarek, 1984)

แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์เกิดจากปฏิกิริยาฟอสโฟไรเลชัน (phosphorylation) ระหว่างแป้งกับสารละลายฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้แก่ ออโท- ไพโร- หรือไตรโพลีฟอสเฟต โดยส่วนใหญ่หมู่ฟอสเฟตจะเข้าแทนที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 และเกิดการแทนที่ในส่วนของอะมิโลสมากกว่าอะมิโลเพกติน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543 ; Sitohy, Labib, EI-Sandany, and Ramadan, 2000) การแทนที่ด้วยหมู่ฟอสเฟตนั้นสามารถทำได้โดยให้ความร้อนกับแป้งในสภาพแห้งในสภาวะต่าง ซึ่งแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุลบ มีความหนืดสูงและใส มีความเสถียรและคงทนต่อการคั้นตัวของแป้งได้ดี มีความคงตัวในการแช่แข็งและการละลาย (freeze-thaw stability) สูงกว่าแป้งดัดแปรหลายชนิด มีลักษณะเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีสำหรับสารเคมีที่ The Joint FAO/WHO (1997) และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารได้แก่ออโท- ไพโร- หรือไตรโพลีฟอสเฟตโดยมี

ปริมาณฟอสเฟตตกค้างในแป้งไม่เกินร้อยละ 0.4 มีการศึกษาผลิตแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์โดย Sitohy et al. (2000) พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์จากแป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพดอะมิโลสและมิโลเพกตินสูง คือใช้สารผสมระหว่าง โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไดโซเดียมไฮโดรเจน ฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมงและ ความเป็นกรด-ด่าง 6.0 ส่วน Muhammad, Hussin, Man, Ghazali, and Kennedy (2000) ทดลองผลิตแป้งชนิดเดียวกันจากแป้งสาลีโดยใช้สารผสมระหว่าง โซเดียม ไตรโพลีฟอสเฟต และโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต คือ ความเป็นกรด-ด่าง 6.0 และใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ขณะที่ Muhammad, Kusnandar, Hasdhim, and Rahman (1999) ทดลองผลิตแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังนั้นพบว่าความเป็นกรด-ด่าง 6.0 ทำให้ระดับการแทนที่สูงที่สุด นอกจากนั้นพบว่าการใช้ความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 9.0 ทำให้แป้งเกิดการเชื่อมข้าม (cross-linking) เกิดขึ้นด้วย ระดับการแทนที่สูงขึ้นนั้นส่งผลให้ขนาดของโมเลกุลแป้งใหญ่ขึ้น ทำให้สมบัติการพอง การละลาย และความใสของแป้งเพิ่มสูงขึ้น (Sitohy and Ramadan, 2001)

ส่วนแป้งคาร์บอกซิลเมทิล เป็นการดัดแปรแป้งจากปฏิกิริยาการบอกรีเมทิลเลชัน (carboxymethylation) ระหว่างแป้งกับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต (sodium monochloro acetate) ในสภาวะต่าง โดยที่กลุ่มของคาร์บอกซิลเมทิล (CH_2COO^-) เข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ซึ่งการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล ทำให้สมบัติบางประการของแป้งเปลี่ยนไป ได้แก่ อุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันต่ำลง การละลายเพิ่มขึ้น และความคงตัวสูงขึ้น โดยคุณสมบัติต่างๆขึ้นอยู่กับระดับการแทนที่ (Siliwanlapa Ketslip, Kunruedee Sangseethong, and Klanarong Srirot, 2002) แป้งคาร์บอกซิลเมทิลสามารถใช้น้ำเป็นตัวกลางระหว่างการผลิตปฏิกิริยาได้แต่ทำให้ระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.1 (Siliwanlapa et al., 2002) ดังนั้น Tijssen, Voncken, and Beenackers (2002) ได้ทำการทดลองผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งข้าวโพด และแป้งเมล็ดสาลีโดยใช้สารผสมระหว่างน้ำและสารละลายอินทรีย์ พบว่าการใช้ ไอโซโพรพานอล สามารถทำให้ระดับการแทนที่สูงกว่าการใช้ เมทานอล เอลทานอล และอะซิโตน ในการผลิตที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับ Qiu and He (1999); Siliwanlapa et al. (2002) และ Jie, Wen-ren, Ganzeveld, and Heeres (2004) ซึ่งทดลองผลิตแป้งดังกล่าวจากแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้สัดส่วนแป้งต่อสารผสมระหว่างน้ำและไอโซโพรพานอลในอัตราส่วน 1 : 8 สามารถทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด

แป้งออกเทนนิล ซัคซิเนตเป็นการดัดแปรแป้งกับออกเทนนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์ (octenyl succinic anhydride, OSA) ในสภาวะต่าง โดยธรรมชาติแป้งมีคุณสมบัติเป็นสารที่ชอบน้ำ (hydrophilic property) การแทนที่ของกลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต ส่งผลให้แป้งมีหน้าที่คล้ายอิมัลซิ

ฟายเออร์ (emulsifier) ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพต่างๆขึ้นอยู่กับสารแทนที่ เช่น ความหนืดสูงขึ้น เพิ่มความแข็งแรงให้กับเจล และอุณหภูมิการเกิดเจลลดในเซชันต่ำลง (Bao, Xing, Philips and Corke, 2003; Shogren, Viswanthan, Ferlker, and Gross, 2000) โดยส่วนใหญ่ระดับการแทนที่ของ กลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนต สามารถเข้าแทนที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 (Shogren et al., 2000) สารเคมีที่ The Joint FAO/WHO (1997) และ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) อนุญาตให้ใช้ออกเทนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์ โดยใช้ได้ไม่เกินร้อยละ 3.0

อย่างไรก็ตาม จากรายงานการวิจัยข้างต้นเป็นนัยพบว่าแป้งแอมโพเทอริกเป็นแป้งตัดแปรที่การผลิตโดยใช้ประจุบวกจากแป้งแคทไอออนิกและประจุลบจากแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ยังไม่มีรายงานการวิจัยในกรณีผลิตแป้งแอมโพเทอริกจากกลุ่มประจุลบอื่นๆ และยังพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ใช้แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี แป้งข้าวโพด เป็นต้น แต่ขณะที่ประเทศไทยสามารถผลิตแป้งมันสำปะหลังได้เป็นจำนวนมาก หาได้ง่าย มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีกลิ่น และราคาถูก จึงทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจทำการศึกษาแป้งมันสำปะหลังแอมโพเทอริกจากประจุลบกลุ่มอื่น เพื่อเป็นทางเลือกในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อคัดเลือกสภาวะการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยการแทนที่ประจุลบที่ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด

1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่ของประจุลบก่อนและหลังการตัดแปรด้วยประจุบวก

1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งแอมโพเทอริกจากประจุลบต่างๆ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา สมบัติทางเคมีและกายภาพของการตัดแปรขึ้นอยู่กับสภาวะการตัดแปร โดยการตัดแปรแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่ประจุลบก่อนประจุบวกทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาค่ำกว่าการตัดแปรด้วยการแทนที่ประจุบวกก่อนประจุลบ และแป้งแอมโพเทอริกที่มีกระบวนการและการแทนที่ประจุลบแตกต่างกันทำให้สมบัติด้านความหนืด การพองตัวและสมบัติด้านความร้อนเปลี่ยนแปลงไป

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ทำการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการแทนที่ของประจุลบต่างๆโดยใช้โมโนโซเดียมคลอโรอะซิเตต (sodium monochloroacetate, SMCA) สำหรับการผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (sodium tripolyphosphate, STP) สำหรับแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ และออกเทนิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (octenyl succinic anhydride, OSA) สำหรับแป้งออกเทนิลซัคซินเนต ที่สภาวะต่างๆ และทำการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสม ที่ทำให้การตัดแปรมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดและมีสมบัติทางเคมีและกายภาพแตกต่างจากแป้งดิบ และทำการตัดแปรต่อโดยการแทนที่ของประจุบวกโดยใช้ 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียมไครอไรด์ (2-epoxypropyl 3-trimethylammonium chloride) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และระดับการแทนที่ สมบัติด้านความหนืด สมบัติทางความร้อน การพองตัว และลักษณะของเม็ดแป้งการตัดแปรแป้งแอมโฟเทอริกโดยการตัดแปรด้วยการแทนที่ของประจุลบก่อน และหลังการตัดแปรด้วยการแทนที่ประจุบวก เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางเคมีและกายภาพ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ทราบถึงสภาวะการตัดแปรที่เหมาะสมที่ทำให้แป้งตัดแปรมีประสิทธิภาพสูงสุดและมีคุณลักษณะที่เหมาะสม

1.5.2 สามารถนำความรู้ด้านสมบัติทางกายภาพและเคมีของแป้งแอมโฟเทอริกที่มีประจุแตกต่างกันประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษได้

1.5.3 ความเป็นไปได้ในการผลิตแป้งตัดแปรต่างๆในระดับอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด

1.6 รายการอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

กรมส่งเสริมการส่งออก. (2547). บรรจุภัณฑ์กระดาษ [ออนไลน์]. ได้จาก : <http://www.dethai.go.th>.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2535). มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งตัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. กระทรวงอุตสาหกรรม.

- Bao, J., Xing, J., Phillips, L. D., and Corke, H. (2003). Physical properties of Octenyl succinic anhydride modified rice, wheat, and potato starches. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 51: 2283-2287.
- Bhandari, N. P., and Singhal, S. R. (2002). Studies on the optimization of preparation of succinate derivative from corn and amaranth starches. **Carbohydrate Polymers** 47: 277-283.
- Hendel, V., Donald, J., and Constance, K. K., and Jonh, C. G. (2002). Process for increasing the dry strength of paper. **US patent #6 723 204**.
- Jie, Y., Wen, R-C., Manurung, M. R., Ganzeveld, J. K., and Heeres, J. H. (2004). Exploratory studies on the carboxymethylation of Cassava starch in water-miscible organic media. **Starch/Stärke** 56: 100-107.
- Kirby, W. K. (1992). Non food used of starch. In J. R. Alexander, and K. Z. Henry (eds.). **Development in carbohydrate chemistry**. (pp. 371-383). USA: The American Association of cereal chemist.
- Kweon, K-D., Chon, K-J., Kim, K-E., and Lim, T- S. (2001). Adsorption of divalent metal ions by succinylate and oxidize corn starches. **Carbohydrate Polymers** 46: 171-177.
- Lawal, S. O. (2004). Succinyl and acetyl starch derivative of a hybrid maize: physicochemical characteristic and retrogradation properties monitored by differential scanning colorimetry. **Carbohydrate Research** 339: 2673-2683.
- Misha, K. A. (2003). A review of starch application in papermaking. In **proceeding of Starch update: The 2nd conference on starch technology** (pp. 35-41). Pattaya. Thailand.

- Muhammad, K., Kusnandar, F., Hashim, M. D., and Rahman, A. R. (1999). Application of native and phosphorylation tapioca starches in potato starch noodle. **International Journal of Food Science and Technology** 34: 275-280.
- Muhammad, K., Hussin, F., Man, C. Y., Ghazali, M. H., and Kennedy, F. J. (2000). Effect of pH on phosphorylation of sago starch. **Carbohydrate Polymers** 42: 85-90.
- Qiu, H., and He, L. (1999). Synthesis and properties study of carboxymethyl cassava starch. **Polymers for Advanced Technology** 10: 469-472.
- Rutenberg, W.M., and Solarek, D. (1984). Starch derivatives: production and use. In L. R. Whistler, N. J. BeMiller, and F. E. Paschal (eds.). **Starch: chemistry and technology** (2nd ed) (pp. 460-461). New York: Academic Press.
- Shogren, R., Viswanthan, A., Felker, F., and Gross, A. R. (2000). Distribution of octenyl succinate groups in octenyl succinate modified waxy maize starch. **Starch/Stärke** 52: 196-204.
- Shogren, L. R. (2003). Rapid preparation of starch esters by high temperature/pressure reaction. **Carbohydrate Polymers** 52: 319-3.26.
- Siliwanlapa, K., Kunruedee, S., and Klanarong, S. (2002). The role of reaction parameter on the preparation and properties of caboxymethyl cassava starch. In **proceeding of Starch update: The 2nd conference on starch technology** (pp. 127-131). Pattaya. Thailand.
- Sitohy, Z. M., Labib, M. S., EI-Saadany, S. S., and Ramadan, F. M. (2000). Optimization the condition for starch dry phosphorylation with sodium mono- and dihydrogen orthophosphate under heat and vacuum. **Starch/Stärke** 52: 95-100.

- Sitohy, Z. M., and Ramadan, F. M. (2001). Granular properties of difference starch phosphate monoesters, **Starch/Stärke** 53:27-34.
- Stojanovic, Z., Jeremic, K., and Jovanovic, S. (2000). Synthesis of carboxymethyl starch. **Starch/Stärke** 52: 413-419.
- The Joint FAO/WHO (1997). Expert Committee on Food Additive. In **Compendium of food additive specification**. [On line]. Available: [http : //www.fao.org/docrep/W6355E/w6355e0o.htm](http://www.fao.org/docrep/W6355E/w6355e0o.htm).
- Thomas, J. D., and Atwell, A. W. (1999). **Starches**. Minnesota: Eagan press.
- Tijssen, J. C., Kolk, J. H., Stamhuis, J. H., and Beenackers, A. A. C. M. (2001). An experimental study on the carboxymethylation of granular potato starch in non-aqueous media. **Carbohydrate Polymers** 45: 219-226.
- Tijssen, J. C., Voncken, V. R., and Beenackers, A. A. C. M. (2001). Design of continuous process for the production of highly substituted granular carboxymethyl starch. **Chemical Engineering Science** 56: 411-418.
- Volkert, B., Loth, F., Lazik, W., and Engelhard, J. (2004). High substituted carboxymethyl starch. **Starch/Stärke** 56: 307-314.

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้งมันสำปะหลัง

แป้งมันสำปะหลังเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในอเมริกาใต้เช่น บราซิล เม็กซิโก มีการเรียกชื่อต่าง ๆ กันตามรากศัพท์ภาษาอังกฤษ ฝรั่งเศส สเปน โปรตุเกส เช่น cassava, mandioca, yacca, tapioca และ manioc โดยในทางพฤกษศาสตร์ มันสำปะหลังจัดเป็นพืชในวงศ์ ใบเลี้ยงคู่ (dicotyledoneae) ตระกูล Euphorbiaceae และมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta Cranta* (ซึ่งเดิมมีการใช้ชื่อว่า *Manihot utilissima Pohl.*) (กล้าณรงค์ ศรีรอดและ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

ประเทศผู้ปลูกมันสำปะหลังรายใหญ่ เช่น บราซิล อินโดนีเซีย และในประเทศทวีปแอฟริกา มีการใช้ประโยชน์มันสำปะหลังเพื่อการบริโภคเป็นอาหารโดยตรงและให้ความสำคัญต่อคุณภาพในการรับประทานเป็นหลัก (organoleptic cooking quality) ส่วนประเทศไทยซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิตมันสำปะหลังรายใหญ่ของโลกจะมีการใช้ประโยชน์และส่งออกมันสำปะหลังในแง่อุตสาหกรรมแป้งและแป้งแปรรูปเป็นหลัก

อุตสาหกรรมแป้งมีความสำคัญมาก ทั้งนี้มีเหตุผลที่สำคัญคือ

1 การเพิ่มปริมาณประชากรโลกทั้งมนุษย์และสัตว์ สัมพันธ์กับความต้องการอาหารเพื่อพลังงาน

2 โครงสร้างของแป้งประกอบไปด้วยหน่วยน้ำตาลกลูโคส ดังนั้นแป้งจึงเป็นแหล่งของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมน้ำตาล น้ำเชื่อม หรืออุตสาหกรรมการหมักได้เป็นอย่างดี

3 จากแป้งประกอบขึ้นด้วยหน่วยของน้ำตาลกลูโคส ซึ่งมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาเคมี การแปรรูปแป้งโดยเฉพาะการแปรรูปทางเคมี ทำให้แป้งมีสมบัติแตกต่างไปจากเดิม เป็นสมบัติตามที่อุตสาหกรรมต้องการ ดังนั้นการพัฒนาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในแง่ต่างๆ จึงสามารถทำได้ทั้งทางเคมี ชีวภาพ และกายภาพ (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

2.2 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นส่วนใหญ่ และมีสิ่งเจือปนอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ถ้าเป็นแป้งที่มีสิ่งเจือปนอยู่มาก เรียกว่า ฟลาว (flour) ส่วนแป้งที่สิ่งเจือปนถูกสกัดออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ เรียกว่า แป้ง (starch) แป้งเป็นอาหารที่สะสมในพืชที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์แสง มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ องค์การอาหารและยา (Food and Drug Administration หรือ FDA) ได้ให้ความหมายของแป้ง (starch) ว่าเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส (anhydroglucose) ที่มาเรียงต่อกันด้วยพันธะกลูโคสิดิก (glucosidic linkage) โดยในแป้งนั้นประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพคติน (amylopectin) (Wurzburg, 1987)

2.2.1 อะมิโลส (Amylose)

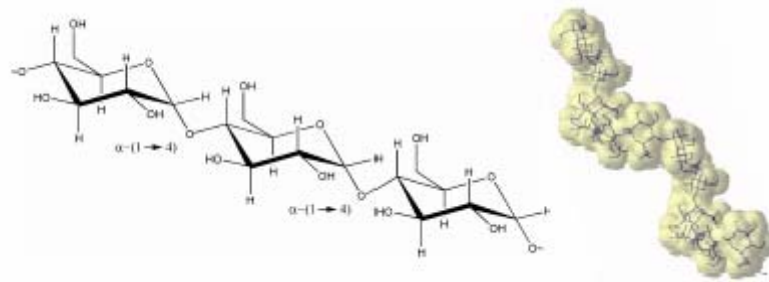
อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200 ถึง 2000 หน่วยมาเรียงต่อกันด้วยพันธะ α -1-4- glucosidic ดังภาพที่ 2.1 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 150,000 ถึง 1,000,000 โดยมีการแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของแป้ง (Fernando, 2004)

อะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไป อะมิโลสในแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่าในแป้งข้าวโพดและแป้งสาลี โดยแป้งแต่ละชนิดมีสายโซ่ (degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังมี DP ของอะมิโลสในช่วง 1,000 ถึง 6,000 ซึ่งสูงกว่าแป้งข้าวโพดและแป้งสาลีที่มี DP ของอะมิโลสในช่วง 200 ถึง 1,200 แป้งที่มีโมเลกุลของอะมิโลสยาวขึ้นมีแนวโน้มของการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรดชัน (retrogradation) ต่ำลง (กล้านรงค์ ศรีรอดและ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ซึ่งในแป้งมันสำปะหลังนั้นจะมีปริมาณอะมิโลสอยู่ระหว่างร้อยละ 8-29 แต่โดยทั่วไปจะพบในช่วงระหว่างร้อยละ 16-18 (นิตติ เต็มเวชชยานนท์, 2543)

2.2.2 อะมิโลเพคติน (Amylopectin)

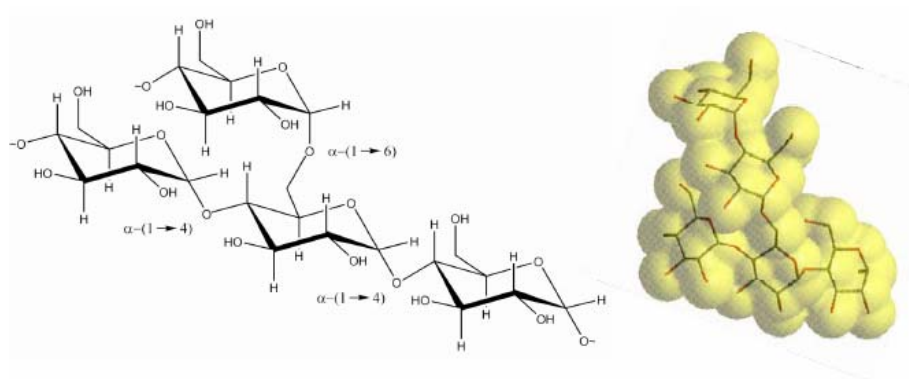
อะมิโลเพคตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคสที่ประกอบด้วยกิ่งก้านจำนวนมากส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1-4- glucosidic และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1-6- glucosidic ดังแสดงในภาพที่ 2.2 จากการศึกษาพบว่า มีผู้แสดงแบบจำลองของอะมิโลเพคตินไว้มากมายนับตั้งแต่ปี 1937 แต่ปัจจุบันแบบจำลองที่ได้รับการยอมรับคือ แบบจำลองของ Hazukuri ซึ่งอธิบายไว้ว่าส่วนที่เป็นกิ่งก้านของอะมิโลเพคตินแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือสายโซ่ A (A chain) เป็นสายโซ่เส้นตรงที่เชื่อมต่อที่หมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 (primary hydroxyl group) ของสายโซ่อื่นเพียงหนึ่งจุดสายโซ่ B (B chain) เป็นโครงสร้างแบบกิ่งก้านที่มีสายโซ่ที่เชื่อมต่อแบบกิ่งกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่าส่วนสายโซ่ C

(C chain) เป็นสายแกนที่มีเพียงหนึ่งสายต่อโมเลกุลเท่านั้น และประกอบด้วยรีดิวซิง 1 หมู่ (Fernando, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 2.3 DP ของโมเลกุลอะมิโลเพคตินมีตั้งแต่ขนาดเล็กซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย ประกอบด้วยสายโซ่ A และสายโซ่ B ขนาดเล็ก จนถึงสายโซ่ขนาดใหญ่ที่มี DP ประมาณ 45 หน่วย ประกอบด้วยสาย B ซึ่งสายโซ่เหล่านี้เกาะรวมกลุ่มก้อนกัน (cluster) ประกอบด้วยโครงสร้างที่จัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ เรียกว่า ส่วนผลึก (crystalline region) ที่เกิดจากส่วนของสายโซ่ ที่เป็นเส้นตรงของแป้งเรียงขนานกันมีความยาวของกลูโคสมากกว่า 10 หน่วย โมเลกุลสองสายเกิดพันธะไฮโดรเจนจัดเรียงตัวกันเกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นเกลียวคู่ (double helix) ในขณะที่บริเวณกึ่งที่เป็นพันธะ α -1-6 ไม่สามารถเรียงตัวเป็นระเบียบได้ จึงเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบหรือที่เรียกว่า ส่วนโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous region) ขึ้น



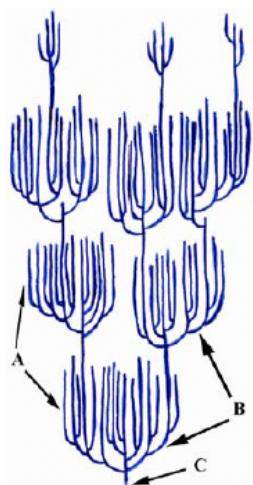
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอะมิโลส

ที่มา : Fernando, 2004



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของอะมิโลเพคติน

ที่มา : Fernando, 2004



ภาพที่ 2.3 แบบจำลองของอะมิโลเพคติน
ที่มา : Fernando, 2004

แป้งในธรรมชาติอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง (starch granule) ซึ่งมีรูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งแตกต่างกันไปตามชนิดและลักษณะของพืช เช่น ทรงกลม รูปไข่ และหลายเหลี่ยม เป็นต้น โดยลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 15 ไมโครเมตร เม็ดแป้งส่วนมากมีลักษณะเป็นรูปไข่ซึ่งปลายข้างหนึ่งถูกตัดคล้ายปากแตร (truncated helium) อย่างชัดเจน และผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าในเม็ดแป้งเหล่านี้จะแสดงให้เห็นรอยบุ๋ม (eccentric helium) อย่างชัดเจน ในบางครั้งอาจเห็นชั้นของแป้งด้วย (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2521) โดยที่ผิวหน้าของเม็ดแป้งจะมีรูเล็กๆขนาด $0.7-20 \text{ \AA}$ จำนวนมากกระจายตัวอยู่บนผิวของเม็ดแป้ง (Sterling, 1964)

2.3 วิธีการดัดแปรแป้ง

แป้งดัดแปรมีมากมายหลายชนิด ขึ้นกับสารเคมีและกรรมวิธีในการผลิต ซึ่งแป้งดัดแปรแต่ละชนิดนั้นมีสมบัติเฉพาะ การดัดแปรแป้งนั้นมีผู้แบ่งกลุ่มไว้หลายประเภทและหลายรูปแบบในที่นี้จะแบ่งกลุ่มตาม BeMiller and Bafayette (1997) ที่เสนอดังนี้

2.3.1 การดัดแปรทางเคมี (Chemical modification) เป็นการเปลี่ยนคุณสมบัติของแป้ง โดยให้แป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมี แบ่งออกเป็น

2.3.1.1 การเกิดอนุพันธ์ (derivertization)

1. การแทนที่สาร โมเลกุลเดี่ยวของแป้ง
2. การแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ หรือแป้งครอสลิง

2.3.1.2 การลดขนาดของโมเลกุลแป้งโดยใช้กรด

2.3.1.3 เด็กซ์ตรีไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดโมเลกุลหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization/transglycosylation) โดยการใช้ความร้อนกับกรด

2.3.1.4 ออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (bleaching และ depolymerization)

2.3.2 การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification) เป็นการเปลี่ยนสมบัติของแป้งโดยใช้ความร้อนหรือแรงกล แบ่งออกเป็น

2.3.2.1 แป้งพรีเจลาติไนซ์ (pregelatinized starch) เป็นการให้ความร้อนจนผ่านขั้นตอนเจลาติไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที ทำให้แป้งชนิดนี้ สามารถละลายในน้ำเย็นได้

2.3.2.2 แป้งละลายน้ำเย็น (granule cold water soluble: GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่ละลายในน้ำเย็นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนเจลาติไนเซชัน

2.3.2.3 การลดขนาดของเม็ดแป้งโดยทางกล (ball milling treatment)

2.3.3 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biology modification) เป็นการเปลี่ยนสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

2.3.3.1 waxy starch เป็นแป้งอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

2.3.3.2 high amylosed starch เป็นแป้งที่มีอะมิโลสสูง

2.3.3.3 การย่อยสลาย (hydrolysis) โดยใช้เอนไซม์เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก

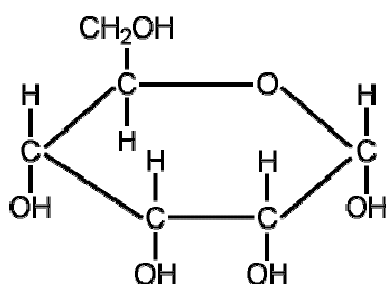
2.4 การดัดแปรทางเคมี

ในปัจจุบันแป้งดัดแปรที่ผลิตและใช้ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยกระบวนการทางเคมี เนื่องด้วยวิธีการดัดแปรทางเคมีเป็นวิธีที่ง่ายและสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งให้ตรงกับความต้องการในการนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพมาก ซึ่งแป้งจัดเป็นสารเคมีตัวหนึ่งที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงทำให้เหมาะต่อการทำปฏิกิริยาเคมีชนิดต่างๆ เพราะในโมเลกุลแป้งจะมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่สามารถทำปฏิกิริยาเคมีได้ ทำให้ง่ายต่อการดัดแปรโดยควบคุมสถานะการดัดแปรให้เป็นไปตามความต้องการ

การดัดแปรแป้งทางเคมีส่วนใหญ่นิยมทำปฏิกิริยาในสภาพแขวนลอย ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชัน (ประมาณ 45-50 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง) เมื่อทำปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งต้องทำในสภาวะชุ่มน้ำหรือเม็ดแป้งที่ปรับสภาพด้วยด่าง เม็ดแป้งจึงจะพองตัวและสามารถทำปฏิกิริยาเคมีกับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 1,000 ได้ (Honeseney and Lineback, 1996) สารเคมีทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้งโดยเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่บริเวณพื้นผิวของส่วนผลึก (crystalline) และภายในส่วนอสัณฐาน (amorphous)

การที่เม็ดแป้งมีส่วนที่เป็นผลึกที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ทำให้การเคลื่อนที่ของสารเคมีเข้าไปภายในเม็ดแป้งจึงเป็นไปได้ยาก ดังนั้นส่วนนี้จึงเกิดปฏิกิริยาได้ต่ำ อย่างไรก็ตามพบว่าพื้นผิวของอะมิโลเพคตินมีช่องเล็ก (micro channel) จำนวนมากทำให้สารเคมีสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดแป้งได้และภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยส่วนที่เป็นอสัณฐาน ซึ่งเป็นส่วน non-crystalline สารเคมีจึงสามารถแทรกซึมเข้าไปภายในโมเลกุลได้ง่ายกว่า ดังนั้นสารเคมีจึงมีแนวโน้มที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยาได้มากกว่าบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง และมีรายงานว่าสารเคมีที่ใช้ในการตัดแปรโดยการแทนที่ที่อยู่บริเวณอสัณฐานของอะมิโลเพคติน (Hood and Mercier, 1978) เนื่องจากในส่วนที่เป็นบริเวณผลึกของอะมิโลสจะแทรกอยู่เป็นโมเลกุลที่จับตัวกันแน่น ในขณะที่อะมิโลเพคตินจะมีขนาดใหญ่กว่าทำให้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า แต่ในกรณีที่ไม่มีน้ำในปฏิกิริยา สารเคมีจะไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปภายในโมเลกุลของแป้งได้ เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำให้เม็ดแป้งบวมและช่วยพาสารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเม็ดแป้งได้ (Hizukuri, 1996; Kweon, Auh, Kim, Park, and Ko, 1997)

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าการแทนที่ คือจำนวนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่ถูกแทนที่ด้วยหมู่ฟังก์ชันต่อจำนวนหน่วยน้ำตาลกลูโคส (anhydroglucose unit, AGU) ดังแสดงในสมการที่ 1 ทั้งนี้ในหนึ่งหน่วยของน้ำตาลกลูโคสของโมเลกุลแป้งจะมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 3 และ 6 ดังแสดงในภาพที่ 2.4 ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 ของหมูน้ำตาลกลูโคสถูกแทนที่ทั้งหมด ค่าระดับการแทนที่จะเท่ากับ 3 ดังนั้นระดับการแทนที่ของแป้งตัดแปรที่จะได้จะเป็นตัวบอกระดับการตัดแปรหรือปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งของปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ เนื่องจากค่าระดับการแทนที่จะเป็น



ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งของคาร์บอนบนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส

ที่มา : <http://www2.glos.ac.uk/gdn/origins/images/sugar.gif>

ของทั้งโมเลกุล (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) โดยการคำนวณค่าระดับการแทนที่สามารถคำนวณได้ตามสูตรดังนี้

$$DS = \frac{\text{โมลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่}}{\text{โมลของแอนไฮโดรกลูโคส}} \quad (1)$$

การตัดแปรรวมในกระบวนการใช้สารเคมีในการทำปฏิกิริยาน้อย ส่วนใหญ่ทำในน้ำแข็งตัดแปรรูปที่ได้จึงมีค่าระดับการแทนที่ต่ำประมาณ 0.1 ถึง 0.2

การประเมินผลการแปรรูปโดยใช้ปฏิกิริยาการแทนที่ เพื่อควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุด และผลผลิตมีความคงตัวตามความต้องการ สามารถดูได้จากสมบัติทางเคมีโดยดูจากปริมาณหมู่แทนที่ที่มีอยู่ในแป้งแล้วคำนวณออกมาในรูปของค่าระดับการแทนที่ และเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดจึงมีการเปรียบเทียบระดับการแทนที่จากการทดลองและระดับการแทนที่จากทฤษฎี เพื่อให้ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาได้ นอกจากการประเมินผลด้านการเกิดปฏิกิริยาการแทนที่โดยดูจากสมบัติทางเคมีแล้ว สามารถพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพได้อีกทางหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปแป้งที่ผ่านการตัดแปรรูปโดยปฏิกิริยาการแทนที่นั้นมีความหนืด ความใส สูงกว่าแป้งดิบขณะที่อุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ และช่วงให้ความเย็นพบว่าค่าความหนืดสุดท้ายก็ต่ำกว่าแป้งดิบ แสดงให้เห็นถึงการเกิดรีโทรเกรเดชันน้อยลง และพบว่าแป้งที่ผ่านการตัดแปรรูปมีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งดิบ

2.5 การตัดแปรรูปด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ของกลุ่มประจุลบ

2.5.1 แป้งออกเทนิล ซัคซิเนต

แป้งออกเทนิล ซัคซิเนตเป็นการตัดแปรรูปโดยวิธีเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ด้วยออกเทนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์ เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสในโมเลกุลด้วยหมู่ออกเทนิล ซัคซิเนต (-COCH₂-CH₂-CH=CH-(CH₂)₄-CH₂COOH) โดยการเกิดปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ 2 ในภาพที่ 2.5 ในการเกิดปฏิกิริยานั้นแป้งจะกระจายตัวในตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นค่าเพื่อพร้อมในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันกับ ออกเทนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์ ในสถานะต่างต่อไป (Song, He, Ruan, and Chen, 2006)

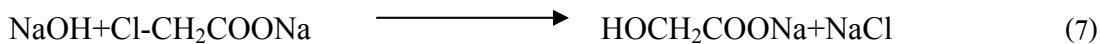
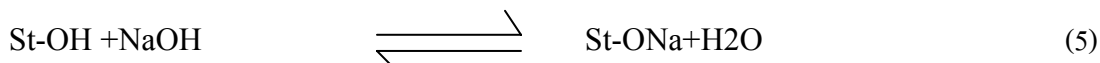
ในการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน จะมีปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) เกิดขึ้นได้ ดังแสดงในสมการที่ 3 และ 4 ในภาพที่ 2.5 เมื่อมีการตัดแปรรูปจะได้แป้งออกเทนิล ซัคซิเนตซึ่งมีสูตรโครงสร้างแสดงดังภาพที่ 2.6

Viswanthan (1999a) พบว่า ระดับการแทนที่และปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถป้องกันการเกิดคอลลอยด์ในระบบอิมัลชันได้ แต่ระดับการแทนที่ที่สูงขึ้นนั้นทำให้แป้งมีความคงตัวต่อการย่อยของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส(α -amylase), อะมิโลกลูโคซิเดส (amyloglucosidase), และ พูลูลานเนส (pullulanase) (Viswanthan, 1999b) ดังนั้นแป้งออกเทนนิล ซัคซิเนตจึงมีสมบัติเป็นแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) โดยมีประโยชน์เทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายและหมุนเวียนเลือด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ระดับการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิล ซัคซิเนต โดยส่วนใหญ่เข้าแทนที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 (Shogren et al., 2000; Song et al., 2006) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณออกเทนนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์จากร้อยละ 3 เป็น 15 โดยน้ำหนักแห้ง ทำให้ระดับการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิล ซัคซิเนตในตัวอย่างแป้งดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Bhosale and Singhal (2006) ศึกษาผลของปริมาณออกเทนนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์จากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 3 ทำให้ระดับการแทนที่สูงขึ้น และนอกจากนี้พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับการแทนที่ลดลงเมื่อใช้ปริมาณของออกเทนนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้การใช้ปริมาณออกเทนนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์มากขึ้นนั้น ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแป้งและสารเคมีในสภาวะที่เหมาะสม โดยที่ประสิทธิภาพปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนของระดับการแทนที่จากการทดลองและระดับการแทนที่จากทฤษฎี

2.5.2 แป้งคาร์บอกซิลเมทิล

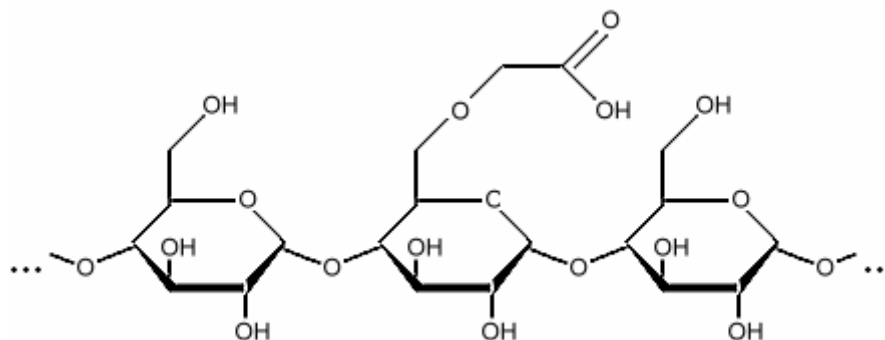
แป้งคาร์บอกซิลเมทิลเป็นการดัดแปรทางเคมีโดยใช้วิธีอีเทอร์ริฟิเคชัน (etherification) ด้วยโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต (sodium monochloroacetate, SMCA) เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสในโมเลกุลด้วยหมู่คาร์บอกซิลเมทิล (-CH₂COO⁻) โดยการเกิดปฏิกิริยา 2 ขั้นตอน คือปฏิกิริยา alkalization ซึ่งจะเป็นการทำให้เม็ดแป้งกระจายตัวในตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นด่างดังแสดงในสมการที่ 5 ในภาพที่ 2.7 เพื่อพร้อมในการทำปฏิกิริยาคาร์บอกซิเมทิลเลชัน (carboxymethylation) ดังแสดงในสมการที่ 6 ในสภาวะต่างต่อไปซึ่งเขียนเป็นสมการดังนี้ (Tijssen, Voncken, and Beenackers, 2001) ในการทำปฏิกิริยา alkalization และ คาร์บอกซิเมทิลเลชันจะมีปฏิกิริยาค้างเคียง (side reaction) เกิดขึ้นดังแสดงในสมการที่ 7 ในภาพที่ 2.7 เมื่อมีการดัดแปรจะได้แป้งคาร์บอกซิลซึ่งมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.8

แป้งคาร์บอกซิลเมทิลหรือที่รู้จักกันในชื่อ starch glyconate เป็นแป้งอีเทอร์ที่มีประจุลบ (anionic starch ether) โดยทั่วไปที่มีการผลิตและใช้ในทางการค้ามีระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.2 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) แป้งชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมายในด้านเภสัชกรรมมีการใช้แป้งคาร์บอกซิลเมทิลเคลือบเม็ดยาเพื่อความคงตัว และใช้เป็น



ภาพที่ 2.7 ปฏิกิริยาคาร์บอกซิเมทิลและปฏิกิริยาข้างเคียง

ที่มา : Tijssen, Voncken, and Beenackers (2001)



ภาพที่ 2.8 สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งคาร์บอกซิลเมทิล

ที่มา : [http:// : www. Ingredients-starch and modified starch.htm](http://www.Ingredients-starch%20and%20modified%20starch.htm)

สารให้ความคงตัวสำหรับยาที่มีส่วนผสมในลักษณะแขวนลอย ซึ่งในยาน้ำแขวนตะกอนจะใช้แป้งคาร์บอกซิลเมทิลนี้ เนื่องจากมีความหนืดสูง การแขวนตะกอนดี และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ (อรอนงค์ สุวรรณภากุล, 2539) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดเกาะ (binder) หรือสารช่วยในการแตกตัว ในการผลิตยาเม็ดเนื่องจากสมบัติความชอบน้ำ (hydrophilic) ของแป้ง (Bolhuis, Zuurmanand, and Wierik, 1997; Tijssen et al., 2001)

ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกในไอศกรีม น้ำเชื่อม น้ำตาลไอซิ่ง อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล ใช้เป็นสารป้องกันการคอลลอยด์ในมายองเนส ใช้เป็นสารทำให้ข้นในน้ำสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์ ใช้เป็นสารทำเป็นวุ้นในเยลลี่ ขนมหวาน ใช้เป็นสารทำให้ขึ้นฟูในไอศกรีม whipping cream ช่วยในด้านเนื้อสัมผัส และเป็นสารความคงตัว (Tijssen et al., 2001) โดย

คุณสมบัติของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลที่ต้องการนั้นขึ้นกับค่าระดับการแทนที่ อัตราส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกติน ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง (Bhattacharyya, Sigal, and Kulkani, 1995)

การที่แป้งคาร์บอกซิลเมทิลเป็นที่ต้องการใช้ในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของแป้งที่เปลี่ยนไปจากแป้งดิบที่สำคัญได้แก่ คุณสมบัติการชอบน้ำ เนื่องจากแป้งดัดแปรชนิดนี้เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลเมทิลส่งผลให้พันธะในเม็ดแป้งอ่อนแอลงและถูกทำลายได้ง่าย ทำให้สามารถละลายน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์ และลดอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตในเซชันลงได้ (Peterson, 1975) โดยที่ Bhattacharyya et al. (1995) ได้ทดลองแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งข้าวโพดและแป้งอะมาแรนธ์ (amaranth) โดยสามารถผลิตแป้งที่มีค่าระดับการแทนที่ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.2 และพบว่าสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น ชนิดตัวกลางทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำในตัวกลางปฏิกิริยา ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ส่วน Kweon, Auh, Kim, Park, and Ko (1997) ได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลที่มีค่าระดับการแทนที่ต่าง ๆ กัน พบว่า ความหนืดของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อลดอุณหภูมิลงแสดงถึงการไม่เกิดการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิลเมทิลทำให้เกิดแรงผลักรั้งระหว่างสายโมเลกุลแป้ง มีผลให้เกิดการยับยั้งการคืนตัวและทำให้แป้งเปียกมีความคงตัว จึงแสดงลักษณะเป็น stabilized starch ที่ช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (α -amylase) นอกจากนี้ แป้งคาร์บอกซิลเมทิลมีค่าการส่องผ่านของแสงสูงกว่าแป้งดิบอีกด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลนั้น ได้แก่ ระดับการแทนที่ของการดัดแปร โดยระดับการแทนที่แปรผันตามสภาวะของกระบวนการผลิตของแป้งแต่ละชนิด ซึ่ง Qui and He (1999) พบว่า สภาวะในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงนั้น ทำให้แป้งดัดแปรที่ได้มีอุณหภูมิเจลลิตในเซชันที่ต่ำลงและมีการพองตัวที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันไป เช่น สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งข้าวโพดที่ให้ค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 100 นาที ที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อ โซเดียมโมโนคลอไรด์เท่ากับ 1.26 : 0.69 เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำแป้งในตัวกลางปฏิกิริยาเท่ากับ 1 : 3 กรัมต่อมิลลิลิตร ตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นเอทานอลที่มีน้ำร้อยละ 25 (Stojonovic, Jeremic, and Jovanovic, 2000) ขณะที่สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งมันฝรั่งที่มีระดับการแทนที่สูงๆ โดยพบว่าชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ทำให้ระดับการแทนที่ของแป้งสูงสุดได้แก่ ไอโซโพรพานอล

ที่มีน้ำร้อยละ 10 และสภาวะอื่นๆที่เหมาะสม ได้แก่ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 100 นาที อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 40 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตต่อหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส เท่ากับ 1.0 (Tijssen et al., 2001)

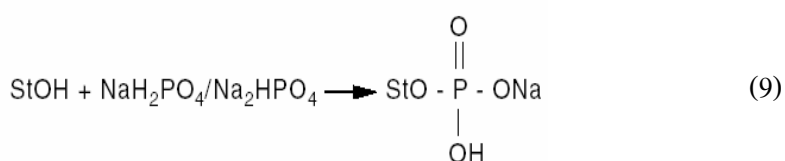
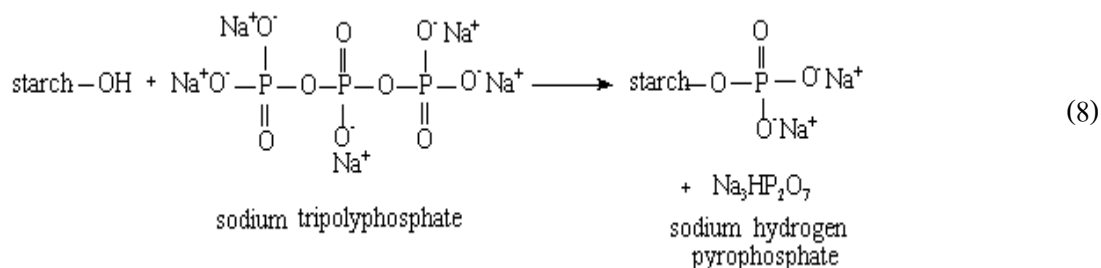
2.5.3 แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นการดัดแปรโดยใช้วิธีเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ในสภาวะกึ่งแห้ง (semi reaction) เป็นการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสในโมเลกุลด้วยหมู่ฟอสเฟต ($P=O(OH)_2$) จากไตรโพลีฟอสเฟตโดยการเกิดปฏิกิริยาฟอสโฟรีเลชัน (phosphorylation) ในสภาวะต่างได้ผลิตภัณฑ์แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ในการผลิตโดยใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (sodium tripolyphosphate, STP) นั้นได้ผลิตภัณฑ์แป้ง ออร์โทฟอสเฟต ดังสมการที่ 8 ในภาพที่ 2.9

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ที่ต้องการระดับการแทนที่ต่ำกว่า 0.02 นั้นนิยมใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต สำหรับแป้งดัดแปรที่ต้องการระดับการแทนที่สูงกว่า 0.2 นั้นนิยมใช้สารผสมระหว่างโมโนโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต สามารถทำปฏิกิริยากับแป้งได้แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ดังสมการที่ 9 ในภาพที่ 2.9 เมื่อมีการดัดแปรทำให้จะได้แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์สูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.10

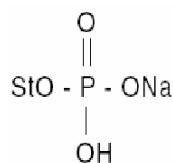
แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นแป้งดัดแปรที่มีสมบัติของประจุลบ มีความหนืดสูงขึ้นตามระดับการแทนที่ มีความเสถียรและคงตัวต่อการคืนตัวของแป้งได้ดี มีความคงตัวในการแช่แข็งและการละลาย (freeze-thaw stability) สูงกว่าแป้งดัดแปรหลายชนิด มีลักษณะเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดีสำหรับสารเคมีที่ The Joint FAO/WHO (1997) และ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ ออโท-ไฟโร-หรือไตรโพลีฟอสเฟตโดยมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างในแป้งไม่เกินร้อยละ 0.4 แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรม ต่างๆมากมาย เช่น ในด้านอุตสาหกรรมอาหาร สามารถใช้ในการผลิตขนมปัง พุดดิ้ง เกรวี ใช้เป็นอิมัลซิไฟเออร์สำหรับ น้ำส้มสายชู มายองเนส สามารถใช้เป็นสารเพิ่มความความชื้น หนืด มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลาย

ในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ ใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะในองค์ประกอบของสารเคลือบ ทั้งนี้เนื่องด้วยเป็นแป้งที่มีประจุลบจึงสามารถจับยึดกับสารที่มีประจุบวกในองค์ประกอบสารเคลือบได้ดียิ่งขึ้น สำหรับผลิตกระดาษบันทึกที่มีความร้อน (thermal recording paper) นอกจากนี้พบว่าการผสมแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์กับแป้งดิบ บอแรกซ์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ในอุตสาหกรรมกระดาษสำหรับกระดาษลูกฟูก เพื่อผลิตกาวที่มีอายุการเก็บรักษานาน (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)



ภาพที่ 2.9 ปฏิกิริยาฟอสโฟไรเลชัน

ที่มา : กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2543)



ภาพที่ 2.10 สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

ที่มา : Thomas and Atwell (1999)

การผลิตแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์นั้นผลิตในสภาวะกึ่งแห้ง ซึ่ง Lim and Serb (1993) ได้ทำการเตรียมแป้งคัดแปรดังกล่าวจากแป้งสาลี แป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่ง โดยเปรียบเทียบสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และสารผสมระหว่างโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต สามารถผลิตแป้งที่มีปริมาณฟอสเฟตร้อยละ 0.17-0.23 โดยพบว่าความเป็นกรด-ด่าง และสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ในการทดลองครั้งนี้พบว่าการใช้การใช้สารผสมระหว่างโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตนั้นสามารถทำให้ระดับการแทนที่สูงกว่าการใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตอย่างใดอย่างหนึ่ง นอกจากนี้ Muhammad, Hussin, Man, Ghazali, and Kennedy (2000) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่

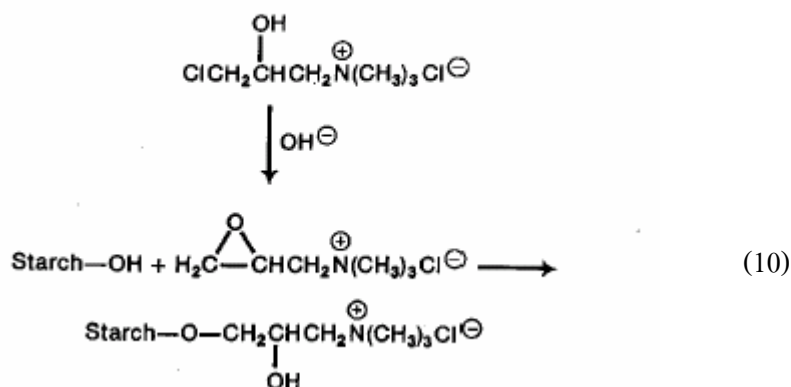
เหมาะสมในการทำให้ระดับการแทนที่สูงสุด เท่ากับ 6.0 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

Landerito and Wang (2005) พบว่าแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงส่งผลให้ระดับการแทนที่ของหมู่ฟอสเฟตต่ำลง เนื่องจากสารเคมีทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเม็ดแป้ง โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่บริเวณผิวของส่วนผลึกและภายในส่วนอสัณฐาน การที่เม็ดแป้งมีส่วนที่เป็นผลึกมาก หมายถึง เม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดแป้งจึงเกิดปฏิกิริยาได้ต่ำ Hood and Mericer (1975) พบว่าสารเคมีที่ใช้ในการตัดแปรโดยการแทนที่ สามารถเข้าทำปฏิกิริยาแทนที่ในบริเวณสัณฐานของอะมิโลพิกติน เนื่องจากส่วนดังกล่าวมีขนาดใหญ่ ทำให้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าส่วนที่เป็นบริเวณสัณฐานอะมิโลส ซึ่งจะแทรกอยู่เป็นโมเลกุลที่จับตัวกันแน่น

2.6 การตัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ของกลุ่มประจุบวก

แป้งแคทไอออนิก (cationic starch) เป็นแป้งตัดแปรที่มีประจุบวกโดยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) บนหน่วยกลูโคสในโมเลกุลด้วยสารที่เป็นวงแหวนอีพอกซี (epoxy ring) หรือสารที่สามารถให้วงแหวนอีพอกซีได้ (วุฒิชัย นาครักษา, 2538) โดยปฏิกิริยาเกิดในสภาวะต่าง ที่อุณหภูมิ 20-50 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 8-16 ชั่วโมง ในระหว่างปฏิกิริยามีการเติมโซเดียมซัลเฟตหรือเกลืออื่นๆ เพื่อป้องกันการพองตัวของเม็ดแป้ง สารเคมีที่ใช้ในการตัดแปรแป้งประจุบวกโดยทั่วไปนั้นเป็นสารเคมีจำพวกเทอร์เทียรี อะมิโน (tertiary amino) และ ควอเทอนารีแอมโมเนียม (quaternary ammonium)

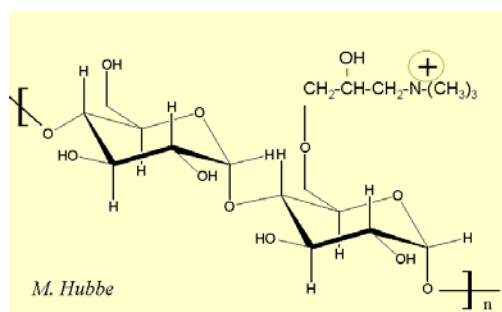
แป้งแคทไอออนิกส่วนใหญ่ที่นิยมนั้นคือ ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ (quaternary ammonium starch ether) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างแป้งและ 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์ (2-epoxypropyl 3-trimethylammonium chloride) ดังสมการที่ 10 ในภาพที่ 2. 11 เมื่อมีการตัดแปรจะได้แป้งแคทไอออนิกมีสูตรโครงสร้างดังภาพที่ 2.12 โดยที่ประจุบวกจากกลุ่มควอเทอนารีมีความคงตัวต่อความเป็นกรด-ด่าง ขณะที่ประจุบวกจากกลุ่มเทอร์เทียรีนั้นมีค่าลดลงเมื่อความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 7.0 (Scott, 1996) ในการผลิตแป้งแคทไอออนิกสามารถผลิตได้ทั้งกระบวนการแบบเปียก (wet process) และแบบแห้ง (dry heat) โดย Lim, Lang, and Sieb (1992) ได้ศึกษาการผลิตแป้งแคทไอออนิกจากแป้งข้าวโอ๊ต (oat starch) ด้วยกระบวนการแบบแห้งโดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และแคลเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ นอกจากนี้ วุฒิชัย นาครักษา (2538) สามารถผลิตแป้งแคทไอออนิกโดย



ภาพที่ 2.11 ปฏิกิริยาแปรงแคทไอออนิกด้วย 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์

ที่มา : Wurzburg (1987)

เทคนิคไมโครเวฟ แต่จากการผลิตดังกล่าวนี้พบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเพียงร้อยละ 6.14-36.0 เท่านั้น ขณะที่การผลิตด้วยกระบวนการแบบเปียกสามารถผลิตแปรงแคทไอออนิกมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาถึงร้อยละ 75.0-90.0 (Rutenberg and Solarek, 1984) สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตแปรงแคทไอออนิกที่สามารถนำมาใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหารตามข้อบังคับของ The Joint FAO/WHO (1997) ได้แก่ 2-ไดเอทิลอะมิโนเอทิล คลอไรด์ (2-diethylamino chloride, DEC) และ 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์ (2-epoxypropyl 3-trimethylammonium chloride) (Solarek, 1984) คุณสมบัติของแปรงแคทไอออนิกมีความเสถียรและอัตราการคืนตัวต่ำ สามารถเกิดพันธะไอออนิกกับประจุลบของเซลล์ลูไลสในอุตสาหกรรมกระดาษได้ดี จึงมีการใช้มากในอุตสาหกรรมกระดาษ ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมน้ำยาซักแปรง ซึ่งในอุตสาหกรรมกาวนั้นใช้แปรงแคทไอออนิกผสมเพื่อเพิ่มความเหนียว ส่วนในอุตสาหกรรมอื่นใช้เป็นสารตกตะกอน (flocclulants) สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีประจุลบ และใช้กำจัดโลหะที่มีประจุลบต่างๆ จากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

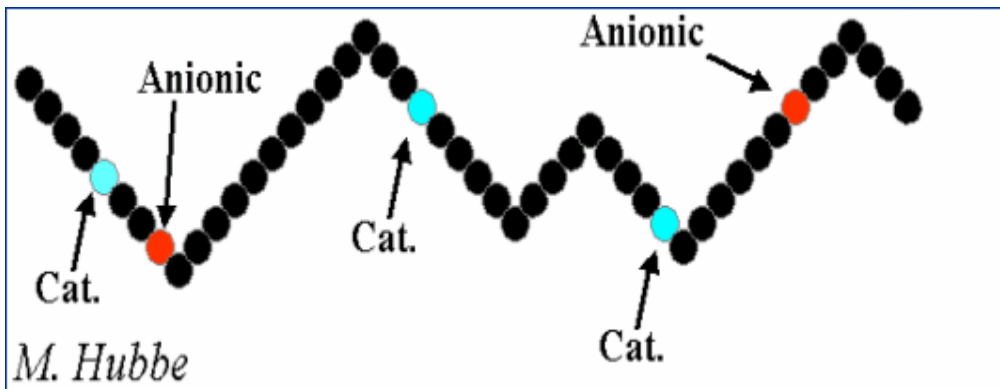


ภาพที่ 2.12 สูตรโครงสร้างของโมกุลแป้งแคทไอออนนิค
ที่มา : <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/CST.htm>

2.7 แป้งแอมโฟเทอริก

แป้งแอมโฟเทอริก (amphoteric starch) เป็นแป้งที่มีทั้งประจุบวกและลบโดยที่ประจุบวกของแป้งเป็นประจุบวกจากเทอร์เทียรี อะมิโน (tertiary amino) และ คิวเทอ (phosphate) และ ซัคซิเนต (succinate) (Kirby, 1992) แป้งแอมโฟเทอริก ในระดับอุตสาหกรรมสามารถผลิตได้ทั้งจากแป้งข้าวโพด ข้าวโพดข้าวเหนียวและมันฝรั่ง โดยเฉพาะในแป้งมันฝรั่งซึ่งมีประจุลบจากฟอสเฟตถึงร้อยละ 0.08 สามารถผลิตแป้งแอมโฟเทอริกได้โดยการเติมเฉพาะกลุ่มประจุบวกเข้าไปในโมเลกุลเท่านั้น ส่วนแป้งชนิดอื่นนั้นต้องมีการเติมทั้งสองประจุเข้าไปในโมเลกุล แป้งแอมโฟเทอริกโดยส่วนใหญ่มีปริมาณกลุ่มประจุบวกมากกว่ากลุ่มของประจุลบ โดยกลุ่มประจุบวกในแป้งแอมโฟเทอริกนั้นมีปริมาณในโตรเจนร้อยละ 0.20-0.33 (Kirby, 1992) ส่วนกลุ่มประจุลบมีปริมาณเพียง 0.07-0.18 โมลต่อโมลของกลุ่มประจุบวก (Rutenberg and Solarek, 1984) ซึ่งมีโครงสร้างดังภาพที่ 2.13

ในอุตสาหกรรมกระดาษนิยมใช้แป้งแอมโฟเทอริกในกระบวนการ wet end (Hubbard, Liberty, Harvey, and Hogen, 1986) เพื่อช่วยเพิ่ม retention และ drainage ซึ่งทำให้ผลผลิต (yield) เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดค่า BOD ของน้ำทิ้ง ทำให้เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม Hubbard et al. (1986) ได้ศึกษาแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต โดยใช้ไตรโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต จากการทดลองพบว่าหลังการดัดแปรแป้งแอมโฟเทอริกแล้ว ระดับการแทนที่ทั้งประจุบวกและลบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งแคทไอออนนิคและแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ต่อมา Xu, Wang, Wu, Wang, and Li (2006) ได้เตรียมแป้งโครอสติงแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิล เพื่อใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยใช้การแทนที่ของประจุบวก ร้อยละ 0.3 ต่อ 0.12-0.33 ของกลุ่มคาร์บอกซิล พบว่าระดับการแทนที่ของคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น และ Xing, Zhang, Ju, and Yang (2006) พบว่าการกำจัด



ภาพที่ 2.13 สูตรโครงสร้างของ โมกุลเป็งแอมโฟเทอริก

ที่มา : <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/CST.htm>

โครเมียมในน้ำเสียนั้น สามารถใช้เป็งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มมาลิก (maleic group) ได้อีกด้วย

2.8 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). **เทคโนโลยีของเป็ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- นิติ เต็มเวชชยานนท์. (2543). การคัดแปรเป็งมันสำปะหลังด้วยวิธี Ball-mill และศึกษาสมบัติของ เป็งคัดแปร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2521). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเป็งมัน สำปะหลัง**. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2535). **มาตรฐานผลิตภัณฑ์เป็งคัดแปรสำหรับ อุตสาหกรรมอาหาร**. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- รุ่งทิวา วันสุขศรี. (2543). การสกัดโปรตีนในปลายข้าวหอมมะลิเพื่อทำเป็งข้าวเจ้าบริสุทธิ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.
- วุฒิชัย นาครักษา (2538). การผลิตเป็งแคทไอออนิกด้วยเทคนิคไมโครเวฟ.วารสารสำนักงาน กรมการวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งชาติ. 27(1) 35-46.

อรอนงค์ สุวรรณภากุล. (2539). การเตรียมและประเมินผลคุณสมบัติการเป็นสารช่วยแขวนตะกอนของแป้งโซเดียมคาร์บอกซีเมทิล. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

BeMiller, J. N., and Lafayette, W. (1997). Starch modification: challenges and prospects. **Starch/Stärke** 49: 127-131.

Bhattacharyya, D., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. (1995). A comparative account of conditions for synthesis of sodium carboxymethyl starch from corn and amaranth starch. **Carbohydrate polymers** 27: 247-253.

Bhosale, R., and Singhal, R. (2006). Process optimization for the synthesis of octenyl succinyl derivative of waxy corn and amaranth starches. **Carbohydrate Polymers** 66(4): 521-527.

Bolhuis, G. K., Zuurmanand. K., and Wierik, G. H. P. (1997). Improve of dissolution of poorly soluble drugs by solid deposition on a super disintegrant. II. The choice of super disintegrant and effect of granulation. **Europe Journal of Pharmaceutical Science** 5: 63-69.

Fernando, E. O. (2004). **Interaction between amylose, native potato, hydrophobically modified potato and amylopectin potato starches.** Ph.D. Dissertation, University of Loud, Sweden.

Haubbard, E. D., Liberty, W., Harty, D. R., and Hogen, L. M. (1986). Starch phosphate and amphoteric starch phosphate. **U.S patent** # 4 5669 10.

Heinze, T. H., Pfeiffer, K. and Lazik, W. (2001). Starch derivatives with high degree of functionalization. III. Influence of reaction conditions and starting materials on molecular structure of carboxymethyl starch. **Journal of Applied Polymer Science** 81(8): 2036-2044.

- Hizukuri, S. (1996). Starch: analytical aspect In A.C. Eliasson (ed.). **Carbohydrate in Food**. (pp. 347-429). New York: Marcel Dekker.
- Hoseney, R. C., and Lineback, D. R. (1996). Method synthesis and characterization. In Hoseney (ed.). In **processing of Starch: Structure, Properties, and Food Uses**. Bangkok. Thailand.
- Hood, L. F., and Mercier, C. (1978). Molecular structure of unmodified and chemically modified manioc starches. **Carbohydrate Research** 61: 53-66.
- <http://www2.glos.ac.uk/gdn/origins/images/sugar.gif>
- <http://www.Ingredients-starch and modified starch.htm>
- <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/CST.htm>
- Kirby, W. K. (1992). Non food used of starch. In J. R. Alexander, and K. Z. Henry (eds.). **Development in carbohydrate chemistry**. (pp. 371-383). USA: The American Association of cereal chemist.
- Kweon, K. J. H, Auh, J. W., Kim, K. H., Park C. H., and Ko, C. J. (1997). Physiochemical properties and functional of highly carboxymethylated starch. **Starch/Stärke** 49(12): 499-505.
- Landerito, N. A., and Wang, Y-J. (2005). Preparation and properties of starch phosphate using waxy, common, and high-amylose corn starch. II. Reactive extrusion method. **Cereal Chemistry** 82(3): 271-276.
- Lim, W. J., Lang, Y. T., and Sieb, P. A. (1992). Cationic oat starch: Preparation and effect on paper strength. **Cereal Chemistry** 69(3): 237-239.
- Lim, S., and Sieb, P. A. (1993). Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphate. **Cereal chemistry** 70(2): 137-144.
- Muhammad, K., Kusnandar, F., Hashim, M. D., and Rahman, A. R. (1999). Application of native and phosphorylation tapioca starches in potato starch

- noodle. **International Journal of Food Science and Technology** 34: 275-280.
- Muhammad, K., Hussin, F., Man, C. Y., Ghazali, M. H., and Kennedy, F. J. (2000). Effect of pH on phosphorylation of sago starch. **Carbohydrate Polymers** 42: 85-90.
- Peterson, N. B. (1975). **Edible starch and starch-Derived syrup**. London: Noyes Data Corporation.
- Qiu, H., and He, L. (1999). Synthesis and properties study of carboxymethyl cassava starch. **Polymers for Advanced Technology** 10: 469-472.
- Rutenberg, W. M., and Solarek, D. (1984). Starch derivatives: production and use. In L. R. Whistler, N. J. BeMiller, and F. E. Paschal (eds.). **Starch: chemistry and technology** (2nd ed) (pp. 460-461). New York: Academic Press.
- Scott, W. E. (1996). **Principle of wet end chemistry**. (2nd ed.) Atlanta: TAPPI Press.
- Shogren, R. L., Viswanathan, A., Felker, F., and Gross, R. A. (2000). Distribution of octenyl succinated groups in octenyl succinic anhydried modified waxy maize starch. **Starch/Stärke** 52: 196-204.
- Solarek, D. (1984). Starch derivatives: production and use. In L.R. Whistler, N. J. BeMiller, and F. E. Paschal (eds.). **Starch: chemistry and technology** (2nd ed) (pp. 480-482). New York: Academic Press.
- Song, X., He, G., Ruan, H., and Chen, Q. (2006). Preparation and properties of octenyl succinic anhydride modified *Early Indica* rice starch. **Starch/Stärke** 58: 109-117.
- Sterling, C. (1964). Starch-Primulin Fluorescence. **Protoplasma** 59: 180-192.
- Stojanovic, Z., Jeremic, K., and Jovanovic, S. (2000). Synthesis of carboxymethyl starch. **Starch/Stärke** 52: 413-419.

- The Joint FAO/WHO. (1997). Expert Committee on Food Additive. In **Compendium of food additive specification**. [On line]. Available: <http://www.fao.org/docrep/W6355E/w6355e0o.htm>.
- Thomas, J. D., and Atwell, A. W. (1999). **Starches**. Minnesota: Eagan Press.
- Tijssen, J. C., Kolk, J. H., Stamhuis, J. H., and Beenackers, A. A. C. M. (2001). An experimental study on the carboxymethylation of granular potato starch in non-aqueous media. **Carbohydrate Polymers** 45: 219-226.
- Viswanathan, A. (1999a). Effect of degree of substitution of octenyl succinate starch on enzymatic degradation. **Journal of Environmental Polymer Degradation** 7: 185-190.

บทที่ 3

การดัดแปรแป้งด้วยปฏิกิริยาแทนที่ของกลุ่มประจุลบ Starch modification substituted by anionic substitution

3.1 บทคัดย่อ

การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยการแทนที่ของกลุ่มประจุลบ 3 กลุ่ม ได้แก่ แป้งออกเทนิน ซัคซินเนต แป้งคาร์บอกซิลเมทิล และแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ซึ่งแป้งออกเทนิน ซัคซินเนต เป็น การดัดแปรแป้งในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง 8.0-10.0 และ ออกเทนิน ซัคซินนิค แอนไฮไดรด์ ร้อยละ 1.0-3.0 ในระยะเวลา 60-300 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพ การเกิดปฏิกิริยามีค่าตั้งแต่ร้อยละ 19.83-75.52 โดยตัวแปรที่เหมาะสมในการเตรียมแป้งออกเทนิน ซัคซินเนต ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ปริมาณออกเทนิน ซัคซินนิคแอนไฮไดรด์ร้อยละ 3.0 และ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 300 นาที ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.52 ความหนืดสูงสุดจากการตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

แป้งคาร์บอกซิลเมทิล ได้จากการทำปฏิกิริยาคาร์บอกซิลเมทิลเลชันระหว่างแป้งที่กระจายตัว ในสารละลายไอโซโพรพานอลที่มีน้ำร้อยละ 7-23 ในสภาวะด่างที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2-10 กับโซเดียม โมโนคลอโรอะซิเตตร้อยละ 5-20 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 1.36-15.09 ขึ้นกับ สภาวะที่ใช้ในการผลิต โดยสภาวะที่ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15.09 เมื่อใช้ตัวกลางปฏิกิริยาที่มีน้ำร้อยละ 1.54 ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 6.0 และปริมาณ โซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตร้อยละ 12.5 นอกจากนี้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ ค่าการละลายในน้ำเย็นเพิ่มขึ้น

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นปฏิกิริยาฟอสโฟรีเลชันในสภาวะกึ่งแห้งระหว่างแป้งและ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต โดยสภาวะที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อย ละ 3-12 ความเป็นกรด-ด่าง 4.5-9.0 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60-240 นาที ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส พบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 23.42 เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไตร โพลีฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 7.5 ความเป็นกรด-ด่าง 6.5 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที โดยที่ความหนืดสูงสุดและความใสของแป้งเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตและ ความเป็นกรด-ด่างสูงขึ้น

3.2 บทนำ

แป้งดัดแปรที่มีประจุลบเป็นการดัดแปรด้วยการแทนที่ของสารเคมีประจุลบต่างๆที่เป็นกลุ่มของ คาร์บอกซิล (carboxyl) ฟอสเฟต (phosphate) และ ออกเทนนิล ซัคซิเนต (octenyl succinate) เป็นต้น (Kirby, 1992)

แป้งออกเทนนิล ซัคซิเนตเป็นที่ต้องการในอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของแป้งที่เปลี่ยนไปจากแป้งดิบ (native starch) ที่สำคัญได้แก่ คุณสมบัติที่ชอบน้ำ (hydrophilic property) และ ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic property) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ส่งผลให้แป้งออกเทนนิล ซัคซิเนตมีหน้าที่คล้ายอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ซึ่งสามารถใช้ในอุตสาหกรรม น้ำสลัด encapsulation สามารถใช้เป็นสารทดแทนกัม อะราบิก (gum arabic) นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถใช้เป็นสารเคลือบผิวในอุตสาหกรรมยา เพื่อป้องกันเม็ดยาเปียก (Tijssen, Kolk, Stamhuis and Beenackers, 2001) เนื่องจากแป้งชนิดนี้เป็นการดัดแปรโดยการแทนที่ (substitution) ดังนั้นสมบัติต่างๆ เช่น ความหนืดที่สูงขึ้น อุณหภูมิการเกิดเจลลาติโนเซชันที่ลดลง การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) และการแยกตัวของน้ำ (syneresis) ที่ลดลง จึงทำให้แป้งชนิดนี้มีความคงตัวต่อสภาวะอุณหภูมิต่ำ (Bao, Xing, Philips, and Corke, 2003; Shogren, Viswanthan, Ferlker, and Gross, 2000; กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ทั้งนี้เนื่องจากการเข้าแทนที่ของกลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต ช่วยขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดแป้งที่จะมาเกิดพันธะไฮโดรเจน โดยการยับยั้งการรวมตัวกันของโมเลกุลอะมิโลส (Whisler and BeMiller, 1997) Viswanthan (1999a) พบว่า ระดับการแทนที่และปริมาณแป้งที่เพิ่มขึ้นไม่สามารถป้องกันการเกิดคอลลอยด์ในระบบอิมัลชันได้ แต่ระดับการแทนที่ที่สูงขึ้นนั้นทำให้แป้งมีความคงตัวต่อการย่อยของเอนไซม์ แอลฟา อะมิเลส (α -amylase), อะมิโลกลูโคซิเดส (amyloglucosidase) และ พุลูลานาส (pullulanase) (Viswanthan, 1999b) ดังนั้นแป้งออกเทนนิล ซัคซิเนตจึงมีสมบัติเป็นแป้งที่ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (resistant starch) โดยมีประโยชน์เทียบเท่ากับเส้นใยอาหาร ซึ่งมีประโยชน์ต่อระบบขับถ่ายและหมุนเวียนเลือด (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) ระดับการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิล ซัคซิเนต โดยส่วนใหญ่เข้าแทนที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 (Shogren et. al., 2000)

The Joint FAO/WHO (1997) และ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) อนุญาตให้ใช้ ออกเทนนิล ซัคซิเนตแอนไฮไดรด์ไม่เกินร้อยละ 3 ซึ่ง Song, He, Ruan, and Chen (2006) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ ออกเทนนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์จากร้อยละ 3 เป็น 15 โดยน้ำหนักแห้ง ระดับการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิล ซัคซิเนตในตัวอย่างแป้งดัดแปรมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Bhosale and Singhal (2006) ศึกษาปริมาณออกเทนนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 3 ทำให้ระดับการแทนที่ที่สูงขึ้นเช่นกัน และพบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับการแทนที่

ต่ำกว่าการใช้ออกเทนิลซัคซินิคแอนไฮไดรด์ปริมาณน้อย ส่งผลให้การใช้ปริมาณออกเทนิลซัคซินิคแอนไฮไดรด์มากขึ้นมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาต่ำ เนื่องจากประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของแป้งและสารเคมีในสภาวะที่เหมาะสม โดยที่ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนของระดับการแทนที่จากการทดลองและระดับการแทนที่จากทฤษฎี

การดัดแปรในระบบที่เป็นด่าง สามารถช่วยเร่งปฏิกิริยาการแทนที่ได้ โดยส่วนใหญ่จะปรับความเป็นกรด-ด่างในช่วง 8.0-9.0 (Song et al., 2006; Bhosale and Singhal, 2006; Jeon, Viswabathan, and Gross, 1999) ทั้งนี้เนื่องจากการปรับความเป็นกรด-ด่างที่ดำเนินไปทำให้หมู่ออกเทนิลซัคซินิคไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้เพียงพอกับกลุ่มไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของแป้ง ในขณะที่ช่วงการปรับความเป็นด่างที่สูงเกินไปส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้ ส่วนอุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีของแป้ง ซึ่งอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียสปฏิกิริยาดำเนินไปช้าๆ (Wurzburg, 1987)

แป้งคาร์บอกซิลเมทิลหรือที่รู้จักกันในชื่อ starch glyconate เป็นแป้งอีเทอร์ที่มีประจุลบ (anionic starch ether) โดยทั่วไปที่มีการผลิตและใช้ในทางการค้ามีระดับการแทนที่ (degree of substitution) ต่ำกว่า 0.2 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) แป้งชนิดนี้ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย ในด้านเภสัชกรรมใช้แป้งคาร์บอกซิลเมทิลเคลือบเม็ดยาเพื่อความสะดวกตัว และใช้เป็นสารให้ความคงตัวสำหรับยาที่มีส่วนผสมในลักษณะแขวนลอย ซึ่งในยาน้ำแขวนตะกอนใช้แป้งคาร์บอกซิลเมทิลนี้ เนื่องจากมีความหนืดสูง การแขวนตะกอนดี และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ (อรอนงค์ สุวรรณภากุล, 2539) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารยึดเกาะ (binder) หรือสารช่วยในการแตกตัว ในการผลิตยาเม็ด เนื่องจากสมบัติความชอบน้ำของแป้ง (Bolhuis, Zuumrmanand, and Wierik, 1997; Tijssen et al., 2001)

ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นสารป้องกันการตกผลึกในไอศกรีม น้ำเชื่อม น้ำตาลไอซิ่งส์ อาหารพวกที่ฉาบน้ำตาล ใช้เป็นสารป้องกันการเกิดคอลลอยด์ในมายองเนส ใช้เป็นสารทำให้ข้นในน้ำสลัด เครื่องดื่ม อาหารสัตว์ ใช้เป็นสารทำให้เกิดฟองในเยลลี่ ขนมหวาน ใช้เป็นสารทำให้ขึ้นฟูในไอศกรีม whipping cream ช่วยในด้านเนื้อสัมผัส และเป็นสารความคงตัว (Tijssen et al., 2001) โดยคุณสมบัติของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลที่ต้องการนั้นขึ้นกับค่าระดับการแทนที่ อัตราส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้ง (Bhattacharyya, Sigal, and Kulkani, 1995)

การที่แป้งคาร์บอกซิลเมทิลเป็นที่ต้องการใช้ในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของแป้งที่เปลี่ยนไปจากแป้งดิบ สำคัญได้แก่ คุณสมบัติการชอบน้ำ เนื่องจากแป้งดัดแปรชนิดนี้เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุลบของหมู่คาร์บอกซิลเมทิลส่งผลให้พันธะในเม็ดแป้งอ่อนแอลงและถูก

ทำลายได้ง่าย ทำให้สามารถละลายน้ำเย็นได้อย่างสมบูรณ์ และลดอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตินเซชันลงได้ (Peterson, 1975)

Bhattachryya et al. (1995) ได้ทำการเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งข้าวโพดและแป้งอะมาแรนธ์ (amarant) โดยสามารถผลิตแป้งที่มีค่าระดับการแทนที่ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.2 และพบว่าสภาวะที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น ชนิดตัวกลางทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำในตัวกลางปฏิกิริยา ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เวลาและอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ส่วน Kweon, Auh, Kim, Park, and Ko (1997) ได้ทำการตรวจสอบสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลที่มีค่าระดับการแทนที่ต่าง ๆ กัน พบว่าความหนืดของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อลดอุณหภูมิลงแสดงถึงการไม่เกิดการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิล ถูกเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิลเมทิลทำให้เกิดแรงผลักรั้งระหว่างสายโมเลกุลแป้ง มีผลให้เกิดการยับยั้งการคืนตัวและทำให้แป้งเปียกมีความคงตัว จึงแสดงลักษณะเป็น stabilized starch ที่ช่วยลดการเกิดรีโทรเกรเดชันและทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา อะมิเลส (α -amylase) นอกจากนี้ แป้งคาร์บอกซิลเมทิลมีค่าการส่องผ่านของแสงสูงกว่าแป้งดิบอีกด้วย โดยปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้งคาร์บอกซิลเมทิลนั้น ได้แก่ ระดับการแทนที่ของการตัดแปร โดยระดับการแทนที่แปรผันตามสภาวะของกระบวนการผลิตของแป้งแต่ละชนิด ซึ่ง Qui and He (1999) พบว่าสภาวะในการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้เอทานอลเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมงนั้นทำให้แป้งตัดแปรที่ได้มีอุณหภูมิเจลลิตินเซชันที่ต่ำลง และมีการพองตัวที่ดีขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการตัดแปร

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลของแป้งแต่ละชนิดแตกต่างกันไป เช่น สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งข้าวโพดที่ให้ค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 100 นาที ที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตด เท่ากับ 1.26 : 0.69 เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำแป้งในตัวกลางปฏิกิริยาเท่ากับ 1:3 กรัมต่อมิลลิลิตร ตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นเอทานอลที่มีน้ำร้อยละ 25 (Stojonovic, Jeremic, and Jovanovic, 2000) นอกจากนี้ Tijssen et al. (2001) พบว่าชนิดของตัวทำละลายอินทรีย์ที่ทำให้ระดับการแทนที่สูงที่สุด ได้แก่ ไอโซโพรพานอล ที่มีน้ำร้อยละ 10 โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 100 นาที ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและ อัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตดต่อหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส เท่ากับ 1.0

Heinze, Pfeiffer, and Lazik (2001) ได้ทำการทดลองเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิลโดยการใช้สารละลายผสมของเมทานอลและน้ำเป็นตัวกลางปฏิกิริยา และเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ

ละ 45 (น้ำหนักต่อปริมาตร) พบว่าแป้งคาร์บอกซิลเมทิลที่ได้มีค่าระดับการแทนที่สูงถึง 0.66 และพบว่าค่าระดับการแทนที่จะเพิ่มสูงขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้เตรียมและปริมาณอะมิโลสของแป้งเริ่มต้น

แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์เป็นแป้งดัดแปรที่มีสมบัติของประจุลบ มีความหนืดสูงขึ้นตามระดับการแทนที่มีความเสถียรและคงตัวต่อการคืนตัวของแป้งได้ดี มีความคงตัวในการแช่แข็งและการละลาย (freeze-thaw stability) สูงกว่าแป้งดัดแปรหลายชนิดมีลักษณะเป็นอิมัลซิฟายเออร์ที่ดีสำหรับสารเคมีที่ The Joint FAO/WHO (1997) และ สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535) อนุญาตให้ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ได้แก่ ออโท-ไฟโร-หรือไตรโพลีฟอสเฟตโดยมีปริมาณฟอสเฟตตกค้างในแป้งไม่เกินร้อยละ 0.4 แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ มากมาย เช่น ในด้านอุตสาหกรรมอาหาร สามารถใช้ในการผลิตขนมปัง พุดดิ้ง เกรวี ใช้เป็นอิมัลซิฟายเออร์สำหรับ น้ำส้มสายชู มายองเนส สามารถใช้เป็นสารเพิ่มความความข้นหนืด มีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็งและการละลาย ในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ ใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะในองค์ประกอบของสารเคลือบ ทั้งนี้เนื่องด้วยแป้งที่มีประจุลบจึงสามารถจับยึดกับสารที่มีประจุบวกในองค์ประกอบสารเคลือบได้ดียิ่งขึ้นสำหรับผลิตกระดาษบันทึกที่มีความร้อน (thermal recording paper) นอกจากนี้พบว่าการผสมแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์กับแป้งดิบ บอแรกซ์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ และน้ำ ในอุตสาหกรรมกระดาษสำหรับกระดาษลูกฟูก เพื่อผลิตกระดาษที่มีอายุการเก็บรักษานาน (กัลารณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

การผลิตแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์นั้นผลิตในสภาวะกึ่งแห้ง ซึ่ง Lim and Serb (1993) ได้ทำการเตรียมแป้งดัดแปรดังกล่าวจากแป้งสาลีแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่ง โดยเปรียบเทียบสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และสารผสมระหว่างโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต สามารถผลิตแป้งที่มีปริมาณฟอสเฟตร้อยละ 0.17-0.23 โดยพบว่าความเป็นกรด-ด่าง และสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง ในการทดลองครั้งนี้พบว่าการใช้การใช้สารผสมระหว่างโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตนั้นสามารถทำให้ระดับการแทนที่สูงกว่าการใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต หรือโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตอย่างใดอย่างหนึ่ง นอกจากนี้ Muhammad, Hussin, Man, Ghazali, and Kennedy (2000) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมในการทำให้ระดับการแทนที่สูงสุด เท่ากับ 6.0 ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง

Landerito and Wang (2005) พบว่าแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะมิโลสสูงส่งผลให้ระดับการแทนที่ของหมู่ฟอสเฟตต่ำลงใน เนื่องมาจากสารเคมีทำปฏิกิริยากับแป้งบริเวณพื้นผิวเมล็ดแป้ง

โดยการเกิดปฏิกิริยาเคมีกับเม็ดแป้งที่บริเวณผิวของส่วนผลึก (crystalline) และภายในส่วนอสัณฐาน (amorphous) การที่เม็ดแป้งมีส่วนที่เป็นผลึกมาก หมายถึง เม็ดแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ดังนั้นจึงเป็นการยากที่สารเคมีจะเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดแป้ง จึงเกิดปฏิกิริยาได้ต่ำ Hood and Mericer (1975) พบว่าสารเคมีที่ใช้ในการตัดแปรโดยการแทนที่ สามารถเข้าทำปฏิกิริยาแทนที่ในบริเวณสัณฐานของอะมิโลพิกติน เนื่องจากส่วนดังกล่าวมีขนาดใหญ่ ทำให้สารเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าส่วนที่เป็นบริเวณสัณฐานอะมิโลส ซึ่งจะแทรกอยู่เป็นโมเลกุลที่จับตัวกันแน่น

คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ที่มีกระบวนการผลิตแตกต่างกันนั้นส่งผลให้คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพต่างกันด้วย โดยพบว่าการใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ในการผลิตที่ความความเป็นกรด-ด่างสูง (มากกว่า 11.0) ทำให้แป้งเกิดพันธะเชื่อมข้าม (crosslink) เกิดขึ้น ขณะที่การเกิดพันธะเชื่อมข้ามโดยการใช้สารผสมระหว่างโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต นั้นจะเกิดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 9.0 ซึ่งการเกิดพันธะเชื่อมข้ามนั้นส่งผลให้เม็ดแป้งแข็งแรงขึ้น เนื่องจากเกิดพันธะโควาเลนต์เชื่อมข้าม ส่งผลให้เพิ่มความต้านทานต่อสภาวะความเป็นกรด และสภาวะที่มีแรงเฉือน นอกจากนี้ยังสามารถลดการพองตัวของเม็ดแป้ง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) Sitohy, Labib, El-Sandany, and Ramadan (2000) พบว่าระดับการแทนที่มากกว่า 0.09 นั้นสามารถทำให้ค่าการละลายน้ำเย็น ความหนืด และค่าการส่องผ่านของแสงลดลง

ปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ได้แก่ ระดับการแทนที่ของการตัดแปรและการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมข้าม ซึ่งจะผันแปรตามสภาวะของกระบวนการผลิตแป้งแต่ละชนิด ซึ่ง Muhammad et al. (2000) พบว่าสภาวะในการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยการใช้สารผสมระหว่างโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ที่ความความเป็นกรด-ด่าง 9.5 และอุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้แป้งที่ได้มีอุณหภูมิเจลาติไนเซชันที่ต่ำลงและทำให้แป้งตัดแปรที่ได้มีการพองตัวต่ำกว่าแป้งดิบ

สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ จากแป้งข้าวโพด และแป้งสาลี ที่ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด โดยทำให้แป้งตัดแปรเกิดพันธะเชื่อมข้ามน้อยที่สุด คือ ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยการใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 5.0 ที่ความความเป็นกรด-ด่าง 6.0 (Lim and Seib, 1993)

ในปัจจุบันแป้งตัดแปรส่วนใหญ่ที่มีการผลิตในเชิงการค้านั้นผลิตจากแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่ง ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นแป้งที่สำคัญและมีการผลิตมากที่สุดของประเทศไทย การผลิตแป้งมันสำปะหลังตัดแปรในระดับอุตสาหกรรมยังมีน้อย งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะ

พัฒนาแปรงคัดแปรด้วยการแทนที่ของกลุ่มประจุบต่างๆ จากแป้งมันสำปะหลัง และศึกษาสมบัติของแปรงคัดแปรที่เตรียมได้ เพื่อเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์ต่อไป

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาสถานะในการทำปฏิกิริยาที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (reaction efficiency, RE) และศึกษาสมบัติทางกายภาพของแป้งที่ผ่านการคัดแปรที่สถานะต่างๆ กันที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลัง

3.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมแป้งออกเทนิน ซัคซินเนต

เตรียมสารละลายน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 35 ปรับความเป็นกรด-ด่างในช่วง 8.0-11.0 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 เติมออกเทนิน ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 1.0-3.0 โดยน้ำหนักแห้ง และปรับความเป็นกรด-ด่างน้ำแป้งในช่วง 8.0-11.0 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5.0 กวนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1-5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปรับความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลางโดยใช้ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5.0 กรองแป้ง และล้างแป้งจนกระทั่งหลังทดสอบน้ำที่ผ่านการกรองแล้วไม่เกิดปฏิกิริยากับ ซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จากนั้นอบแป้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง

การศึกษาคัดเลือกสถานะการคัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยออกเทนิน ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ ซึ่งมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัยได้แก่ ปริมาณของออกเทนิน ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ ความเป็นกรด-ด่าง และ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.3.2 การเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิล

การเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิลภายใต้สภาวะที่ดัดแปลงสภาวะจากวิธีของ Tijssen et al. (2001) โดยการเตรียมน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 10.0 ในตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นไอโซโพรพานอล ที่มีน้ำร้อยละ 7.0-23.0 โดยน้ำหนัก จากนั้นกวนในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 2.0-10.0 กวนเป็นเวลา 10 นาที และเติมโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตในอัตราส่วนร้อยละ 5.0-20.0 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปรับความเป็นกรด-ด่างน้ำแป้งให้เป็นกลาง กรองแป้งและล้างแป้งจนกระทั่งหลังทดสอบน้ำที่ผ่านการกรองแล้วไม่เกิดปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จากนั้นอบแป้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง ซึ่งทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ร้อยละของน้ำ ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ และปริมาณของโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตดังแสดงในตารางที่

3.3.3 การเตรียมแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์

การเตรียมแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ คัดแปลงสภาวะจากวิธีของ Lim and Sieb (1993) โดยการเตรียมโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตในอัตราส่วนร้อยละ 3.0-12.0 ละลายในน้ำกลั่น 200 มล. ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายในช่วง 4.0-9.0 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10.0 หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10.0 กวนจนละลาย ค่อยๆเติมแป้ง 100 กรัมโดยน้ำหนักแห้งลงในสารละลาย ปรับความเป็นกรด-ด่างของสารละลายน้ำแป้งในช่วง 4.0-9.0 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10.0 หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10.0 กวนทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง กรองแป้ง และอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 5.0-8.0 และอบแป้งอีกครั้งที่อุณหภูมิในช่วง 130 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1-4 ชั่วโมง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำแป้งคัดแปรที่ได้ละลายในน้ำกลั่น 500 มล. และปรับความเป็นกรด-ด่างน้ำแป้งให้เป็นกลาง กรองล้างเกลือออกจากแป้งจนหมด และนำไปอบที่ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง ซึ่งทำการศึกษา 3 ปัจจัย ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ความเป็นกรด-ด่าง และ ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในตารางที่ 3.1

3.3.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งประจุลบ

นำตัวอย่างแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการคัดแปรตามแผนการทดลอง มาตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะตัวดังต่อไปนี้

3.3.4.1 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแป้งออกเทนิล ซัคซิเนต

การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ที่คัดแปลงจากวิธีของ The Joint FDA /WHO 1997 ดังรายละเอียดต่อไปนี้ ซึ่งน้ำหนักแป้งมันคัดแปรที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.1 มาทำให้กระจายตัวในสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 2.5 นอร์มอล จากนั้นกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เติมไอโซโพรพานอลเข้มข้นร้อยละ 90 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร และกวนต่อไปอีก 10 นาที กรองและล้างแป้งด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่ง เมื่อใช้สารละลายซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้นร้อยละ 0.1 นอร์มอล ทดสอบกับน้ำที่ใช้ล้างที่ผ่านการกรองใส ไม่เกิดตะกอนขุ่น จากนั้นล้างครั้งสุดท้ายด้วยไอโซโพรพานอลเข้มข้นร้อยละ 90 นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และชั่งตัวอย่าง 1.0 กรัม เติมน้ำ 100 มิลลิลิตร นำไปต้มจนกระทั่งสารละลายใส และทำการไทเทรตขณะร้อนด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล โดยทำการคำนวณค่าระดับการแทนที่ได้ดังนี้

$$S = \frac{(V_b - V_s) \times 0.021 \times N_{\text{NaOH}}}{M}$$

$$DS = \frac{S \times 162}{2100 - (209 \times S)}$$

เมื่อ	S	คือ	ร้อยละโดยน้ำหนักของกลุ่มออกเทนิล ซัคซินเนต
	V _b	คือ	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำ Blank titration (ml)
	V _s	คือ	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ml)
	N _{NaOH}	คือ	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)
	M	คือ	น้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่นำมาไทเทรต (g)

3.3.4.2 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแป้งคาร์บอกซิลเมทิล

การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ดัดแปลงจากวิธีของ ศิริวัลภา เกษศิริ (2547) โดยชั่งน้ำหนักแป้งมันคัดแปรที่เตรียมได้จากข้อ 3.3.2 มาทำให้กระจายตัวในเมทานอล จากนั้นเติมน้ำและกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันปรับความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับ 1.0 ด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 4 และกวนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที เติมเมทานอลเพื่อตกตะกอนแป้ง และตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กรองและล้างแป้งด้วยเอทานอลจนได้ความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง กรองและนำไปอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง และชั่งตัวอย่าง 0.1 กรัม เติมน้ำ 100 มิลลิลิตรและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 นอร์มอล ปริมาตร 25 มิลลิลิตร นำไปเขย่า 3 ชั่วโมง และทำการไทเทรตด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มอล โดยทำการคำนวณค่าระดับการแทนที่ได้ดังนี้

$$C = \frac{(V_b - V_s) \times 0.058 \times N_{\text{NaOH}}}{M}$$

$$DS = \frac{C \times 162}{5800 - (166.5 \times C)}$$

เมื่อ	C	คือ	ร้อยละโดยน้ำหนักของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล
	V _b	คือ	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการทำ blank titration (ml)
	V _s	คือ	ปริมาตรโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง (ml)
	N _{NaOH}	คือ	ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (N)
	M	คือ	น้ำหนักแห้งของตัวอย่างที่นำมาไทเทรต (g)

3.3.4.3 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแข็งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์

การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ทำตามวิธีของ The Joint FAO/WHO (1997) โดยการชั่งแข็งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ที่ได้จากข้อ 3.3.3 จำนวน 20 –25 กรัมลงในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมส่วนผสมของเมธานอล : น้ำ (อัตราส่วน 7:3) 200 มิลลิลิตร กวนทิ้งไว้ 15 นาที กรองสารละลายตัวอย่างผ่านด้วย buchner funnel นำแข็งที่ได้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และบดตัวอย่างให้ละเอียด และวิเคราะห์ความชื้น จากนั้นชั่งสารตัวอย่าง 10 กรัมโดยน้ำหนักแห้งใส่ในครุชีเบิ้ล เติมสารละลายซิงค์อะซิเตตร้อยละ 10 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร กระจายสารตัวอย่างให้ทั่ว และค่อยๆทำให้แห้งบน hot plate จากนั้นทำการเผาตัวอย่างด้วยตะเกียงไฟจนตัวอย่างไหม้เกรียมและนำไปเผาอีกครั้งในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงและทิ้งไว้ให้เย็นล้างด้วยน้ำกลั่น 15 มล. เติมสารละลายไนตริกเข้มข้นร้อยละ 29 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ด้านข้างครุชีเบิ้ล ถ่ายสารละลายลงในขวดตวงขนาด 200 มิลลิลิตร จากนั้นดูดสารละลายที่ได้ปริมาตร V มิลลิลิตรถ่ายลงในขวดตวง 100 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไนตริก 10 มิลลิลิตร สารละลายแอมโมเนียมวานาเดท 10 มิลลิลิตรและสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดท 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตรตั้งทิ้งไว้ 10 นาที วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 460 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน

$$P = \frac{Ax200x1000}{VxW}$$

$$DS = \frac{162*P}{3100-102P}$$

เมื่อ	A	คือ	ค่าดูดกลืนแสงที่ 460 นาโนเมตร
	V	คือ	ปริมาตรสารที่ใช้ (ml)
	W	คือ	น้ำหนักตัวอย่าง (g)
	P	คือ	ปริมาณฟอสเฟต (ppm)

3.3.4.4 ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (Reaction efficiency, RE)

เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยใช้สารเคมี ทั้งนี้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนของระดับการแทนที่จากการทดลองและระดับการแทนที่จากทฤษฎี ซึ่งระดับการแทนที่จากทฤษฎีนั้นเป็นสัดส่วนของโมลสารเคมีที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่อโมลแอนไฮโดรกลูโคสโดยไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ดังนั้นประสิทธิภาพการผลิตสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพปฏิกิริยา (RE)} = \frac{DS \times 100}{DS_t}$$

เมื่อ DS คือ ระดับการแทนที่จากการทดลอง
 DS_t คือ ระดับการแทนที่จากทฤษฎี โดยคำนวณจาก

$$DS_t = \frac{\text{โมลของสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา}}{162}$$

3.3.4.5 ความหนืด (viscosity)

การวิเคราะห์ความหนืดของแป้งด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบรวดเร็ว (Rapid Visco Analyser, RVA model 3-D (Newport Scientific, Warriewood, Australia) ตามวิธีของ Newport scientific (1995) โดยนำแป้งมันที่ผ่านการคัดแปร วิเคราะห์ค่าความชื้น จากนั้นชั่งน้ำหนักแป้งตัวอย่าง 2.0 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในกระบอกใส่ตัวอย่าง เติมน้ำกลั่นจนครบ 25 มิลลิลิตร ใช้แกนกวนแป้งให้กระจายตัว แล้วตั้งสภาวะในการทำงานของเครื่อง RVA โดย อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 1.5 นาที และเพิ่มอุณหภูมิไปที่ 95 องศาเซลเซียสใช้ระยะเวลา 7.5 นาที และควบคุมอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที และลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 7.5 นาที และควบคุมอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 นาที ซึ่งรวมระยะเวลาทั้งหมด 24.5 นาที เครื่องจะแสดงผลการวัดค่าความหนืดเป็นหน่วยของเครื่องมือ (RVU) และบันทึกค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity)

3.3.4.6 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้ง (starch granule morphology)

ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (JSM-6400, Japan) ตามวิธีของ ศิริวัลภา เกษศิลป์ (2547) โดยการนำตัวอย่างปริมาณเล็กน้อยมากระจายตัวบนเทปกาว 2 หน้า ที่ติดอยู่บนแท่ง aluminum stub จากนั้นนำแท่ง aluminum stub ที่ติดตัวอย่างแล้วเข้าเครื่องเคลือบทอง แล้วเข้าสู่ช่องภายในตัวกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยควบคุมสภาวะการทดลองที่ค่าอัตราการเร่งของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 10 kv และใช้กำลังขยายที่ 1,000 และ 4,500 เท่า และบันทึกภาพดังกล่าวลงในคอมพิวเตอร์

3.3.4.7 ความสามารถในการละลายน้ำเย็น (cold water solubility)

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายน้ำเย็น คัดแปลงจากวิธีของ Chen and Jane (1994) โดยชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจำนวน 100 มิลลิลิตร ค่อยๆ เทน้ำกลั่นและสารละลายตัวอย่างใส่ในโถเครื่องปั่นผสม (blender

jar) จนครบ 100 มิลลิลิตร ทำการปั่นผสมที่ความเร็วรอบต่ำเป็นเวลา 3 นาที ปิเปตส่วนใสปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในจานออลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำออกมาชั่งน้ำหนักและทำการคำนวณค่าร้อยละการละลายน้ำแข็งสูตร

$$\text{ร้อยละการละลายน้ำแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักงานและตัวอย่างหลังอบ} - \text{น้ำหนักงานออลูมิเนียม}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น}} \times 2 \times 100$$

3.3.4.8 ความใส (Paste clarity)

การวิเคราะห์ความใส คัดแปลงจากวิธีของ กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2543) โดยชั่งตัวอย่าง 0.2 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที ให้แป้งกระจายตัวดี แล้วต้มสารละลายน้ำแป้งในอ่างน้ำเดือดโดยเขย่าตลอดเวลาเป็นเวลา 5 นาทีแรก และตั้งทิ้งไว้ในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที และนำออกมาเขย่าทุกๆ 10 นาที นำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นถ่ายสารละลายใส่ cuvette นำไปวัดค่าร้อยละการส่องผ่าน (%T) ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/VIS 916)

3.4 การเก็บรวบรวมและการวิเคราะห์ข้อมูล

แผนการทดลองที่ใช้คือ Central composite design (CCD) ซึ่งทำให้ได้ผลการทดลองที่สามารถนำไปสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้อธิบายถึงอิทธิพลและวิเคราะห์หาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่ศึกษาต่อค่าตอบสนองได้ ซึ่งแผนการทดลองนี้จะมีการแปรระดับของปัจจัยของการศึกษาเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับต่ำ (-1) ระดับกลาง (0) ระดับสูง (+1) ระดับลบแอลฟา (- α) และระดับบวกแอลฟา (+ α) ดังนั้นจึงมีการจัดแปรแปงมันสำปะหลังจำนวน 15 แผนการทดลอง และเพื่อประเมินความคลาดเคลื่อนของการทดลอง จึงทำการทดลองซ้ำที่ระดับค่ากลาง (center point) อีก 3 ซ้ำ ดังนั้นจึงมีการจัดแปรแปงมันสำปะหลังทั้งสิ้น 18 แผนการทดลอง ดังรายละเอียดแสดงอยู่ในตารางที่ 3.1

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการถดถอยแบบพหุ (multiple regression) โดยใช้โปรแกรม SPSS version 10.0 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยศึกษากับค่าตอบสนองและหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยการศึกษา แสดงภาพความสัมพันธ์ของพื้นผิวตอบสนอง response surface methodology (RSM) ระหว่างปัจจัยศึกษากับค่าตอบสนอง โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistica version 5.0

โดยมีสมมติฐานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการดังนี้

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3$$

เมื่อ b_0 คือ ค่าคงที่ (constant regression coefficients)
 X คือ ปัจจัยศึกษาที่ใช้ทำการตัดแปรมันสำปะหลัง ซึ่งได้แก่ X_1 X_2 และ X_3
ตามลำดับ
 Y คือ ค่าตอบสนอง

จากความสัมพันธ์ดังกล่าว ได้ทำการคัดเลือกระดับของปัจจัยศึกษาที่เหมาะสม ที่สามารถทำให้ได้แป้งตัดแปรที่มีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด สำหรับการตัดแปรแป้งประจุบทั้ง 3 ชนิด และพิจารณาจากสมบัติที่แตกต่างกันของแป้งแต่ละชนิด เช่น การตัดแปรด้วยออกเทนิลซัคซินิค แอนไฮไดรด์ จะให้ค่าความหนืดของการตัดแปรที่สูงกว่าแป้งดิบ การตัดแปรด้วยโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต จะให้ค่าการละลายน้ำเย็นของการตัดแปรที่สูงกว่าแป้งดิบ และแป้งที่ผ่านการตัดแปรด้วยโมโนโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต จะให้ค่าความหนืดและความใสที่สูงกว่าแป้งดิบ โดยที่แป้งตัดแปรจะต้องมีคุณสมบัติที่ยังอยู่ในเกณฑ์ของแป้งตัดแปรด้วยปฏิกิริยาการแทนที่ เพื่อนำไปใช้ในการผลิตแป้งแอมโพเทอริคในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3.1 แผนการทดลองตามวิธี Central composited Design (CCD) สำหรับการทดลองแป้งมันสำปะหลังดัดแปรประจุลบที่มี 3 ปัจจัย

ชนิดแป้งดัดแปร	ปัจจัย	รหัส	ระดับ				
			$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
แป้งออกเทนิต ซักซิเนต	ปริมาณของ OSA(%)	X ₁	0.35	0.50	1.75	3.00	3.85
	ความเป็นกรด-ด่าง	X ₂	7.3	8.0	9.0	10.0	10.7
	ระยะเวลา (นาที)	X ₃	22.4	60.0	180.0	300.0	421.8
	ร้อยละของน้ำ (%)	X ₁	1.56	7.0	15.0	23.0	24.8
แป้งคาร์บอกซีเมทิล	ปริมาณของ NaOH (%)	X ₂	0.73	2.0	6.0	10.0	12.63
	ปริมาณของ SMCA (%)	X ₃	0.12	5.0	12.5	20.0	25.12
แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์	ปริมาณของ STP (%)	X ₁	0.07	3.0	7.5	12.0	15.07
	ความเป็นกรด-ด่าง	X ₂	2.3	4.0	6.5	9.0	10.7
	ระยะเวลา (นาที)	X ₃	1.38	60.0	150.0	240.0	301.4

หมายเหตุ -1 คือปัจจัยระดับต่ำ, 0 คือปัจจัยระดับกลาง, +1 คือปัจจัยระดับสูง, -1.682 คือ ปัจจัยระดับ $-\alpha$, +1.682 คือระดับ $+\alpha$

3.5 ผลการทดลองและวิจารณ์

3.5.1 แป้งออกเทนิล ซักซิเนต

จากการทำการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการแทนที่โดยใช้ออกเทนิลซักซิเนตแอนไฮไดรด์ โดยมีปัจจัยในการทำการศึกษา 3 ปัจจัย คือปริมาณออกเทนิล ซักซิเนตแอนไฮไดรด์ (X_1) ความเป็นกรด-ด่าง (X_2) และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (X_3) ตามแผนการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อทำการคัดเลือกสภาวะการตัดแปรที่เหมาะสม ที่สามารถทำให้แป้งมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด และมีค่าความหนืดสูงกว่าแป้งดิบ โดยพิจารณาจากค่าตอบสนอง ได้แก่ ประสิทธิภาพการผลิต (Y_1) และค่าความหนืดสูงสุด (Y_2) แสดงผลในตารางที่ 3.2

จากการนำค่าในตารางที่ 3.2 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุ เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการศึกษา กับค่าตอบสนองได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากตารางที่ 3.3 พบว่าระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (X_3) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (X_2) กับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (X_3) แสดงอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และค่าความหนืดสูงสุด ขณะที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกเทนิล ซักซิเนตแอนไฮไดรด์ (X_1) และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (X_3) นั้นแสดงอิทธิพลเฉพาะประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เท่านั้น ซึ่งสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยมาเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (model) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (Y_1) และค่าความหนืดสูงสุด (Y_2) กับปัจจัยศึกษาได้ดังนี้

$$Y_1 = 26.421 + 0.344X_3 - 3.092 \times 10^{-2}X_2X_3 + 2.256 \times 10^{-2}X_1X_3 \quad (1)$$

$$Y_2 = 197.036 + 0.164X_2X_3 - 2.49 \times 10^{-3}X_3^2 \quad (2)$$

แบบจำลองที่ 1 และ 2 มีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.71 และ 0.73 ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่า แบบจำลองที่ 1 ใช้อธิบายความแปรเปลี่ยนไปของประสิทธิภาพการผลิตได้ร้อยละ 71.0 ส่วนแบบจำลองที่ 2 ใช้อธิบายความแปรเปลี่ยนไปของความหนืดสูงสุดได้ร้อยละ 73.0

ตารางที่ 3.2 ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและค่าความหนืดของแป้งออกเทนิล ซัคซิเนต

แผนการทดลองที่	ปัจจัยการศึกษา			ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (%) (Y ₁)	ค่าความหนืดสูงสุด(RVU) (Y ₂)
	X ₁ (ร้อยละ)	X ₂	X ₃ (นาที)		
1	0.5	8.0	60	32.57 ± 5.09 ^{ef}	321.88 ± 7.84 ⁱ
2	0.5	8.0	300	43.45 ± 0.06 ^d	357.17 ± 1.06 ^h
3	0.5	10.0	60	19.83 ± 2.61 ^h	243.75 ± 4.95 ^{kl}
4	0.5	10.0	300	36.25 ± 0.02 ^e	378.92 ± 1.65 ^{gf}
5	3.0	8.0	60	31.07 ± 0.90 ^f	247.79 ± 2.77 ^k
6	3.0	8.0	300	75.52 ± 2.29 ^a	318.59 ± 2.60 ⁱ
7	3.0	10.0	60	32.60 ± 0.44 ^{ef}	287.79 ± 5.85 ^j
8	3.0	10.0	300	50.26 ± 1.76 ^c	483.38 ± 7.49 ^a
9	3.85	9.0	180	52.60 ± 1.72 ^c	415.63 ± 8.92 ^d
10	0.35	9.0	180	51.77 ± 0.02 ^c	374.05 ± 4.07 ^g
11	1.75	10.7	180	44.29 ± 0.47 ^d	440.58 ± 5.30 ^{bc}
12	1.75	7.3	180	70.46 ± 0.39 ^b	281.34 ± 8.61 ^j
13	1.75	9.0	421.8	75.46 ± 2.94 ^a	452.67 ± 9.07 ^b
14	1.75	9.0	22.4	26.48 ± 0.74 ^g	229.67 ± 0.23 ^l
15	1.75	9.0	180	45.42 ± 0.36 ^d	397.00 ± 0.11 ^{gf}
16	1.75	9.0	180	45.42 ± 0.36 ^d	427.59 ± 0.23 ^{cd}
17	1.75	9.0	180	44.71 ± 0.36 ^d	395.29 ± 0.43 ^{ef}
18	1.75	9.0	180	44.71 ± 0.36 ^d	398.42 ± 5.89 ^e
แป้งมันสำปะหลัง				-	250.96 ± 6.31 ^l

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

X₁ คือ ปริมาณออกเทนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์, X₂ คือ ความเป็นกรด-ด่าง, X₃ คือ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

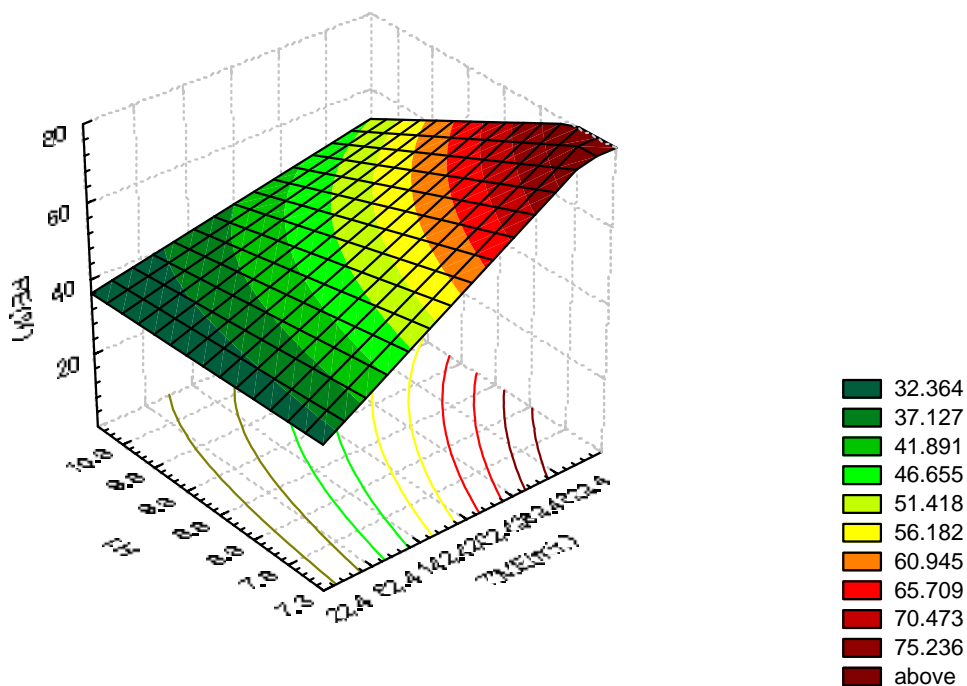
ตารางที่ 3.3 แสดงการทดสอบสัมประสิทธิ์รีเกรชันของสมการปัจจัยของการเตรียมแป้งออกเทนิล ซักซินิคจากแป้งมันสำปะหลัง

ปัจจัยการศึกษา	Regression coefficient(b)	
	ประสิทธิภาพปฏิกิริยา (Y ₁)	ค่าความหนืดสูงสุด (Y ₂)
Constant	26.42***	197.04***
X ₁	-	-
X ₂	-	-
X ₃	0.34**	-
X ₁ ²	-	-
X ₂ ²	-	-
X ₃ ²	-	-2.49x10 ⁻³ **
X ₁ X ₂	-	-
X ₁ X ₃	2.26x10 ⁻² *	-
X ₂ X ₃	-3.09x10 ⁻² *	0.16***
R-squared (adjust)	0.71	0.73

หมายเหตุ *, **, *** แสดงความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, 99.0 และ 99.9 ตามลำดับ

3.5.1.1 ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (reaction efficiency, RE)

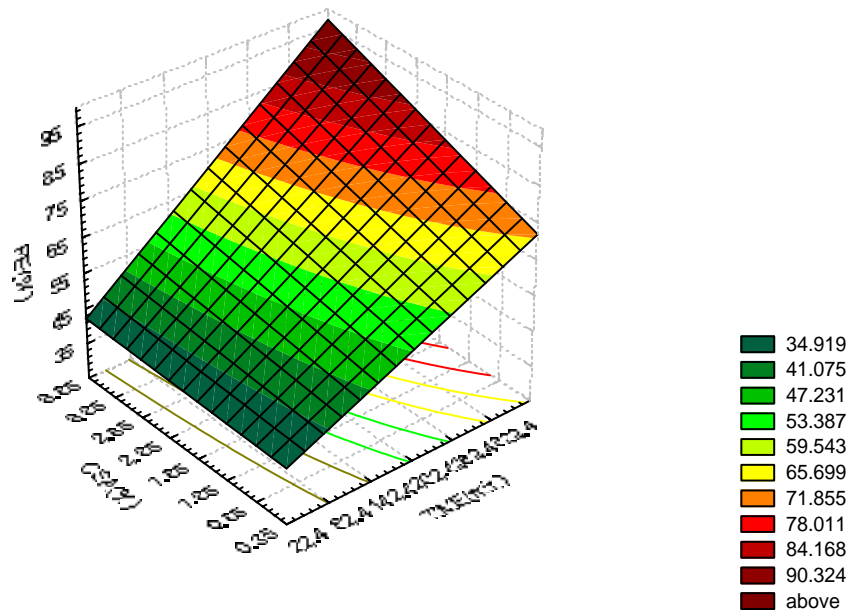
แบบจำลองที่ 1 สามารถสร้างเป็นพื้นผิวตอบสนองของประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา ดังภาพที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งพบว่าเวลาที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด ตามมาด้วย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาของปฏิกิริยา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของออกเทนิลซักซินิค แอนไฮไดรด์ และระยะเวลาของปฏิกิริยา โดยทำการแปรผันระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 22.4, 60, 180, 300 และ 421.8 นาที จะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่น้อยที่สุดในการทำปฏิกิริยา คือ 22.4 นาที ประสิทธิภาพปฏิกิริยาต่ำที่สุดเท่ากับร้อยละ 26.48 เมื่อใช้สภาวะความเป็นกรด-ด่าง 9.0 และปริมาณออกเทนิล ซักซินิค แอนไฮไดรด์ร้อยละ 1.75 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็น 300 นาที ประสิทธิภาพปฏิกิริยาสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 75.52 และ



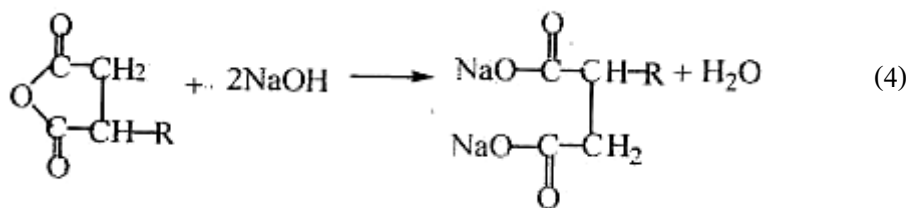
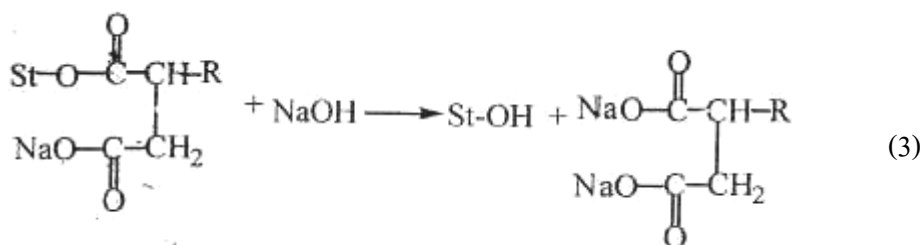
ภาพที่ 3.1 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time) กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (RE) ที่ปริมาณออกเทนนิล ซัคซินิคแอนไฮไดรด์ร้อยละ 1.75

พบว่าไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากระยะเวลา 421.8 นาที ซึ่งมีประสิทธิภาพปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 75.46 ดังตารางที่ 3.2 และ ภาพที่ 3.1 และที่ 3.2 เนื่องด้วยการแทนที่ของหมู่ออกเทนนิล ซัคซินิคจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวและบริเวณออสถฐานของเม็ดแป้งก่อนต่อมาจึงจะเกิดการแทนที่บริเวณผลึกซึ่งเป็นบริเวณที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่า (Kweon et al., 1997) ดังนั้นระยะเวลาที่นานขึ้นนั้นจะทำให้เพิ่มอัตราการซึมผ่าน ของหมู่ออกเทนนิล ซัคซินิค เข้าไปในโมเลกุลของแป้งได้เพิ่มขึ้น ทำให้ให้ระดับการแทนที่สูงขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงขึ้นด้วย และจากการทดลอง (ไม่ได้นำเสนอ) ในการเพิ่มระยะเวลาจาก 300 นาที เป็น 600 นาที นั้นประสิทธิภาพปฏิกิริยาไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาแป้งออกเทนนิล ซัคซินิคเท่ากับ 300 นาที

ความเป็นกรด-ด่างนั้นเป็นเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการผันแปรความเป็นกรด-ด่าง 7.3, 8.0, 9.0, 10.0 และ 10.7 และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 22.4, 60, 180, 300 และ 421.8 นาที ซึ่งเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่าง ประสิทธิภาพปฏิกิริยาลดลง และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 3.2 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Time) และปริมาณออกเทนิลซัคซินิกแอนไฮไดรด์ (OSA) กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (RE) ที่ความเป็นกรด-ด่าง 8.0



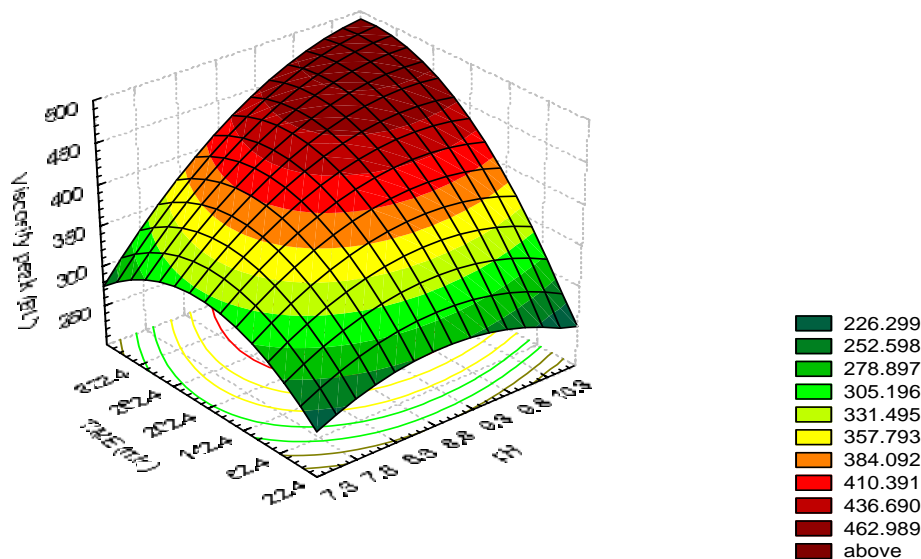
ภาพที่ 3.3 การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียงของแป้งออกเทนิล ซัคซินेट
ที่มา: Song et al., (2006)

ในระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่เท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 3.1 โดยพบว่าประสิทธิภาพปฏิกิริยามีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.52 เมื่อความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 8.0 และเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่างขึ้นจาก 8.0 เป็น 10.0 พบว่า ประสิทธิภาพปฏิกิริยาที่ได้จะมีค่าลดลง เป็น 50.26 ดังตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อมีการเพิ่มความเป็นกรด-ด่างนั้นส่งผลให้ไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือ เข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแป้งที่มีการแทนที่ของหมู่ออกเทนิน ซัคซินเนต และโมเลกุลหมู่ออกเทนิน ซัคซินเนตที่แขวนลอยในสารละลายแป้งทำให้เกิดเป็นปฏิกิริยาข้างเคียง ดังแสดงในสมการ 3 และ 4 ในภาพที่ 3.3 จึงทำให้ระดับการแทนที่ต่ำลงในสภาวะที่ความเป็นกรด-ด่างสูง ส่งผลให้ปฏิกิริยาดำลงด้วยซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Jeon et al. (1999) และ Song et al. (2006) พบว่าความเป็นกรด-ด่างที่ไม่เหมาะสมระหว่างการทำปฏิกิริยาของแป้งนั้นมีผลต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยา

ในการศึกษาผลของปริมาณออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ที่มีต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาของแป้งออกเทนินซัคซินเนต โดยทำการผันแปรปริมาณออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ 5 ระดับ ได้แก่ ปริมาณร้อยละ 0.35, 0.5, 1.75, 3.0 และ 3.85 ในการทำปฏิกิริยากับแป้งมันสำปะหลังในสภาวะตามตารางที่ 3.1 ซึ่งออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์นั้นเป็น esterifying agent พบว่าเมื่อทำการเพิ่มปริมาณของออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ ประสิทธิภาพปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญดังแสดงในภาพที่ 3.2 โดยพบว่าในสภาวะความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 9.0 และระยะเวลาในการผลิตเท่ากับ 300 นาที นั้นโดยที่แปรผันปริมาณออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์จากร้อยละ 0.5 เป็นร้อยละ 3.0 พบว่าประสิทธิภาพปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 43.45 เป็นร้อยละ 75.52 ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ทั้งนี้เนื่องด้วยการเพิ่มปริมาณออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ ส่งผลให้เพิ่มอัตราการซึมผ่านของหมู่ออกเทนิน ซัคซินิกเข้าไปในโมเลกุลของแป้ง ทำให้ระดับการแทนที่ของหมู่ออกเทนินสูงขึ้นไป ดังนั้นประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงขึ้นด้วย

3.5.1.2 ความหนืด (viscosity)

ความหนืดเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของแป้งที่ถูกนำมาใช้ประโยชน์มาก โดยที่แป้งทำหน้าที่เป็นตัวให้เนื้อสัมผัสและเป็นสารให้ความข้นหนืด แต่บ่อยครั้งที่ความหนืดแป้งดิบสูงหรือต่ำเกินไปที่จะนำไปใช้ในบางอุตสาหกรรม ดังนั้นการคัดแปรแป้งด้วยการแทนที่ของหมู่ออกเทนิน ซัคซินเนตจะสามารถช่วยเพิ่มประโยชน์ของแป้งได้ จากแบบจำลองที่ 2 และในตารางที่ 3.3 พบว่าปริมาณของออกเทนิน ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความหนืดสูงสุด และจากแบบจำลองที่ 2 สามารถสร้างเป็นพื้นผิวตอบสนอง ดังภาพที่ 3.4 ซึ่งพบว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนืดสูงสุด โดยที่เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากการผันแปรความเป็นกรด-ด่างจาก 7.3 เป็น 10.7 ที่ปริมาณออกเทนิน ซัคซินิกแอนไฮไดรด์และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเดียวกันทำให้ค่าความหนืดสูงสุด

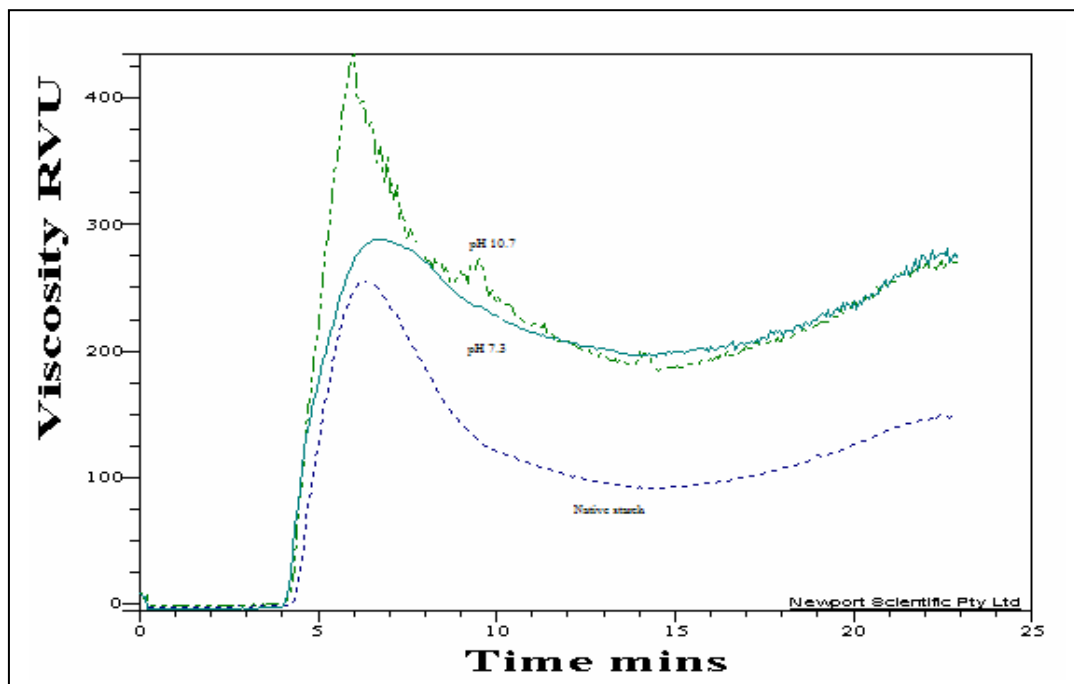


ภาพที่ 3.4 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time) กับค่าความหนืดสูงสุดที่ ปริมาณออกเทนอล ซักซินิคแอนไฮไดรด์ ร้อยละ 1.75

เพิ่มขึ้นจาก 281.34 RVU เป็น 440.58 RVU ดังแสดงในภาพที่ 3.5 ทั้งนี้เนื่องจากความเป็นด่างสูง นั้นทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถซึมผ่านเข้าไปภายในเม็ดได้มากขึ้นส่งผลให้แป้งวม และการดูดน้ำเพิ่มขึ้น (Lai, Karain, Norziah, and Seon, 2004) จึงทำให้เกิดการพองตัวเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดสูงขึ้นกว่าแป้งดิบ ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ส่วนผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าความหนืดสูงสุดนั้น เมื่อทำผันแปรระยะเวลา ในการทำปฏิกิริยาจาก 60 นาทีเป็น 300 นาที ในสภาวะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณออกเท นิล ซักซินิคแอนไฮไดรด์เดียวกัน พบว่าค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 247.79 RVU เป็น 318.59 RVU ดังแสดงในภาพที่ 3.6 ทั้งนี้เนื่องด้วยการเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทำให้เพิ่มอัตราการซึม ผ่านของกลุ่มไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) ของโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถซึมผ่านเข้าไปในโมเลกุลของ แป้งทำให้แป้งพองตัวส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มขึ้น

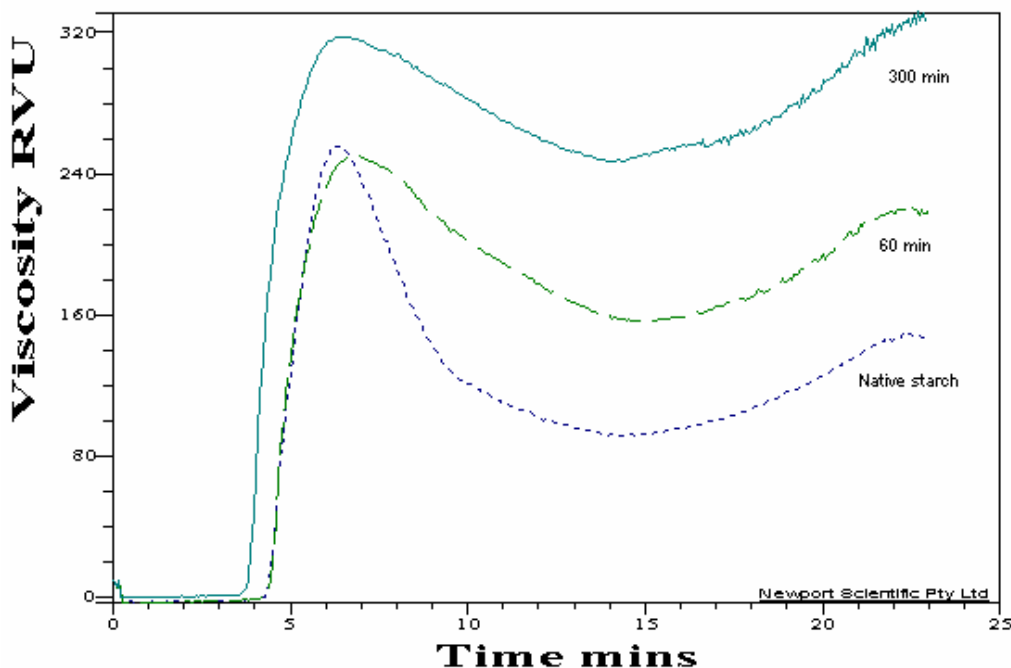
ดังนั้นจากการทดลองครั้งนี้พบว่าค่าความหนืดสูงสุดนั้นขึ้นอยู่กับขึ้นอยู่กับสภาวะความ เป็นกรด-ด่างและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเท่านั้น



ภาพที่ 3.5 ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังตัดแปรแบบการแทนที่ด้วยออกเทนิล ซัลฟอนิก แอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 1.75 เป็นระยะ 180 นาที ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.3 และ 10.7

3.5.1.3 ลักษณะของเม็ดแป้ง (starch morphology)

แป้งมันสำปะหลังนั้นมีลักษณะพื้นผิวเรียบ เป็นรูปไข่ที่ปลายด้านหนึ่งถูกตัดออก และผิวตรงส่วนที่ตัดออกมีลักษณะเว้าเข้าด้านใน บางเม็ดอาจมีริมด้านหนึ่งโค้ง อีกด้านหนึ่งแบนไม่สม่ำเสมอ ดังแสดงให้เห็นรอยมุมอย่างชัดเจน (eccentric helium) เมื่อทำการส่องดูเม็ดแป้งที่ผ่านการตัดแปรที่ค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.0016, 0.0068, 0.0132 และ 0.0178 ดังภาพที่ 3.7 b-d นั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน คือยังคงสภาพของเม็ดแป้งและรูปร่างเหมือนแป้งมันสำปะหลัง (ภาพที่ 3.7a) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับการที่ตั้งแต่ 0.0132 ขึ้นไปนั้นพบผิวของเม็ดแป้งบางเม็ดมีลักษณะขรุขระ ดังแสดงในภาพที่ 3.8 ทั้งนี้อาจเนื่องจากแป้งที่ผ่านการตัดแปรนั้นเกิดการกักความร้อนของสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่ผิวของเม็ดแป้ง (Napaporn Antichokudomchai, and Saiyavit Varavinit 2003; Segura and Sira, 2003) ซึ่งสารเคมีส่วนใหญ่สามารถเข้าทำปฏิกิริยากับเม็ดแป้งบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งในส่วนอณูฐาน ซึ่งอาจเป็นส่วนปลายสายของหมู่ออกเทนิล ซัลฟอนิก ที่เกาะกับพื้นผิวของเม็ดแป้ง (Song et al., 2006)

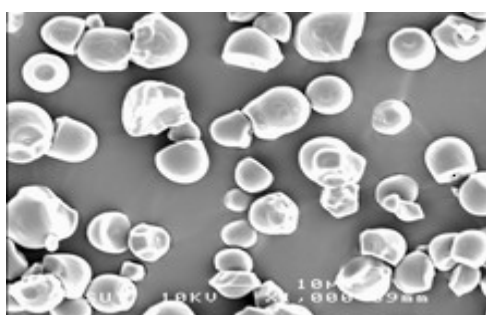


ภาพที่ 3.6 ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลัง แป้งมันสำปะหลังตัดแปรแบบการแทนที่ด้วยออกเทนิล ซัลฟอนิก แอนไฮไดรด์ปริมาณร้อยละ 3.0 ที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ในระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 60 และ 300 นาที

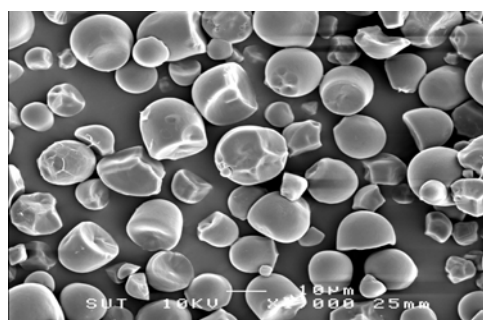
3.5.2 แป้งคาร์บอกซิลเมทิล

จากการทำการตัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการแทนที่โดยใช้โซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต โดยทำการศึกษา 3 ปัจจัยร้อยละของน้ำ (X_1) ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ (X_2) และ ความปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต (X_3) ตามแผนการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อทำการคัดเลือกสภาวะการตัดแปร ที่จะทำให้แป้งมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด มีค่าการละลายในน้ำเย็นสูงกว่าแป้งดิบ ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการศึกษากับค่าตอบสนองได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.5

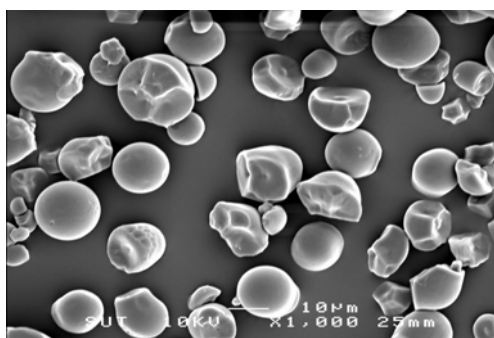
จากการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การถดถอยแบบพหุ ดังแสดงในตารางที่ 3.5 ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และค่าการละลายน้ำเย็น กับปริมาณน้ำในตัวอย่างปฏิกิริยา ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต ดังนี้



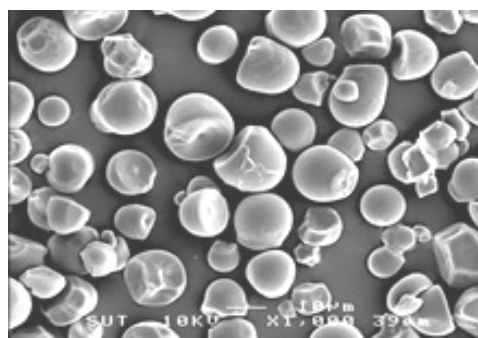
(a)



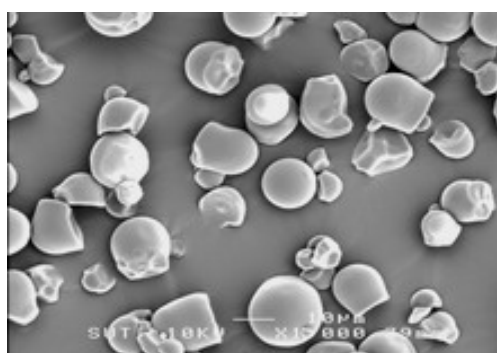
(b)



(c)

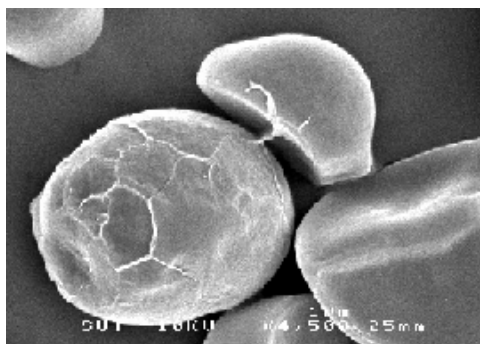


(d)



(e)

ภาพที่ 3.7 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนิล ซักซิเนต เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์
 ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดย (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งออกเทนิล
 ซักซิเนต ระดับการแทนที่ 0.0016 (c) แป้งออกเทนิล ซักซิเนตระดับการ
 แทนที่ 0.0068 (d) แป้งออกเทนิล ซักซิเนตระดับการแทนที่ 0.0132 (e)
 แป้งออกเทนิล ซักซิเนต ระดับการแทนที่ 0.017



ภาพที่ 3.8 ลักษณะของเม็ดแป้งออกเทนิล ซัคซิเนต ที่ระดับการแทนที่ 0.0132 เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 4,500 เท่า

$$Y_1 = 5.833 + 2.448X_2 - 2.10 \times 10^{-2} X_1 X_3 - 0.147X_2^2 \quad (5)$$

$$Y_2 = 16.215 - 5.552X_2 + 0.564X_2^2 + 7.56 \times 10^{-2} X_1 X_2 \quad (6)$$

3.5.2.1 ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (Reaction efficiency, RE)

ในการทำปฏิกิริยาคาร์บอกซิเมทิลเลชันนั้นจะมีโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทำการผันแปรปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังตารางที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์จากร้อยละ 0.73 เป็นร้อยละ 6.0 ทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยให้ค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับร้อยละ 15.09 และเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ขึ้นจากร้อยละ 6.0 เป็นร้อยละ 12.73 นั้นพบว่า ประสิทธิภาพปฏิกิริยามีค่าลดลงดังภาพที่ 3.9 ทั้งนี้เนื่องมาจากเกิดการสมดุลระหว่างแป้งและโซเดียมไฮดรอกไซด์ดังสมการที่ 7 ดังนั้นแม้ว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นก็ไม่ทำให้อัตราของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้เลย



นอกจากนี้การมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ในปฏิกิริยามากเกินไป สามารถทำปฏิกิริยากับโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตที่เติมลงไป ส่งผลให้ปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับโมเลกุลแป้งลดลง ทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่สูง โดยปฏิกิริยาข้างเคียงดังกล่าวแสดงดังสมการ 8

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 6.0 สามารถทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาสูงสุด จากรายงานของ Tijssen et al. (2001) พบว่าการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปในปฏิกิริยา นอกจากการเติมในลักษณะที่เป็นสารละลายแล้วยังสามารถเติมในลักษณะที่เป็นผลึกได้อีกด้วย ในการทดลองพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ในลักษณะที่เป็นผลึกหลังจากผ่านการทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 180 นาที ผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะไม่สม่ำเสมอ และให้ค่าระดับการแทนที่ต่ำ (0.17) ในขณะที่เติมในลักษณะที่เป็นสารละลาย หลังจากผ่านการทำปฏิกิริยา 180 นาทีเช่นกัน จะมีลักษณะที่สม่ำเสมอและให้ค่าระดับการแทนที่ที่สูง (0.61) ดังนั้นลักษณะการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมคือ การเติมในลักษณะที่เป็นสารละลาย

ในการเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิลนั้นจะใช้ตัวทำละลายอินทรีย์จำพวกแอลกอฮอล์เป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา เนื่องจากแอลกอฮอล์มีความสามารถที่จะช่วยคงสภาพของเม็ดแป้ง และทำให้ได้แป้งหลังผ่านการทำปฏิกิริยาออกมาในลักษณะที่เป็นผงละเอียดไม่เกาะกันเป็นก้อน จากการศึกษาปริมาณน้ำในตัวกลางปฏิกิริยา พบว่าปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.54 เป็นร้อยละ 28.46 ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลงจากร้อยละ 15.09 เป็นร้อยละ 2.40 ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ ภาพที่ 3.8 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำในตัวกลางปฏิกิริยาทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองบวมขึ้นและช่วยละลายโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตและเป็นตัวช่วยพาโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้สามารถแพร่ผ่านเข้าไปทำปฏิกิริยาภายในเม็ดแป้งได้ แต่การที่มีปริมาณน้ำมากเกินไปในสารละลายตัวกลางส่งผลให้ระดับการแทนที่ต่ำลง (ศิริวัฒนา เกษศิริ, 2547) จากการทดลองพบว่าปริมาณน้ำที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 1.54 โดยน้ำหนัก

ผลของปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาของแป้งคาร์บอกซิลเมทิล พบว่าเมื่อปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 20 นั้นทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาลดต่ำลงจากร้อยละ 11.48 เป็นร้อยละ 5.97 ดังตารางที่ 3.4 ในสภาวะที่ปริมาณน้ำร้อยละ 23.0 และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10.0 ซึ่งการทดลองให้ผลเช่นเดียวกันเมื่อทำการผันแปรสภาวะที่ปริมาณน้ำร้อยละ 15 และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 6.0 เมื่อปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.5 เป็นร้อยละ 25.12 ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำลงเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 3.9 เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังสมการ 8 ที่โซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตทำปฏิกิริยากับโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต ที่ทำประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับร้อยละ 12.5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.4 ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพของแป้งคาร์บอกซิลเมทิล

แผนการทดลองที่	ปัจจัยการศึกษา			ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (ร้อยละ) (Y ₁)	ค่าการละลายน้ำเย็น (ร้อยละ) (Y ₂)
	X ₁ (ร้อยละ)	X ₂ (ร้อยละ)	X ₃ (ร้อยละ)		
1	7	2	5	3.21 ± 0.28 ^h	7.53 ± 0.28 ^k
2	7	2	20	5.18 ± 0.16 ^g	9.40 ± 0.58 ^j
3	7	10	5	12.36 ± 0.48 ^c	13.41 ± 0.54 ^g
4	7	10	20	11.04 ± 0.37 ^d	10.67 ± 0.58 ⁱ
5	23	2	5	3.24 ± 0.57 ^h	6.59 ± 0.17 ^l
6	23	2	20	1.36 ± 0.10 ^j	4.66 ± 0.59 ^m
7	23	10	5	11.48 ± 0.55 ^d	26.87 ± 0.31 ^c
8	23	10	20	5.97 ± 0.14 ^f	39.87 ± 0.44 ^b
9	1.54	6	12.5	15.09 ± 0.24 ^a	18.24 ± 0.36 ^d
10	28.46	6	12.5	2.40 ± 0.13 ⁱ	14.25 ± 0.06 ^f
11	15	0.73	12.5	3.51 ± 0.22 ^h	17.43 ± 0.50 ^e
12	15	12.73	12.5	8.65 ± 0.22 ^e	54.92 ± 0.42 ^a
13	15	6	25.12	5.21 ± 0.18 ^g	12.27 ± 0.33 ^h
14	15	6	0.12	13.41 ± 0.00 ^b	7.30 ± 0.21 ^{lk}
15	15	6	12.5	11.67 ± 0.30 ^d	9.34 ± 0.06 ^j
16	15	6	12.5	11.23 ± 0.05 ^d	9.74 ± 0.03 ^j
17	15	6	12.5	12.67 ± 0.53 ^c	9.08 ± 0.07 ^j
18	15	6	12.5	12.49 ± 0.27 ^c	9.62 ± 0.47 ^j
แป้งมันสำปะหลัง				-	2.32 ± 0.29 ⁿ

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

X₁ คือ ร้อยละของน้ำ X₂ คือ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ X₃ คือ ปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต

ตารางที่ 3.5 แสดงการทดสอบสัมประสิทธิ์รีเกรชันของสมการการเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากแป้งมันสำปะหลัง

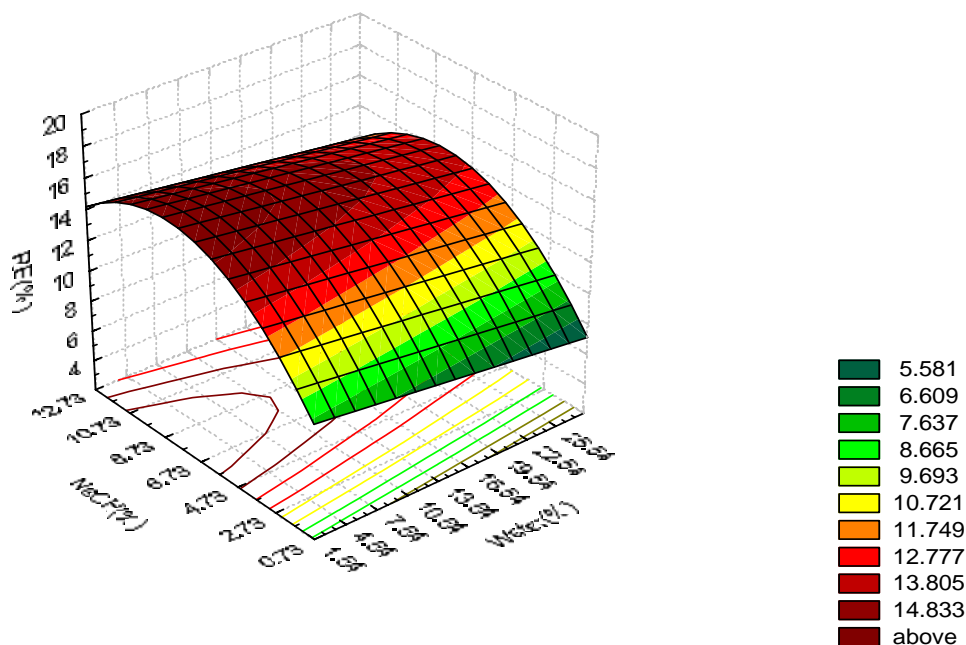
ปัจจัยการศึกษา	Regression coefficient(b)	
	ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (Y ₁)	การละลายน้ำเย็น (Y ₂)
Constant	5.83**	16.22**
X ₁	-	
X ₂	2.45***	-5.55**
X ₃		
X ₁ ²	-	
X ₂ ²	-0.15***	0.55***
X ₃ ²	-	
X ₁ X ₂	-	7.56x10 ⁻² *
X ₁ X ₃	-2.10x10 ⁻² ***	-
X ₂ X ₃	-	-
R-squared (adjust)	0.80	0.75

หมายเหตุ *, **, *** แสดงความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, 99.0 และ 99.9 ตามลำดับ

3.5.2.2 การละลายน้ำเย็น (cold water solubility)

การละลายน้ำเย็น เป็นสมบัติของแป้งในสภาวะต่างในสารละลายแอลกอฮอล์ (Chen and Jan, 1994) เป็นสมบัติที่แป้งละลายน้ำเย็นได้โดยไม่ผ่านการให้ความร้อน โดยปกติแป้งดิบไม่สามารถละลายในน้ำเย็นได้ เนื่องจากเม็ดแป้งดิบประกอบไปด้วยโมเลกุลเส้นตรงของอะมิโลสและโมเลกุลกิ่งก้านของอะมิโลเพคติน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบเบรตซ์มี มีส่วนที่เป็นเส้นสายของโมเลกุลมาเกิดพันธะไฮโดรเจน ดังนั้นการละลายจึงต้องอาศัยความร้อนในทำลายพันธะและทำให้สามารถละลายในน้ำได้ (hydration) เมื่อทำการตรวจสอบหาความสามารถในการละลายน้ำเย็นพบว่าให้ค่าการละลายเพียงร้อยละ 2.32 ซึ่งพบว่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับแป้งคาร์บอกซิลเมทิล ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และจากภาพที่ 3.11 พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของการละลายน้ำเย็นของแป้งคาร์บอกซิลเมทิล ทั้งนี้เนื่องจาก

โซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถทำให้แป้งเกิดการพองตัวขึ้น ส่งผลให้แป้งมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันลดต่ำลง

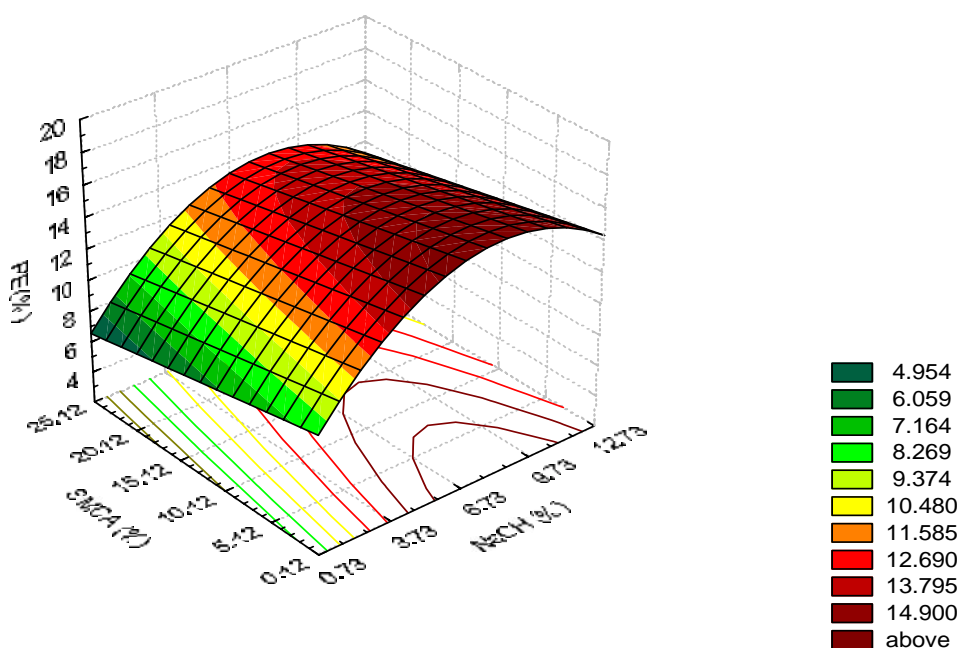


ภาพที่ 3.9 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water) และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (RE) ที่ปริมาณโซเดียมโมโนคลอไรด์ร้อยละ 5.0

ซึ่งจากรายงานของ Lai et al. (2004) พบว่าค่าความเป็นด่างสูงนั้นทำให้โซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถซึมผ่านเข้าไปภายในในเม็ดได้มากขึ้นส่งผลให้แป้งบวม และการดูดน้ำเพิ่มอีกด้วย ดังนั้นความเป็นด่างเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ทำให้แป้งคาร์บอกซิเมทิล สามารถละลายในน้ำเย็นได้

3.5.3 แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

จากการทำการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการแทนที่โดยใช้โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต โดยมีปัจจัยในการทำการศึกษาคือ 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณของโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (X_1) ความเป็นกรด-ด่าง (X_2) และ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (X_3) ตามแผนการทดลองแบบ Central Composite Design เพื่อทำการคัดเลือกสภาวะการดัดแปรที่เหมาะสม ที่จะทำให้แป้งมีประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด มีค่าความหนืดสูงสุดและค่าความใสสูงกว่าแป้งดิบ ดังแสดงในตารางที่ 3.6



ภาพที่ 3.10 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และปริมาณของโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาที่ปริมาณน้ำร้อยละ 7

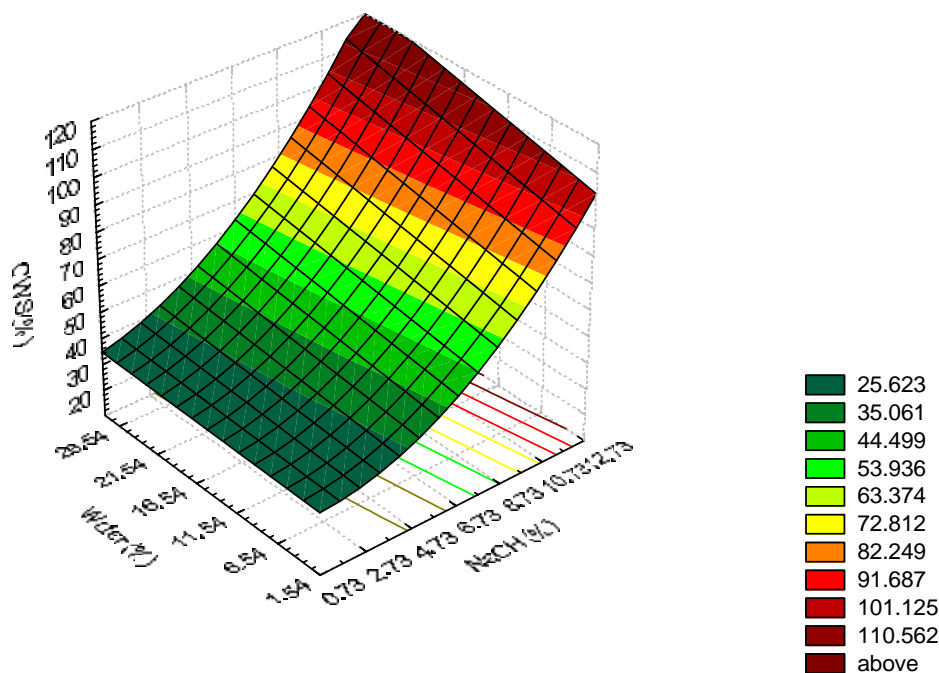
จากการนำค่าในตารางที่ 3.6 มาทำการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุ เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยการศึกษากับค่าตอบสนองได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 3.7

จากการวิเคราะห์ในตารางที่ 3.7 ทำให้ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา ค่าความหนืดสูงสุด และกำลังการพองตัว กับ ปริมาณของโซเดียมไตรโพลิฟอสเฟต ความเป็นกรด-ด่าง และ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

$$Y_1 = 8.211 + 0.220X_3 - 5.67 \times 10^{-4}X_3^2 - 0.71X_2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 150.388X_2 + 2.743X_1^2 - 10.16X_2^2 \quad (10)$$

$$Y_3 = 48.849 + 0.250X_1 - 4.945X_2 + 1.582 \times 10^{-4}X_3^2 \quad (11)$$



ภาพที่ 3.11 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำ (Water) และปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ กับความสามารถการละลายในน้ำเย็น

3.5.3.1 ประสิทธิภาพปฏิกิริยา (reaction efficiency, RE)

จากการศึกษาความเป็นกรด-ด่างต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาพบว่าเมื่อทำการผันแปรความเป็นกรด-ด่าง เห็นได้ว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังตารางที่ 3.6 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.0 ในสถานะที่ใช้ปริมาณโซเดียมไตร โพลีฟอสเฟตร้อยละ 3.0 และเวลา 240 นาที มีค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 32.24 และเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่างขึ้นเป็น 9.0 พบว่าประสิทธิภาพการผลิตลดลงเป็นร้อยละ 19.18 ดังตารางที่ 3.6 และภาพที่ 3.14 โดยที่ประสิทธิภาพปฏิกิริยาสูงสุดเท่ากับร้อยละ 32.24 เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 4.0 ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 10.0 จะทำให้กลุ่มไฮดรอกซิล (OH^-) บนโมเลกุลแป้งและหมู่ฟอสเฟตของโซเดียมไตร โพลีฟอสเฟตแตกตัวกลายเป็นประจุลบ (Rutenburg and Solarek, 1984) จึงเป็นการยากในการเกิดปฏิกิริยาเนื่องจากเกิดแรงผลักรันระหว่างประจุทั้ง 2 ตัว นอกจากนี้ค่าความเป็นด่างสูงกว่า 10 ประจุลบที่จุดกึ่งกลางของโมเลกุลโซเดียมไตร โพลีฟอสเฟต สามารถจับกับโมเลกุลของแป้งได้เป็นผลิตภัณฑ์ ออโทฟอสเฟต ดังสมการที่ 12 ในภาพที่ 3.12 และสามารถทำปฏิกิริยาต่อกับโมเลกุลแป้งได้

ตารางที่ 3.6 ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและสมบัติทางกายภาพของแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์

แผนการทดลองที่	ปัจจัยการศึกษา			ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (ร้อยละ) (Y ₁)	ค่าความหนืดสูงสุด(RVU) (Y ₂)	ค่าความใส(ร้อยละ) (Y ₃)
	X ₁ (ร้อยละ)	X ₂	X ₃ (นาที)			
1	3.0	4.0	60.0	21.76 ± 2.24 ^{ef}	207.46 ± 1.00 ^{ij}	37.87 ± 2.38 ^g
2	3.0	4.0	240.0	32.24 ± 0.84 ^a	22.54 ± 1.71 ^l	47.32 ± 4.30 ^e
3	3.0	9.0	60.0	12.86 ± 0.84 ⁱ	346.17 ± 4.21 ^{ef}	22.49 ± 1.01 ^j
4	3.0	9.0	240.0	19.18 ± 0.28 ^g	421.59 ± 3.92 ^b	25.47 ± 1.20 ^{ij}
5	12.0	4.0	60.0	13.65 ± 0.98 ⁱ	144.06 ± 1.94 ^k	68.87 ± 2.05 ^c
6	12.0	4.0	240.0	22.65 ± 0.14 ^{cdef}	0.00 ± 0.00 ^m	74.67 ± 2.21 ^b
7	12.0	9.0	60.0	13.84 ± 1.96 ⁱ	316.84 ± 3.77 ^g	34.97 ± 0.50 ^g
8	12.0	9.0	240.0	25.27 ± 1.19 ^b	384.32 ± 1.21 ^e	45.44 ± 1.81 ^{ef}
9	15.07	6.5	150.0	20.91 ± 0.39 ^{fg}	225.32 ± 3.50 ^{hi}	87.96 ± 3.96 ^a
10	0.07	6.5	150.0	24.08 ± 0.00 ^{bcd}	204.61 ± 1.85 ^j	10.55 ± 0.06 ^l
11	7.5	2.3	150.0	24.01 ± 0.12 ^{bc}	0.00 ± 0.00 ^m	56.05 ± 0.86 ^d
12	7.5	10.7	150.0	22.07 ± 0.11 ^{efd}	369.27 ± 9.54 ^c	15.09 ± 1.92 ^k
13	7.5	6.5	301.4	16.85 ± 0.34 ^h	477.63 ± 5.59 ^a	42.04 ± 1.41 ^f
14	7.5	6.5	1.38	2.69 ± 0.45 ^j	231.25 ± 2.72 ^h	26.61 ± 1.30 ^{ih}
15	7.5	6.5	150.0	23.02 ± 0.78 ^{cdef}	372.25 ± 5.66 ^d	28.37 ± 1.19 ^{ih}
16	7.5	6.5	150.0	23.42 ± 0.67 ^{bcde}	358.50 ± 1.77 ^{de}	29.90 ± 0.98 ^{ih}
17	7.5	6.5	150.0	23.34 ± 0.34 ^{bcde}	378.88 ± 3.83 ^{ed}	30.08 ± 1.67 ^h
18	7.5	6.5	150.0	23.02 ± 0.56 ^{cdef}	327.50 ± 1.30 ^{fg}	29.98 ± 1.16 ^{ih}
แป้งมันสำปะหลัง				-	250.96 ± 6.31 ^{de}	24.98 ± 2.54 ^{ij}

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 X₁ คือ ปริมาณของโซเดียมไตร โพลีฟอสเฟต X₂ คือ ความเป็นกรด-ด่าง และ X₃ คือ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

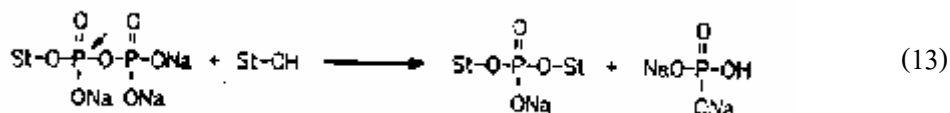
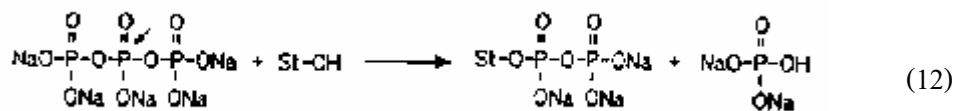
ตารางที่ 3.7 แสดงการทดสอบสัมประสิทธิ์รีเกรชันของสมการการเตรียมแป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์จากแป้งมันสำปะหลัง

ปัจจัยการศึกษา	Regression coefficient (b)		
	ประสิทธิภาพการผลิต (Y ₁)	ค่าความหนืดสูงสุด (Y ₂)	ค่าความใส (Y ₃)
Constant	8.21*	-	48.85***
X ₁	-	-	0.25***
X ₂	-0.71*	150.39**	-4.94***
X ₃	-0.22***	-	-
X ₁ ²		2.74*	-
X ₂ ²		-10.16**	-
X ₃ ²	-5.67*10 ⁻⁴ ***	-	1.58*10 ⁻⁴ *
X ₁ X ₂		-	-
X ₁ X ₃		-	-
X ₂ X ₃		-	-
R-squared (adjust)	0.78	0.73	0.90

หมายเหตุ *, **, *** แสดงความมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95, 99.0 และ 99.9

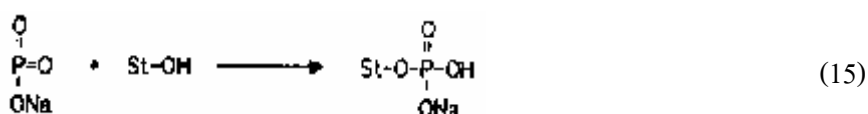
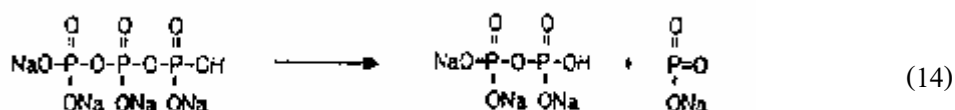
ผลิตภัณฑ์โมโนฟอสเฟต (Lim and Sieb, 1999) ซึ่งอัตราการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟตในแป้งเพื่อให้ได้แป้งฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์จำเป็นต้องใช้ปฏิกิริยาถึง 2 ขั้นตอน ดังนั้นจึงส่งผลให้กลุ่มฟอสเฟตในโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตเข้าแทนที่บนโมเลกุลของแป้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ช้าลง ส่งผลให้ระดับการแทนที่ต่ำ ดังนั้นประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาจึงต่ำลงด้วย นอกจากนี้ค่าความเป็นด่างที่สูงกว่า 10 นั้นสามารถเกิดพันธะ di-ester ได้ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเป็นแป้งครอสลิงได้ (Solarek, 1984) ดังสมการที่ 13 ในภาพที่ 3.12

ในขณะที่ความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 9.0 นั้นหมู่ฟอสเฟตสุดท้ายของโมเลกุลโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตจะหลุดออกมาและสามารถทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแป้งได้โดยตรงดังสมการที่ 14 และ 15 ในภาพที่ 3.13 ซึ่งทำให้ระดับการแทนที่ที่เกิดขึ้นได้รวดเร็วขึ้น ส่งผลประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นด้วย



ภาพที่ 3.12 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ที่ความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่า 10.0

ที่มา: Lim and Sieb, 1999



ภาพที่ 3.13 การเกิดปฏิกิริยาของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ที่ความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 9.0

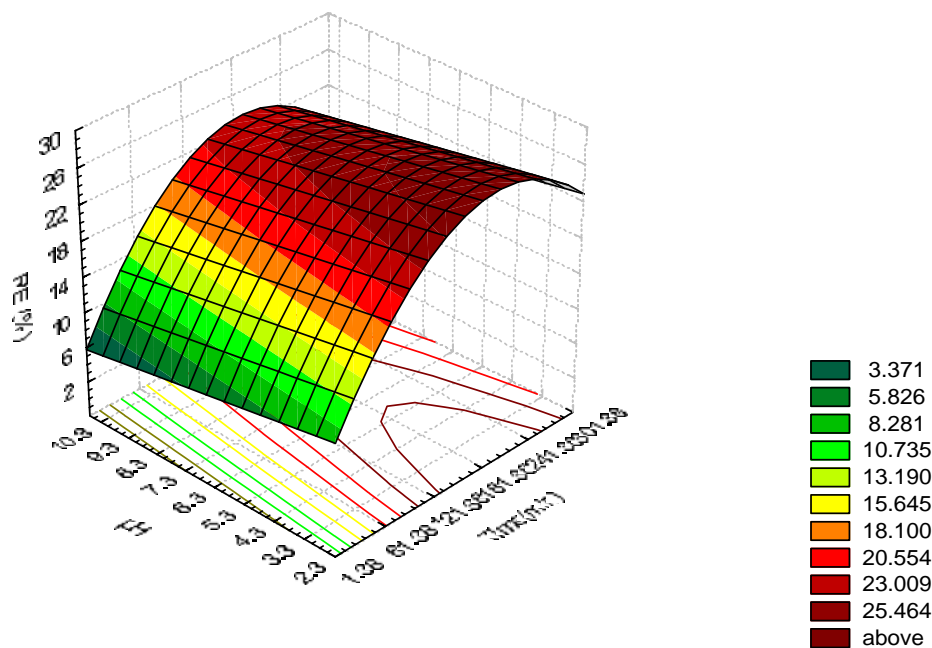
ที่มา: Lim and Sieb, 1999

ผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาฟอสโฟริเลชัน เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาข้างเคียงซึ่งให้อุณหภูมิสูงในการทำให้เกิดปฏิกิริยาแทนที่ของหมู่ฟอสเฟต ซึ่งระยะเวลาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการศึกษาครั้งนี้ทำการผันแปรระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานเกินไปนั้นส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง ดังแสดงในภาพที่ 3.14 ทั้งนี้เนื่องมาระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นนั้นทำให้อัตราการแทนที่ของหมู่ฟอสเฟตเพิ่มขึ้นด้วย แต่หาระยะเวลาเพิ่มมากเกินไปนั้นส่งผลให้โครงสร้างของแป้งมีขนาดลดลง (degradation) ซึ่ง Wurzburg (1986) พบว่า การลดขนาดของแป้งทำให้พันธะ α -1-6-glucosidic ถูกทำลายมากกว่า α -1-4-glucosidic ส่งผลให้แป้งมีปริมาณส่วนผลึก (crystalline)

มากกว่าส่วนอสังฐานซึ่งการแทนที่ของสารเคมีในโมเลกุลเบ็งนั้น สามารถเข้าแทนที่ได้ดีในส่วนอสังฐาน ได้ดีกว่าส่วนผลึก ดังนั้นระยะเวลาที่เพิ่มมากขึ้นไปจึงทำให้การแทนที่ต่ำลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าหากใช้ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากกว่า 240 นาที นั้น เบ็งมีสีเหลืองนวล กว่าเบ็งที่ผ่านการตัดแปรที่ใช้ระยะเวลาน้อย จากรายงานของ Sitohy et al. (2000) พบว่า การใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่มากกว่า 3 ชั่วโมงนั้นจะทำให้เบ็งมีระดับการแทนที่สูงขึ้นแต่เบ็งที่ได้จะมีค่าความหนืดต่ำกว่าเบ็งดิบ จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 180 นาที เป็นระยะเวลาที่ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด

3.5.3.2 ความหนืด (viscosity)

จากการทดลองพบว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความหนืดสูงสุด ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตและความเป็นกรด-ด่าง ในการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่างจาก 4.0 เป็น 9.0 ในสภาวะที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 240 นาทีและปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตเท่ากับร้อยละ 3.0 ส่งผลให้ค่าความหนืดเพิ่มสูงขึ้นจาก 22.54 RVU เป็น 421.59 RVU ดังตารางที่ 3.6 แต่เมื่อเพิ่มความเป็นกรด-ด่างขึ้นเป็น 10.7 พบว่าค่าความหนืดต่ำลง ดังภาพที่ 3.12 ทั้งนี้เนื่องด้วยความเป็นกรด-ด่างต่ำในสภาวะกึ่งแห้ง ที่ใช้อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการลดขนาดลง (hydrolysis) โดยที่สภาวะมีความเป็นกรดจะตัดโมเลกุลในภายของเบ็ง ทำให้โมเลกุลเล็กลงส่งผลให้ความหนืดต่ำลง ส่วนที่ความเป็นด่างสูงนั้นเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงครอสลิงเกิดขึ้น ดังรายงานของ Lim and Sieb (1993) และ Muhammad, Kusnandar, Hashim, and Rahman (1999) พบว่า ปฏิกิริยาครอสลิงของโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต สามารถเกิดได้ที่ความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 9.0 ซึ่งส่งผลให้เบ็งมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำลง ทั้งนี้เนื่องจากเบ็งครอสลิงนั้นมีพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของเบ็ง จึงเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดเบ็ง ช่วยลดการฟองตัวของเม็ดเบ็งได้ ส่งผลให้เม็ดเบ็งไม่สามารถดูดน้ำเข้าไปในโมเลกุลได้ เบ็งจึงมีความหนืดต่ำ สำหรับการศึกษาครั้งนี้พบว่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 และปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.5 สามารถทำให้เบ็งตัดแปรมีค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 327.50 RVU จนถึง 378.88 RVU และทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาสูงถึงร้อยละ 23.02 ถึงร้อยละ 23.42

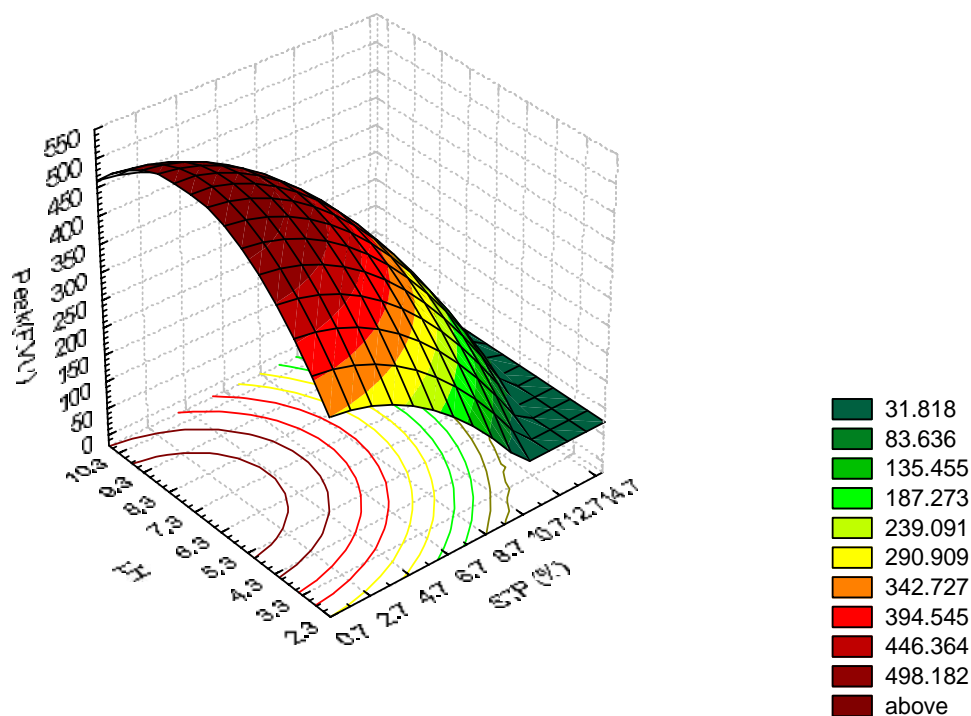


ภาพที่ 3.14 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (Time) กับประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (RE) ที่ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.5

3.5.3.3 ค่าความใส (paste clarity)

ในอุตสาหกรรมมักต้องการแป้งที่ผ่านกระบวนการแปรรูปหรือนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์แล้วได้เจลดที่ใส ซึ่งความใสของแป้งนั้นจะแปรผันไปตามแหล่งของแป้ง และเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเม็ดแป้งถูกตัดแปรด้วยวิธีทางเคมี จากการวิเคราะห์ค่าความใสของน้ำแป้งสุกเข้มข้นร้อยละ 2 พบว่าค่าการส่องผ่านของแสงที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตรของสารละลายน้ำแป้งที่เตรียมจากแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ในสภาวะต่าง ๆ นั้นมีปัจจัยมาจากทั้ง ความเป็นกรด-ด่างและปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต โดยพบว่าความเป็นกรด-ด่างสูงจะทำให้ความใสลดต่ำลง ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาครอสลิง (Kerr and Cleaveland, 1959) ส่วนความเป็นกรด-ด่างต่ำนั้นพบว่าค่าใสเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3.16 เนื่องด้วยในการเกิดปฏิกิริยาฟอสโฟรีเลชัน ทำให้เกิดการผลักกันระหว่างประจุลบ (electronegative) ของหมู่ฟอสเฟตส่งผลให้ป้องกันการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและป้องกันการจับตัวกันระหว่างโมเลกุล (collapsing) ทำให้โมเลกุลแป้งเกิดการรวมตัวกับน้ำได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์จึงมีความใสของแป้งเปียกเพิ่มขึ้น ในขณะที่แป้งดิบหรือแป้งครอสลิงจะมีค่าความใสต่ำกว่าแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ทั้งนี้เนื่องด้วยแป้งครอสลิงเป็นแป้งที่สามารถเกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลแป้งทำให้โมเลกุลแป้งไม่สามารถรวมตัวกับน้ำได้ ส่วนแป้งดิบนั้นอาจเกิดการซ้อนทับกันและมีการสร้างพันธะไฮโดรเจน

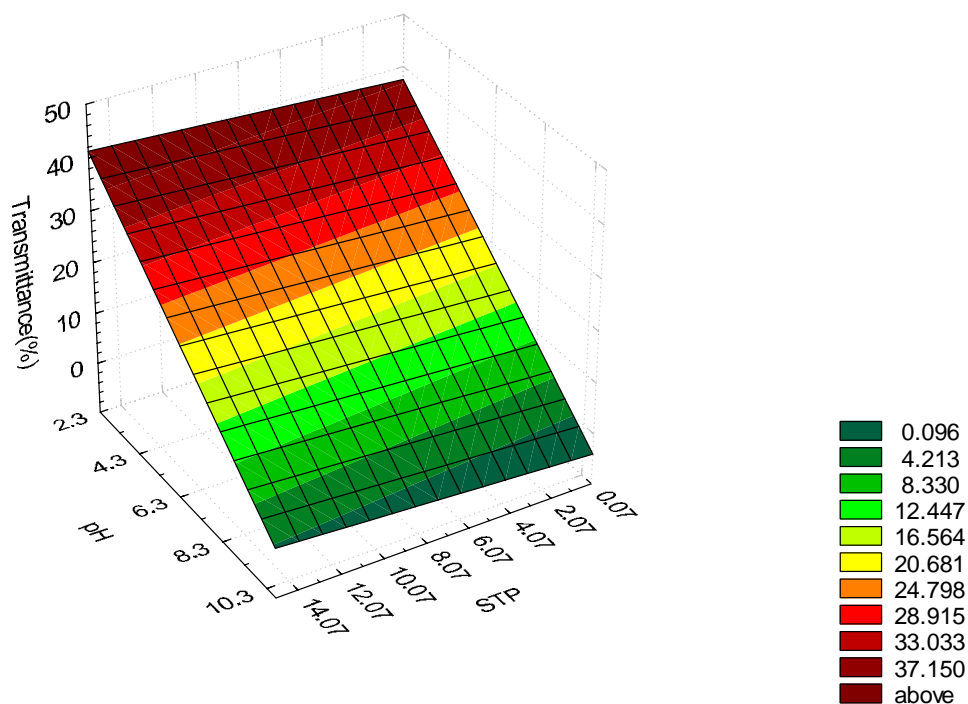
ระหว่างโมเลกุลของแป้งทำให้เกิด junction zone ซึ่งเป็นบริเวณที่กว้างเกินกว่าความยาวคลื่นแสง อันทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสงได้ จึงทำให้ค่าความใสต่ำ



ภาพที่ 3.15 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณ โซเดียมไตร โพลีฟอสเฟต (STP) กับความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ที่ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที

ดังนั้นปริมาณ โซเดียมไตร โพลีฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความใสเพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3.16 เนื่องด้วยการเพิ่มปริมาณ โซเดียมไตร โพลีฟอสเฟต ทำให้เพิ่มปริมาณหมู่ฟอสเฟตสูงขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ค่าความใสเพิ่มขึ้น ดังได้อธิบายข้างต้น

จากการศึกษาขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดัดแปรแป้งสำปะหลัง ด้วยการแทนที่ของหมู่ฟอสเฟต โดยใช้โซเดียมไตร โพลีฟอสเฟตในการทำปฏิกิริยา ที่ทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยาสูงที่สุดโดยที่ไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง ค่าความหนืดสูงสุด ค่าความใส สูงกว่าแป้งดิบ ซึ่งการศึกษาพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 150 นาที ปริมาณโซเดียมไตร โพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.5 จะทำให้ประสิทธิภาพปฏิกิริยา เท่ากับร้อยละ 23.0.2 ถึงร้อยละ 23.42 และความหนืดสูงสุดเท่ากับ 327.50 RVU ถึง 378.88 RVU ค่าความใส เท่ากับร้อยละ 28.37 ถึง ร้อยละ 30.08 ซึ่งสมบัติทางกายภาพดังกล่าวสูงกว่าแป้งดิบ



ภาพที่ 3.16 พื้นผิวตอบสนองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (STP) กับค่าความใส (transmittance)

3.6 สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรปฏิกิริยาของเบี่ยงออกเทนิต ซัคซินेट ได้แก่ ปริมาณออกเทนิต ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ ความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และค่าความหนืดสูงสุด พบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างความเป็นกรด-ด่างกับระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา และปฏิสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกเทนิต ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ส่วนตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนืดสูงสุด ได้แก่ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยพบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุดร้อยละ 75.52 เมื่อ ปริมาณออกเทนิต ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ร้อยละ 3.0 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 และระยะเวลานาน 300 นาที ค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 318.59 RVU. นอกจากนี้พบว่าตัวแปรทั้ง 3 ไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของแป้งคัดแปรดังกล่าว แต่เมื่อระดับการแทนที่สูงกว่า 0.0132 มีผลทำให้พื้นผิวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาและค่าการละลายในน้ำเย็น ของแป้งคาร์บอกซีลเมทิลจากแป้งมันสำปะหลัง ได้แก่ ปริมาณน้ำในตัวกลาง ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีอิทธิพลหลักต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา และค่าการละลายในน้ำเย็น ซึ่งพบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำในตัวกลางทำปฏิกิริยาเท่ากับ 1.54 โดยน้ำหนัก และปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตร้อยละ 12.5 จากการตัดแปรแป้งดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับร้อยละ 15.09 และค่าการละลายในน้ำเย็นเท่ากับร้อยละ 18.24

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรปฏิกิริยาของแป้ง ฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยา ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความใส พบว่าความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพปฏิกิริยา ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความใส ซึ่งจากการทดลองพบว่าผลของตัวแปรทั้ง 3 ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความใส ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.5 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 150 นาที จากการตัดแปรดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ ร้อยละ 22.0 และค่าความใสเท่ากับร้อยละ 16.0 และได้แป้งตัดแปรทั้ง 3 ชนิดที่มีรสภาวะเหมาะสมดังกล่าวไปทดลองในการผลิตแป้งแอมโฟเทอริกต่อไป

3.7 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2535). มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งตัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. กระทรวงอุตสาหกรรม.
- ศิริวัลภา เกษศิลป์ (2547). การผลิตและสมบัติของแป้งคาร์บอกซีลเมทิลจากแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.
- อรอนงค์ สุวรรณภากุล. (2539). การเตรียมและประเมินผลคุณสมบัติการเป็นสารช่วยแขวนตะกอนของแป้งโซเดียมคาร์บอกซีลเมทิล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Bhosale, R., and Singhal, R. (2006). Process optimization for the synthesis of octenyl succinyl derivative of waxy corn and amaranth starches. **Carbohydrate Polymers** 66(4): 521-527.

- Bao, J. Xing, J. Philips, L. D., and Corke, H. (2003). Physical properties of octenyl succinic anhydride modified rice, wheat, and potato starches. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 51:2283-2287
- Bhattacharyya, D., Singhal, R. S., and Kulkarni, P. R. (1995). A comparative account of conditions for synthesis of sodium carboxymethyl starch from corn and amaranth starch. **Carbohydrate polymers** 27: 247-253.
- Bolhuis, G. K., Zuurmanand. K., and Wierik, G. H. P. (1997). Improve of dissolution of poorly soluble drugs by solid deposition on a super disintegrant. II. The choice of super disintegrant and effect of granulation. **Europe Journal of Pharmaceutical Science** 5: 63-69.
- Chen, J., and Jan, J. (1994). Prepaton of granular cold-water-soluble starches by alcoholic alkali treatment. **Cereal Chemistry** 71(6): 618-622.
- Heinze, T. H., Pfeiffer, K., and Lazik, W. (2001). Starch derivatives with high degree of functionalization. III. Influence of reaction conditions and starting materials on molecular structure of carboxymethyl starch. **Journal of Applied Polymer Science** 81(8) : 2036-2044.
- Hood, L. F., and Mercier, C. (1978). Molecular structure of unmodified and chemically modified manioc starches. **Carbohydrate Research** 61: 53-66.
- Jeon, Y. S., Viswabathan, A., Gross, R. A. (1999). Studies of starch esterification: Reactions with alkenyl-succinated in aqueous slurry systems. **Starch/ Stärke** 51: 90-93.
- Kerr, R. W., and Cleveland, F. C. (1957). Process fro preparation of distarch phosphate and resulting product. **U.S. patent # 2 801 413**.

- Kirby, W. K. (1992). Non food used of starch. In J. R. Alexander, and K. Z. Henry (eds.). **Development in carbohydrate chemistry**. (pp. 371-383). USA: The American Association of cereal chemist.
- Kweon, K. J. H., Auh, J. W., Kim, K. H., Park, C. H., and Ko, C. J. (1997). Physiochemical properties and functional of highly carboxymethylated starch. **Starch/Stärke** 49(12): 499-505.
- Lai, L. N., Karain, A. A., Norziah, M. H., and Seon, C. C. (2004). Effect of Na₂CO₃ and NaOH on pasting properties of selected native cereal starch. **Food Chemistry and Technology** 69(4): 249-256.
- Landerito, N. A., and Wang, Y. J. (2005). Preparation and properties of starch phosphate using waxy, common, and high-amylose corn starch. II. reactive extrusion method. **Cereal Chemistry** 82(3): 271-276.
- Lim, S., and Sieb, P. A. (1993). Preparation and pasting properties of wheat and corn starch phosphate. **Cereal Chemistry** 70(2): 137-144.
- Muhammad, K., Kusnandar, F., Hashim, M. D., and Rahman, A. R. (1999). Application of native and phosphorylation tapioca starches in potato starch noodle. **International Journal of Food Science and Technology** 34: 275-280.
- Muhammad, K., Hussin, F., Man, C. Y., Ghazali, M. H., and Kennedy, F. J. (2000). Effect of pH on phosphorylation of sago starch. **Carbohydrate Polymers** 42: 85-90.
- Napaporn, A., and Saiyavit, V. (2003). Characterization and utilization of acid – modified crosslinked tapioca starch in phamacecal tablets. **Carbohydrate Polymers** 53: 263-270.
- Newport Scientific. (1995) **Operation manual for the series 4 Rapid Visco Analyzer**. Australai : Newport Scientific.

- Peterson, N. B. (1975). **Edible starch and starch-Derived syrupe**. London: Noyes Data Corporation.
- Qiu, H., and He, L. (1999). Synthesis and properties study of carboxymethyl cassava starch. **Polymers for Advanced Technology** 10: 469-472.
- Rutenberg, W. M., and Solarek, D. (1984). Starch derivatives: production and use. In L.R. Whistler, N. J. BeMiller, and F. E. Paschal (eds.). **Starch: chemistry and technology** (2nd ed) (pp. 460-461). New York: Academic Press.
- Segura, E. M., and Sira, E. E. P. (2003). Characterization of native and modified cassava starches by scanning electro microscopy and x-ray diffraction techniques. **Cereal World** 48(2): 78-81.
- Shogren, R. L., Viswanathan, A., Felker, F., and Gross, R. A. (2000). Distribution of octenyl succinated groups in octenyl succinic anhydried modified waxy maize starch. **Starch/ Stärke** 52: 196-204.
- Sitohy, Z. M., Labib, M. S., El-Saadany, S. S., and Ramadan, F. M. (2000). Physical properties of difference type of starch phosphate monoester, **Starch/ Stärke** 52: 101-105.
- Solarek, D. (1984). Starch derivatives: production and use. . In L.R. Whistler, N. J. BeMiller, and F. E. Paschal (eds.). **Starch: chemistry and technology** (2nd ed) (pp. 480-482). New York: Academic Press.
- Song, X., He, G., Ruan, H., and Chen, Q. (2006). Preparation and Properties of octenyl succinic anhydride modified Early Indica rice starch. **Starch/ Stärke** 58: 109-117.
- Stojanovic, Z., Jeremic, K., and Jovanovic, S. (2000). Synthsis of carboxymethyl starch. **Starch/Stärke** 52 : 413-419.

- The Joint FAO/WHO. (1997). Expert Committee on Food Additive. In **Compendium of food additive specification**. [On line]. Available: <http://www.fao.org/docrep/W6355E/w6355e0o.htm>.
- Tijssen, J. C., Kolk, J. H., Stamhuis, J. H., and Beenackers, A. A. C. M. (2001). An experimental study on the carboxymethylation of granular potato starch in non-aqueous media. **Carbohydrate Polymers** 45: 219-226.
- Viswanathan, A. (1999a). Effect of degree of substitution of octenyl succinate starch on enzymatic degradation. **Journal of Environmental Polymer Degradation** 7: 185-190
- Viswanathan, A. (1999b). Effect of degree of substitution of octenyl succinate starch on the emulsification activity of different oil phases. **Journal of Environmental Polymer Degradation** 7: 191-196
- Whistler, R. L. and BeMiller, J. N. (1997). In Whistler, R. L. and BeMiller, J. N. (eds). **Carbohydrate chemistry for food scientists**. USA: American association of cereal chemists.
- Wurzburg, O. B. (1987). **Modified starches: properties and uses**. Florida: CRC Press.

บทที่ 4

การดัดแปรแป้งแอมโฟเทอริก Modification of amphoteric starch

4.1 บทคัดย่อ

แป้งแอมโฟเทอริกเป็นแป้งดัดแปรที่มีการแทนที่ทั้งประจุบวกและประจุลบ ซึ่งเตรียมโดยใช้ 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียมครอไรด์ร้อยละ 6.0 ทำปฏิกิริยากับแป้งในสภาวะความเป็นด่าง 11.0 ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเป็นกลุ่มแทนที่ประจุบวกและประจุลบใช้การแทนที่ด้วยกลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนต (OSA) คาร์บอกซิลเมทิล (CMS) และกลุ่มฟอสเฟต (PPS) ใน 2 กระบวนการ คือ การผลิตประจุบวกก่อนประจุลบและการผลิตประจุลบก่อนประจุบวก จากการศึกษาพบว่า ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของทั้งประจุบวกและประจุลบลดลงทั้ง 2 กระบวนการ โดยที่กระบวนการผลิตประจุลบก่อนประจุบวกมีระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบลดลงมากกว่า นอกจากนี้ความหนืดสูงสุด เบรกดาว์น และการพองตัวของ Cat-OSA มีค่าสูงสุด ขณะที่ อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดและ เซตเบค ของการดัดแปรดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งออกเทนิล ซัคซิเนต ส่วนแป้งแอมโฟเทอริก Cat-CMS และ Cat-PPS นั้นมีความหนืดสูงสุด เบรกดาว์น และการพองตัวลดลง เมื่อเทียบกับ CMS และ PPS แต่ Cat-CMS มีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดลดลง ขณะที่ Cat-PPS มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามแป้งแอมโฟเทอริกที่ผ่านการดัดแปรทั้ง 3 กลุ่มนั้นมีเอลทัลปีของการเกิดเจลลาติโนเซชันต่ำลงทั้ง 2 กระบวนการ ส่วนลักษณะ โครงสร้างของเม็ดแป้งแอมโฟเทอริก ทั้งการแทนที่ด้วยกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลและกลุ่มฟอสเฟตมีลักษณะคล้ายถูกกัดกร่อน

4.2 บทนำ

อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมต่อเนื่องจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ โดยการใช้เยื่อกระดาษมาผลิตเป็นกระดาษชนิดต่างๆ และเป็นอุตสาหกรรมพื้นฐาน ที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจ ซึ่งสามารถทดแทนการนำเข้าได้อย่างมาก อัตราการขยายตัวของอุตสาหกรรมกระดาษเป็นตัวบ่งชี้ความเจริญก้าวหน้าทางสังคม และการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศได้เป็นอย่างดี โดยมีอัตราการบริโภคกระดาษของคนไทยโดยเฉลี่ย 40 กิโลกรัม/คน/ปี (The Thai print Association, 2007) โดยเฉพาะกระดาษพิมพ์เขียนเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรที่รู้หนังสือ และรองลงมาได้แก่กระดาษกราฟท์ มีอัตราการขยายตัวเนื่องจากความต้องการใช้บรรจุภัณฑ์

ประเภทกระดาษเพิ่มสูงขึ้น เช่น อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น สำหรับกระดาษแข็งและกล่องนั้น มีปริมาณความต้องการเพิ่มขึ้นเนื่องจากการขยายตัวอย่างต่อเนื่องของอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์และกระดาษทั้งเพื่อการส่งออก และ เพื่อการบริโภคภายในประเทศ

จะเห็นได้ว่าปริมาณความต้องการใช้ผลิตภัณฑ์กระดาษมีจำนวนมาก ซึ่งการบริโภคผลิตภัณฑ์กระดาษมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ราคานำเข้ากระดาษประเภทต่างๆสูงขึ้น ส่วนหนึ่งมีผลกระทบมาจากราคาวัตถุดิบต่างๆ ได้แก่ เยื่อสั้น เยื่อยาว และส่วนผสมอื่นๆ

โดยการผลิตกระดาษนั้นต้องใช้เยื่อกระดาษที่ทำจากไม้ต่าง ๆ เช่น ไม้สน ไม้ไผ่ ไม้ยูคาลิปตัส เป็นต้น ทำให้เป็นเยื่อเล็ก ๆ แล้วนำเยื่อกระดาษเหล่านั้นมาเรียงเป็นแผ่น อย่างไรก็ตามแผ่นกระดาษจะไม่เรียบ จะต้องมีการฉาบผิวจากแป้งทำให้กระดาษเรียบและยังเข้าไปอยู่ตามรูของใยกระดาษเพื่อช่วยทำให้กระดาษไม่ซึมหมึก เวลาเขียนด้วยน้ำหมึก หรือพิมพ์สี นอกจากนั้นจากแป้งยังช่วยทำให้กระดาษเหนียวยิ่งขึ้น แป้งดิบ (native starch) ที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษนั้นมีข้อจำกัด ได้แก่ การจับตัวกับเยื่อกระดาษได้ต่ำ และทำให้กระดาษเปราะไม่แข็งแรง ดังนั้นการดัดแปรแป้ง (starch modification) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้ โดยแป้งดัดแปรสามารถใช้ใน กระบวนการ wet end, surface sizing และกระบวนการเคลือบผิว (coating) ซึ่งแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นกับสมบัติ binding ของวัตถุดิบ โดยเฉพาะการ binding ของเยื่อกระดาษในกระบวนการ wet end ซึ่งหากพันธะที่จับกันมีความแข็งแรงนั้น ส่งผลให้กระดาษมีความยืดหยุ่นและคงตัวได้ดี ซึ่งแป้งแคทไอออนิกเป็นแป้งที่มีประจุบวกสามารถเกิดพันธะไอออนิกกับประจุลบของเยื่อกระดาษได้ดี ดังนั้นแป้งดัดแปรนี้จึงเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมกระดาษ

อย่างไรก็ตามแป้งแคทไอออนิกมีข้อจำกัดในอุตสาหกรรมกระดาษ คือ การเติมแป้งแคทไอออนิกที่มากเกินไปทำให้ประจุบวกของแป้งที่เกิดพันธะกับประจุลบของเยื่อกระดาษเหลืออยู่ จึงทำให้สารละลายเยื่อกระดาษส่วนใหญ่มีสมบัติเป็นประจุบวกด้วย ส่งผลให้เกิดพันธะได้ต่ำกับสารปรุงแต่งประจุบวก (cationic additive) เช่น สี สารเคลือบผิว สารคงรูปต่างๆ และเรซิน นอกจากนี้พบว่าสารละลายเยื่อกระดาษที่มีสมบัติเป็นประจุบวกยังทำให้เกิดฟองระหว่างกระบวนการผลิตส่งผลให้ผิวหน้ากระดาษไม่เรียบ ดังนั้นการใช้แป้งประจุบวกจึงต้องใช้ปริมาณจำกัด โดยทั่วไปปริมาณแป้งประจุบวกที่ใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษประมาณร้อยละ 0.5-2.5 โดยน้ำหนักแห้งของเยื่อกระดาษ (Handel, Donald, Constance and John, 2002) ซึ่งปริมาณการใช้แป้งนั้นขึ้นอยู่กับความเป็นประจุลบของเยื่อกระดาษและความเป็นประจุบวกของแป้งประจุบวก อีกประการที่สำคัญคือในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล จำเป็นต้องใช้แป้งที่มีทั้งประจุบวกและลบ ทั้งนี้เนื่องด้วยเยื่อกระดาษที่ผ่านการใช้งานนั้นเป็นเยื่อที่ไม่มีประจุหรือมีประจุลบเหลืออยู่ จำเป็นต้องใช้แป้งประจุบวกเพื่อจับกับเยื่อบางส่วนและประจุลบสารปรุงแต่งอื่น และแป้งประจุลบ

เพื่อจับกับสารปรุงแต่งประจุบวก จากปัญหาดังกล่าวทำให้มีการใช้แป้งแอมโฟเทอริก (amphoteric starch) ทดแทนแป้งแคทไอออนิก

แป้งแอมโฟเทอริก (amphoteric starch) เป็นแป้งดัดแปรที่มีการแทนที่ทั้งกลุ่มประจุลบ และประจุบวก โดยนิยมนำ 2-epoxypropyl 3-trimethylammonium chloride เพื่อใช้เป็นกลุ่มแทนที่ประจุบวก และใช้โซเดียมไตร โพลีฟอสเฟต หรือกลุ่มออร์โทฟอสเฟต เพื่อใช้เป็นกลุ่มแทนที่ประจุลบ โดยทั่วไประดับการแทนที่ของกลุ่มประจุบวกต่อประจุลบเท่ากับ 0.20-0.30 : 0.07-0.18 (Rutenberg and Solarek, 1984) การใช้แป้งแอมโฟเทอริกสามารถช่วยให้การควบคุมความแข็งแรงของกระดาษได้โดยไม่ต้องสารเติมแต่งอื่น (additive) และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพใช้งานได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความไม่สมดุลของประจุ ซึ่งความสมดุลของประจุของกระดาษทำให้ส่วนผสมมีความคงตัว ทำให้ง่ายต่อการควบคุมกระบวนการผลิต โดยทั่วไปเครื่องจักรในอุตสาหกรรมกระดาษค่อนข้างมีความเร็วสูง และกำลังการผลิตที่สูง ดังนั้นการควบคุมการผลิตจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อป้องกันการสูญเสียและเพิ่มผลผลิต ความคงตัวของส่วนผสมจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการควบคุมกระบวนการผลิต นอกจากนี้แล้วแป้งแอมโฟเทอริกยังเพิ่ม drainage และ retention ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงทนต่อการผลิตที่รวดเร็วได้ ในอุตสาหกรรมกระดาษ นิยมใช้แป้งแอมโฟเทอริกในกระบวนการ wet end (Hubbard, Liberty, Harvey, and Hogen, 1986) เพื่อช่วยเพิ่ม retention และ drainage ซึ่งทำให้ผลผลิต (yield) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดค่า BOD ของน้ำทิ้ง ทำให้เป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม Hubbard et al. (1986) ได้ศึกษาแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต โดยใช้ไตรโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต จากการทดลองพบว่าหลังการดัดแปรแป้งแอมโฟเทอริกแล้ว ระดับการแทนที่ทั้งประจุบวกและลบมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งแคทไอออนิกและสตาร์ช ฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ต่อมา Xu, Wang, Wu, Wang, and Li (2006) ได้เตรียมแป้งครอสสลิงแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิล เพื่อใช้ในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสีย โดยใช้การแทนที่ของประจุบวกร้อยละ 0.3 ต่อ 0.12-0.33 ของกลุ่มคาร์บอกซิล พบว่าระดับการแทนที่ของคาร์บอกซิลเพิ่มขึ้นส่งผลให้การดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้น และ Xing, Zhang, Ju, and Yang (2006) พบว่าการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียนั้น สามารถใช้แป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มมาลิก (maleic group) ได้เช่นกัน

จากการศึกษาผ่านมาแป้งแอมโฟเทอริกส่วนใหญ่ศึกษาจากแป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง ขณะที่แป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นแป้งที่มีการผลิตมากที่สุดในประเทศไทย การผลิตแป้งแอมโฟเทอริกจากแป้งมันสำปะหลัง และกลุ่มประจุลบที่แตกต่างกัน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังเป็นทางเลือกให้อุตสาหกรรมนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

4.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.3.1 การเตรียมแป้งแคทไอออนิก

เตรียมแป้งภายใต้สภาวะที่คัดแปลงจากวิธีของ Lim, Lang, and Sieb (1992) โดยเตรียมน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้งเติม 2-อีพอกซีโพรพิล 3-ไตรเมทิลแอมโมเนียม คลอไรด์ (2-epoxypropyl 3-trimethylammonium chloride) ร้อยละ 6.0 ความเป็นกรด-ด่าง 11.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5.0 ปรับอุณหภูมิน้ำแป้ง 38-40 องศาเซลเซียส และกวนทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หยุดปฏิกิริยาโดยการปรับความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลาง กรองล้างเกลือออกจากแป้งจนหมดและนำไปอบที่ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง

4.3.2 การเตรียมแป้งออกเทนิลซัคซิเนต

ทำการเตรียมออกเทนิลซัคซิเนต จากสภาวะที่คัดเลือกในการทดลองที่ 3.3.1 โดยเตรียมสารละลายน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 35 ความเป็นกรด-ด่าง 8.0 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 เติมออกเทนิล ซัคซิเนต แอนไฮไดรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักแห้งและปรับความเป็นกรด-ด่างน้ำแป้งในช่วง 8.0 กวนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง หลังจากนั้นปรับความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลางโดยใช้ กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 กรองแป้งและล้างแป้งจนกระทั่งหลังทดสอบน้ำผ่านการล้างแล้วไม่เกิดปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จากนั้นอบแป้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง

4.3.3 การเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิล

ทำการเตรียมแป้งคาร์บอกซิลเมทิลจากสภาวะที่คัดเลือกในการทดลองที่ 3.3.2 โดยการเตรียมน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 10 ในตัวกลางปฏิกิริยาที่เป็นไอโซโพรพานอล ที่มีน้ำร้อยละ 1.54 โดยน้ำหนัก จากนั้นกวนในอ่างน้ำ ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วจึงเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 ในอัตราส่วนร้อยละ 6.0 กวนเป็นเวลา 10 นาทีและเติมโซเดียมโมโนคลอไรด์ในอัตราส่วนร้อยละ 12.5 ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นปรับความเป็นกรด-ด่างน้ำแป้งให้เป็นกลาง กรองแป้งและล้างแป้งจนกระทั่งหลังทดสอบน้ำผ่านการล้างแล้วไม่เกิดปฏิกิริยากับซิลเวอร์ไนเตรตเข้มข้น 0.1 นอร์มอล จากนั้นอบแป้งที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง

4.3.4 การเตรียมแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์

ทำการเตรียมแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์จากสภาวะที่คัดเลือกในการทดลองที่ 3.3.3 โดยการเตรียมโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตในอัตราส่วนร้อยละ 7.5 ละลายในน้ำกลั่น 200 มล. ปรับความเข้มข้นของสารละลายในช่วง 6.0 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 10 หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 กวนจนละลาย ค่อยๆเติมแป้ง 100 กรัม โดยน้ำหนักแห้งลงในสารละลาย ปรับความเข้มข้นของสารละลายน้ำแป้งในช่วง 6.5 กวนทิ้งไว้ 30 นาที ที่อุณหภูมิห้องกรองแป้งและอบที่อุณหภูมิ 40 เซลเซียส จนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 5-8 และอบแป้งอีกครั้งที่อุณหภูมิในช่วง 130 เซลเซียส เป็นระยะเวลา 150 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำแป้งคัดแปรที่ได้ละลายในน้ำกลั่น 500 มล. และปรับความเข้มข้นน้ำแป้งให้เป็นกลาง กรองล้างเกลือออกจากแป้งจนหมด และนำไปอบที่ 40 องศาเซลเซียสจนกระทั่งแป้งมีความชื้นร้อยละ 11-14 ทำการบดแป้งผ่านตะแกรง 100 เมช บรรจุถุงพลาสติกและเก็บไว้ในที่แห้ง

4.3.5 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิลซัลฟิเนต

4.3.5.1 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกโดยแทนที่ประจุบวกก่อนประจุลบ

นำแป้งแคทไอออนิกจากข้อ 4.3.1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง และทำการทดลองตามกระบวนการผลิตแป้งออกเทนิลซัลฟิเนต ตามข้อ 4.3.2

4.3.5.2 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกโดยแทนที่ประจุลบก่อนประจุบวก

นำแป้งเตรียมออกเทนิลซัลฟิเนตจากข้อ 4.3.2 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้งและทำการทดลองตามกระบวนการผลิตแป้งแคทไอออนิก ตามข้อ 4.3.1

4.3.6 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล

4.3.6.1 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกโดยประจุบวกก่อนประจุลบ

นำแป้งแคทไอออนิกจากข้อ 4.3.1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง และทำการทดลองตามกระบวนการผลิตแป้งคาร์บอกซิเมทิล ตามข้อ 4.3.3

4.3.6.2 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกโดยประจุลบก่อนประจุบวก

นำแป้งคาร์บอกซิเมทิลจากข้อ 4.3.3 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง และทำการทดลองตามกระบวนการผลิตแป้งแคทไอออนิก ตามข้อ 4.3.1

4.3.7 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต

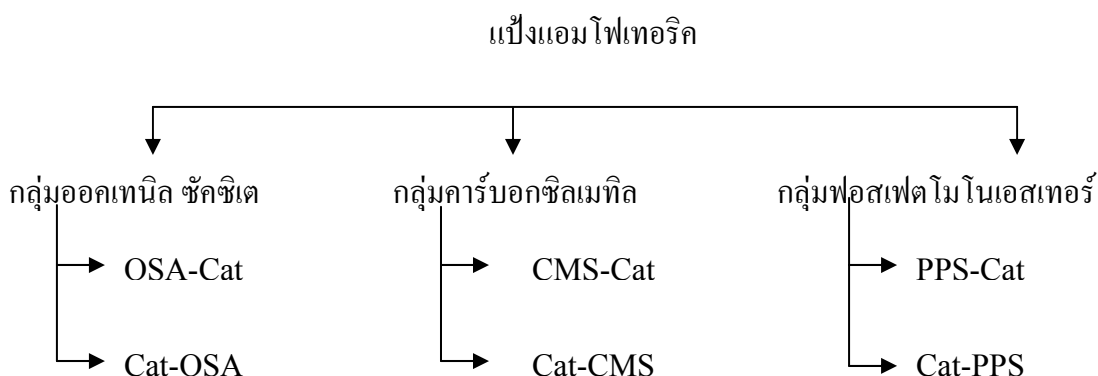
4.3.7.1 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกโดยประจุบวกก่อนประจุลบ

นำแป้งแคทไอออนิกจากข้อ 4.3.1 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง และทำการทดลองตามกระบวนการผลิตแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ตามข้อ 4.3.4

4.3.7.2 การเตรียมแป้งแอมโฟเทอริกโดยประจุลบก่อนประจุบวก

นำแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ข้อ 4.3.4 ร้อยละ 40 โดยน้ำหนักแห้ง และทำการทดลองตามกระบวนการผลิตแป้งแคทไอออนิก ตามข้อ 4.3.1

แผนการทดลองแป้งแอมโฟเทอริก



4.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของแป้งแอมโฟเทอริก

4.4.1 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของแป้งแคทไอออนิก

ระดับการแทนที่ (Degree of substitution, DS) ของแป้งแคทไอออนิกใช้วิธีของ Kjeldahl ตาม AOAC (2000) ซึ่งสามารถคำนวณระดับการแทนที่ตามสมการดังต่อไปนี้

$$DS = \frac{162xN}{1400 - (152xN)}$$

เมื่อ

N คือ ร้อยละ โดยน้ำหนักของไนโตรเจน

4.4.2 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนต

ทำการวิเคราะห์ผลตามข้อ 3.3.2.1

4.4.3 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่กลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล

ทำการวิเคราะห์ตามข้อ 3.3.4.2

4.4.4 การวิเคราะห์ระดับการแทนที่กลุ่มฟอสเฟต

ทำการวิเคราะห์ตามข้อ 3.3.4.3

4.4.5 ประสิทธิภาพปฏิกิริยา (reaction efficiency, RE)

เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยใช้สารเคมี ทั้งนี้ ประสิทธิภาพปฏิกิริยาเป็นสัดส่วนของระดับการแทนที่จากการทดลองและระดับการแทนที่จากทฤษฎี ซึ่งระดับการแทนที่จากทฤษฎี นั้นเป็นสัดส่วนของโมลสารเคมีที่สามารถเข้าทำปฏิกิริยาต่อโมลแอนไฮโดรกลูโคสโดยไม่เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง

ดังนั้นประสิทธิภาพการผลิตสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ประสิทธิภาพปฏิกิริยา} = \frac{DS}{DS_t} \times 100$$

เมื่อ DS คือ ระดับการแทนที่จากการทดลอง

DS_t คือ ระดับการแทนที่จากทฤษฎี โดยคำนวณจาก

$$DS_t = \frac{162}{\text{โมลของสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา}}$$

4.4.6 ความหนืด (viscosity)

โดยใช้วิธีเช่นเดียวกับ 3.3.4.5 และเพิ่มการตรวจสอบอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature), setback, และ breakdown

4.4.7 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดแป้ง (starch granule morphology)

ใช้วิธีเดียวกับ 3.3.4.6

4.4.8 กำลังการพองตัว (swelling power)

คัดแปลงมาจากวิธีของกล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ (2545) โดยชั่งตัวอย่างแป้ง 0.5 กรัมใส่ในหลอดเหยียงที่ทราบน้ำหนักแน่นอน เติมน้ำกลั่นปริมาตร 15 มิลลิลิตร นำไปวางแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิได้ (water bath) และปรับอุณหภูมิของแต่ละตัวอย่างให้คงที่ คือ อุณหภูมิ 55 65 75 และ 85 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีพร้อมกับกวนเบาๆ หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำตัวอย่างไปเหยียงในเครื่องเหยียงที่ความเร็ว 2,200 รอบต่อ

นาที นาน 15 นาที รินส่วนใสลงในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้ว นำไปประเหยที่ตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จนแห้ง ชั่งน้ำหนักเป็นส่วนที่ละลายน้ำ ส่วนแข็งเปียกในหลอดนำมาชั่งเป็นแข็งที่พองตัวแล้ว

$$\text{กำลังการพองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักแข็งที่พองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละการละลาย})}$$

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง}}$$

4.4.9 สมบัติทางความร้อน (thermal properties)

การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ดัดแปลงจากวิธีของ วนิดา เศถิณุโชค (2547) โดยการชั่งตัวอย่างแข็งที่ทราบน้ำหนักแน่นอนประมาณ 10 มิลลิกรัม ใส่ใน aluminum pan เติมน้ำกลั่นจำนวน 20 ไมโครลิตร ปิดฝา aluminum pan แล้วนำมาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน เพื่อให้แข็งดูดซับน้ำได้เต็มที่ หลังจากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างโดยใช้เครื่อง Differential scanning calorimeter (Pyris Daimond ,Perkin Elmer,USA) ที่อุณหภูมิ 30 ถึง 95 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที บันทึกค่า onset temperature (To) peak temperature (Tp) conclusion temperature (Tc) และ ค่าเอนทัลปี (ΔH)

4.5 การเก็บรวบรวมข้อมูลและการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์คุณภาพทางเคมีและกายภาพ โดยวิเคราะห์ 3 ซ้ำจากการทดลอง 2 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรม Statistical Analysis System (SAS institute Inc., 1995) สำหรับทุกการวิเคราะห์

4.6 ผลการทดลองและวิจารณ์

4.6.1 ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา

จากการทำการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังแอมโฟเทอร์ริกจากกลุ่มประจุลบ 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มออกเทนิต ซัคซิเนต กลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล และกลุ่มฟอสเฟต ซึ่งแบ่งการดัดแปรออกเป็น 2 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการผลิตประจุบวกก่อนประจุลบ และกระบวนการผลิตประจุลบก่อนประจุบวก โดยศึกษาประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุบวกและประจุลบของทั้ง 2 กระบวนการ พบว่า การดัดแปรแป้งแอมโฟเทอร์ริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิตนั้น ทำให้

ระดับแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุบวกลดลง จากกระบวนการตัดแปรทั้ง 2 กระบวนการ ดังตารางที่ 4.1 โดยกระบวนการตัดแปรด้วยประจุลบก่อนประจุบวก (OSA-Cat) ส่งผลให้ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบลดต่ำลงมากกว่าการแทนที่ด้วยประจุบวกก่อนประจุลบ (Cat-OSA) ซึ่งประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลงจากร้อยละ 71.0 เป็นร้อยละ 22.0 และ 47.5 เมื่อมีการตัดแปรด้วยการแทนที่ OSA, OSA-Cat, และ Cat-OSA ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.1

การตัดแปรแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล พบว่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุบวกและประจุลบในกระบวนการผลิตประจุบวกก่อนประจุลบ (Cat-CMS) และ กระบวนการผลิตประจุลบก่อนประจุบวก (CMS-Cat) มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งแคทไอออนิก (Cat) หรือแป้งคาร์บอกซิลเมทิล (CMS) ดังตารางที่ 4.2 โดยที่ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุบวกลดลงจากร้อยละ 75.8 เป็นร้อยละ 72.4 และ 73.9 เมื่อใช้กระบวนการผลิต Cat, CMS-Cat, และ Cat-CMS ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบลดลงจากร้อยละ 15.1 เป็นร้อยละ 13.0 และ 14.8 เมื่อใช้กระบวนการผลิต CMS, CMS-Cat, และ Cat-CMS ตามลำดับ การตัดแปรแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟตพบว่าประจุบวกหลังผ่านกระบวนการผลิตทั้ง 2 กระบวนการมีค่าลดลง โดยพบว่าตัดแปรด้วยประจุลบก่อนประจุบวก (PPS-Cat) นั้นส่งผลประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุบวกลดลงจากร้อยละ 75.7 เป็นร้อยละ 72.4 แต่เมื่อทำการตัดแปรประจุบวกก่อนประจุลบ (Cat-PPS) พบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุบวกลดลงเป็นร้อยละ 75.0 ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโฟเทอริกโดยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิต ซัคซิเนต

กระบวนการผลิต	ระดับการแทนที่		ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (%)	
	ประจุบวก	ประจุลบ	ประจุบวก	ประจุลบ
Cat	0.0298 ^a	-	75.7 ^a	-
OSA	-	0.0187 ^a	-	71.0 ^a
OSA-Cat	0.0285 ^c	0.0087 ^c	72.4 ^c	22.0 ^c
Cat-OSA	0.0290 ^b	0.0125 ^b	73.7 ^b	47.5 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.2 ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโฟเทอริกโดยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมิล

กระบวนการผลิต	ระดับการแทนที่		ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (%)	
	ประจุบวก	ประจุลบ	ประจุบวก	ประจุลบ
Cat	0.0298 ^a	-	75.7 ^a	-
CMS	-	0.0147 ^a	-	15.1 ^a
CMS-Cat	0.0285 ^c	0.0127 ^c	72.4 ^c	13.0 ^c
Cat-CMS	0.0291 ^b	0.0144 ^b	73.9 ^b	14.8 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ขณะที่ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบเมื่อทำการตัดแปรรแป้งแอมโฟเทอริกด้วย PPS-Cat ก่อนนั้นพบว่าค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาลดต่ำกว่า Cat-PPS โดยประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบลดลงจากร้อยละ 24.3 เป็นร้อยละ 12.4 และ 22.7 เมื่อผ่านการตัดแปรรด้วย PPS, PPS-Cat, และ Cat-PPS ตามลำดับ

แป้งแอมโฟเทอริกที่มีการตัดแปรรด้วยการแทนที่ของประจุลบทั้ง 3 กลุ่ม ได้แก่ ออกเทนิล ซัลซิเนต คาร์บอกซิลเมทิล และฟอสเฟต ด้วยกระบวนการแทนที่ของประจุบวกก่อนประจุลบและ

ตารางที่ 4.3 ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแอมโฟเทอริกโดยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต

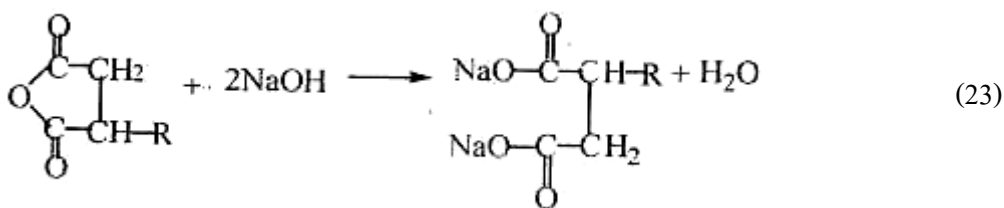
กระบวนการผลิต	ระดับการแทนที่		ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยา (%)	
	ประจุบวก	ประจุลบ	ประจุบวก	ประจุลบ
Cat	0.0298 ^a	-	75.7 ^a	-
PPS	-	0.0147 ^a	-	24.3 ^a
PPS-Cat	0.0285 ^c	0.0075 ^c	72.4 ^c	12.4 ^c
Cat-PPS	0.0295 ^b	0.0137 ^b	75.0 ^b	22.7 ^b

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

กระบวนการแทนที่ของประจุลบก่อนประจุบวก พบว่ากระบวนการผลิตทั้ง 2 กระบวนการส่งผลให้ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของทั้งประจุบวกและประจุลบลดลง โดยที่ อัตราการลดลงของประจุบวกน้อยกว่าประจุลบ กระบวนการตัดแปรที่ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบสูงสุดได้แก่ กระบวนการตัดแปรด้วยประจุบวกก่อนประจุลบ ทั้งนี้เนื่องด้วยเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น โดยการแทนที่ด้วยกลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนตในแป้งแอมโพเทอริกที่มีการแทนที่ด้วยกระบวนการ OSA-Cat เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงดังสมการ 23 ในภาพที่ 4.1 ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาดำ ซึ่งในการทำปฏิกิริยาในกระบวนการ Cat นั้นใช้ความเป็นกรด-ด่างมากถึง 11.0 เมื่อความเป็นกรด-ด่างเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาดำลงซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับแป้งแอมโพเทอริกที่มีการแทนที่ด้วยกลุ่มฟอสเฟต นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่ของหมู่ออกเทนิล ซัคซิเนตนั้น ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาของประจุลบลดลงในอัตราต่ำกว่าการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลและกลุ่มฟอสเฟต ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 เนื่องด้วยพันธะของกลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนตและกลุ่มฟอสเฟตที่จับกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งเป็นพันธะเอสเทอร์ ขณะที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่จับกับกลุ่มคาร์บอกซิลเป็นพันธะอีเทอร์ ซึ่งพันธะเอสเทอร์มีความแข็งแรงน้อยกว่าพันธะอีเทอร์ (Wurzburg, 1987)

4.6.2 ความหนืด (viscosity)

อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืด (pasting temperature) ของแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าการตัดแปรด้วยกลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนต และ กลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลมีค่าลดลง ทั้ง 2 กระบวนการผลิต



ภาพที่ 4.1 การเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงของแป้งออกเทนิล ซัคซิเนต

ที่มา: Song, He, Raun, and Chen (2006)

เมื่อเปรียบเทียบกับ OSA และ CMS ดังตารางที่ 4.4 ซึ่งการที่อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดลดลงในแป้งแอมโพเทอริกกลุ่มนี้เนื่องด้วยแป้งตัดแปรดังกล่าวมีระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งแคทไอออนิกหรือแป้งประจุลบต่างๆ อย่างเดียว โดยที่แป้งแอมโพเทอริกนั้นมี

ระดับการแทนที่ทั้งของประจุบวกและและจุลป สอดคล้องกับ Kim, Hermansson, and Eriksson (1992) ที่พบว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดลดลงเมื่อระดับของการดัดแปรสูงขึ้น เนื่องจากกลุ่มการแทนที่ช่วยขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้ง นอกจากนี้ระดับการแทนที่สูงมากกว่า 0.2 ส่งผลให้แป้งมีสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic property) เพิ่มขึ้นอีกด้วย (Sing, Kuar, and McCarty, 2007; Whistler and Bemiller, 1997) ขณะที่แป้งแอมโฟเทอริกที่แทนที่ด้วยกลุ่มฟอสเฟตมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดสูงขึ้นเนื่องด้วยกระบวนการผลิตแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์เป็นกระบวนการกึ่งแห้งซึ่งต้องใช้สภาวะรุนแรง ดังนั้นจึงมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึกภายในเม็ดแป้งให้แข็งแรงขึ้นด้วย นอกจากนี้พบว่ากระบวนการผลิตด้วยประจุบวกก่อนประจุลบมีค่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดสูงกว่ากระบวนการผลิตประจุลบก่อนประจุบวก

ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของแป้งแอมโฟเทอริกทั้ง 3 กลุ่มมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยพบว่า Cat-CMS และ Cat-PPS มีค่าความหนืดสูงสุดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแป้ง CMS และ PPS แต่การแทนที่ของกลุ่มออกเทนิล ซักซิเนตนั้น Cat-OSA มีความหนืดสูงสุดสูงกว่า OSA ดังตารางที่ 4.4 เนื่องด้วยแป้งออกเทนิลที่มี side chain ที่ใหญ่และอยู่ในลักษณะที่กางออกมากกว่าเมื่อมีการหมุนของโมเลกุลในสารละลายจะครอบคลุมปริมาตรที่มากกว่า ส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น และค่า breakdown ของแป้งที่ผ่านกระบวนการ CMS-Cat

Setback เป็นค่าที่แสดงถึงการคืนตัวของแป้ง โดยที่เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลจะมีการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำลง โดยทั้งไปแป้งดัดแปรจะมีค่า setback ต่ำกว่าแป้งดิบ เนื่องด้วยหมู่การแทนที่ต่างๆช่วยขัดขวางการจัดเรียงตัวของโมเลกุลภายในเม็ดแป้ง โดยจะช่วยยับยั้งการรวมตัวกันของอะมิโลส (Whistler, Bemiller, 1997) จากการทดลองพบว่าแป้งแอมโฟเทอริกทั้ง 3 กลุ่ม

มีค่า setback ลดต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับ Cat ,OSA, CMS และ PPS ดังตารางที่ 4.4 เนื่องด้วยระดับการแทนที่ของแป้งแอมโฟเทอริกเพิ่มขึ้นจึงทำให้กลุ่มแทนที่เหล่านั้นมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแป้งได้ดีกว่าการแทนที่ด้วยประจุเดียว นอกจากนี้พบว่าแป้งแอม โฟเทอริกด้วยกระบวนการประจุบวกก่อนประจุลบทั้ง 3 กลุ่มมีค่า setback ต่ำมากกว่ากระบวนการประจุลบก่อนประจุบวก ดังนั้นแป้งดังกล่าวจึงมีอัตราการคืนตัวน้อยกว่าด้วย

เมื่อเปรียบเทียบแป้งแอมโฟเทอริกทั้ง 3 กลุ่มพบว่า OSA-Cat มีอัตราการคืนตัวน้อยกว่าการแทนที่ด้วย Cat-CMS และ Cat-PPS ตามลำดับ

ตารางที่ 4.4 ค่าความหนืดของแป้งแอมโพเทอริกจากประจุบและกระบวนการที่แตกต่างกัน

ชนิดแป้ง	Pasting temp. (องศาเซลเซียส)	ความหนืด (RVU)		
		Peak	Breakdown	Setback
Cat	58.55±0.25 ^g	227.08±2.89 ^e	117.88±10.96 ^{cf}	43.00±3.60 ^d
OSA	69.85±0.14 ^b	403.02±3.02 ^b	175.73±16.71 ^c	112.19±7.91 ^a
OSA-Cat	65.10±0.14 ^c	281.65±4.39 ^d	154.77±0.86 ^d	57.35±1.56 ^{bc}
Cat-OSA	66.20±0.11 ^d	677.10±9.58 ^a	527.97±3.20 ^a	4.80±0.18 ^f
CMS	72.48±0.19 ^a	211.19±2.38 ^f	125.65±5.16 ^e	43.46±0.01 ^d
CMS-Cat	60.33±0.18 ^f	225.85±0.92 ^e	127.67±0.71 ^e	39.06±0.74 ^d
Cat-CMS	65.95±0.32 ^d	187.00±5.01 ^g	101.94±1.59 ^f	27.32±0.21 ^e
PPS	59.78±0.25 ^f	328.96±9.31 ^c	195.06±12.58 ^b	63.67±4.36 ^b
PPS-Cat	60.39±0.83 ^f	341.86±8.51 ^c	189.02±20.83 ^{bc}	53.75±0.76 ^c
Cat-PPS	68.44±0.09 ^c	186.17±4.24 ^g	102.10±2.44 ^f	26.89±0.09 ^e

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

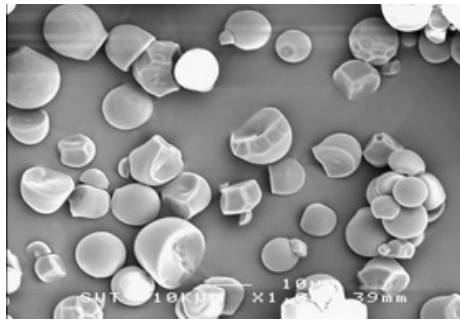
4.6.3 ลักษณะของเม็ดแป้ง (Starch morphology)

เมื่อทำการสังเกตลักษณะเม็ดแป้ง Cat, CMS, OSA และ PPS เปรียบเทียบกับแป้งดิบ พบว่าแป้งดัดแปรทั้ง 4 ชนิดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับเม็ดแป้งดิบ ดังภาพ 4.2 (a-e) โดยยังคงสภาพของเม็ดแป้งที่มีพื้นผิวเรียบ เป็นรูปไข่ และแสดงให้เห็นรอยนูนชัดเจน แต่ PPS มีรูปทรงเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาของในการทำปฏิกิริยาในสภาวะที่ใช้อุณหภูมิสูงและปริมาณน้ำน้อย ดังนั้นอาจเกิดการทำลายโครงสร้างบางส่วนของเม็ดแป้ง ซึ่งสอดคล้องกับ Perera, Hoover, and St.John's (1999) พบว่ากระบวนการร้อนขึ้นส่งผลให้เม็ดแป้งถูกกัดกร่อนได้ง่ายกว่าแป้งดิบ นอกจากนี้อาจเกิดจากแรงกลในกระบวนการเตรียมแป้งอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ลักษณะของเม็ดแป้งหลังการทำปฏิกิริยาเปลี่ยนแปลงไป เมื่อแป้งผ่านกระบวนการดัดแปรแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 2 กระบวนการพบว่าแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 6 ชนิดมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันโดยยังคงสภาพของเม็ดแป้ง และพบว่าแป้งแอมโพเทอริก Cat-CMS, CMS-Cat, Cat-PPS และ PPS-Cat นั้นมีลักษณะของเม็ดแป้งที่แตกร้าวบางส่วน ดังภาพที่ 4.3

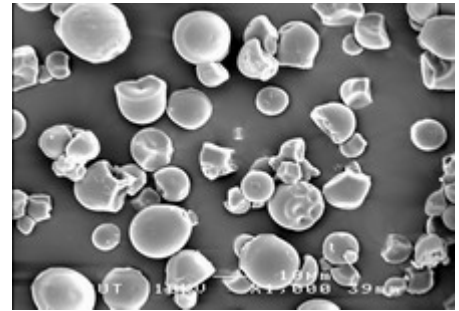
(a-f) อาจเนื่องด้วยสภาวะการผลิตของ CMS ใช้สภาวะที่มีความเป็นด่างสูง ดังนั้นเมื่อน้ำพาโซเดียมไฮดรอกไซด์ผ่านเข้าไปในเม็ดแป้ง โซเดียมไฮดรอกไซด์อาจไปทำลายพื้นผิวบางส่วนของเม็ดแป้ง ส่วนสภาวะการผลิตของ PPS เป็นสภาวะที่ต้องใช้ความร้อนสูงและใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นจึงอาจเกิดการกักตัวของความร้อน ขณะที่แป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของ OSA นั้น ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งหลังการตัดแปร ซึ่ง Gonzalez, and Perez (2002) พบว่าการตัดแปรด้วยการแทนที่ของกลุ่มอะซิล (acetyl group) ในกระบวนการตัดแปรอะซิเลชัน (acetylation) ที่มีระดับการแทนที่มากกว่า 0.03 ส่งผลให้ผิวเม็ดแป้งมีรูพรุน (porosity) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังพบว่าผิวบางส่วนของเม็ดแป้งถูกกักตัว และ Sithohi and Ramadan (2002) พบว่า ระดับการแทนที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้เม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้นอีกด้วย ขณะที่ Kaur, Singh, and Sothi (2002) พบว่า ลักษณะของเม็ดแป้งที่ผ่านตัดแปรด้วยวิธีการครอสลิง (crosslinked) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

4.6.4 การพองตัว (swelling power)

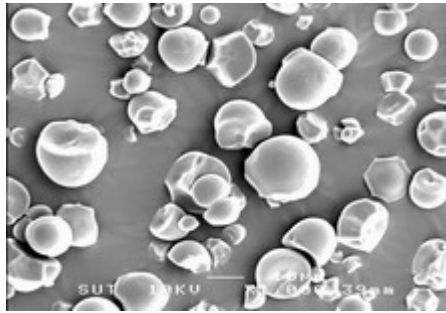
กำลังการพองตัวของแป้งแอมโฟเทอริกทั้ง 3 กลุ่ม และ 2 กระบวนการ พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยที่แป้งแต่ละชนิดมีค่ากำลังการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากส่วนอสัณฐานของโมเลกุลแป้งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้มากยิ่งขึ้น และพันธะระหว่างโมเลกุลในส่วนที่เป็นผลึกคลายความหนาแน่นลง โมเลกุลในส่วนที่คลายตัวจะมีการดูดซับน้ำได้มากขึ้นทำให้เม็ดแป้งมีการพองตัวเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นพันธะส่วนผลึกที่เหลือจะคลายตัว ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ และเม็ดแป้งอาจแตกออกทำให้เกิดการละลายมากขึ้น เมื่อพิจารณาแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิล ซัคซิเนต พบว่า Cat-OSA มีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่า OSA-Cat ดังแสดงในตาราง 4.5 ทั้งนี้ Cat-OSA มีระดับการแทนที่สูงกว่า OSA-Cat ซึ่งระดับการแทนที่สูงนั้นทำให้โครงสร้างแป้งคลายความหนาแน่นลง ทำให้พันธะภายในเม็ดแป้งอ่อนแอลง ส่งผลให้โมเลกุลสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ Cat-OSA ก็มีกำลังการพองตัวสูงที่สุดด้วย ส่วนแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิล มีกำลังการพองตัวไม่แตกต่างกันทั้ง Cat-CMS หรือ CMS-Cat ขณะที่การแทนที่ด้วยกลุ่มฟอสเฟตนั้น Cat-PPS มีค่ากำลังการพองตัวต่ำกว่า PPS-Cat ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ทั้งนี้ สอดคล้องกับผลของความหนืดสูงสุดของแป้ง Cat-PPS ที่มีค่าต่ำกว่า PPS-Cat ด้วยเช่นกัน



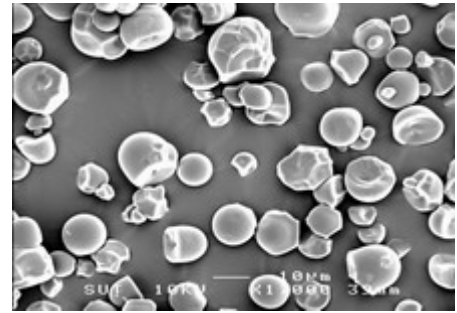
(a)



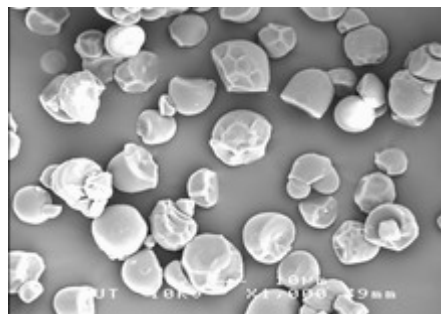
(b)



(c)

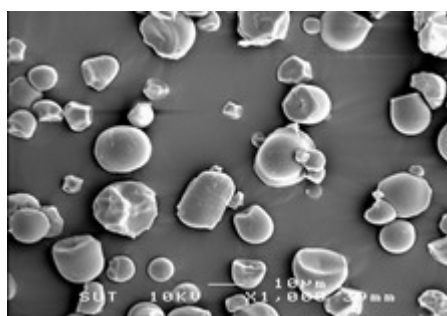


(d)

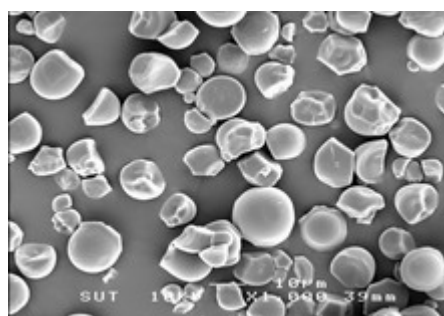


(e)

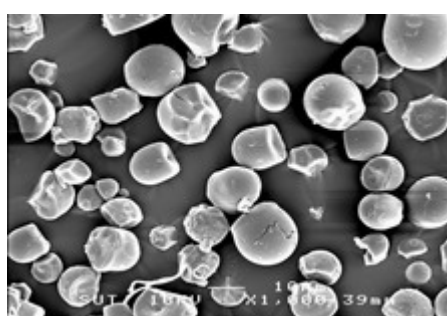
ภาพที่ 4.2 ลักษณะของเม็ดแป้งเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดย (a) แป้งดิบสำปะหลัง (b) Cat (c) CMS (d) OSA (e) PPS



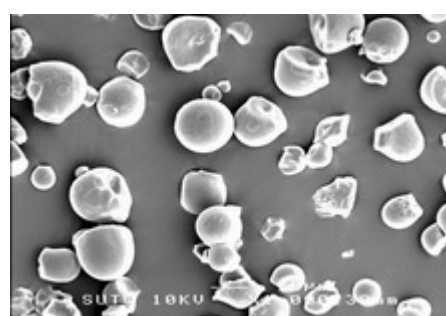
(a)



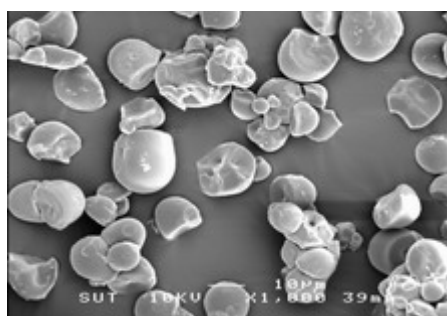
(b)



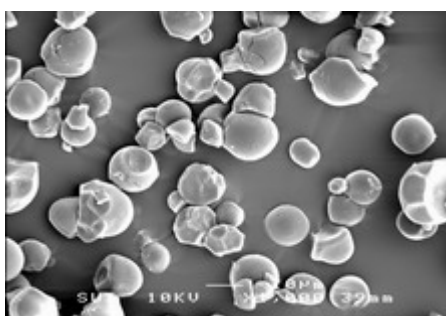
(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 4.3 ลักษณะของเม็ดแป้งแอมโพเทอริกเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์ที่
กำลังขยาย 1,000 เท่า โดย (a) OSA-Cat (b) Cat-OSA (c)
CMS-Cat (d) Cat-CMS (e) PPS-Cat (f) Cat-PPS
ตารางที่ 4.5 กำลังการพองตัวของแป้งแคทไอออนิก แป้งประจุลบ และแป้งแอมโพเทอริกที่อุณหภูมิ
55-85 องศาเซลเซียส

	55	65	75	85
Cat	10.58±0.19 ^a	12.13±0.46 ^{bc}	12.09±0.05 ^d	12.13±0.05 ^d
OSA	2.62±0.03 ^g	15.53±0.23 ^a	16.36±0.06 ^b	16.83±0.09 ^b
OSA-Cat	5.21±0.07 ^e	10.16±0.05 ^{de}	13.45±0.35 ^c	8.48±0.11 ^h
Cat-OSA	6.41±0.38 ^d	9.33±0.15 ^{ef}	28.28±0.29 ^a	25.21±0.10 ^a
CMS	2.39±0.00 ^g	7.18±0.02 ^g	7.46±0.06 ^h	9.42±0.13 ^f
CMS-Cat	7.76±0.45 ^c	11.36±0.57 ^{cd}	11.23±0.06 ^{de}	11.22±0.16 ^e
Cat-CMS	7.40±0.06 ^c	8.68±0.39 ^{efg}	10.74±0.04 ^e	10.99±0.12 ^e
PPS	6.52±0.42 ^d	8.98±0.96 ^{ef}	9.42±0.87 ^f	9.98±0.07 ^g
PPS-Cat	8.79±0.27 ^b	13.20±0.19 ^b	13.21±0.48 ^c	13.21±0.69 ^c
Cat-PPS	3.33±0.33 ^f	8.03±0.15 ^g	9.38±0.47 ^f	9.38±0.01 ^g

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.6.5 สมบัติทางความร้อน (Thermal properties)

การตรวจวัดสมบัติทางความร้อนเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงที่บอกถึงพลังงานที่ต้องให้กับตัวอย่างในการเปลี่ยนสถานะ พลังงานที่ใช้ไปเรียกว่าเอนทัลปี (Enthalpy, ΔH) อุณหภูมิที่ตัวอย่างตารางที่ เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะเรียกว่า onset temperature (T_o) ที่อุณหภูมินี้ตัวอย่างจะเริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลง และมีการให้หรือรับพลังงานเพื่อเปลี่ยนแปลงสถานะ

จากการทดลองพบว่า แป้งแอมโพเทอริกจากกลุ่มประจุลบทั้ง 3 กลุ่มมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันต่ำกว่าแป้งดิบ ดังแสดงในตารางที่ 4.6 เมื่อพิจารณาแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 3 กลุ่มในกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน พบว่าแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มออกเทนิล ซัลซิเนต มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันไม่แตกต่างกันทั้งสองกระบวนการ ส่วนแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลมีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันลดต่ำลงหลังผ่านการตัดแปรรวมโพเทอริกแล้ว โดยที่ CMS-Cat มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันลดต่ำลงมากกว่า Cat-CMS และแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่ของกลุ่มฟอสเฟต พบว่า Cat-PPS มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่ PPS-Cat มีอุณหภูมิการเกิดเจลลิตในเซชันไม่แตกต่างจาก PPS ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ส่วนเอนทัลปีของแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 3 กลุ่มมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้ง Cat, OSA, CMS, และ PPS ทั้งนี้เนื่องด้วยระดับการแทนที่ของแป้งเพิ่มขึ้นทั้งประจุบวกและประจุลบ เนื่องจากกลุ่มแทนที่ในแป้งตัดแปรรทำให้เกลียวคู่ (double helices) คลายเกลียวและพันธะ

ไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแข็งอ่อนแอลง ทำให้แข็งถูกทำลายได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแข็งคิบ ซึ่ง Perera and Hoover (1999) และ Sigh et al. (2007) พบว่าระดับการแทนที่สูงขึ้นในการตัดแปรด้วยการแทนที่ของกลุ่มไฮดรอกซิล โพรพิล (hydroxyl propyl group) และกลุ่มอะซิetyl (acetyl group) ทำให้เอนทัลปีลดลง เมื่อพิจารณากระบวนการผลิต พบว่า กระบวนการผลิตแทนที่ด้วยประจุบวกก่อนประจุลบนั้นมีค่าเอนทัลปีลดลงมากกว่ากระบวนการผลิตประจุลบก่อนประจุบวก เนื่องด้วยการผลิตด้วยกระบวนการดังกล่าวมีระดับการแทนที่สูงกว่า

ดังนั้นกระบวนการนี้ทำให้ใช้พลังงานในการเปลี่ยนแปลงสถานะน้อยกว่ากระบวนการผลิตด้วยการแทนที่ประจุลบก่อนประจุบวก

ตารางที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของแป้งแคทไอออนนิค แป้งประจุลบ และแป้งแอมโฟเทอริก

ชนิดแป้ง	Transition temperature (°C)			
	To	Tp	Tc	ΔH (J/g)
Native	63.3±0.2 ^{bc}	68.2±0.2 ^c	77.4±0.4 ^{ef}	12.9±0.8 ^{bc}
Cat	63.6±0.1 ^b	74.9±0.1 ^a	82.7±2.1 ^{bc}	14.1±0.6 ^a
OSA	62.0±0.1 ^{cd}	67.2±0.4 ^d	76.1±1.3 ^{ef}	12.7±0.4 ^b
OSA-Cat	61.5±0.6 ^d	68.4±0.7 ^c	79.5±1.1 ^d	9.5±0.3 ^d
Cat-OSA	62.3±0.6 ^{cd}	67.4±0.9 ^d	80.5±0.2 ^d	9.9±0.1 ^d
CMS	71.0±0.1 ^a	75.7±0.7 ^a	89.9±0.6 ^a	12.2±0.8 ^{bc}
CMS-Cat	57.6±0.3 ^e	64.5±0.1 ^e	80.0±0.5 ^d	10.0±0.7 ^c
Cat-CMS	62.4±0.5 ^{cd}	69.3±0.1 ^{bc}	83.6±0.2 ^b	9.3±0.9 ^d
PPS	58.2±0.7 ^e	69.5±0.3 ^b	81.0±1.3 ^{cd}	11.7±0.1 ^{bc}
PPS-Cat	57.3±0.2 ^e	66.5±1.3 ^d	78.8±1.1 ^{de}	5.1±0.9 ^f
Cat-PPS	63.4±0.6 ^{bc}	69.6±0.7 ^{bc}	75.3±1.1 ^f	6.9±0.7 ^e

หมายเหตุ ตัวอักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้งแสดงตามความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4.7 สรุปผลการทดลอง

แป้งแอมโฟเทอริกหลังผ่านการตัดแปรด้วยประจุลบทั้ง 3 กลุ่ม ส่งผลให้ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาทั้งประจุบวกและประจุลบลดลง ซึ่งการลดลงของประจุลบ

มากกว่าประจวบทุก โดยการแทนที่ด้วยกลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต มีอัตราการลดลงของระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดเมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดในแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่กลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต และคาร์บอกซิลเมทิลลดลง ขณะที่การแทนที่ด้วยกลุ่มฟอสเฟตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งประจวบแต่ละชนิด นอกจากนี้กระบวนการแทนที่ด้วยประจวบก่อนประจวบมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนค่าความหนืดสูงกว่ากระบวนการแทนที่ด้วยประจวบก่อนประจวบ ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุดของ Cat-OSA มีค่าความหนืดสูงสุด breakdown ด้วยการแทนที่ของกลุ่ม คาร์บอกซิลเมทิลและกลุ่มฟอสเฟตมีต่ำลงทั้ง 2 กระบวนการ ขณะที่การแทนที่ Cat-OSA มีค่าสูงขึ้นและ setback ของแป้งแอมโพททั้ง 3 กลุ่มมีค่าลดลง สำหรับสมบัติทางความร้อนนั้นแป้งแอมโพเทอริกทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเอนทัลปีลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้ง Cat, OSA, CMS, และ PPS ส่วนกำลังการพองตัวของแป้งแอมโพเทอริกของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิล มีค่าไม่แตกต่างกันทั้ง 2 กระบวนการ ขณะที่ Cat-OSA มีกำลังการพองตัวสูงกว่า OSA-Cat แต่ Cat-PPS มีกำลังการพองตัวต่ำกว่า PPS-Cat ส่วนลักษณะของเม็ดแป้งแอมโพเทอริกด้วยการแทนที่กลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลและกลุ่มฟอสเฟต มี ลักษณะคล้ายถูกกัดกร่อนและรอยแตกกว้างที่บริเวณผิว ขณะที่การแทนที่ด้วยกลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต ไม่พบการเปลี่ยนแปลง

แป้งแอมโพเทอริก Cat-OSA เหมาะสมต่อการผลิตโดยมีประสิทธิภาพการผลิตสูงที่สุด นอกจากนี้ยังส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น และอุณหภูมิการเกิดเจลาคีไนต์ต่ำทำให้ง่ายต่อการต้ม และมีอัตราการคืนตัวต่ำ

4.8 รายการอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). **เทคโนโลยีของแป้ง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วนิดา เพ็ญโชค. (2545). การผลิตสตาร์ชมันสำปะหลังออกซิไดซ์-ฟรีเจลาตีไนต์เพื่อเป็นสารเพิ่มสารเกาะติดในแป้งชุบทอด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศิริวัลภา เกษศิริปี (2547). การผลิตและสมบัติของแป้งคาร์บอกซีเมทิลจากแป้งมันสำปะหลัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย เกษตรศาสตร์.

AOAC. (2000). **Official Methods of Analysis** (17th ed.). Washington: Association of Official Analytical Chemists.

- Gonzalez, Z., and Perez, E. (2002). Effect of acetylation on some properties of rice starch. **Starch/Stärke** 54: 148-154.
- Haubard, E. D., Liberty, W., Harty, D. R., and Hogen, L. M. (1986). Starch phosphate and amphoteric starch phosphate. **U.S patent** # 4 5669 10.
- Hendel, V., Donald, J., and Constance, K. K., and Jonh, C. G. (2002). Process for increasing the dry strength of paper. **US patent** # 6 723 204.
- Kaur, L., Singh, N., and Sothi, N. S. (2002). Some properties of potatoes and their starches. II Morphological, thermal, and rheological properties of starches. **Food Chemistry** 79: 183-192.
- Kim, H. R., Hermansson, A. M., and Eriksson, C. E. (1992). Structural characteristics of hydroxypropyl potato starch granule depending on their molar substitution. **Starch/Stärke** 44: 111-116.
- Kirby, W. K. (1992). Non food uses of starch. In J. R. Alexander, and K. Z. Henry (eds.). **Development in carbohydrate chemistry**. (pp. 371-383). USA: The American Association of cereal chemist.
- Lawal, O. S. (2004). Succinyl and acetyl starch derivatives of hybrid maize: Physicochemical characteristics and retrogradation properties monitored by differential scanning calorimetry. **Carbohydrate Research** 339: 2673-2682.
- Lim, W. J., Liang, Y. T., and Seib, P. A. (1992). Cationic oat starch: Preparation and effect on paper strength. **Cereal chemistry** 69(3): 237-239.
- Newport Scientific 1995. **Operation manual for the series 4 Rapid Visco Analyzer**. Australia: Newport Scientific.

- Perera, C., and Hoover, R. (1999). Influence of hydroxypropylation on retrogradation properties of native, defatted and heat-moisture treated potato starches. **Food Chemistry** 64: 361-375.
- Perera, C., Hoover, H., and John, S. (1999). The reactivity of porcine pancreatic alpha-amylase toward native, defatted, and heat moisture treated potato starches before and after hydroxypropylation. **Starch/Stärke** 50(5): 206-213.
- Rutenberg, W. M., and Solarek, D. (1984). Starch derivatives: production and use. In L. R. Whistler, N. J. BeMiller, and F. E. Paschal (eds.). **Starch: chemistry and technology** (2nd ed) (pp. 460-461). New York: Academic Press.
- Sing, J., Kaur, L., and McCarthy, O. J. (2007). Factor influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically for food starch application. **Food hydrocolloids** 21: 1-22.
- Sitothi, M. Z., and Ramandan, M. F. (2001). Granular properties of different starch phosphate monoester. **Starch/Stärke** 53: 27-34.
- The Thai print Association. (2007). [On line]. Available: [http://www. Thaiprint.org. /viewindspending](http://www.Thaiprint.org/viewindspending).
- Whistler, R. L., and BeMiller, J. N. (1997). In Whister, R. L. and BeMiller, J. N (eds). **Carbohydrate chemistry for food scientists**. USA: American association of cereal chemists.
- Wurzburg, O. B.(1987). **Modified starches: properties and uses**. Florida: CRC Press.
- Xing, G. X., Zhang, S. H., Ju. Z., and Yang, J. Z. (2006). Study on adsorption of crooslinked cationic starch maleate for chromium (VI). **Carbohydrate Polymers** 66(2): 246-251.

Xu, S., Wang, J., Wu, J., Wang, J., and Li, H. (2006). Adsorption behavior of acid and basic dyes on crosslinked amphoteric starch. **Chemical Engineering Journal** 117: 161-167.

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรปฏิกริยาของแป้งออกเทนนิล ซัคซินेट ได้แก่ ปริมาณออกเทนนิล ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการทำปฏิกริยาต่อค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยา และค่าความหนืดสูงสุด พบว่าตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยา คือ ระยะเวลาในการทำปฏิกริยา ส่วนตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อค่าความหนืดสูงสุด ได้แก่ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการทำปฏิกริยา โดยพบว่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยามีค่าสูงสุดร้อยละ 75.52 เมื่อปริมาณออกเทนนิล ซัคซินิกแอนไฮไดรด์ร้อยละ 3.0 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 8.0 และระยะเวลา 300 นาที ค่าความหนืดสูงสุดเท่ากับ 318.59 RVU นอกจากนี้พบว่าตัวแปรทั้ง 3 ไม่มีผลต่อลักษณะโครงสร้างของแป้งตัดแปรดังกล่าว แต่เมื่อระดับการแทนที่สูงกว่า 0.0132 มีผลทำให้พื้นผิวของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยาและค่าการละลายในน้ำเย็นของแป้งคาร์บอกซิลเมทิล ได้แก่ ปริมาณน้ำ ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ และปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตต พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์มีอิทธิพลหลักต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยา และค่าการละลายในน้ำเย็น ซึ่งพบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพปฏิกริยาและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เท่ากับ ร้อยละ 6.0 โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำในตัวกลางทำปฏิกริยาเท่ากับ 1.54 โดยน้ำหนัก และปริมาณโซเดียมโมโนคลอโรอะซิเตตร้อยละ 12.5 จากการตัดแปรแป้งดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยาเท่ากับร้อยละ 15.09 และค่าการละลายในน้ำเย็นเท่ากับร้อยละ 18.24

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรปฏิกริยาของแป้งฟอสเฟต โมโนเอสเทอร์ ได้แก่ ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต ความเป็นกรด-ด่าง และระยะเวลาในการเกิดปฏิกริยาต่อประสิทธิภาพปฏิกริยา ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความใส พบว่าความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลามีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพปฏิกริยา ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความใส ซึ่งจากการทดลองพบว่าผลของตัวแปรทั้ง 3 ที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยา ค่าความหนืดสูงสุด และค่าความใส ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.5 ปริมาณโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตร้อยละ 7.5 และระยะเวลาในการเกิดปฏิกริยาเท่ากับ 150 นาที จากการตัดแปรดังกล่าวมีค่าประสิทธิภาพการเกิดปฏิกริยาเท่ากับ ร้อยละ 22.0 และค่าความใสเท่ากับร้อยละ 16.0

แป้งแอมโฟเทอริกหลังผ่านการคัดแปรด้วยประจุบทั้ง 3 กลุ่ม ส่งผลให้ระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาทั้งประจุบวกและประจุลบลดลง ซึ่งการลดลงของประจุบมากกว่าประจุบวก โดยการแทนที่ด้วยกลุ่ม ออกเทนนิล ซัคซิเนต มีอัตราการลดลงของระดับการแทนที่และประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด

เมื่อทำการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของแป้งแอมโฟเทอริกทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนความหนืดในแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่กลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต และคาร์บอกซิลเมทิลลดลง ขณะที่การแทนที่ด้วยกลุ่มฟอสเฟตมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งประจุบแต่ละชนิด นอกจากนี้กระบวนการแทนที่ด้วยประจุบวกก่อนประจุบมีอุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนความหนืดสูงกว่ากระบวนการแทนที่ด้วยประจุลบก่อนประจุบวก ขณะที่ค่าความหนืดสูงสุดของ Cat-OSA มีค่าความหนืดสูงสุด breakdown ด้วยการแทนที่ของกลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลและกลุ่มฟอสเฟตมีค่าต่ำลงทั้ง 2 กระบวนการ ขณะที่การแทนที่ Cat-OSA มีค่าสูงขึ้นและ setback ของแป้งแอมโฟทั้ง 3 กลุ่มมีค่าลดลง และสมบัติทางความร้อนของแป้งแอมโฟเทอริกทั้ง 3 กลุ่มมีค่าเอนทัลปีลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้ง Cat, OSA, CMS และ PPS ส่วนกำลังการพองตัวของแป้งแอมโฟเทอริกของกลุ่มคาร์บอกซิล มีค่าไม่แตกต่างกันทั้ง 2 กระบวนการ ขณะที่ Cat-OSA มีกำลังการพองตัวสูงกว่า OSA-Cat ขณะที่ Cat-PPS มีกำลังการพองตัวต่ำกว่า PPS-Cat ส่วนลักษณะของเม็ดแป้งแอมโฟเทอริกด้วยการแทนที่กลุ่มคาร์บอกซิลเมทิลและกลุ่มฟอสเฟต มีลักษณะคล้ายถูกกัดกร่อนและรอยแตกร้าวที่บริเวณผิวของเม็ดแป้ง ขณะที่การแทนที่ด้วยกลุ่มออกเทนนิล ซัคซิเนต ไม่พบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว

แป้งแอมโฟเทอริก Cat-OSA เหมาะสมต่อการผลิตโดยมีประสิทธิภาพการผลิตสูงที่สุด นอกจากนี้ความหนืดสูง ง่ายต่อการต้ม และมีอัตราการคืนตัวต่ำ

ประวัติผู้เขียน

นางนพภรณ์ โพธิ์อ่อนตา เกิดเมื่อวันที่ 14 มิถุนายน พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดบุรีรัมย์ ศึกษาในระดับประถมที่โรงเรียนบ้านหนองโดน จบการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายที่โรงเรียนลำปลายมาศ ในปี พ.ศ. 2535 และเข้ารับการศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2539 ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานกับ บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด จากการทำงานด้านประกันคุณภาพและการวิจัยเกี่ยวกับอุตสาหกรรมแป้งมามากกว่า 9 ปี จึงทำให้เกิดแรงจูงใจพร้อมทั้งการสนับสนุนจาก คุณ ธิดารัตน์ รอดอนันต์ ที่จะศึกษาต่อระดับปริญญาโทด้านแป้ง โดยได้เข้าศึกษาต่อในสาขาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2546

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพและพัฒนาผลิตภัณฑ์ บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด