



# วิทยานิพนธ์

การผลิตและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ช  
อีเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

**PREPARATION AND PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES  
OF QUATERNARY AMMONIUM STARCH ETHER FROM  
CASSAVA STARCH BY WET AND DRY PROCESSES**

นางสาววนิดา วงษ์กุหลาบ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2551



## ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)

### ปริญญา

เทคโนโลยีชีวภาพ	เทคโนโลยีชีวภาพ
สาขา	ภาควิชา

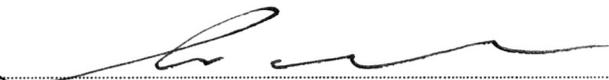
เรื่อง การผลิตและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอร์นารีแอม โมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้ง  
มันสำปะหลัง โดยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

Preparation and Physico-Chemical Properties of Quaternary Ammonium Starch Ether  
From Cassava Starch by Wet and Dry Processes

นามผู้วิจัย นางสาวนิตา วงษ์กุหลาบ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

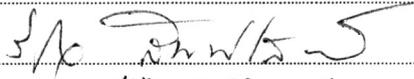
ประธานกรรมการ

(  )  
รองศาสตราจารย์กล้าณรงค์ ศรีรอด, Dr.Ing.

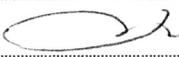
กรรมการ

(  )  
อาจารย์กุลฤดี แสงสีทอง, Ph.D.

กรรมการ

(  )  
รองศาสตราจารย์วิไล สันติโสภาศรี, Ph.D.

หัวหน้าภาควิชา

(  )  
รองศาสตราจารย์สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ, Ph.D.

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(  )  
รองศาสตราจารย์วินัย ออคงหาญ, M.A.

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 3 เดือน เมษายน พ.ศ. 2551

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้งมันสำปะหลัง  
โดยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

Preparation and Physico-Chemical Properties of Quaternary Ammonium Starch Ether From  
Cassava Starch by Wet and Dry Processes

โดย

นางสาวนิตา วงษ์กุหลาบ

เสนอ

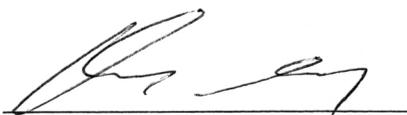
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพ)  
พ.ศ. 2551



Vanida Wongkulab 2008: Preparation and Physico-Chemical Properties of Quaternary Ammonium Starch Ether From Cassava Starch by Wet and Dry Processes. Master of Science (Biotechnology), Major Field: Biotechnology, Department of Biotechnology. Thesis Advisor: Associate Professor Klanarong Sriroth, Dr.Ing. 98 pages.

Quaternary ammonium starch ether is a chemically modified starch carrying cationic group. This cationic starch is prepared by the etherification of starch with 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride (CHPTAC) under alkaline condition. In this study, the effects of modification conditions and the physico-chemical properties of quaternary ammonium starch ether prepared from cassava starch by wet and dry processes were investigated. The modification conditions under study included the molar ratio of CHPTAC to anhydroglucose unit ( $n(\text{CHPTAC}) : n(\text{AGU}) = 0.02-0.12$ ), the molar ratio of sodium hydroxide to CHPTAC ( $n(\text{NaOH}) : n(\text{CHPTAC}) = 0.5-3.0$ ) and the reaction time (1-22 hours). Results revealed that the optimal amounts of sodium hydroxide during cationization of cassava starch by wet process were similar to those of dry process which were found to be at  $n(\text{NaOH}) : n(\text{CHPTAC})$  of 2.0, 1.5, 1.5 and 1.5 for the reactions containing  $n(\text{CHPTAC}) : n(\text{AGU})$  of 0.02, 0.04, 0.08 and 0.12 respectively. However, the rate of reaction in the dry process was much higher than that of the wet process. While cationization under wet conditions required reaction time of 22 hours, the optimal reaction time for dry process was only 4 hours. Quaternary ammonium starch ether with degree of substitution (DS) of 0.01, 0.03, 0.05 and 0.07 were prepared under optimal conditions by wet and dry processes and their physico-chemical properties were determined. The properties of quaternary ammonium starch ether were found to depend on the derivatization methods and degree of substitution. The granular structure of quaternary ammonium starch ether prepared by wet process was similar to that of native starch, but quaternary ammonium starch ether prepared by dry process showed some granular damage. Cold water solubility, swelling power and solubility, peak viscosity and paste clarity of quaternary ammonium starch ether were higher than those of native starch and increased with increasing DS. On the other hand, the gelatinization temperature, enthalpy of gelatinization and degree of retrogradation of quaternary ammonium starch ether were lower than those of native starch and decreased with increasing DS. Quaternary ammonium starch ether prepared from different methods showed variation in their properties.

Vanida Wongkulab  
Student's signature

  
Thesis Advisor's signature

21 / 03 / 51

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. กล้าณรงค์ ศรีรอด ประธานกรรมการที่ปรึกษา ดร. กุลฤดี แสงสีทอง กรรมการวิชาเอก และรองศาสตราจารย์ ดร. วิไล สันติโสภาศรี กรรมการวิชาการ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำปรึกษาในการดำเนินการวิจัย ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง และขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ปริศนา สุวรรณาภรณ์ อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่ช่วยแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่มอบทุนอุดหนุนการค้นคว้าและสนับสนุนงานวิจัย และขอขอบคุณหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้งสถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย รวมทั้งขอขอบคุณบริษัทเจเจเดกซ์ซ่า เคมีคอล (ที) จำกัด ที่เอื้อเพื่อสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และพี่ๆ เพื่อนๆ หน่วยแป้งทุกท่านที่ช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน ให้คำแนะนำ คำปรึกษา และความอนุเคราะห์ในด้านต่างๆ จนงานสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ชายของข้าพเจ้า ที่ได้ให้การสนับสนุนและส่งเสริมด้านการศึกษาของข้าพเจ้าด้วยดีตลอดมา

วนิดา วงษ์กุลหาบ

มีนาคม 2551

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	29
ผลและวิจารณ์	38
สรุปและข้อเสนอแนะ	72
สรุป	72
ข้อเสนอแนะ	76
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	77
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์	82
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ผลทางสถิติ	91
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	98

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งในสภาวะที่มีอัตราส่วนโมล NaOH ต่อ CHPTAC และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU ในระดับต่างๆ	48
2	สภาวะที่ใช้ในการเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 ที่อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU ในระดับต่างๆ ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์	50
3	ร้อยละการละลายน้ำเย็น ( Cold Water Solubility) ของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07	55
4	ค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07	57
5	ค่ากำลังการพองตัวที่อุณหภูมิต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07	57
6	ค่าร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07	58
7	ค่าร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆ ของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07	58

### สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
8	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราวเนนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ	60
9	อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาคีโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	66
10	อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 หลังการเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	68
11	ค่าร้อยละการส่องผ่านแสง (%Transmittance) ของสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07	71
ตารางผนวกที่		
ข1	ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก โดยใช้อัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU ที่ระดับต่างกัน	92
ข2	ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก โดยใช้อัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU ที่ระดับต่างกัน	94

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข3	ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอม โมนียมสตาร์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง โดยใช้อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU ที่ระดับต่างกัน	95
ข4	ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอม โมนียมสตาร์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง โดยใช้อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU ที่ระดับต่างกัน	97

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของอะมิโลสซึ่งเกิดจากน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแอลฟา 1-4	5
2	โครงสร้างของอะมิโลเพกติน	5
3	ลักษณะกราฟความหนืดและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA	7
4	จุดที่สำคัญในการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ	9
5	ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส	10
6	แสดงการพองตัวของโครงสร้างร่างแหภายในแกรนูลแป้ง	11
7	แสดงตำแหน่งของคาร์บอนบนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส	17
8	ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ DEC ได้ผลิตภัณฑ์เทอร์เทียรีอะมิโนเอคิลสตาร์ชอีเทอร์	20
9	ปฏิกิริยาการผลิตไฮดรอกซีโพรพิล ไตรเมทิลแอมโมเนียมสตาร์ช	21
10	การเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบเปียก	31
11	การเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบแห้ง	32
12	ปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นของกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ โดยใช้สาร 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride (CHPTAC) ในสถานะที่เป็นต่าง	39
13	ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ในสถานะที่มีอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02 (a), 0.04 (b), 0.08 (c), 0.12 (d) และอัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างๆ	40
14	ค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ในสถานะที่มีอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 โดยใช้อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างกัน (ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 22 ชั่วโมง)	43

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ในสภาวะที่มีอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02 (a), 0.04 (b), 0.08 (c), 0.12 (d) และอัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างๆ	45
16	ค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ในสภาวะที่มีอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 โดยใช้อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างกัน (ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง)	47
17	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ (a, b) และควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 (c, d), 0.03 (e, f), 0.05 (g, h) และ 0.07 (i, j) เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา (ด้านซ้าย) และแสงโพลาไรซ์ (ด้านขวา) ที่กำลังขยาย 160 เท่า	52
18	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ (a, b) และควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 (c, d), 0.03 (e, f), 0.05 (g, h) และ 0.07 (i, j) เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา (ด้านซ้าย) และแสงโพลาไรซ์ (ด้านขวา) ที่กำลังขยาย 160 เท่า	53
19	ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ที่ความเข้มข้นแป้ง 6% (w/w)	61
20	ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ที่ความเข้มข้นแป้ง 6% (w/w)	62

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (รูป a) และวิธีแบบแห้ง (รูป b) ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	65
22	ลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (รูป a) และวิธีแบบแห้ง (รูป b) ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 หลังการเก็บรักษาที่ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	67

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

AGU	=	anhydroglucose unit
BU	=	Brabender unit
CHPTAC	=	3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride
DEC	=	2-diethyl-aminoethyl chloride
DSC	=	Differential Scanning Calorimeter
DS	=	Degree of substitution
NaOH	=	sodium hydroxide
RE	=	reaction efficiency
RVA	=	Rapid Visco Analyzer
To	=	onset temperature
Tp	=	peak temperature
Tc	=	conclusion temperature
$\Delta H_g$	=	enthalpy of gelatinization
$\Delta H_r$	=	enthalpy of retrogradation

การผลิตและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้ง  
มันสำปะหลังโดยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

Preparation and Physico-Chemical Properties of Quaternary Ammonium Starch  
Ether From Cassava Starch by Wet and Dry Processes

คำนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย ปัจจุบันมีพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังในประเทศไทยประมาณ 6.69 ล้านไร่ และมีกำลังการผลิตประมาณ 22.58 ล้านตันหัวมันต่อปี (ศูนย์สารสนเทศการเกษตร, 2549) เนื่องจากหัวของมันสำปะหลังมีแป้งในปริมาณมาก แต่มีสารอื่นๆ เช่น โปรตีน ไขมัน ในปริมาณต่ำ จึงเป็นแหล่งแป้งบริสุทธิ์ชั้นเลิศที่สามารถสกัดออกมาได้ง่ายและมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ได้อย่างหลากหลาย ในปัจจุบันนี้แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตได้มีได้ใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์โดยตรงแต่เพียงอย่างเดียว แต่ยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตของอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย เช่น อุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมกระดาษ และอุตสาหกรรมสิ่งทอ แต่การใช้ประโยชน์จากแป้งธรรมชาติยังมีข้อจำกัด เนื่องจากคุณสมบัติบางประการของแป้งที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการนำแป้งไปผ่านกระบวนการคัดแปรเพื่อปรับปรุงสมบัติของแป้งให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน และเป็นการเพิ่มคุณค่าและมูลค่าของผลิตภัณฑ์ให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มรายได้ให้แก่ประเทศอีกทางหนึ่งด้วย

แป้งแคทไอออนิกเป็นแป้งคัดแปรชนิดหนึ่งที่อาศัยวิธีการคัดแปรทางเคมีที่ได้จากปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ amino, imino, sulfonium, phosphonium หรือ ammonium เป็นต้น ในปัจจุบันแป้งแคทไอออนิกที่นิยมผลิตส่วนใหญ่เป็นชนิดควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสาร 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride (CHPTAC) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งคัดแปรที่มีประจุบวกอยู่ในโมเลกุลของแป้ง ด้วยคุณสมบัติเด่นข้อนี้จึงนิยมนำแป้งแคทไอออนิกไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษเป็นส่วนใหญ่ เพราะสามารถเกิดพันธะไอออนิกระหว่างประจุบวกของแป้งกับประจุลบของเซลลูโลสที่ใช้ทำกระดาษได้ดี ทำให้กระดาษที่ได้มีความแข็งแรงและมีคุณภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ อีก เช่น ใช้ในการเคลือบผ้าสำหรับการผลิตสิ่งทอ, ใช้เป็นสารตกตะกอนสารอินทรีย์ที่มีประจุลบ เป็นต้น (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546) โดย

ส่วนใหญ่แปรงแคทไอออนิกในระดับอุตสาหกรรมผลิตด้วยวิธีการแบบเปียก ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาในสภาพแขวนลอยภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ทำให้สารเคมีสามารถแทรกซึมเข้าไปในเม็ดแปรงได้ การทำปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลแปรงกับสารเคมีจึงเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอ และง่ายต่อการควบคุม (Jin *et al.*, 2001) แต่เนื่องจากสภาวะที่ใช้ในการผลิตมีค่าความเป็นกรดด่างและอุณหภูมิสูง ส่งผลทำให้เม็ดแปรงเกิดเจลาตินในเซชันได้ จึงต้องมีการเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต (sodium sulphate) หรือโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) ลงในส่วนผสมเพื่อป้องกันการเกิดเจลาตินในเซชันของเม็ดแปรง ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้น้ำจำนวนมากในการล้างเกลือและสารเคมีที่เหลืออยู่ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต ต่อมาได้มีการพัฒนาการผลิตแปรงแคทไอออนิกโดยใช้แอลกอฮอล์ในการป้องกันการพองตัวของเม็ดแปรงแทนการใช้เกลือ เพื่อลดขั้นตอนการล้างเกลือออก พบว่าแปรงแคทไอออนิกที่ได้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเช่นเดียวกัน (Kweon *et al.*, 1997; Han and Sosulski, 1998) นอกจากการผลิตแปรงแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบเปียกแล้ว ยังมีการพัฒนาการผลิตแปรงแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบแห้ง โดยการผสมเม็ดแปรงแห้งกับของผสมระหว่างสารเคมีกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกต่างภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ข้อดีของการเตรียมแปรงแคทไอออนิกด้วยวิธีนี้คือ ประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาสูง ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสั้นและไม่มีการขึ้นตอนการล้างจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต (Hellwig *et al.*, 1992; Khalil and Dokki, 1998) แต่การที่ไม่มีขั้นตอนการล้างจึงทำให้มีสารปนเปื้อนตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์แปรงได้ นอกจากนี้ลักษณะการเข้าทำปฏิกิริยาของสารเคมีภายใต้วิธีการผลิตที่ต่างกันก็มีความแตกต่างกันด้วย โดยหมู่ฟังก์ชันในแปรงแคทไอออนิกที่ผลิตด้วยวิธีการแบบเปียกจะมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอแต่หมู่ฟังก์ชันของแปรงแคทไอออนิกที่ผลิตด้วยวิธีการแบบแห้งจะเกิดขึ้นที่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแปรงเป็นส่วนใหญ่ (Manelius *et al.*, 2000) ซึ่งอาจส่งผลให้แปรงแคทไอออนิกที่ผลิตได้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน (Radosta *et al.*, 2004)

ในงานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการผลิตควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตและหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต ตลอดจนศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตขึ้นด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงผลิตภัณฑ์แปรงคัดแปรงให้มีสมบัติตามที่ต้องการและเหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

## วัตถุประสงค์

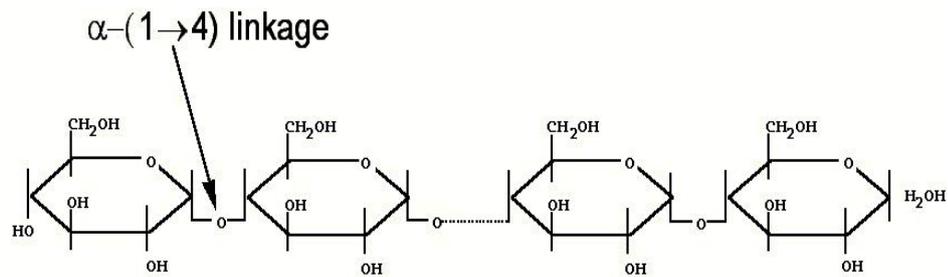
1. เพื่อศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตที่แตกต่างกัน
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

## การตรวจเอกสาร

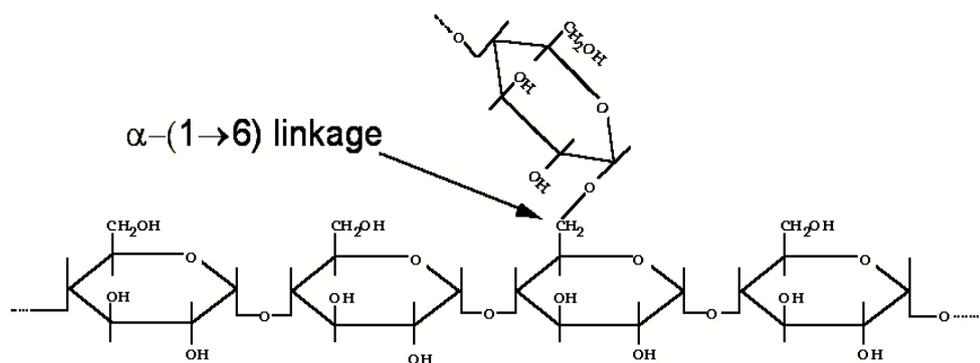
### 1. แป้ง

แป้งเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตพวกพอลิแซ็กคาไรด์ ที่เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส (AGU) ซึ่งเกิดจากการเรียงต่อกันของน้ำตาลกลูโคสโดยสูญเสีย น้ำ 1 โมเลกุลต่อ 1 พันธะไกลโคซิดิกที่เกิดระหว่างน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล (น้ำตาลกลูโคสที่สูญเสีย น้ำจะเรียกว่าน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส) โดยทั่วไปองค์ประกอบของแป้งมีอยู่ 2 ส่วนคืออะมิโลสและอะมิโลเพกทิน อะมิโลสมีลักษณะเป็นสายตรงของน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1-4 ไกลโคซิดิกเพียงอย่างเดียว (ภาพที่ 1) ประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200-2000 หน่วย อะมิโลสมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  อะมิโลเพกทินมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ส่วนที่เป็นเส้นตรงประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคส 25-30 หน่วยเรียงต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1-4 ไกลโคซิดิก ส่วนจุดแยกเป็นกิ่งก้านจะต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1-6 ไกลโคซิดิก (ภาพที่ 2) อะมิโลเพกทินโมเลกุลหนึ่งจะประกอบด้วยน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200,000 หน่วยขึ้นไปจึงมีขนาดใหญ่กว่าอะมิโลสมาก อะมิโลเพกทินจะมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $10^7$  ถึง  $10^9$  ขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งแต่ส่วนใหญ่จะมากกว่า  $10^8$  ปฏิกิริยาที่สำคัญจะเกิดขึ้นที่หมู่ไฮดรอกซิลอิสระที่คาร์บอนตำแหน่ง 2, 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคสตลอดสายโมเลกุล

แป้งพบได้ในส่วนต่างๆของพืช เช่น ผล เมล็ด ราก ลำต้น ใบ เป็นต้น โดยเป็นอาหารสะสมของพืช แป้งส่วนใหญ่นั้นเป็นแหล่งสะสมคาร์โบไฮเดรตถาวรจะสร้างในออร์แกเนลล์ที่เรียกว่าอะมิโลพลาสต์ (amyloplast) โมเลกุลแป้งจะรวมกันอยู่เป็นเม็ดแป้งซึ่งมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช ปริมาณสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินที่ประกอบอยู่ในแป้งของพืชแต่ละชนิดก็แตกต่างกันด้วย เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวโพด ข้าวเหนียว มีอัตราส่วนอะมิโลสต่ออะมิโลเพกทิน เท่ากับ 17/83, 17/83, 24/76 และ 1/99 ตามลำดับ (Knight, 1969)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของอะมิโลสซึ่งเกิดจากน้ำตาลแอนไฮโดรกลูโคสเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแอลฟา-1-4



ภาพที่ 2 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน (ลูกศรแสดงจุดเกิดกิ่งก้านซึ่งต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1-6)

## 2. สมบัติที่สำคัญของแป้ง

### 2.1 การเกิดเจลลาทีโนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) จำนวนมาก ชีดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) จึงทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆเม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลาทีโนเซชัน (gelatinization) อุณหภูมิที่สารละลายเริ่มเกิดความหนืดเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเจลลาทีโนเซชัน เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัด

ความหนืด มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเจลาทิไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มเจลาทิไนซ์ของแป้งธัญพืช (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)

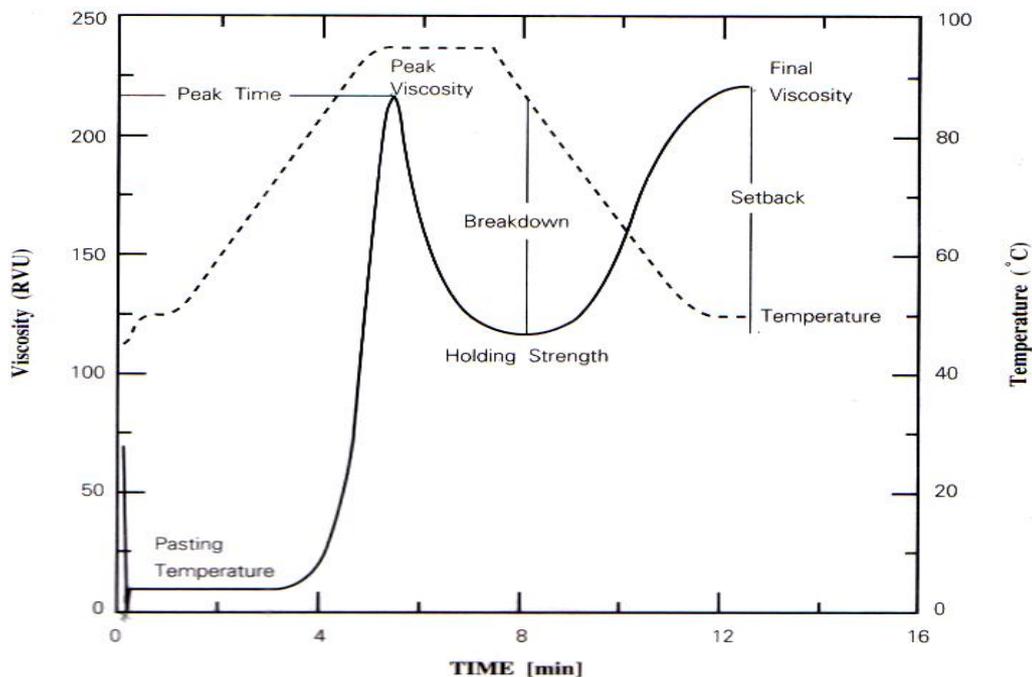
## 2.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของแป้งสูงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง วิธีการทำให้แป้งสุก และความเข้มข้นของแป้ง โดยแป้งมันฝรั่งมีความหนืดสูงกว่าแป้งอื่นๆที่สภาวะเดียวกัน เนื่องจากอิทธิพลของหมู่ฟอสเฟตในแป้งมันฝรั่ง และถ้ามีปริมาณฟอสเฟตสูงขึ้นไปจะทำให้ความหนืดสูงขึ้นเช่นเดียวกัน แป้งจากรากและ waxy starch มีความหนืดสูงกว่าแป้งจากธัญพืช นอกจากนั้นแรงเฉือนทางกลมีผลในการลดความหนืดของแป้งสุก เช่น การกวน และการผสม ซึ่งจะไปเลื่อนเม็ดแป้งที่บวม แป้งจากพืชหัว ราก และ waxy starches บวมน้ำได้เร็วและมาก ขณะเดียวกันก็ง่ายต่อการแตกกระหว่างการกวน แต่แป้งจากธัญพืชบวมน้ำช้าและน้อยและต้านทานต่อการลดความหนืดโดยแรงเฉือนระหว่างการกวน (วชิราพรณ, 2543)

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญและเป็นประโยชน์มากที่สุดของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของแป้ง การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเป็นสมบัติเฉพาะตัวและแตกต่างกันไปตามชนิดและสายพันธุ์แป้ง การตรวจวัดค่าจึงมีความสำคัญต่อการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในอุตสาหกรรมอาหาร ใช้ในขั้นตอน sizing และ coating ในอุตสาหกรรมกระดาษ เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมีเครื่องมือหลายชนิดที่ใช้ในการวัดความหนืด ซึ่งมีทั้งแบบปรับอุณหภูมิไม่ได้ เช่นเครื่อง Brookfield viscometer, Capillary viscometer และ Rheometer ซึ่งจะวัดค่าที่อุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น ส่วนเครื่องมือแบบปรับและควบคุมอุณหภูมิได้ เช่น Rapid Visco Analyzer (RVA) และบราเบนเดอร์ วิสโคอะไม โลกกราฟ แบบปรับและควบคุมอุณหภูมิได้นี้ มีความสำคัญในการศึกษาลักษณะของกราฟความหนืดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิให้กับน้ำแป้ง ทำให้ทราบอุณหภูมิที่เกิดเจลาทิไนเซชัน ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายเมื่อสารละลายแป้งเกิดรีโทรเกรเดชันได้ เครื่องมือทั้งสองมีรายละเอียดดังนี้

### 2.2.1 การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA)

ลักษณะพิเศษของเครื่องนี้ คือมีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ ทั้งการทำให้ร้อนและทำให้เย็นได้อย่างแม่นยำแน่นอน ควบคู่ไปกับความสามารถในการรักษาอุณหภูมิให้คงที่ การทำงานของเครื่องสามารถควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ทำให้ง่ายต่อการใช้งานและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการตรวจวัด ในการวิเคราะห์นั้นเมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนจะดูดซึมน้ำและพองตัวขยายใหญ่ขึ้น ขณะเดียวกันน้ำที่เหลืออยู่รอบๆเหลือน้อยลงทำให้เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยาก และในสภาวะที่มีการกวนภายใต้แรงเฉือน (shear force) ค่าหนึ่ง แป้งจะถูกเปลี่ยนเป็นเจล ซึ่งเป็นการเกิดเจลตาในเซชันของแป้งมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ซึ่งเป็นจุดที่เม็ดแป้งมีการพองตัวเต็มที่ การเพิ่มอุณหภูมิและการกวนต่อไปอีกจะมีผลทำให้โครงสร้างภายในแตกออกทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อลดอุณหภูมิลงจะเกิดรีโทรเกรเดชัน จึงมีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งเป็นความหนืดที่เกิดจากการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะมิโลสที่หลุดออกมาจากเม็ดแป้ง ลักษณะของกราฟความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง RVA ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ลักษณะกราฟความหนืดและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

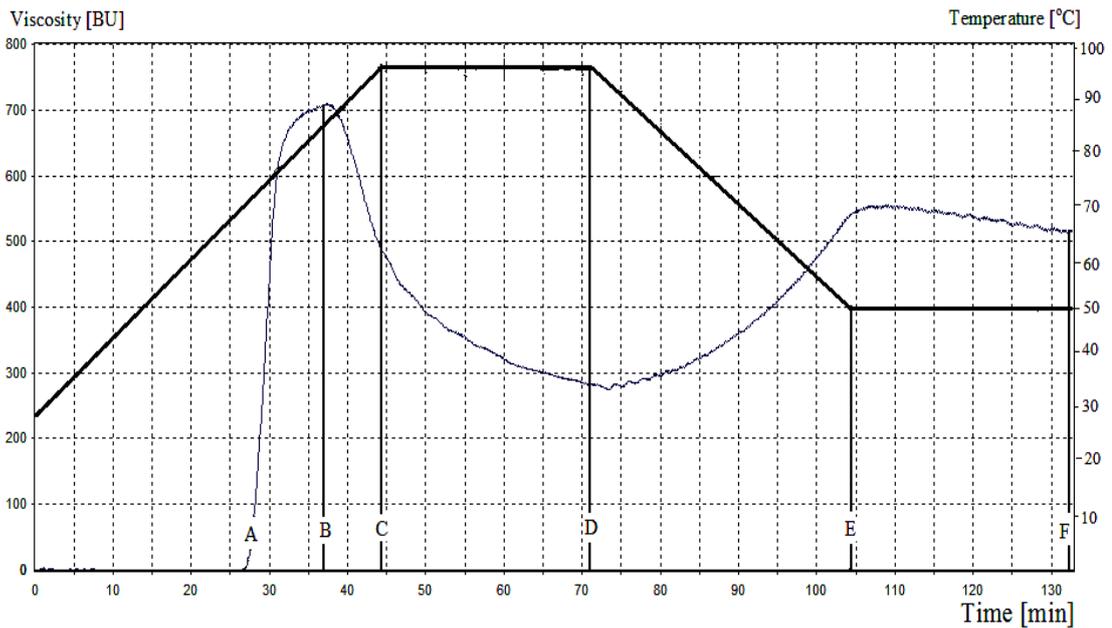
ที่มา: Newport Scientific (1995)

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เครื่อง RVA แสดงผล มีดังนี้

- (1) Peak time = เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด หน่วยเป็นนาที
- (2) Pasting temperature = อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืดหรืออุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ในเวลา 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- (3) Peak temperature = อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด หน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- (4) Holding strength = ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำให้เย็น หน่วยเป็น RVU
- (5) Breakdown = ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด หน่วยเป็น RVU
- (6) Final viscosity = ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง หน่วยเป็น RVU
- (7) Setback from peak = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด หน่วยเป็น RVU
- (8) Setback from trough = ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด หน่วยเป็น RVU

### 2.2.2 การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่องวัดความหนืดบราเบนเดอร์วิสโคอะไมโลกราฟ

เครื่องวัดความหนืดบราเบนเดอร์วิสโคอะไมโลกราฟ สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งในระหว่างการทำให้ร้อน จนถึงการทำให้อุ่นลงและแสดงผลออกมาในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป รูปแบบของกราฟที่ได้จะแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง หน่วยของความหนืดที่ได้คือ หน่วยบราเบนเดอร์ (Brabender unit, BU) สามารถเปลี่ยนเป็นเซนติพอยส์ (centipoises) ได้โดยเทียบความหนืดของสารละลายแป้งสุก 5% ความหนืด 500 BU เท่ากับ 2,700 เซนติพอยส์ ความหนืดค่าต่างๆ จะแสดงให้เห็นถึงลักษณะที่สำคัญของแป้งแต่ละชนิด ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 จุดที่สำคัญในการวิเคราะห์โดยใช้เครื่องบราเวนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ

จุด A แสดงความหนืดเริ่มเกิดเจลทีไนซ์

จุด B แสดงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เป็นความหนืดสูงสุดในช่วงการให้ความร้อน เป็นจุดที่เม็ดแป้งพองตัวเต็มที่

จุด C แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งให้เห็นถึงความยากง่ายในการหุงต้ม

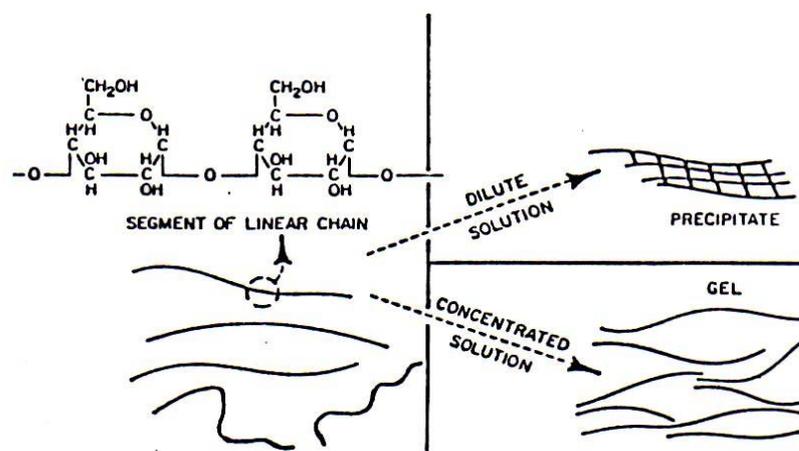
จุด D แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งให้เห็นถึงความคงตัวของเม็ดแป้ง

จุด E แสดงความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งให้เห็นถึงการเกิดรีโทรเกรเดชัน เนื่องจากการทำให้เย็น

จุด F แสดงความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งให้เห็นถึงความคงตัวของน้ำแป้งสุกที่ผ่านการหุงต้ม และทิ้งไว้ให้เย็นแล้ว

### 2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation)

ปรากฏการณ์รีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือเซตแบ็ค (set back) เกิดขึ้นหลังจากแป้งเกิดเจลลาที่ในเซชันแล้วอุณหภูมิลดต่ำลง โมเลกุลอะมิโลสและสายโซ่ด้านนอกที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลเพกทินจะเกิดการจัดเรียงตัวกัน โดยโมเลกุลอะมิโลสซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรง สามารถที่จะหมุนตัวเองให้ไปเรียงตัวในแนวขนานกับโมเลกุลอะมิโลสด้วยกันเอง หรือกับส่วนที่เป็นเส้นตรงในโมเลกุลอะมิโลเพกทินจนเข้าใกล้กันมากพอที่จะทำให้เกิดการยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โมเลกุลอะมิโลสเป็นส่วนที่สำคัญที่ทำให้เกิดรีโทรเกรเดชัน ในกรณีของแป้งที่ประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสสูง ถ้าความเข้มข้นของแป้งต่ำจะเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลอะมิโลสได้มาก จึงมีการรวมตัวกันขึ้นจนอาจเกิดการตกตะกอนได้ แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูงอาจเกิดการเรียงตัวในบางส่วนของโมเลกุลอะมิโลส เนื่องจากการกีดขวางทางโครงสร้าง (steric hindrance) ทำให้ได้เจลซึ่งมีลักษณะเป็นร่างแหสามมิติขึ้นมา โดยมีพันธะไฮโดรเจนอยู่เฉพาะตรงส่วนที่โมเลกุลเข้าใกล้กัน (ภาพที่ 5) ส่วนอะมิโลเพกทินมีโมเลกุลขนาดใหญ่และมีลักษณะเป็นกิ่งก้าน ทำให้มีความสามารถในการเคลื่อนที่น้อย โมเลกุลจะเข้าใกล้กันเพื่อเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ยาก



ภาพที่ 5 ลักษณะการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส

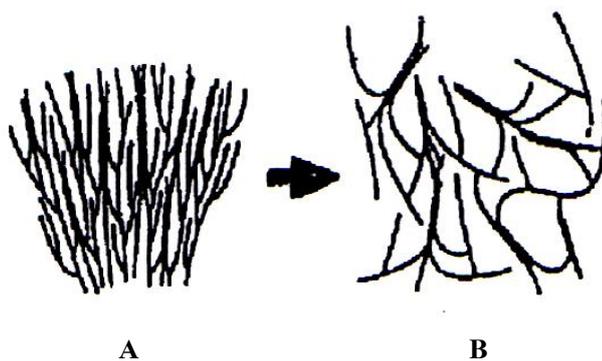
ที่มา: Wurzburg (1987)

ที่อุณหภูมิต่ำจะเร่งการเกิดรีโทรเกรเดชัน มีผลให้แป้งซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ชอบน้ำ ดึงดูดกับโมเลกุลของน้ำได้น้อยลง ทำให้แป้งสุกเกิดความข้น เกิดลักษณะการเป็นก้อนๆ และ

ซินเนอริซิส (syneresis) ซึ่งเป็นลักษณะของการเกิดของเหลวแยกตัวออกมาจากแป้งสุก อาจเรียก  
ลักษณะนี้ว่า วีปิง (weeping) แป้งที่มีอะมิโลเพกทินสูงมีแนวโน้มเพียงเล็กน้อยที่จะเกิดเจลหรือ  
ริโทรเกรเดชันเมื่อเก็บไว้ในสภาวะปกติที่อุณหภูมิห้อง แต่ถ้าเก็บไว้ในสภาพที่มีอุณหภูมิต่ำก็จะทำ  
ให้เกิดความชุ่มและซินเนอริซิสได้เช่นเดียวกับแป้งที่มีอะมิโลส ทั้งนี้เป็นเพราะว่าที่อุณหภูมิต่ำจะมี  
การเคลื่อนที่ทางจลศาสตร์ (kinetic movement) เป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้กึ่งก้านด้านนอกที่มีลักษณะ  
เป็นเส้นตรงของอะมิโลเพกทิน เกิดพันธะไฮโดรเจนยึดเกาะระหว่างโมเลกุลได้ (Langan, 1987)

#### 2.4 กำลังการพองตัวและสมบัติการละลาย (Swelling Power and Solubility)

ภายในเม็ดแป้งประกอบด้วยโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงของอะมิโลสและ  
กิ่งสาขาของอะมิโลเพกทิน ซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบรัศมี (radial fashion) ดังภาพที่ 6A อย่างไรก็ตาม  
ส่วนที่เป็นเส้นสายของโมเลกุลที่เป็นเส้นตรงหรือกิ่งสาขาที่เกิดอยู่ขนานกัน สามารถเกิดพันธะ  
ไฮโดรเจนต่อกัน เกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นระเบียบที่เรียกว่า crystalline region สำหรับในส่วนที่ไม่  
เป็นผลึกหรือบริเวณพื้นที่ช่องว่างระหว่างผลึกที่เต็มไปด้วยสายและกิ่งสาขาที่มีลักษณะไม่เป็น  
ระเบียบ และรวมตัวกันอย่างหลวมๆ จะเรียกส่วนนี้ว่าบริเวณ amorphous region เมื่อแกรนูลแป้ง  
ได้รับความร้อน พันธะไฮโดรเจนจะอ่อนตัวลง บริเวณ amorphous จะมีโมเลกุลของน้ำมาเกาะ  
(hydration) มากขึ้นและเริ่มมีการพองตัวเกิดขึ้น ในที่สุดลักษณะร่างแหจะเริ่มขยายออก ดังภาพที่  
6B พันธะไฮโดรเจนในบริเวณผลึกจะเริ่มถูกทำลาย ทำให้โครงสร้างร่างแหมีลักษณะที่ช่วยให้  
แกรนูลแป้งพองตัวแล้ว มีความหนืดสูงขึ้น แล้วอยู่ในลักษณะขั้นเป็นแป้งเปียก (Leach *et al.*, 1959)



ภาพที่ 6 แสดงการพองตัวของโครงสร้างร่างแหภายในแกรนูลแป้ง

A คือลักษณะร่างแหปกติภายในแกรนูลแป้ง

B คือลักษณะร่างแหที่พองตัวภายในแกรนูลแป้ง

ที่มา: Leach *et al.* (1959)

เมื่อให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแข็ง เม็ดแข็งจะเกิดการพองตัว และบางส่วนของแข็งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของแข็งจะแสดงเป็นปริมาตรหรือน้ำหนักของเม็ดแข็งที่เพิ่มขึ้นมากที่สุด เมื่อเม็ดแข็งพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแข็ง ความแข็งแรงและลักษณะร่างแหภายในเม็ดแข็ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแข็งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแข็ง และการตัดแปรทางเคมี (กล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546; Leach *et al.*, 1959)

2.5 สมบัติการเปลี่ยนแปลงพลังงานของแกรนูลแข็งจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter, DSC

การเกิดเจลาทีไนเซชันเป็นการพองตัวและดูดซับน้ำเข้าไปในแกรนูลแข็งและอาจกล่าวได้ว่าเป็นการหลอมละลาย (melting) ในส่วนที่เป็นโครงสร้างผลึก (crystalline) ของแกรนูลแข็ง ซึ่งเป็นไปตามการตรวจวิเคราะห์ทางเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic analysis) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเกิดเจลาทีไนเซชันของแข็ง สามารถที่จะศึกษาได้ด้วยเครื่อง Differential Thermal Analyzer (DTA) และ Differential Scanning Calorimeter (DSC) (Zobel, 1984)

เครื่อง DSC ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยอาศัยหลักการที่ว่า ทั้งตัวอย่างและสารอ้างอิงจะต้องคงอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันในกระบวนการให้ความร้อนหรือทำให้เย็นลงที่อัตราที่กำหนดไว้ ดังนั้นปริมาณความร้อนจะไหลเข้าสู่ระบบไม่ว่าที่สารตัวอย่างหรือสารอ้างอิง เพื่อที่จะพยายามรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ ปริมาณความร้อนดังกล่าวนี้จะเป็นฟังก์ชันกับเวลาหรืออุณหภูมิ

เครื่อง DSC ถูกนำมาใช้ในการศึกษาแข็งชนิดต่างๆและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเจลาทีไนเซชัน โดยใช้ตัวอย่างสารแขวนลอยแข็งที่มีแข็ง 3.0 – 3.5 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ละลายในน้ำ deionized โดยคิดเป็นน้ำ 70 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนัก/น้ำหนัก) บ่มที่อุณหภูมิห้องนานกว่า 1 ชั่วโมง ใส่ในภาชนะบรรจุ (pan) ของเครื่อง DSC ตั้งอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จาก 40 ถึง 100 องศาเซลเซียส (Kim *et al.*, 1995) ค่าทางเทอร์โมไดนามิกจากการวัดด้วยเครื่อง DSC คือ

$T_o$  คือ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลาทีไนซ์ (onset temperature) เป็นองศาเซลเซียส

$T_p$  คือ อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลาทีไนซ์ (peak temperature) เป็นองศาเซลเซียส

$T_c$  คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลาทีไนซ์ (conclusion temperature) เป็นองศาเซลเซียส

$\Delta H$  คือ พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลาทีไนซ์ (enthalpy) เป็นจูลต่อกรัม

อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (transition temperature) และ enthalpy ในการเกิดเจลาทีไนซ์ของแกรนูลแป้งจากการวัดด้วยเครื่อง DSC จะมีความสัมพันธ์กับระดับของผลึก (degree of crystalline) ของแกรนูลแป้ง โดยระดับของผลึกที่สูงจะมีผลทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานสูงขึ้นด้วย ระดับของผลึกเป็นตัวบอกลถึงความคงตัว (stability) ของโครงสร้างแกรนูล ทำให้มีความต้านทานต่อการเกิดเจลาทีไนซ์ นอกจากนี้ส่วน โครงสร้างผลึกที่มีผลแล้ว ยังเกิดจากความคงตัวของส่วนอสัณฐาน (amorphous region) หรือส่วนกิ่งสาขาด้วย และค่า enthalpy ที่สูงก็เป็นผลมาจากความคงตัวของ โครงสร้างแกรนูล เนื่องจากมีส่วนที่เป็นผลึกมาก (Zeleznaк and Hosney, 1987)

### 3. แป้งดัดแปร

แป้งดัดแปร (modified starch) ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง (starch) เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆเพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ซึ่งคุณลักษณะเกณฑ์ชี้บ่งต่างๆของแป้งดัดแปรแต่ละประเภทจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2535)

เนื่องจากแป้งมีลักษณะจำเพาะอันเนื่องมาจากแหล่งที่ผลิต เช่น แป้งที่ได้จากมันสำปะหลัง ซึ่งมีลักษณะจำเพาะในเรื่องของขนาดรูปร่างและการพองตัว แต่สิ่งที่แป้งทุกชนิดมีคล้ายกัน คือ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อมีปัจจัยความร้อน แรงเฉือน และเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแป้งแต่ละชนิดจะแสดงการเปลี่ยนแปลงคล้ายๆกันเมื่อตรวจสอบโดยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) หรือเครื่อง Brabender Viscoamylograph ถ้าสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติเหล่านี้ได้ จะทำให้เราสามารถนำแป้งไปใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆได้มากมาย การดัดแปรแป้งจึงได้เริ่มมีผู้ค้นคว้าวิจัยขึ้นทั้งโดยทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมีความพร้อมในการทำปฏิกิริยาต่างๆได้ดีมาก

แป้งดิบโดยทั่วไปมีสมบัติบางประการไม่เหมาะสมกับการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ได้แก่ มีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงทนต่อแรงเฉือนในกระบวนการผลิตหรือความคงทนต่อสภาวะต่างๆต่ำ ซึ่งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพต่ำและสิ้นเปลืองงบประมาณในการผลิตโดยไม่จำเป็น ดังนั้นจึงมีการดัดแปรสมบัติบางประการของแป้งดิบเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เช่น ทำให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น คงทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลาทีไนเซชัน (gelatinization) การคืนตัว (retrogradation) และการสูญเสียน้ำของเจลาตลดลง มีความคงตัวในการคืนรูปจากการแช่เยือกแข็ง (freeze thaw) เพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลาดีขึ้น มีสมบัติความเป็นกาวเพิ่มขึ้น มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ เพิ่มขึ้น (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)

#### 4. วิธีการดัดแปรแป้ง

การดัดแปรแป้งสามารถทำได้ 3 วิธีใหญ่ๆ คือ

##### 4.1 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical Modification)

- (1) เจลาทีไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งจนผ่านขั้นตอนของเจลาทีไนเซชันแล้วทำแห้งทันที เช่น pregelatinized starch
- (2) แป้งละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble-starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปจนได้แป้งที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น โดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาทีไนเซชัน
- (3) การลดขนาดเม็ดแป้งโดยทางกล การทำให้เม็ดแป้งแตกโดยทางกลจะได้เม็ดแป้งขนาดเล็กกว่าปกติ
- (4) annealing เป็นการให้ความร้อนในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเจลาทีไนเซชัน
- (5) การแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนสูงกว่าจุดเจลาทีไนเซชันแก่แป้งในขณะที่แป้งมีความชื้นต่ำ

## 4.2 การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological Modification)

การเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

(1) waxy starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย

(2) high-amylose starch คือ แป้งที่มีอะมิโลสสูง

## 4.3 การตัดแปรทางเคมี (Chemical Modification)

### 4.3.1 คอนเวอร์ชัน (conversion)

คอนเวอร์ชันเป็นการตัดแปรแป้งที่มีผลทำลายโมเลกุลแป้งให้มีขนาดเล็กลง ความแข็งแรงของเม็ดแป้งลดลง ความสามารถในการพองตัวและความชื้นหนืดจะน้อยลง ทำให้แป้งละลายได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าแป้งธรรมชาติ

วัตถุประสงค์หลักของการตัดแปรแป้งวิธีนี้ก็เพื่อให้สามารถใช้แป้งได้มากขึ้น เพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ ควบคุมความแข็งแรงของเจล และมีความหนืดในขณะร้อนลดลง โดยทั่วไปในการใช้ประโยชน์แป้งจะมีการเตรียมน้ำแป้งโดยใช้ความเข้มข้นแป้งไม่เกินร้อยละ 6 เพราะจะให้ความหนืดที่สูงมาก แต่ในผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น ลูกกวาดที่มีลักษณะเป็นกัมที่นุ่ม ต้องการแป้งความหนืดต่ำที่สามารถเตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงๆ ได้ เพื่อให้เกิดโครงสร้างของเจลและการแข็งตัว ดังนั้นในอุตสาหกรรมดังกล่าวจึงนิยมใช้แป้งที่ตัดแปรด้วยกระบวนการคอนเวอร์ชัน (เอกพันธ์, 2538)

กระบวนการคอนเวอร์ชัน แบ่งออกได้เป็น

- การลดขนาดโมเลกุลแป้งโดยกรด (acid thinning) เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับกรดเกลือหรือกรดกำมะถันเจือจาง กรดจะตัดโมเลกุลของแป้งทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงจนได้ความหนืดที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์แป้งย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch

- เด็กซ์ทริไนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดหรือเปลี่ยนการจับเกาะ (depolymerization หรือ transglycosylation) โดยใช้ความร้อนหรือความร้อนกับกรด เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่พันธะแอลฟา-1-4 และ repolymerization ในเม็ดแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งเป็น 3 ชนิด

ขึ้นอยู่กับสถานะที่ใช้ในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และ pH คือ เดกซ์ทรินขาว, เดกซ์ทรินเหลือง และบริทิซกัม

- ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการทำให้ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรท์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต เป็นต้น ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง คุณสมบัติเคมี และขนาดของโมเลกุลแป้งเปลี่ยนแปลงไป ได้แป้งดัดแปรที่เรียกว่าแป้งออกซิไดซ์ (oxidized starch)

- การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ จะทำการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์เพื่อให้โมเลกุลแป้งมีขนาดเล็กลงตามต้องการ เอนไซม์ที่ใช้มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของแป้งดัดแปรที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์จากการย่อยแป้ง ได้แก่ น้ำเชื่อมกลูโคส น้ำเชื่อมฟรักโทส มอลโตเดกซ์ทริน

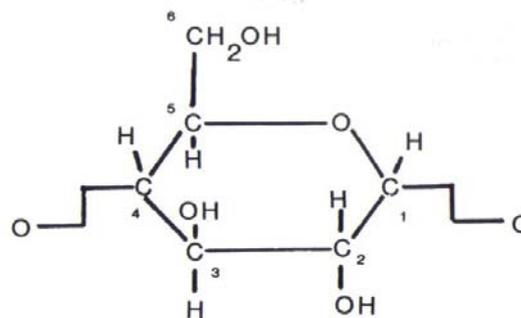
#### 4.3.2 การครอสลิง (cross linking)

การครอสลิงเป็นการดัดแปร โดยให้แป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมี เช่น โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์ แอซีติกแอนไฮไดรด์ใช้ร่วมกับกรดแอคติก อีพิคลอโรไฮดริน เป็นต้น ปฏิกิริยาครอสลิงเกิดที่หมู่ไฮดรอกซิลตั้งแต่ 2 หมู่ขึ้นไปในหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสของแป้งกับสารเคมี ทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์เป็นสะพานเชื่อมระหว่างโมเลกุลแป้ง ทำให้โครงสร้างแป้งแข็งแรงมากขึ้น อุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนเซชันเพิ่มขึ้น ทนต่อความร้อน แรงเฉือน และความเป็นกรด เหมาะที่จะใช้ในอาหารที่มีความเป็นกรดสูง แป้งครอสลิงมีหลายชนิด เช่น ไดสตาร์ชอะดิเปต (distarch adipate) ไดสตาร์ชฟอสเฟต (distarch phosphate)

#### 4.3.3 ปฏิกิริยาการแทนที่ (substitution)

ปฏิกิริยานี้จะเติมหมู่ฟังก์ชัน (functional groups) เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งสามารถดัดแปรให้แป้งมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไป เช่น อุณหภูมิในการเกิดเจลลาทีนเซชันลดลง ความข้นหนืดสูงขึ้น ความใสเพิ่มขึ้น การเกิดรีโทรเกรเดชันและซินเนอริซิสลดลง จับกับไขมันได้ดีขึ้น คงตัวต่อสภาพการละลายหลังการแช่เยือกแข็ง สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีหลายชนิดขึ้นกับหมู่ฟังก์ชันที่ต้องการ แป้งดัดแปรที่ได้ก็จะมีคุณสมบัติและการนำไปใช้ประโยชน์แตกต่างกันไปตามหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลแป้ง ซึ่งการแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้ง (monostrach substitution) นี้เกิดทั้งปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งอะซิเตต (starch acetate) หรือปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน เช่น แป้งไฮดรอกซีเอทิล (hydroxyethyl starch) แป้งแคทไอออนิก (cationic starch) เป็นต้น

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งจะแสดงค่าเป็นระดับการแทนที่ (Degree of Substitution, DS) คือ จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ต่อจำนวนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose Unit, AGU) ดังแสดงในสมการที่ [1] ทั้งนี้ในหนึ่งหน่วยของโมเลกุลกลูโคสมีหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่ได้ 3 หมู่ คือ คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ดังแสดงในภาพที่ 7 ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลทั้ง 3 หมู่ถูกแทนที่จะมีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 3 ถ้าแทนที่ 2 หมู่จะมีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 2 และแทนที่ 1 หมู่ มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 1 ดังนั้นค่าระดับการแทนที่จะบ่งบอกถึงจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่เท่านั้น แต่ไม่สามารถระบุถึงตำแหน่งที่ถูกแทนที่ได้ เนื่องจากค่าระดับการแทนที่จะเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของทั้งกลุ่มโมเลกุล (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546)



ภาพที่ 7 แสดงตำแหน่งของคาร์บอนบนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส

ที่มา: Wurzburg (1987)

โดยค่าระดับการแทนที่ (Degree of Substitution, DS) สามารถคำนวณได้ตามสูตรดังนี้

$$DS = \frac{\text{โมลของหมู่ไฮดรอกซิลที่ถูกแทนที่}}{\text{โมลของแอนไฮโดรกลูโคส}} \quad [1]$$

## 5. แป้งแคทไอออนิก

แป้งแคทไอออนิกเป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุบวก ได้จากปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ amino, imino, ammonium, sulfonate หรือ phosphonium ในสถานะที่เป็นด่าง สารเคมีที่ใช้ในการผลิตแป้งแคทไอออนิก ที่นำมาใช้กับบรรจุภัณฑ์อาหาร ตามข้อบังคับของ FDA (The Food and Drug Administration) ได้แก่ (4-chlorobutene-2)-trimethylammonium chloride, 2-diethylaminoethyl chloride และ 2,3-(epoxypropyl) trimethylammonium chloride (Solarek, 1987)

แป้งแคทไอออนิกถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆมากมาย โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมกระดาษ ใช้เป็นสารเพิ่มความเหนียวให้กับกระดาษและใช้เคลือบกระดาษ ทำให้กระดาษทนต่อการขูดหรือถลอก ด้านทานการแทรกซึมของหมึกหรือของเหลว ป้องกันฝุ่นละออง และทำให้ค่า BOD, COD ของน้ำทิ้งมีค่าต่ำ เป็นผลดีต่อสภาวะแวดล้อม โดยในขั้นตอนการผลิตจะมีการเติมแป้งแคทไอออนิกลงในน้ำเยื่อกระดาษที่อยู่ในส่วนของ head box หรือ wet end เพื่อให้แผ่นเยื่อระบายน้ำออกได้ดี และเป็นตัวเชื่อม (binder) ของเส้นใยกระดาษและสารฟิลเลอร์ (filler) ที่ใช้ในขั้นตอนการขึ้นแผ่นกระดาษ (sheet formation) เพื่อช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ และทำให้ฟิลเลอร์เกาะกระดาษได้ดีขึ้น

ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้แป้งแคทไอออนิกในการเคลือบผ้าและผสมในน้ำยาซักแห้งเพื่อเพิ่มความเหนียวนุ่มและความเรียบให้แก่เส้นใยผ้าหลังจากซักแห้ง

ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ใช้แป้งแคทไอออนิกเป็นสารตกตะกอน (flocculant) สารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีประจุลบ และใช้กำจัดโลหะหนักที่มีประจุลบ เช่น chromate, dichromate, ferrocyanide, ferricyanide, molybdate, permanganate จากน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตฟิล์มถ้ำรูป ใช้ผสมกับสารเคมีสำหรับผลิตน้ำยาสระผม สเปรย์แต่งผม น้ำยาล้างจาน (Solarek, 1987)

การที่แป้งแคทไอออนิกเป็นที่ต้องการใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากคุณสมบัติต่างๆของแป้งที่เปลี่ยนแปลงไปจากแป้งดิบ (native starch) ได้แก่ แป้งมีความเสถียรมากขึ้น อุณหภูมิในการเกิดเจลาทิโนเซชัน (pasting temperature) ลดลง มีอัตราการคืนตัว (retrogradation) ลดลง สามารถละลายน้ำได้สูง พองตัวได้ในน้ำเย็นและสามารถเกิดพันธะไอออนิกระหว่างประจุบวกของโมเลกุล

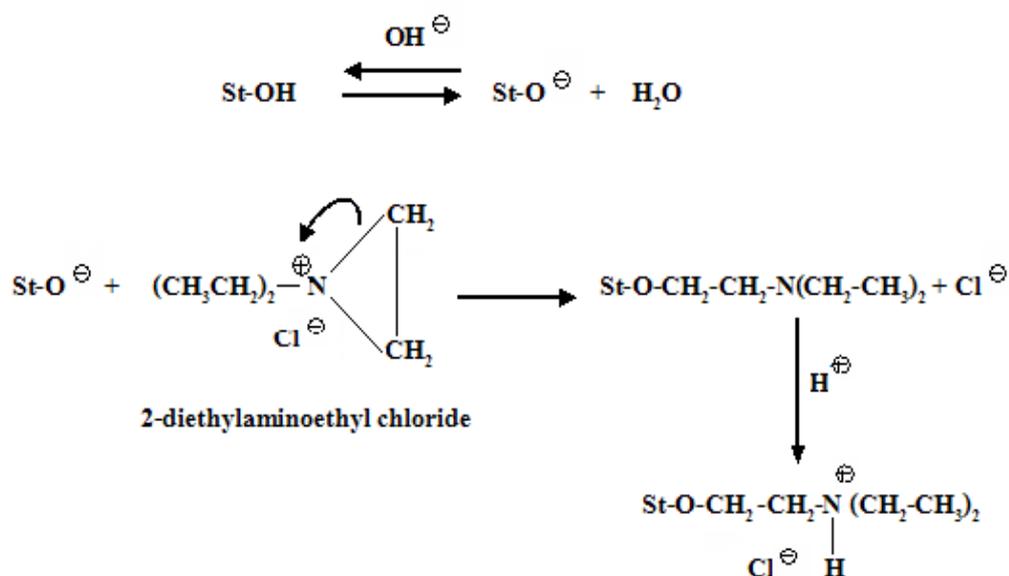
แข่งกับประจุลบของสารต่างๆ ได้ดี เช่น ประจุลบของเส้นใยเซลลูโลสที่ใช้ทำกระดาษ ประจุลบของสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์เพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนได้ เป็นต้น

### 5.1 ชนิดของแป้งแคทไอออนิก

แป้งแคทไอออนิกมีหลายชนิดขึ้นกับชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งสามารถแบ่งชนิดของแป้งแคทไอออนิกได้ดังนี้

#### 5.1.1 เทอร์เทียรีอะมิโนแอลคิลสตาร์ชอีเทอร์ (Tertiary Aminoalkyl Starch Ether)

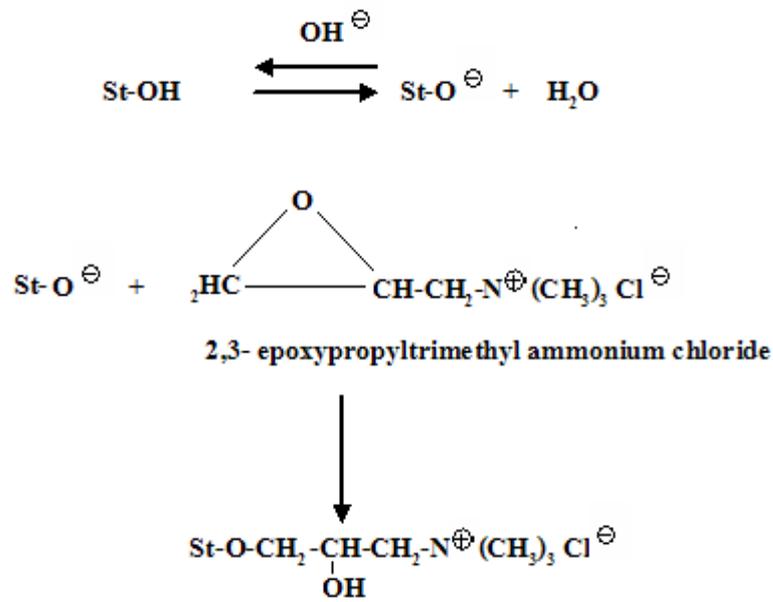
เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสาร dialkylaminoalkyl chloride เช่น 2-diethyl-aminoethyl chloride (DEC), 2-dimethylaminoethyl chloride, 2-diisopropylaminoethyl chloride, 2-diethylaminoethyl bromide และ 2-dimethylaminoisopropyl chloride (Solarek, 1987) ในสถานะที่เป็นด่าง แป้งแคทไอออนิกชนิดนี้จะไม่มีประจุบวกในโมเลกุลแป้ง จำเป็นต้องมีการปรับ pH ให้เป็นกรดเพื่อเป็นการเติมโปรตรอนให้แก่แป้งจึงจะเกิดเป็นหมู่ประจุบวกขึ้น การใช้ประโยชน์ของแป้งชนิดนี้ในอุตสาหกรรมกระดาษจึงค่อนข้างจำกัดอยู่เฉพาะกระบวนการผลิตซึ่งมีสถานะในระหว่างการผลิตเป็นกรด แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตกระดาษในปัจจุบันเริ่มมีแนวโน้มที่จะเปลี่ยนเป็นแบบสถานะการผลิตที่มีสภาพเป็นด่างมากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นการใช้ประโยชน์ของแป้งแคทไอออนิกชนิดนี้จึงเริ่มน้อยลง



ภาพที่ 8 ปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับ DEC ได้ผลิตภัณฑ์เทอร์เทียรีอะมิโนแอลคิลสตาร์ชอีเทอร์  
ที่มา: Solarek (1987)

#### 5.1.2 ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ (Quaternary Ammonium Starch Ether)

เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารที่มีหมู่ควอเทอนารีแอมโมเนียม ในสถานะที่เป็นด่าง ตัวอย่างสารเคมีในกลุ่มนี้ ได้แก่ 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride, 4-chloro-2-butenyl-trimethylammonium chloride, chloropropyltrimethylammonium chloride และ *N*-(3-chloro-2-hydroxypropyl)pyridinium chloride (Solarek, 1987) แป้งแคทไอออนิกชนิดนี้แตกต่างจากชนิดแรกตรงที่โมเลกุลของแป้งมีประจุบวกในทุกสถานะของความเป็นกรดหรือด่าง ดังนั้นแป้งแคทไอออนิกชนิดนี้จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางกว่า และเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดในปัจจุบัน



ภาพที่ 9 ปฏิกิริยาการผลิตไฮดรอกซีโพรพิลไตรเมทิลแอมโมเนียมสตาร์ช  
ที่มา: Solarek (1987)

### 5.1.3 Aminoethylated Starch

เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสาร ethyleneimine ได้แป้งแคโทไอออนิกที่มีหมู่ 2-aminoethyl ซึ่งกระบวนการโดยทั่วไปประกอบด้วย การผสมในสถานะแห้งหรือแบบกึ่งแห้ง ที่อุณหภูมิ 75 ถึง 120°C โดยไม่ใช้ตัวเร่งและจะได้สาร poly(ethyleneimine) เป็นผลพลอยได้จาก การทำปฏิกิริยาดังกล่าว (Rutenberg and Solarek, 1984)

### 5.1.4 Cyanamide Starch หรือ Iminoalkyl Starch

เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสาร disubstituted cyanamide ในสถานะที่เป็นผง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งที่มีหมู่ iminodialkyl carbamate จากนั้นทำการเติมกรดเพื่อเป็นการเติมโปรตรอนให้กับอะตอมไนโตรเจนของหมู่ imino เกิดเป็นหมู่ประจุบวกขึ้น (Rutenberg and Solarek, 1984)

### 5.1.5 Amphoteric Starch

เป็นแป้งดัดแปรที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบในโมเลกุล เตรียมได้จากการใช้วิธีการดัดแปรสองวิธีร่วมกัน กล่าวคือมีการเติมหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวกและหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบเข้าไปในโมเลกุลของแป้ง โดยมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ให้นำไปใช้ในสภาพของกระบวนการผลิตที่หลากหลายขึ้น (Rutenberg and Solarek, 1984) ตัวอย่างเช่น การนำแป้งแคทไอออนิกมาทำปฏิกิริยากับสารเคมีที่สามารถเติมหมู่ฟอสเฟตเข้าไปในโมเลกุลของแป้ง สารเคมีที่ใช้ในการเติมหมู่ฟอสเฟต เช่น tripolyphosphate และ sodium hexametaphosphate เป็นต้น ได้แป้ง amphoteric ที่ใช้เป็น wet-end additives ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและปรับปรุงคุณสมบัติการถ่ายน้ำ (drainage properties) ในกระบวนการผลิตกระดาษ (Solarek *et al.*, 1989)

### 5.1.6 Cationic Dialdehyde Starch

เตรียมได้จากปฏิกิริยาระหว่างแป้ง dialdehyde (แป้งนี้ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของแป้งด้วยกรด periodic) กับสารพวกไฮดราซีนหรือสารประกอบไฮดราไซด์ที่มีหมู่เทอร์เทียรีอะมิโนหรือควาเทอนารีแอมโมเนียม ในปฏิกิริยาแบบ slurry หรือแบบ dispersion (ใช้น้ำเป็นตัวกลาง) ก็จะได้แป้งไดอัลดีไฮด์ประจุบวก (Cationic dialdehyde starch) (Solarek, 1987) ตัวอย่างเช่นการเตรียมแป้ง dialdehyde betaine hydrazone hydrochloride จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้ง dialdehyde กับสาร betaine hydrazide hydrochloride โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง และให้ความร้อนในช่วง 90 ถึง 95 °C (Harley *et al.*, 1977)

## 5.2 การผลิตแป้งแคทไอออนิก

การผลิตแป้งแคทไอออนิกสามารถทำได้ทั้งด้วยวิธีการแบบเปียกและวิธีการแบบแห้ง ซึ่งการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบเปียก (wet process) เป็นการทำปฏิกิริยาที่ใช้กับเมล็ดแป้งในสภาพแขวนลอยกับสารเคมีในสถานะที่เป็นต่าง โดยที่มีการเติมเกลือโซเดียมซัลเฟต (sodium sulphate) หรือโซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) ลงในส่วนผสมเพื่อป้องกันหรือลดการเกิดเจลลิตินในเซชัน วิธีนี้มีข้อดีคือการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีเกิดขึ้นได้อย่างสม่ำเสมอเนื่องจากมีน้ำช่วยในการละลายและการแพร่กระจายของสารได้ดี จึงส่งผลให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความสม่ำเสมอและง่ายต่อการควบคุม (Jin *et al.*, 2001) รวมทั้งสามารถล้างเกลือและสารเคมีที่เหลืออยู่ออกได้หมดทำให้แป้งที่ได้มีความบริสุทธิ์ มีงานวิจัยที่ได้ทำการเตรียมแป้ง

แคทไอลอนิกจากแป้งถั่ว (pea starch) และแป้งข้าวโพดด้วยวิธีการแบบเปียก ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลาง ในการทำปฏิกิริยา และมีการเติมเกลือ โซเดียมซัลเฟตในส่วนผสมเพื่อป้องกันการเกิด เจลาไทน์เซชันของเม็ดแป้ง ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 ชั่วโมง โดยสามารถผลิตแป้งที่มีค่าระดับการแทนที่ได้ตั้งแต่ 0.02 ถึง 0.05 และทำการตรวจสอบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง แคทไอลอนิกที่มีค่าระดับการแทนที่ต่างๆเทียบกับแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร พบว่า อุณหภูมิที่เริ่ม เปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ลดลง, ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เพิ่มขึ้น, ค่าเซ็ทแบ็ค (set back) ในช่วงการทำให้เย็นมีค่าสูงขึ้น และไม่เกิดปรากฏการณ์ซินเนอเรซิส (syneresis) หลังจากเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและ -15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เนื่องจากการมีประจุบวกในโมเลกุลของแป้ง ทำให้การกระจายตัว (dispersion) ของเม็ดแป้งเกิดขึ้น ได้อย่างรวดเร็วในช่วงที่มีการให้ความร้อนและลดการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุล อะมิโลสในช่วงที่ทำให้เย็นและการเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ (Yook *et al.*, 1994)

ต่อมาได้มีการพัฒนาการผลิตแป้งแคทไอลอนิกโดยใช้แอลกอฮอล์ในการป้องกันการ พองตัวของเม็ดแป้งแทนการใช้เกลือเพื่อลดขั้นตอนการล้างเกลือออก พบว่าแป้งแคทไอลอนิกที่ได้ มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานเช่นเดียวกัน ซึ่งมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของชนิดและความ เข้มข้นของสารละลายแอลกอฮอล์, อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นของสาร 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride (CHPTAC) ที่มีต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและ ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาแทนที่ของหมู่ประจุบวก (cationization) ของแป้งแคทไอลอนิกที่ เตรียมจากแป้งข้าวโพดและแป้งถั่ว (pea starch) โดยใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 24 ชั่วโมง ซึ่ง พบว่าการใช้สารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 65 และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสทำให้อัตราการ เกิดปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีที่สุด และค่าระดับการแทนที่ของแป้งแคทไอลอนิกสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้น ของสาร CHPTAC มากขึ้น ซึ่งแป้งแคทไอลอนิกที่ได้มีค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการ เกิดปฏิกิริยาใกล้เคียงกับการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา (Kweon *et al.*, 1996) และมี งานวิจัยที่ทำการเตรียมแป้งแคทไอลอนิกจากแป้งข้าวโพด, แป้งข้าวโพดเหนียว (waxy corn starch), แป้งข้าวบาร์เลย์, แป้งข้าวบาร์เลย์เหนียว (waxy barley) และแป้งถั่ว (pea starch) ด้วยการใช้ สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำเป็นตัวกลาง ในสถานะที่เป็นต่าง โดยสามารถผลิตแป้งแคท ไอลอนิกที่มีค่าระดับการแทนที่ได้ตั้งแต่ 0.030 ถึง 0.035 และทำการตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆของ แป้งดัดแปรที่ได้ พบว่าความสามารถในการพองตัวของแป้งมีค่ามากขึ้น, อุณหภูมิที่เริ่ม เปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) ลดลง, ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) เพิ่มขึ้น และความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ก่อนข้างสูง แต่ไม่เกิดปรากฏการณ์ซินเนอเรซิส (syneresis) หลังจากเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสและ -15 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน นอกจากนี้แป้ง

แคทไอออนิกที่ผลิตได้ยังมีความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสูงกว่าแป้งดิบที่ไม่ผ่านการตัดแปร (Kweon *et al.*, 1997) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ได้ทำการเตรียมแป้งแคทไอออนิกจากแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง โดยการใช้สารละลายผสมของเอทานอลและน้ำเป็นตัวกลางในสภาวะที่ไม่มีกรดเกลือ ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง ซึ่งก็พบว่าเอทานอลมีประสิทธิภาพในการยับยั้งการพองตัวของเม็ดแป้งเช่นเดียวกับเกลือ โดยสามารถผลิตแป้งแคทไอออนิกจากแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลังที่มีค่าระดับการแทนที่สูงกว่า 0.04 ได้โดยใช้เวลา 3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ และพบว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จาก 2.8 M ไปจนถึง 3.6 M จะช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลงได้ถึง 1.5 ถึง 2.0 ชั่วโมง และอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา (Han and Sosulski, 1998) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาวิธีการเตรียมแป้งแคทไอออนิกที่มีค่าระดับการแทนที่สูง จากการทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสาร 2,3-epoxypropyltrimethyl ammonium chloride โดยใช้ตัวกลางในการทำปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน ได้แก่ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, ตัวทำละลาย dimethyl sulfoxide และสารละลายผสมของเอทานอลและน้ำ โดยสามารถผลิตแป้งแคทไอออนิกที่มีค่าระดับการแทนที่สูงถึง 1.1 และพบว่าอัตราส่วนโมลของสารเคมีที่ทำให้ประจุบวก (cationization agent) ต่อหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าระดับการแทนที่สูงขึ้น รวมทั้งปริมาณอะมิโนสที่มีอยู่ในแป้งดิบที่นำมาตัดแปรก็มีผลต่อค่าระดับการแทนที่แต่ไม่มากนัก นอกจากนี้แป้งแคทไอออนิกที่ผลิตได้สามารถละลายได้ในน้ำเย็น และใช้เป็นสารตกตะกอนน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Heinze *et al.*, 2004)

การผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีแบบเปียกมีข้อเสียคือต้องใช้น้ำในการผลิตมาก จึงก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต ระยะเวลาที่ใช้ดำเนินการปฏิกิริยานาน และประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาดำ (Jarowenko and Solarek, 1981) จึงมีการพัฒนาการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบแห้ง (dry process) โดยไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลาง (liquid disperse medium) ในการทำปฏิกิริยา ซึ่งทำการผลิตได้โดยการผสมเม็ดแป้งแห้งกับของผสมระหว่างสารเคมีกับตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกต่างภายใต้สภาวะที่เหมาะสม การเตรียมแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีนี้มีข้อดีคือประสิทธิภาพของการเกิดปฏิกิริยาสูงเพราะการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ส่งผลทำให้ปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันลดลงนั้นเกิดขึ้นต่ำ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาสั้น ไม่มีขั้นตอนการล้างจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการกำจัดน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการผลิตไม่มีขั้นตอนการล้างจึงทำให้มีสารปนเปื้อนตกค้างอยู่ในผลิตภัณฑ์แป้ง แป้งที่ได้จึงไม่บริสุทธิ์ นอกจากนี้การที่ไม่มีน้ำเป็นตัวกลางในระหว่างกระบวนการผลิตทำให้การเข้าทำปฏิกิริยาของสารเคมีกับแป้งเกิดได้อย่างไม่สม่ำเสมอ ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดเฉพาะที่ผิวของเม็ดแป้ง

(Manelius *et al.*, 2000) มีงานวิจัยที่ได้ทำการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบแห้ง ที่ใช้กระบวนการที่เรียกว่า Powdercat<sup>®</sup> Process พบว่า แป้งแคทไอออนิกที่ผลิตได้มีค่าระดับการแทนที่สูงถึง 0.5 โดยใช้อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้องซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้ในการผลิตลงมาก รวมทั้งให้ผลผลิต (yield) ที่สูงกว่าการผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (Hellwig *et al.*, 1992) นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ได้ทำการเตรียมแป้งแคทไอออนิกจากแป้งข้าวโพด, แป้งพรีเจล (pregelled starch) และแป้งไฮโดรไลซ์ (hydrolyzed starch) ด้วยวิธีการแบบแห้ง โดยสามารถผลิตแป้งแคทไอออนิกที่มีค่าระดับการแทนที่ได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 ซึ่งพบว่าค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับอัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเอมีน, ชนิดของสารเอมีนที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา, อัตราส่วนโมลของเอมีนต่อแป้ง และชนิดของแป้งที่ใช้ในการผลิต (Khalil and Dokki, 1998) นอกจากนี้งานวิจัยข้างต้นแล้วยังมีงานวิจัยอื่นอีกที่ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของแป้งแคทไอออนิกที่เตรียมจากแป้งข้าวโพด (corn starch) ด้วยวิธีแบบแห้ง โดยใช้ปริมาณสารที่ให้ประจุบวก (epihalohydrin) ที่มีระดับความเข้มข้น 2.5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 100 ถึง 130 องศาเซลเซียสและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 50 ถึง 80 นาที พบว่าค่าระดับการแทนที่ของแป้งแคทไอออนิกสูงขึ้นเมื่อปริมาณสารที่ให้ประจุบวก (epihalohydrin) มากขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยากลับลดลงเมื่อปริมาณสารที่ให้ประจุบวก (epihalohydrin) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนอุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยามีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้นเมื่อค่าทั้งสองเพิ่มขึ้น แต่อุณหภูมิที่สูงกว่า 120 องศาเซลเซียสอาจจะทำให้โมเลกุลแป้งถูกทำลาย (degradation) และมีสีเข้มขึ้นได้ (Chen *et al.*, 1996)

การผลิตแป้งแคทไอออนิกสามารถทำได้หลายวิธี และแต่ละวิธีที่ใช้ในการผลิตก็ส่งผลต่อคุณสมบัติของแป้งแคทไอออนิกที่ได้ต่างกัน มีงานวิจัยที่ได้ทำการเตรียมแป้งแคทไอออนิกจากแป้งมันฝรั่ง โดยใช้วิธีการเตรียมที่แตกต่างกัน 4 วิธีคือ วิธีการแบบ slurry, วิธีการแบบ paste, วิธีการแบบกึ่งแห้ง (semi-dry process) และวิธีการแบบเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion process) โดยสามารถผลิตแป้งแคทไอออนิกที่มีค่าระดับการแทนที่ได้ตั้งแต่ 0.03 ถึง 0.12 และพบว่าคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งแคทไอออนิกที่ผลิตได้จะแตกต่างกันไปตามวิธีการที่ใช้ผลิตและค่าระดับการแทนที่ของแป้ง โดยแป้งแคทไอออนิกที่ผลิตได้จากวิธีการแบบ slurry นั้นมีโครงสร้างของเม็ดแป้งที่เปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก จึงมีความสามารถในการพองตัวและการละลาย รวมทั้งค่าความหนืดที่คล้ายกับแป้งมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการตัดแปร ส่วนแป้งแคทไอออนิกที่ผลิตได้จากวิธีการแบบ paste โครงสร้างของเม็ดแป้งจะถูกทำลายจนหมด ส่งผลทำให้แป้งสามารถละลายในน้ำเย็น

ได้ดี และมีความหนืดต่ำ ส่วนแป้งแคทไอออนิกที่ผลิตได้จากวิธีการแบบกึ่งแห้ง โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายเพียงบางส่วน ส่งผลทำให้แป้งสามารถละลายในน้ำเย็นได้มากขึ้นและมีความหนืดลดลงเมื่อค่าระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น ส่วนการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบอิเล็กโทรลูชันนั้นพบว่าอาจเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมข้าม (crosslinking reaction) ในระหว่างที่มีการแทนที่ด้วยหมู่ประจุบวก ซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายของตัวอย่างแป้งที่ได้จากการเตรียมด้วยวิธีการแบบอิเล็กโทรลูชันมีค่าลดลงเมื่อค่าระดับการแทนที่เพิ่มขึ้น (Radosta *et al.*, 2004) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Liu *et al.* (1999) ที่ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางด้านการใช้งาน (functional properties) และความสามารถในการย่อยด้วยเอนไซม์ของแป้งแคทไอออนิก และแป้งแคทไอออนิกที่มีพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุล (cross-linked cationic starch) ที่ผลิตจากแป้งข้าวโพด (maize starch) พบว่าการมีประจุบวกในโมเลกุลช่วยลดอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด ( $T_p$ ) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด ( $T_c$ ) ของการเกิดเจลลาคีโนเซชัน ค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น ค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายสูงขึ้น ความใสและความสามารถในการย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ (native starch) และพบว่าแป้งแคทไอออนิกที่มีพันธะเชื่อมข้ามจะมีค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น ( $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด ( $T_p$ ) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด ( $T_c$ ) ของการเกิดเจลลาคีโนเซชันสูงขึ้นและค่าความหนืดสูงสุดเพิ่มขึ้น แต่มีค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายลดลงรวมทั้งค่าความใสและความสามารถในการย่อยด้วยเอนไซม์ลดลงด้วย เนื่องจากพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้โมเลกุลแป้งแข็งแรงมากขึ้น จึงทำให้การดูดซับน้ำทำได้ยากขึ้น ทำให้อุณหภูมิในการเกิดเจลลาคีโนเซชันมีค่าสูงขึ้น และโอกาสที่โมเลกุลแป้งจะกลับมาจับตัวกันใหม่ได้ง่ายขึ้นด้วย

# อุปกรณ์และวิธีการ

## อุปกรณ์

### 1. วัตถุดิบ

แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นแป้งมันสำปะหลังทางการค้าชั้นพิเศษ (Tapioca Starch Premium Grade) จาก บริษัท สงวนวงษ์ อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา

### 2. สารเคมี

2.1 สารละลาย 3-chloro-2-hydroxypropyl-trimethyl ammonium chloride 69% (CHPTAC) (บริษัท เจเจ-เดกussa เคมีคอล (ที) จำกัด)

2.2 กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)

2.3 กรดซัลฟูริกเข้มข้น (Concentrated Sulfuric acid)

2.4 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)

2.5 กรดบอริก (Boric acid)

2.6 ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate)

2.7 โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate)

2.8 โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate)

2.9 โพแทสเซียมซัลเฟต (Potassium sulfate)

2.10 คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate)

2.11 ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)

2.12 โบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green)

2.13 เมทิลเรด (Methyl red)

2.14 เอทานอล 95% (Ethanol 95%)

## 3. เครื่องมือ

- 3.1 เครื่องวัด pH (pH meter, HACH, USA)
- 3.2 มอเตอร์สำหรับกวน (Stirring motor, IKA Labortechnik, Germany)
- 3.3 อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath, WB 14, Germany)
- 3.4 ตู้อบไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven, UM 500, Germany)
- 3.5 กล้องจุลทรรศน์ (Meiji model Ck 3800, Japan)
- 3.6 เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 7 Perkin Elmer, USA)
- 3.7 เครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะมิโลกราฟ (Brabender, Germany)
- 3.8 เครื่องปั่นเหวี่ยง (Sigma 2K15, Germany)
- 3.9 เครื่องปั่นเหวี่ยงไมโครเซนตริฟิวจ์ (Spectrafuge 16M Labnet, USA)
- 3.10 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic Genesys 5, Milton Roy Company, USA)
- 3.11 เครื่องตีผสม (Mixer, Kenwood, KM006, UK)
- 3.12 ขวดสเปรย์สารเคมี (Trigger spray bottle, Cole-Parmer, USA)
- 3.13 เครื่องกวน (Hot plate magnetic stirrer, VELP Scientifica, Italy)
- 3.14 เครื่องวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน (ประกอบด้วย Kjeltac system 1026 Distilling unit และ 2006 Digester, Tecator, Sweden)
- 3.15 เครื่องควบคุมอุณหภูมิน้ำหล่อเย็น (Polyscience 9505, USA)
- 3.16 เครื่องบดไฟฟ้า (Moulinex X13, French)
- 3.17 เครื่องบดแป้ง (Laboratory mill, Perten 3100, Sweden)
- 3.18 เครื่องแก้วชนิดต่างๆ ที่จำเป็นในการวิเคราะห์

## วิธีการ

### 1. การศึกษาเปรียบเทียบผลของสภาวะในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

#### 1.1 การผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ด้วยวิธีแบบเปียก (Wet Process)

ทำการเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Yook *et al.* (1994) ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยเตรียมน้ำแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้นร้อยละ 45 (โดยน้ำหนัก) ในน้ำซึ่งมีเกลือโซเดียมซัลเฟตความเข้มข้นร้อยละ 30 (ต่อน้ำหนักแป้ง) ทำการกวนแป้งให้กระจายตัวดีแล้วย้ายสารละลายแป้งลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้น้ำแป้งมีอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จากนั้นทำการผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) กับสารละลาย 3-chloro-2-hydroxypropyl-trimethyl ammonium chloride (CHPTAC) แล้วเติมลงในน้ำแป้งและกวนน้ำแป้งในสภาวะที่กำหนด เมื่อครบระยะเวลาการทำปฏิกิริยาเก็บตัวอย่างมาทำการหยุดปฏิกิริยาโดยปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งให้อยู่ในระหว่าง 6 ถึง 6.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นทำการกรองและล้างแป้งด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 40 จนกระทั่งน้ำล้างไม่เกิดตะกอนขาวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรทแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาผลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

1.1.1 อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (CHPTAC:AGU) โดยควบคุมค่าอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12

1.1.2 อัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสาร CHPTAC (NaOH:CHPTAC) โดยควบคุมค่าอัตราส่วนโมลของสาร NaOH : CHPTAC เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0

1.1.3 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา โดยควบคุมระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 1, 2, 4, 7 และ 22 ชั่วโมง

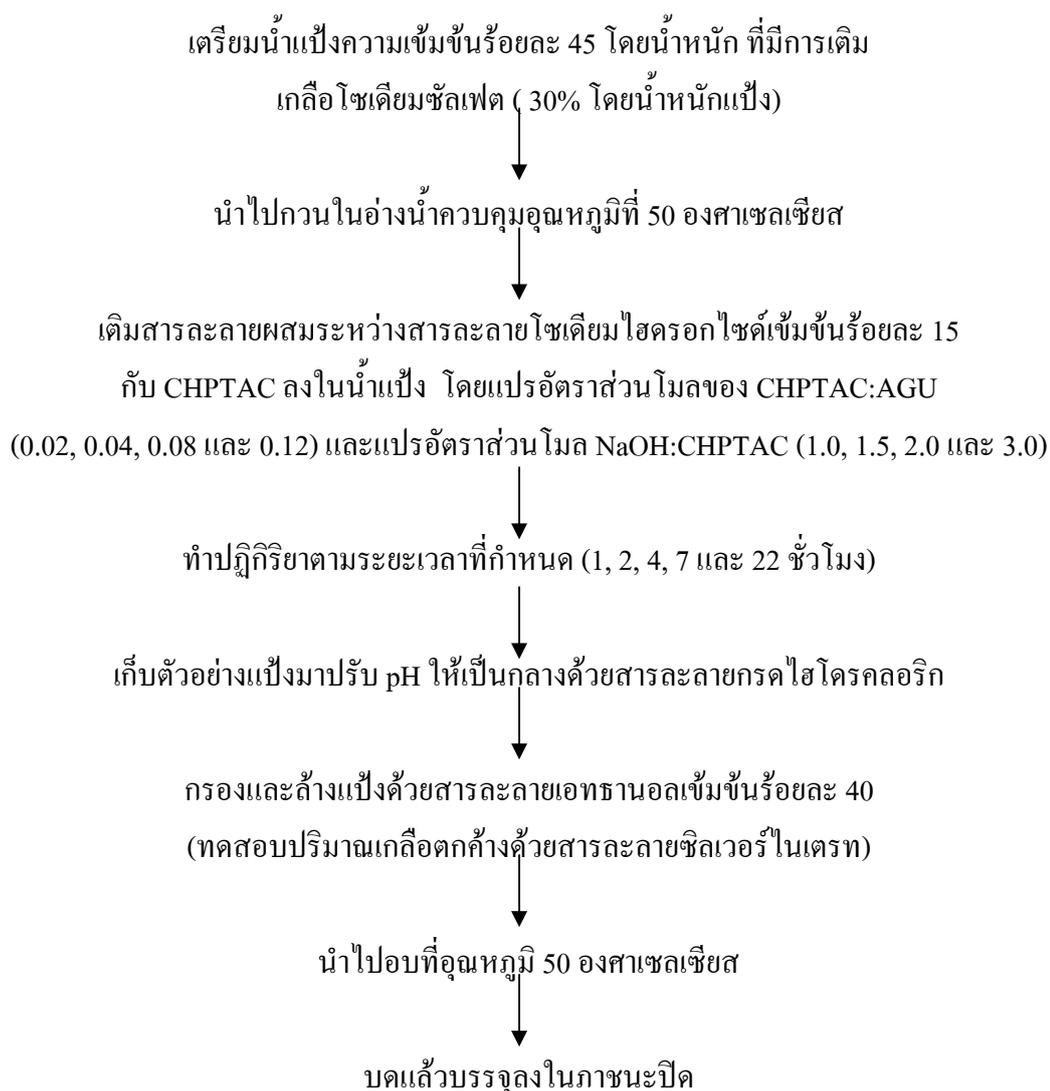
## 1.2 การผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลไอออนด้วยวิธีแบบแห้ง (Dry Process)

ทำการเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลไอออน โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Jarowenko and Solarek (1981) ดังแสดงในภาพที่ 11 โดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ผสมกับสารละลาย 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride (CHPTAC) คนให้เข้ากันแล้วทิ้งไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำสารละลายผสมที่ได้สเปรย์ลงบนแป้งมันสำปะหลังแห้ง โดยควบคุมปริมาณน้ำในระบบที่ร้อยละ 20 โดยน้ำหนักรวม (ยกเว้นในกรณีที่มีปริมาณน้ำดังกล่าว น้อยเกินไป ไม่เพียงพอในการละลายสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และ CHPTAC ซึ่งในกรณีดังกล่าวจะเพิ่มปริมาณน้ำโดยใช้ปริมาณน้ำในระบบน้อยที่สุดที่สามารถละลายสารละลายผสมของโซเดียมไฮดรอกไซด์และ CHPTAC ได้) ในระหว่างการสเปรย์สารเคมี ทำการกวนผสม แป้งด้วยเครื่องผสม (mixer) เป็นเวลา 30 นาที กวนผสมจนเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำตัวอย่างแป้งเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าควบคุมอุณหภูมิที่ระดับอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในสภาวะปิด เมื่อครบระยะเวลาการทำปฏิกิริยา เก็บตัวอย่างมากระจายตัวในสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 50 และหยุดปฏิกิริยาโดยปรับความเป็นกรด-ด่างของน้ำแป้งให้อยู่ในระหว่าง 6 ถึง 6.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก จากนั้นทำการล้างกรองแป้งด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 50 จนกระทั่งน้ำล้างไม่เกิดตะกอนขาวเมื่อทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรท แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาผลของปัจจัยในกระบวนการผลิตที่มีต่อค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาดังนี้

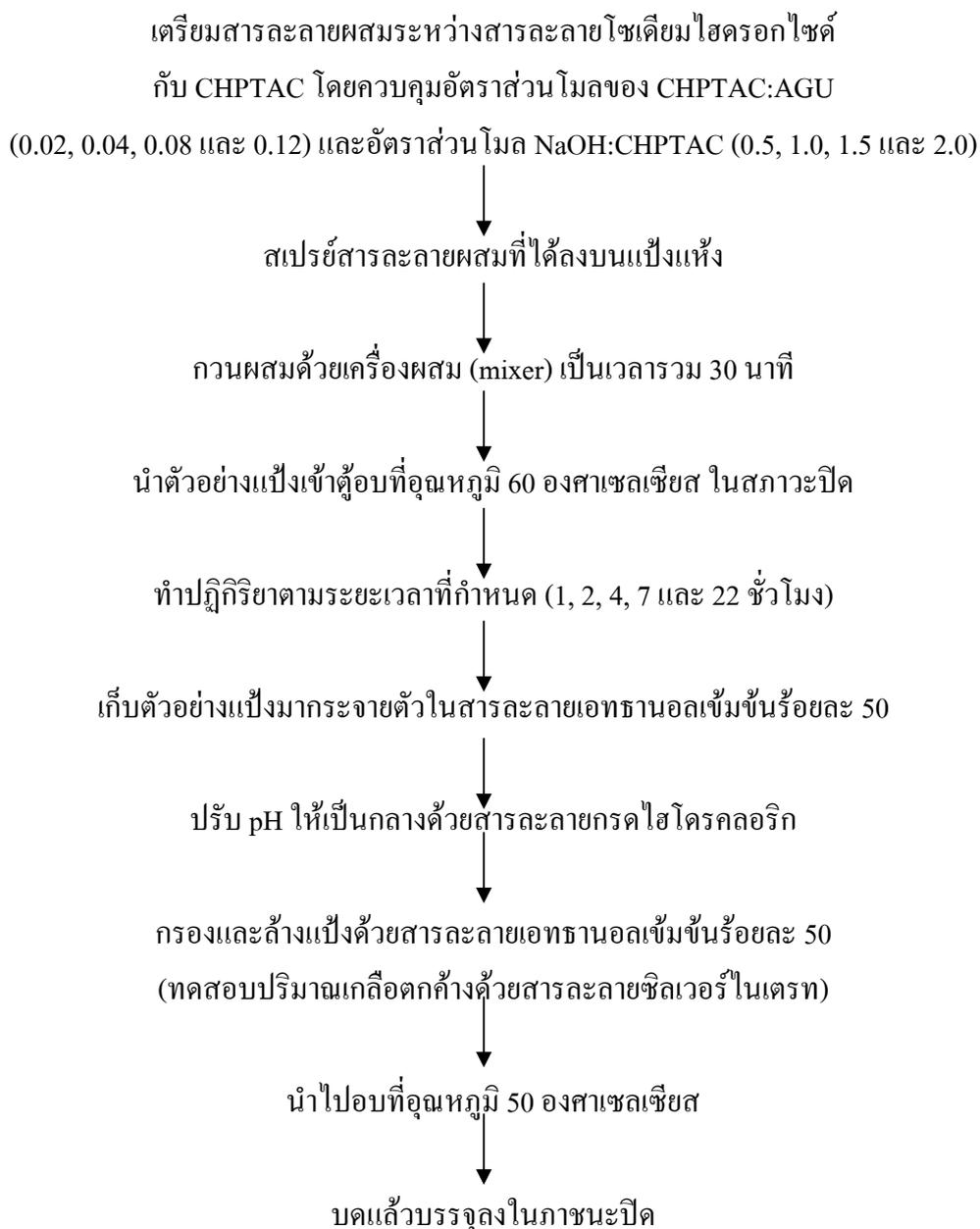
1.2.1 อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อหน่วยแอนไอออนคลอไรด์ (CHPTAC:AGU) โดยควบคุมค่าอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12

1.2.2 อัตราส่วนโมลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสาร CHPTAC (NaOH:CHPTAC) โดยควบคุมค่าอัตราส่วนโมลของสาร NaOH : CHPTAC เท่ากับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0

1.2.3 ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา โดยควบคุมระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่ 1, 2, 4, 7 และ 22 ชั่วโมง



**ภาพที่ 10** การเตรียมควอเทอนารีแอม โมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบเปียก  
ที่มา: คัดแปลงจาก Yook *et al.* (1994)



**ภาพที่ 11** การเตรียมควอเทอนารีแอม โมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ จากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบแห้ง  
ที่มา: ดัดแปลงจาก Jarowenko and Solarek (1981)

## 1.3 วิเคราะห์ค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพของปฏิกิริยา

### 1.3.1 ค่าระดับการแทนที่ (Degree of Substitution, DS)

การแทนที่ของหมู่ฟังก์ชันภายในเม็ดแป้งแสดงเป็นค่าระดับการแทนที่ คือ จำนวนหมู่ฟังก์ชันที่มาแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลต่อจำนวนหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส ซึ่งค่าระดับการแทนที่นี้จะคำนวณจากปริมาณของไนโตรเจนที่เกิดจากการแทนที่ของหมู่ N-trimethyl-2-hydroxypropyl ต่อหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส (Anhydroglucose unit) ของแป้ง โดยจะใช้วิธี Kjeldahl (มอก. 274-2521) ในการหาปริมาณไนโตรเจนของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ (ภาคผนวก ก ข้อ1) จากนั้นนำไปคำนวณหาค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา ตามสูตรดังนี้

$$DS = \frac{162 \times \text{ปริมาณไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)}}{(1400 - (151.5 \times \text{ปริมาณไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)})}$$

### 1.3.2 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยา (Reaction Efficiency, RE) คำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$RE \text{ (เปอร์เซ็นต์)} = \frac{\text{ค่าระดับการแทนที่ (DS)}}{\text{อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อหน่วยแอนไฮโดรกลูโคสที่เติมลงไป}}$$

## 2. การศึกษาสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์

2.1 ทำการเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จากแป้งมันสำปะหลัง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) ต่างๆ (DS เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.07) ซึ่งเตรียมจากสถานะที่มีอัตราส่วนโมลสาร CHPTAC:AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 ตามลำดับ ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ภายใต้สถานะที่มีปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม (สถานะที่เหมาะสมได้จากข้อมูลการศึกษาในหัวข้อที่ 1) แล้วจึงนำควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ได้ไปใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ต่อไป

## 2.2 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง

### 2.2.1 ลักษณะของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ (ภาคผนวก ข้อ 2)

ตรวจสอบลักษณะของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดัดแปลงจากวิธีการของ Kerr (1950) โดยนำตัวอย่างแป้งปริมาณเล็กน้อยมากระจายลงบนสารละลายซูโครสอิ่มตัว (ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 80) บนแผ่นสไลด์ แล้วนำมาตรวจดูลักษณะอนุภาคแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Meiji model Ck 3800, Japan) ภายใต้แสงธรรมดาที่กำลังขยาย 160 เท่า และบันทึกภาพเม็ดแป้งไว้ จากนั้นใส่เลนส์ปรับแสงโพลาไรซ์ลงบนช่องกำเนิดแสง หมุนปรับตัวเลนส์เพื่อให้เกิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ศึกษาลักษณะ Birefringence ของอนุภาคแป้ง บันทึกภาพไว้ แล้วทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพลักษณะอนุภาคแป้งที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดาและแบบใช้แสงโพลาไรซ์ ภายในกรอบภาพและตำแหน่งอนุภาคเดียวกัน

### 2.2.2 ความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Cold Water Solubility) (ภาคผนวก ข้อ 3)

ตรวจสอบความสามารถในการละลายในน้ำเย็นของตัวอย่าง ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Chen and Jane (1994) โดยนำตัวอย่างแป้งผสมกับน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.5 กวนให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อให้แป้งดูดซับน้ำ จากนั้นนำไปปั่นผสมด้วยเครื่อง blender (Moulinex, French) ที่ความเร็วรอบต่ำเป็นเวลา 2 นาที เติสารละลายดังกล่าวใส่ในหลอดเหวี่ยงและนำไปเหวี่ยงแยกด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (Sigma 2K15, Germany) ที่ความเร็วรอบ 1200 x g เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเปิดน้ำส่วนใสด้านบนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่จานอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก นำเข้าอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำออกมาชั่งและทำการหาค่าร้อยละการละลายน้ำเย็น

### 2.2.3 ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้ง (ภาคผนวก ข้อ 4)

วิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัวและการละลายของแป้ง ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch (1964) โดยชั่งแป้ง 0.5 กรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในหลอดเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนัก แล้วเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปต้มในอ่างน้ำไฟฟ้าที่ควบคุมอุณหภูมิได้ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยกวนตลอดเวลา จากนั้นนำไปเหวี่ยงในเครื่องปั่นเหวี่ยง (Spectrafuge 16M Labnet, USA) ที่ความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที

นาน 15 นาที แยกส่วนใสออกจากหลอดเหวี่ยงใสในภาชนะที่ทราบน้ำหนักให้มากที่สุด และนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส ซึ่งน้ำหนักเป็นน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ ส่วนแป้งเปียกในหลอดนำมาชั่งเป็นน้ำหนักแป้งที่พองตัวแล้ว เพื่อนำมาคำนวณค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้ง

#### 2.2.4 ความหนืดของแป้ง (ภาคผนวก ข้อ 5)

วิเคราะห์ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ตามวิธีการของ AACC (1980) โดยชั่งตัวอย่างแป้งคิดเป็น 30 กรัม ใส่น้ำลงไป โดยให้น้ำหนักทั้งหมดเท่ากับ 500 กรัม ใสลงในเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender, Germany) จากนั้นตั้งค่าที่เครื่องโดยเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อ นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ นาน 30 นาที แล้วค่อยๆ ลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกัน จนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ นาน 30 นาที ทำการบันทึกค่าความหนืดต่างๆ ในหน่วยของ Brabender Unit (BU) และอุณหภูมิที่สารละลายแป้ง เริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) จากกราฟที่ได้

#### 2.2.5 การวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชัน ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (ภาคผนวก ข้อ 6)

วิเคราะห์การเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 7 Perkin Elmer, USA) ตามวิธีที่ดัดแปลงจากวิธีของ Kim *et al.* (1995) โดยเตรียมน้ำแป้งเข้มข้นร้อยละ 30 (โดยน้ำหนักแห้ง) ใสใน stainless steel pan สำหรับบรรจุตัวอย่าง เก็บตัวอย่างไว้ข้ามคืน ทำการวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลิตีในเซชันของตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature;  $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature;  $T_p$ ) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature;  $T_c$ ) ของการเกิดเจลลิตีในเซชัน และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงในระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้ง (enthalpy of gelatinization;  $\Delta H_g$ )

### 2.2.6 การวิเคราะห์สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (ภาคผนวก ข้อ 6)

นำตัวอย่างที่ผ่านการวิเคราะห์การเกิดเจลลิตินเซชันแล้ว (จากข้อ 2.2.5) ไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน แล้วจึงนำตัวอย่างมาตรวจวัดสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันโดยทำการวิเคราะห์ในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ตรวจวัดค่าอุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature;  $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature;  $T_p$ ) และอุณหภูมิที่จุดสิ้นสุด (conclusion temperature;  $T_c$ ) และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างที่ผ่านการรีโทรเกรเดชัน (enthalpy of retrogradation;  $\Delta H_r$ )

### 2.2.7 ความใสของแป้งเปียก (Paste Clarity) (ภาคผนวก ข้อ 7)

ตรวจสอบความใสของแป้งเปียก โดยวัดค่าแสงส่องผ่าน (% Transmittance) ที่ 650 นาโนเมตร ตามวิธีของ Craig *et al.* (1989) โดยเตรียมสารละลายแป้งเข้มข้นร้อยละ 1 จากนั้นตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที โดยเขย่าหลอดตลอดเวลาในช่วง 5 นาทีแรกเพื่อให้แป้งเกิดการเจลลิตินเซชันอย่างสม่ำเสมอ หลังจากนั้นทำการเขย่าเป็นครั้งคราว (ทุก 10 นาที) เมื่อครบเวลานำสารละลายออกมาวางให้เย็นตัวที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที วัดค่าการส่องผ่านของแสง (% Light Transmittance) ที่ 650 นาโนเมตร โดยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic Genesys 5, Milton Roy Company, USA)

### 3. การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลโดยวิธีทางสถิติ

ในการทดลองจัดสิ่งทดลองแบบแฟคทอเรียล ในแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) และวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลด้วยวิธี Duncan's Multiple Range (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### 4. สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการของหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีแปรรูปมันสำปะหลังและแป้ง สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

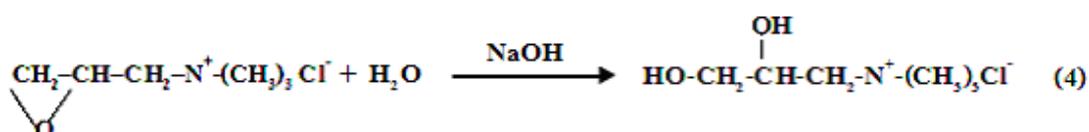
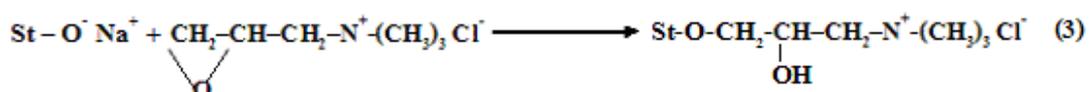
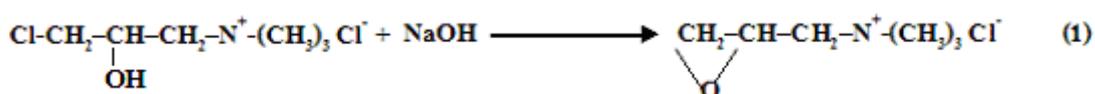
### 5. ระยะเวลาในการทำวิจัย

ระยะเวลาในการทำวิจัยเริ่มตั้งแต่ตุลาคม 2548 ถึงมกราคม 2551

## ผลและวิจารณ์

### 1. การศึกษาเปรียบเทียบผลของสภาวะในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

แป้งแคทไอออนิก (cationic starch) เป็นแป้งดัดแปรที่มีประจุบวกที่ได้จากปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน (etherification) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งกับสารเคมีที่มีหมู่ amino, imino, ammonium, sulfonate หรือ phosphonium ในปัจจุบันแป้งแคทไอออนิกที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ ได้แก่ ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่เตรียมได้โดยการทำปฏิกิริยาของแป้งกับสาร 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride (CHPTAC) ภายใต้สภาวะที่เป็นค่ากระบวนการผลิตแป้งแคทไอออนิกเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างซับซ้อน มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องหลายขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 12 ซึ่งจะเห็นว่าต่างจัดเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดำเนินของปฏิกิริยา โดยต่างจะช่วยเปลี่ยนสาร CHPTAC ในรูปคลอโรไฮไดริน (chlorohydrin) ให้ไปอยู่ในรูปอีพอกไซด์ (epoxide) ซึ่งเป็นรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยา (สมการที่ 1) นอกจากนี้ต่างยังมีส่วนช่วยเร่งปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน โดยต่างจะเข้าไปเปลี่ยนสภาพหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลแป้ง (สมการที่ 2) เพื่อให้พร้อมในการทำปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชันต่อไป (สมการที่ 3) (Solarek, 1987) อย่างไรก็ตาม ในระหว่างกระบวนการผลิตแป้งแคทไอออนิกอาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสาร CHPTAC ในรูปอีพอกไซด์ (epoxide) ทำให้เกิดสารประกอบ diol (สมการที่ 4) (Hellwig *et al.*, 1992) ซึ่งจะทำให้มีสาร CHPTAC ที่จะทำปฏิกิริยากับแป้งได้มีปริมาณน้อยลง ดังนั้นการศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการผลิตแป้งแคทไอออนิกจึงมีความสำคัญอย่างมากเพื่อที่จะได้ผลิตแป้งแคทไอออนิกที่มีค่าระดับการแทนที่ตามที่ต้องการโดยใช้ปริมาณสาร CHPTAC โซเดียมไฮดรอกไซด์และเวลาได้อย่างเหมาะสมต่อไป

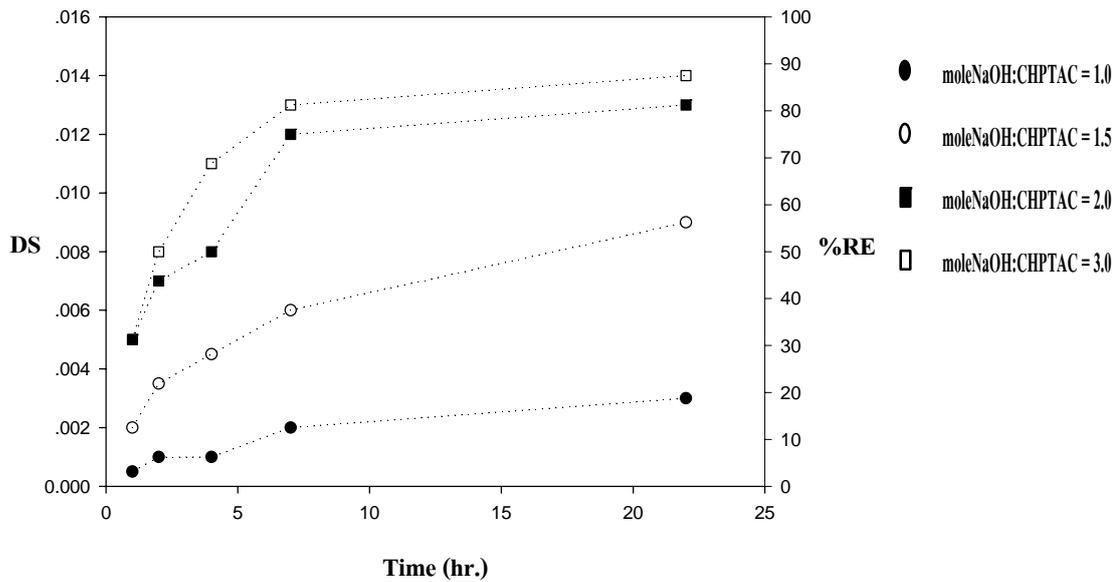


ภาพที่ 12 ปฏิกริยาต่างๆที่เกิดขึ้นของกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซีเทอร์โดยใช้สาร 3-chloro-2-hydroxypropyltrimethyl ammonium chloride (CHPTAC) ในสถานะที่เป็นต่าง

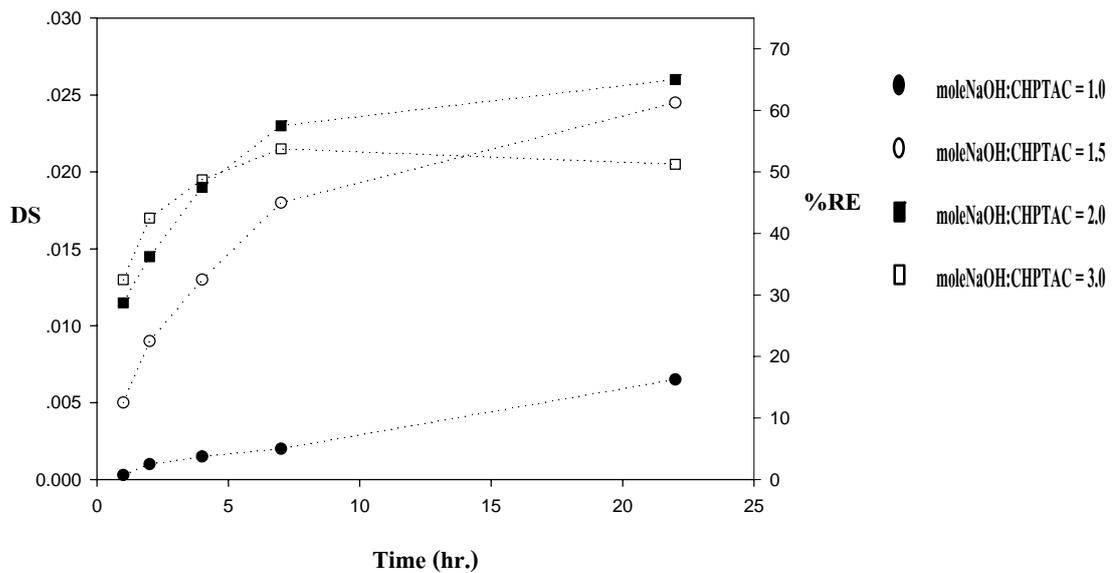
1.1 การศึกษาผลของสภาวะในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียก

ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการผลิต ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU (0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12) , อัตราส่วนโมลของสาร NaOH : CHPTAC (1.0, 1.5, 2.0 และ 3.0) และระยะเวลาการทำปฏิกริยา ( 1 ถึง 22 ชั่วโมง) ที่มีต่อค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกริยาของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ซึ่งได้ผลดังแสดงในภาพที่ 13

จากผลในภาพที่ 13 จะเห็นว่าโดยทั่วไปแล้วควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซีเทอร์จะมีค่าระดับการแทนที่ (DS) สูงขึ้นตามระยะเวลาการทำปฏิกริยาที่นานขึ้น อัตราเร็วของการเกิดปฏิกริยาในช่วง 7 ชั่วโมงแรกจะค่อนข้างสูง (สังเกตจากความชันของกราฟ) ส่วนช่วงเวลาหลังจากผ่าน 7 ชั่วโมงไปแล้วปฏิกริยาเกิดขึ้นในอัตราเร็วที่ลดลง

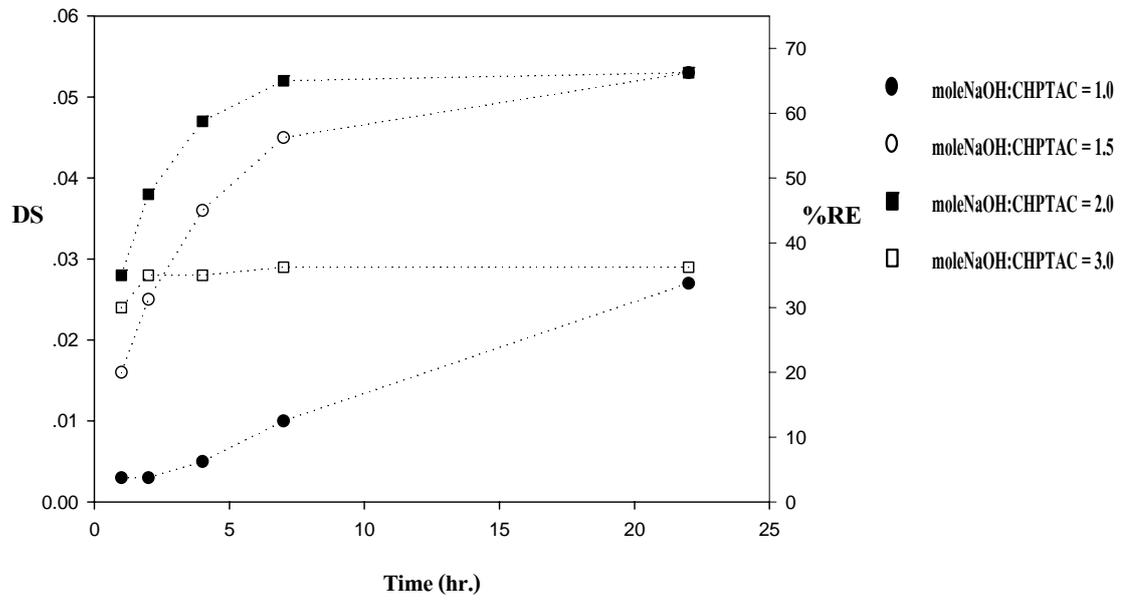


(a)

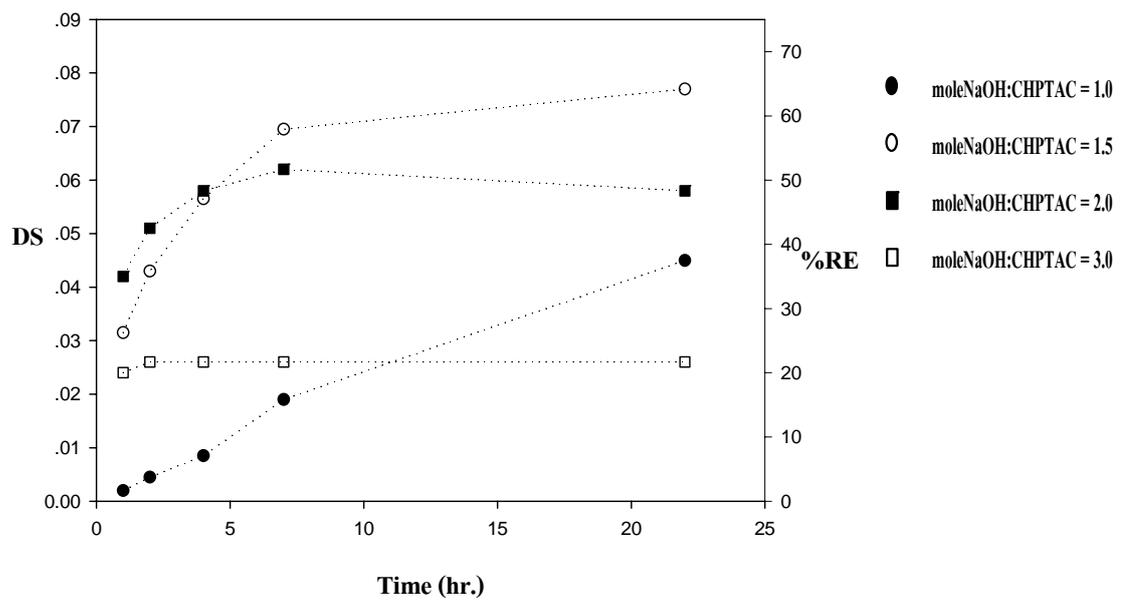


(b)

ภาพที่ 13 ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารี แอมโมเนียมสตาไรลซอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ในสภาวะที่มีอัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02 (รูป a), 0.04 (รูป b), 0.08 (รูป c) และ 0.12 (รูป d) และอัตราส่วนโมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างๆ



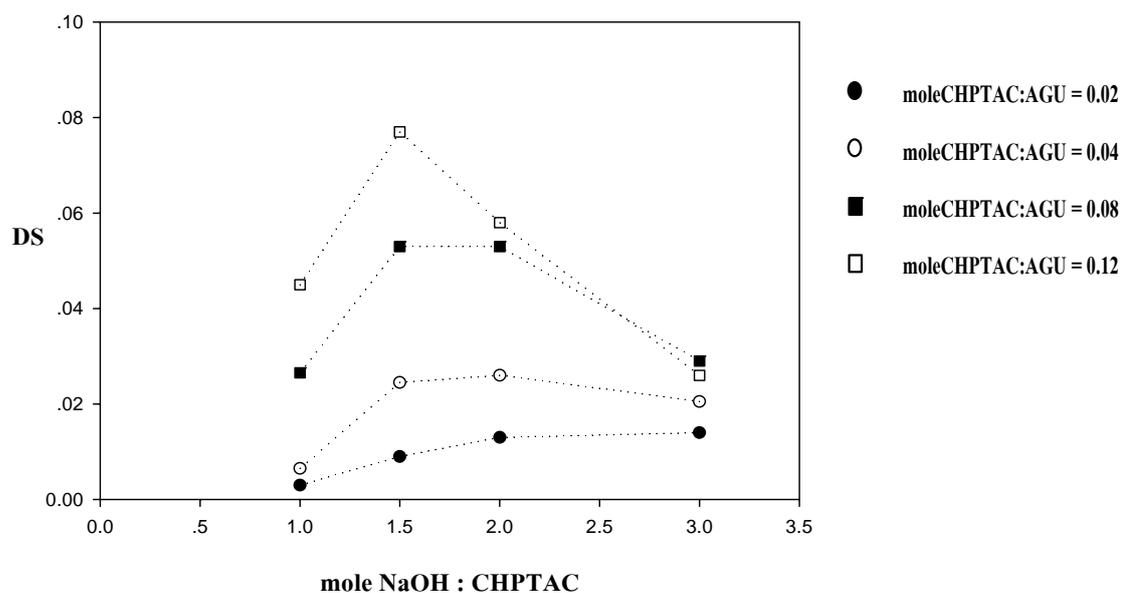
(c)



(d)

ภาพที่ 13 (ต่อ)

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียก พบว่าโดยส่วนใหญ่แล้วค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์มีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นตามปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามที่ระดับของอัตราส่วนโมล CHPTAC : AGU เท่ากับ 0.04, 0.08 และ 0.12 (ภาพที่ 13b, 13c, และ 13d) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณค่าให้สูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่งจะมีผลทำให้ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าระดับการแทนที่ (DS) ลดลง และจากภาพที่ 14 ที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตขึ้นในสภาวะที่มีอัตราส่วนโมล CHPTAC : AGU ที่ระดับต่างๆ (ที่ระยะเวลาการทำปฏิกิริยา 22 ชั่วโมง) จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณค่าในช่วงต้นจะช่วยทำให้ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์มีค่าระดับการแทนที่ (DS) สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณค่าจนถึงระดับหนึ่งจะมีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีอยู่ในระบบมากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ก่อให้เกิดสารประกอบ diol ที่ส่งผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาไอเทอร์ริฟิเคชันระหว่างแป้งกับสารเคมีที่อยู่ในรูปอีพอกไซด์ (epoxide) ลดน้อยลงดังที่แสดงในภาพที่ 12 จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนโมล NaOH : CHPTAC ที่ให้ค่าระดับการแทนที่ (DS) สูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.0-3.0, 1.5-2.0, 1.5-2.0 และ 1.5 สำหรับปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโมลของ CHPTAC : AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 ตามลำดับ



ภาพที่ 14 ค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลซอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ในสถานะที่มีอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 โดยใช้อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างกัน (ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 22 ชั่วโมง)

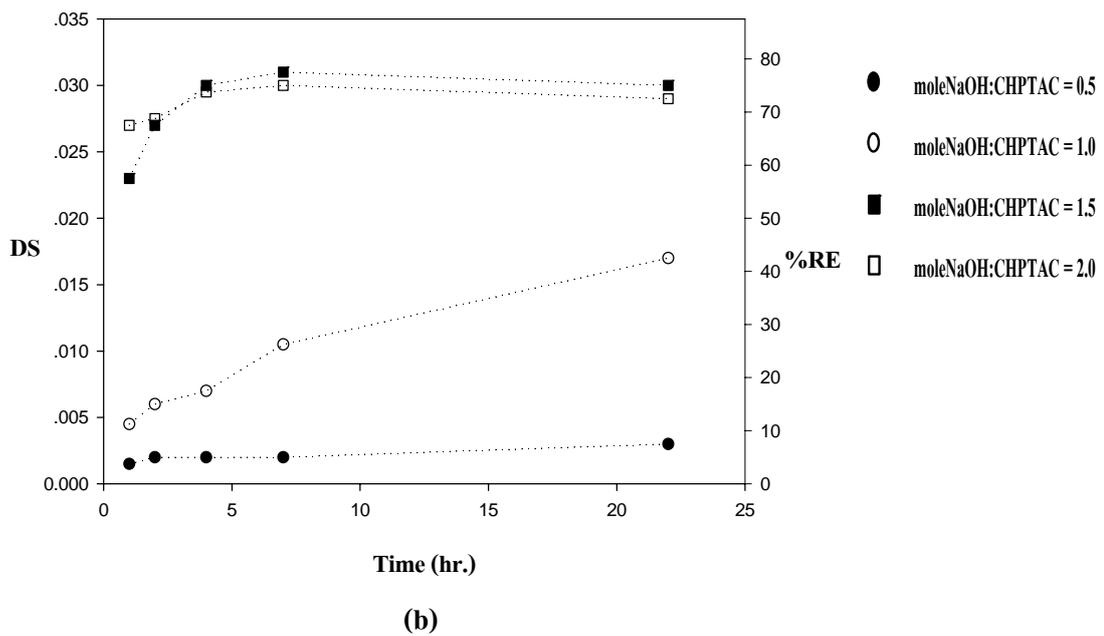
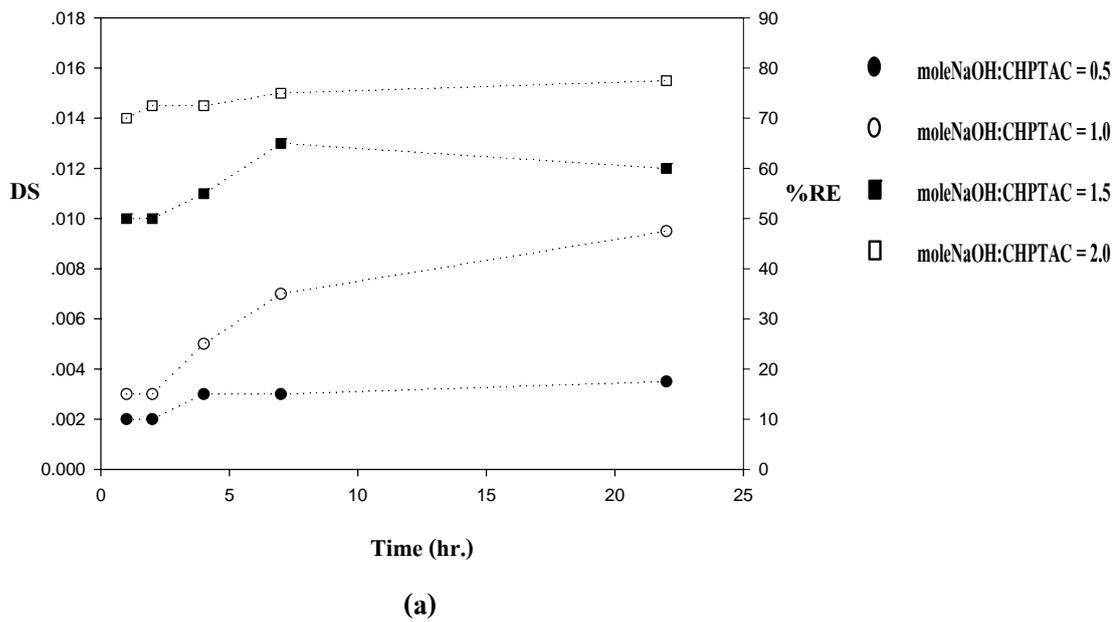
#### 1.2 การศึกษาผลของสถานะในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลซอเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้ง

ทำการศึกษาผลของปัจจัยต่างๆที่ใช้ในการผลิต ซึ่งประกอบด้วยอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU (0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12) , อัตราส่วนโมลของ NaOH : CHPTAC (0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0) และระยะเวลาการทำปฏิกิริยา ( 1 ถึง 22 ชั่วโมง) ที่มีต่อค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลซอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ได้ผลดังแสดงใน ภาพที่ 15

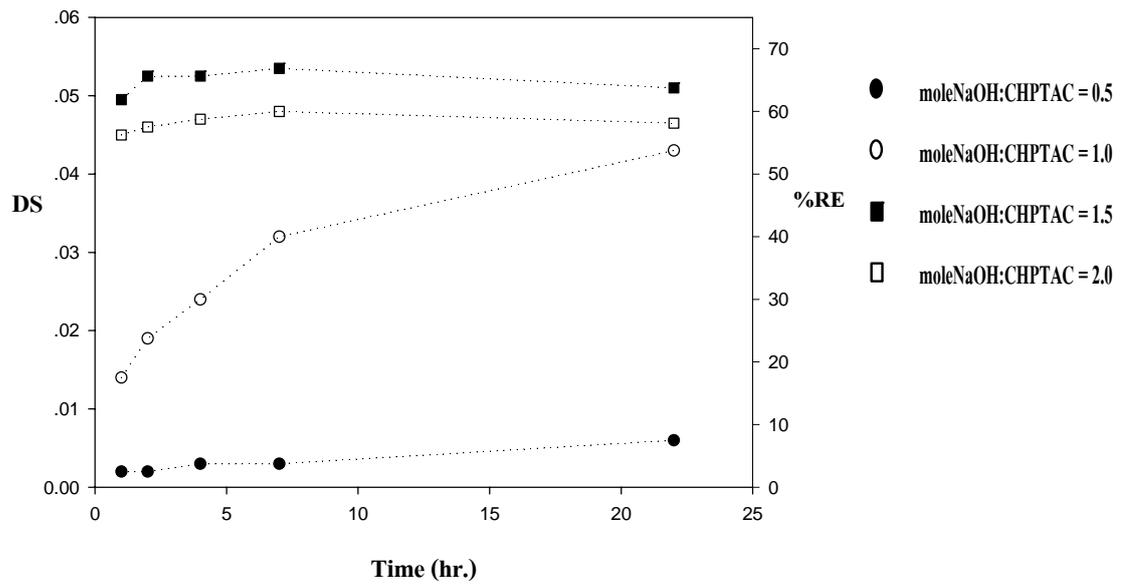
เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลซอเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้ง พบว่าที่อัตราส่วนโมล NaOH : CHPTAC ในระดับต่ำ (เท่ากับ 0.5 และ 1.0) การเพิ่มระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาจนถึง 22 ชั่วโมงจะทำให้ค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงขึ้น แต่ที่อัตราส่วนโมลของ NaOH : CHPTAC ในระดับที่สูงขึ้น (เท่ากับ 1.5 และ 2.0) พบว่าการเกิดปฏิกิริยามีอัตราเร็วค่อนข้างสูง ปฏิกิริยาส่วนใหญ่

จึงเกิดขึ้นในช่วง 4 ชั่วโมงแรก การเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาไม่มีผลทำให้ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ มีค่าระดับการแทนที่ (DS) สูงขึ้น จะเห็นว่าปริมาณค่าที่เพิ่มขึ้นมีบทบาทสำคัญในการช่วยเร่งอัตราเร็วของปฏิกิริยา อย่างไรก็ตามในสภาวะที่มีอัตราส่วนโมล CHPTAC : AGU ตั้งแต่ 0.04 ขึ้นไป พบว่าการใช้ค่าอัตราส่วนโมล NaOH : CHPTAC สูงกว่า 1.5 จะมีผลทำให้ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตได้ มีค่าระดับการแทนที่ (DS) ลดลง เนื่องจากปริมาณค่าที่มากเกินไปจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่ก่อให้เกิดสารประกอบ diol (ตามสมการที่ 4 ในภาพที่ 12) ส่งผลให้มีสาร CHPTAC ที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับแป้งเหลือน้อยลง ทำให้แป้งแคโทไอออนิกที่ได้มีค่า DS ลดลงด้วย

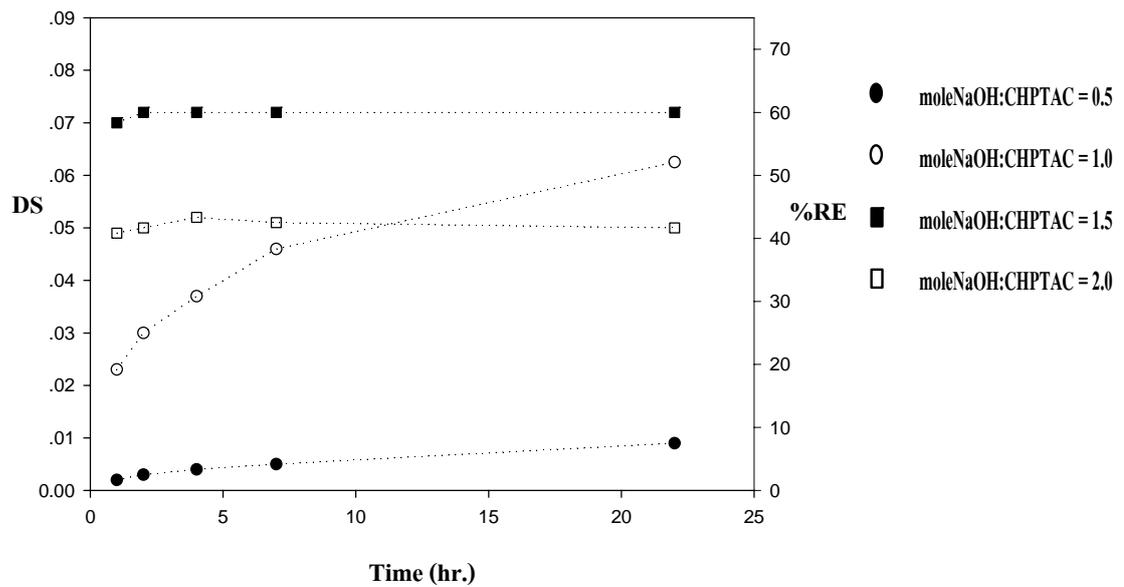
จากภาพที่ 16 แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตในสภาวะที่มีปริมาณ CHPTAC : AGU ในระดับต่างๆ ภายใต้สภาวะการผลิตแบบแห้ง (ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง) จะเห็นว่าอัตราส่วนโมลของสาร NaOH : CHPTAC ที่เหมาะสมในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่าเท่ากับ 2.0, 1.5, 1.5 และ 1.5 สำหรับปฏิกิริยาที่มีอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 ตามลำดับ



ภาพที่ 15 ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ในสถานะที่มีอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02 (รูป a), 0.04 (รูป b), 0.08 (รูป c) และ 0.12 (รูป d) และอัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างๆ

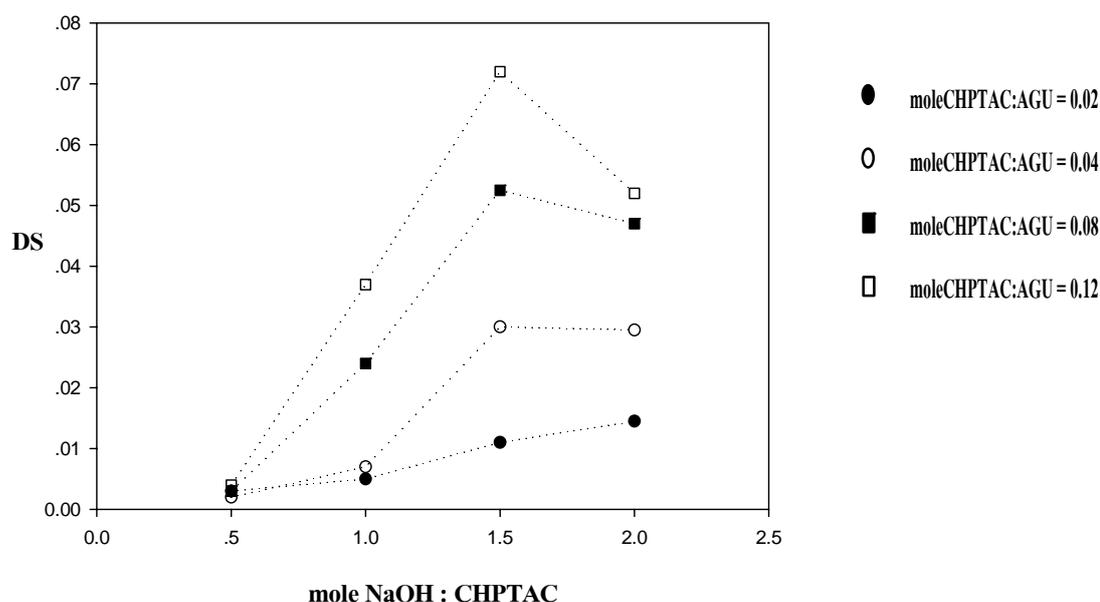


(c)



(d)

ภาพที่ 15 (ต่อ)



ภาพที่ 16 ค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ในสภาวะที่มีอัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 โดยใช้อัตราส่วนโมล NaOH ต่อ CHPTAC ที่ระดับต่างกัน ( ที่เวลาการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง)

### 1.3 การเปรียบเทียบสภาวะและประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซอ์เทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

การผลิตแป้งแคทไอออนิกสามารถทำได้ทั้งด้วยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง ซึ่งการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีแบบเปียก เป็นการทำปฏิกิริยาของสารเคมีกับเม็ดแป้งที่อยู่ในสภาพแขวนลอยโดยที่มีการเติมเกลือโซเดียมซัลเฟตลงในส่วนผสม เพื่อป้องกันการเกิดเจลในเซชัน ส่วนการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีการแบบแห้งเป็นการผลิตโดยการผสมสารละลายผสมของสารเคมีและต่างกับเม็ดแป้งแห้งโดยตรง โดยที่ไม่ใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา ซึ่งวิธีการผลิตที่แตกต่างกันนี้ส่งผลต่อค่าระดับการแทนที่ และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 แสดงค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอิลด้วยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง ในสถานะที่มีอัตราส่วนโมลของสาร NaOH : CHPTAC และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม (ซึ่งได้ข้อมูลจากผลการศึกษาในหัวข้อที่ 1.1 และ 1.2) เมื่อมีการใช้อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU ที่ระดับต่างๆ ( 0.02 ถึง 0.12) จากข้อมูลในตารางที่ 1 พบว่าที่ระดับอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU ที่เท่ากัน ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาจะมีค่าเท่ากัน แสดงว่าวิธีการผลิตที่แตกต่างกันไม่ได้มีผลต่อปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำปฏิกิริยา แต่ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสาร CHPTAC ที่มีอยู่ในระบบเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสมของวิธีทั้งสองจะมีความแตกต่างกันคือ การผลิตแบบเปียกใช้ออกซิเจนด้วยวิธีแบบเปียกจำเป็นต้องใช้เวลานานถึง 22 ชั่วโมง ในขณะที่การผลิตด้วยวิธีแบบแห้งใช้เวลาเพียง 4 ชั่วโมง การที่วิธีการผลิตแบบแห้งมีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าการผลิตด้วยวิธีแบบเปียกอาจจะเนื่องมาจากในสถานะการผลิตแบบแห้งมีการใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าจึงมีส่วนช่วยในการเร่งปฏิกิริยา เป็นผลให้ระยะเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาลดลง

**ตารางที่ 1** ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอิลที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ในสถานะที่มีอัตราส่วนโมล NaOH ต่อ CHPTAC และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาที่อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU ในระดับต่างๆ

mole CHPTAC:AGU	วิธีแบบเปียก				วิธีแบบแห้ง			
	mole	Time	DS	%RE	mole	Time	DS	%RE
	NaOH:CHPTAC	(hr.)			NaOH:CHPTAC	(hr.)		
0.02	2.0	22	0.013	65.0	2.0	4	0.015	75.0
0.04	1.5	22	0.026	65.0	1.5	4	0.030	75.0
0.08	1.5	22	0.053	66.3	1.5	4	0.053	65.6
0.12	1.5	22	0.077	64.2	1.5	4	0.072	60.0

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง จะเห็นว่าที่อัตราส่วนโมล CHPTAC : AGU เท่ากับ 0.02 และ 0.04 ประสิทธิภาพของปฏิกิริยา (%RE) ในการผลิตแป้งแคทไอออนิกด้วยวิธีแบบแห้งจะสูงกว่าวิธีแบบเปียก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีมาก่อน ที่ได้มีการให้คำอธิบายไว้ว่าในระบบแบบเปียกมีการใช้น้ำเป็นตัวกลางในการทำปฏิกิริยา ซึ่งน้ำที่มีอยู่ในระบบจะส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของสาร CHPTAC ทำให้เกิดสารประกอบ diol มากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาอีเทอร์ริฟิเคชัน (etherification) ระหว่างโมเลกุลแป้งกับสาร CHPTAC ลดลง (Hellwig *et al.*, 1992 ; Khalil and Dokki, 1998) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC : AGU ที่สูงขึ้น (0.08 และ 0.12) พบว่าค่าประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีแนวโน้มลดลงและมีแนวโน้มที่จะน้อยกว่าวิธีแบบเปียก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในการเข้าถึงโมเลกุลภายในเม็ดแป้งของสารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา กล่าวคือในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ซอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียก สารเคมีสามารถแทรกเข้าไปถึงโครงสร้างภายในเม็ดแป้งได้ จึงมีโอกาสเข้าถึงหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งได้มากกว่า แต่ในวิธีการผลิตแบบแห้ง สารเคมีจะเข้าทำปฏิกิริยาได้เฉพาะกับโมเลกุลบนพื้นผิวของเม็ดแป้งเท่านั้น ดังนั้นในกรณีที่มีปริมาณสาร CHPTAC สูงขึ้น แต่พื้นผิวของเม็ดแป้งมีค่าคงเดิมจึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพของการเข้าทำปฏิกิริยาของสาร CHPTAC ลดต่ำลงได้

## 2. การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง

จากการศึกษาผลของสภาวะในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ทั้งด้วยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง พบว่าเมื่อแปรค่าอัตราส่วน โมล CHPTAC : AGU ในช่วง 0.02 ถึง 0.12 จะสามารถผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.07 ดังนั้นจึงได้ทำการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่มีค่า DS เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.07 ด้วยวิธีการผลิตแบบเปียกและแบบแห้ง ภายใต้สภาวะดังที่แสดงในตารางที่ 2 แล้วจึงนำควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตได้ไปทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ต่อไป

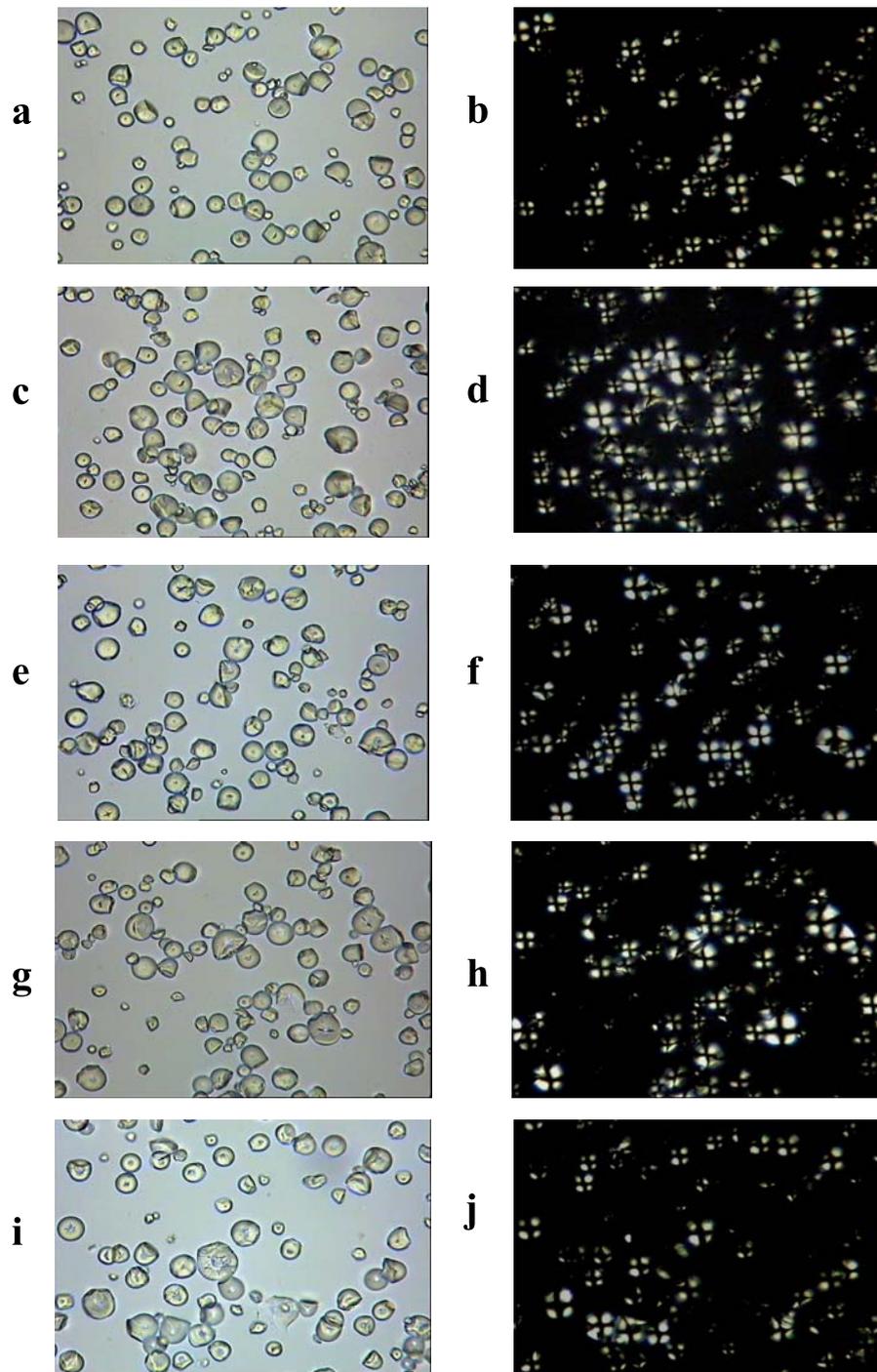
**ตารางที่ 2** สภาวะที่ใช้ในการเตรียมควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 ที่อัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU ในระดับต่างๆ ซึ่งนำมาใช้ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์

วิธีการผลิต แป้งแคทไอออนิก	ค่าระดับการ แทนที่ (DS)	อัตราส่วน โมลของ CHPTAC : AGU	อัตราส่วน โมลของ NaOH : CHPTAC	เวลา (ชั่วโมง)
แบบเปียก	0.01	0.02	3.0	22
	0.03	0.04	2.0	22
	0.05	0.08	2.0	22
	0.07	0.12	1.5	22
แบบแห้ง	0.01	0.02	2.0	4
	0.03	0.04	1.5	4
	0.05	0.08	1.5	4
	0.07	0.12	1.5	4

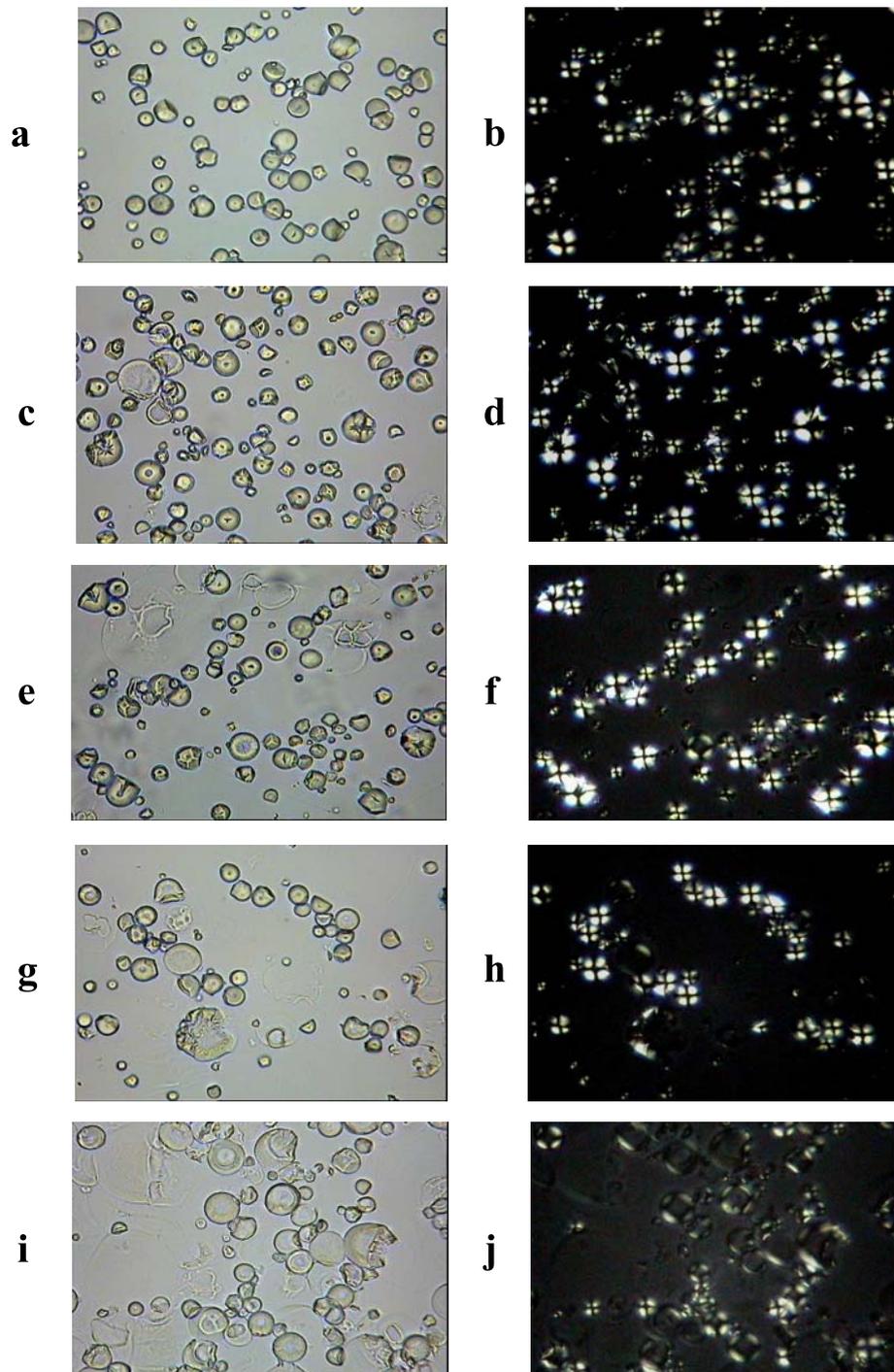
## 2.1 ลักษณะเม็ดแป้งที่ตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์

เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง มาตรวจสอบลักษณะเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดาและแสงโพลาไรซ์ที่กำลังขยาย 160 เท่า พบว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบมีลักษณะกลมมน มีปลายตัดด้านหนึ่ง (ภาพที่ 17a) และแสดงคุณสมบัติของการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ หรือที่เรียกว่า Birefringence อย่างชัดเจน (ภาพที่ 17b) ส่วนควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกส่วนใหญ่จะมีลักษณะเม็ดแป้งและความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) คล้ายคลึงกับแป้งมันสำปะหลังดิบ แต่อย่างไรก็ดีที่ค่าระดับการแทนที่สูงขึ้น ( $DS=0.07$ ) พบว่าลักษณะของเม็ดแป้งบางส่วนเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลแป้งถูกทำลายมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ลดลง (ดังภาพที่ 17j) เมื่อพิจารณาเม็ดแป้งของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง พบว่าลักษณะของเม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงและแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังดิบอย่างเห็นได้ชัด (ดังภาพที่ 18) ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะของเม็ดแป้งควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์บางส่วนภายใต้แสงธรรมดากเกิดการบวมพองมากกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ และจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าระดับการแทนที่สูงขึ้น และเมื่อนำมาส่องกล้องภายใต้แสงโพลาไรซ์พบว่าความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) จะน้อยกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ และจะยิ่งลดน้อยลงเมื่อค่าระดับการแทนที่สูงขึ้นของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะเม็ดแป้งของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากัน จะเห็นว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง มีลักษณะของเม็ดแป้งที่ถูกทำลายหรือเกิดความเสียหายมากกว่าทำให้ความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์น้อยกว่าของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีการแบบเปียก เนื่องจากการผลิตด้วยวิธีแบบแห้งเม็ดแป้งจะสัมผัสกับค่าและความร้อนโดยตรง เป็นผลทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งถูกทำลายได้มากกว่าวิธีการแบบเปียก



ภาพที่ 17 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบ (a, b) และควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 (c, d), 0.03 (e, f), 0.05 (g, h) และ 0.07 (i, j) เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา (ด้านซ้าย) และแสงโพลาไรซ์ (ด้านขวา) ที่กำลังขยาย 160 เท่า



**ภาพที่ 18** ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเมื่อดำเนินงานสำปะหลังดิบ (a, b) และควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 (c, d), 0.03 (e, f), 0.05 (g, h) และ 0.07 (i, j) เมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดา (ด้านซ้าย) และแสงโพลาไรซ์ (ด้านขวา) ที่กำลังขยาย 160 เท่า

## 2.2 ความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Cold Water Solubility)

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนเซชัน เนื่องจากภายในเม็ดแป้งประกอบไปด้วยโมเลกุลเส้นตรงของอะมิโลสและโมเลกุลเชิงกิ่งของอะมิโลเพคตินซึ่งมีการจัดเรียงตัวแบบรัศมี จึงมีส่วนที่เป็นเส้นสายของโมเลกุลมาเกิดพันธะไฮโดรเจนต่อกัน การละลายจึงต้องอาศัยความร้อนจากการหุงต้มในการแพร่กระจายและทำให้สามารถละลายในน้ำได้ เมื่อทำการตรวจสอบหาความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้งมันสำปะหลังดิบ พบว่าให้ค่าการละลายร้อยละ 1.37 ส่วนควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.07 ให้ค่าร้อยละการละลายเท่ากับ 1.16, 1.74, 2.14 และ 2.86 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าร้อยละการละลายของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 และค่าระดับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นแทบจะไม่ส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกนั้นเพิ่มสูงขึ้น ส่วนควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.07 ให้ค่าร้อยละการละลายเท่ากับ 4.49, 15.02, 21.87 และ 54.92 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับแป้งมันสำปะหลังดิบ และเมื่อค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์เพิ่มขึ้นก็ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของแป้งเพิ่มมากขึ้นด้วย

การผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ส่งผลต่อความสามารถในการละลายที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีความสามารถในการละลายน้ำเย็นต่ำกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งทุกค่าระดับการแทนที่ เนื่องจากการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้ง เป็นการผลิตในระบบที่มีน้ำน้อย เม็ดแป้งจึงสัมผัสกับค่าและความร้อนโดยตรง ทำให้โครงสร้างบริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งถูกทำลายได้มากกว่า ซึ่งมีผลต่อการจัดเรียงตัวของเม็ดแป้งโดยทำให้ความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลแป้งอ่อนแอลงจึงทำให้แป้งดูดซับน้ำได้มากขึ้น ความสามารถในการละลายน้ำเย็นจึงเพิ่มขึ้น

**ตารางที่ 3** ร้อยละการละลายน้ำเย็น (Cold Water Solubility) ของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่ค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07

ตัวอย่าง	ร้อยละการละลายน้ำเย็น (%CWS)
แป้งดิบ (Native)	1.37 ± 0.25 <sup>f</sup>
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก	
ที่มี DS = 0.01	1.16 ± 0.28 <sup>f</sup>
ที่มี DS = 0.03	1.74 ± 0.03 <sup>f</sup>
ที่มี DS = 0.05	2.14 ± 0.15 <sup>ef</sup>
ที่มี DS = 0.07	2.86 ± 0.15 <sup>c</sup>
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง	
ที่มี DS = 0.01	4.49 ± 0.59 <sup>d</sup>
ที่มี DS = 0.03	15.02 ± 0.08 <sup>c</sup>
ที่มี DS = 0.05	21.87 ± 0.75 <sup>b</sup>
ที่มี DS = 0.07	54.92 ± 0.85 <sup>a</sup>

หมายเหตุ อักษรต่างกัน หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

### 2.3 กำลังการพองตัวและการละลายของแป้ง

ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำมากเพียงพอ เมื่อแป้งได้รับความร้อนพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลของแป้งจะถูกทำลายลง เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเกิดการบวมพองและมีปริมาตรสูงขึ้น ซึ่งความสามารถในการดูดซึมน้ำของเม็ดแป้งที่อุณหภูมิหนึ่งๆ สามารถตรวจสอบได้ด้วยการวิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัว จากตารางที่ 4 และ 5 แสดงค่ากำลังการพองตัวของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าแป้งมันสำปะหลังดิบมีค่ากำลังการพองตัวสูงขึ้นตามค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจาก 3.49 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็น 53.31 ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และจากผลการทดลองจะเห็นว่าโดยทั่วไปแล้วควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่า

แป้งมันสำปะหลังดิบและมีแวนอีนจะสูงขึ้นตามค่าระดับการแทนที่ (DS) ที่เพิ่มขึ้นด้วย ทั้งนี้ เนื่องจากประจุบวกของหมู่ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมในโมเลกุลของแป้งแคโทไอออนิก มีแรงผลักระหว่างกัน ทำให้เม็ดแป้งมีความอ่อนแอลง จึงช่วยให้น้ำสามารถซึมผ่านเข้าสู่เม็ดแป้งได้ง่ายและเร็วขึ้น เม็ดแป้งจึงสามารถพองตัวได้มากขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีการต่างกัน พบว่าที่ค่าระดับการแทนที่ (DS) เดียวกัน ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีแวนอีนที่มีค่ากำลังการพองตัวสูงกว่าควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า นอกจากจำนวนประจุบวกในโมเลกุลแล้วสถานะที่ใช้ในการผลิตก็มีผลต่อสมบัติการพองตัวของเม็ดแป้งด้วย โดยในสถานะการผลิตแบบแห้งเม็ดแป้งมีการสัมผัสกับสารละลายต่างที่ค่อนข้างเข้มข้นโดยตรง จึงมีผลไปทำลายโครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งอ่อนแอลง จึงสามารถดูดซึมน้ำได้ง่ายและเร็วกว่าควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก และจากผลการทดลองในตารางที่ 4 และ 5 จะเห็นว่าควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่มีค่าระดับการแทนที่สูง (DS เท่ากับ 0.05 และ 0.07) จะไม่สามารถวิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัวได้ทั้งที่บางอุณหภูมิ (60, 70 และ 90 องศาเซลเซียส) ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งกลุ่มนี้มีประจุบวกในปริมาณที่สูงมาก ส่งผลให้เม็ดแป้งมีความอ่อนแอมาก เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจนถึงระดับหนึ่งเม็ดแป้งจึงแตกออก เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์จนไม่มีเม็ดแป้งที่บวมพองเหลืออยู่ ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่ากำลังการพองตัวได้

ค่าร้อยละการละลายของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งแสดงในตารางที่ 6 และ 7 ตามลำดับ พบว่าค่าการละลายได้ของแป้งมันสำปะหลังดิบจะมีแวนอีนคล้ายคลึงกับค่ากำลังการพองตัว คือจะมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง อย่างไรก็ตามสำหรับค่าร้อยละการละลายได้ของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟต พบว่าส่วนใหญ่แล้วไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งนี้เนื่องจากเม็ดแป้งของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตมีการบวมพองอย่างเต็มที่และมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้สูงมาก จึงไม่มีน้ำส่วนที่แยกออกจากเม็ดแป้งที่บวมพอง ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ค่าร้อยละการละลายของตัวอย่างเหล่านี้ได้ อย่างไรก็ตามที่ค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.05 และ 0.07 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการวิเคราะห์ถึงระดับหนึ่งพบว่าเม็ดแป้งที่บวมพองมีการแตกออกและเกิดการละลายได้อย่างสมบูรณ์ โดยพบว่าควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งจะเกิดการละลายได้อย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก แสดงให้เห็นว่าเม็ดแป้งควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาไรลซัลเฟตที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง

มีความอ่อนแอกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอ์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (เมื่อเปรียบเทียบกับที่ค่าระดับการแทนที่เท่ากัน)

**ตารางที่ 4** ค่ากำลังการพองตัวของอุณหภูมิต่างๆของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอ์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07

อุณหภูมิ (°C)	แป้งดิบ (Native)	ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอ์ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		0.01	0.03	0.05	0.07
50	3.49 ± 0.31	3.89 ± 0.71	5.84 ± 0.26	132.50 ± 0.84	145.04 ± 0.38
60	7.89 ± 0.29	46.31 ± 2.00	126.58 ± 0.64	141.69 ± 1.71	141.61 ± 0.30
70	33.5 ± 3.03	133.02 ± 0.73	135.30 ± 2.14	143.26 ± 0.37	n.d
90	53.31 ± 0.71	129.76 ± 1.70	144.50 ± 1.36	n.d	n.d

หมายเหตุ n.d = not detected หมายถึง สารละลายน้ำแป้งมีการละลายได้ 100% ไม่พบเกรนูลแป้งเหลืออยู่

**ตารางที่ 5** ค่ากำลังการพองตัวของอุณหภูมิต่างๆของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอ์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07

อุณหภูมิ (°C)	แป้งดิบ (Native)	ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอ์ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		0.01	0.03	0.05	0.07
50	3.49 ± 0.31	31.80 ± 3.03	130.14 ± 0.75	142.19 ± 0.43	143.58 ± 0.10
60	7.89 ± 0.29	133.31 ± 1.92	137.19 ± 0.75	144.51 ± 0.62	n.d
70	33.5 ± 3.03	139.83 ± 0.10	141.86 ± 0.39	n.d	n.d
90	53.31 ± 0.71	132.09 ± 0.62	142.41 ± 0.38	n.d	n.d

หมายเหตุ n.d = not detected หมายถึง สารละลายน้ำแป้งมีการละลายได้ 100% ไม่พบเกรนูลแป้งเหลืออยู่

**ตารางที่ 6** ค่าร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารี  
แอมโมเนียมสตาโรซอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ  
0.01 ถึง 0.07

อุณหภูมิ (°C)	แป้งดิบ (Native)	ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอร์ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		0.01	0.03	0.05	0.07
50	2.84 ± 0.21	5.46 ± 0.52	7.52 ± 0.92	n.d	n.d
60	4.89 ± 0.26	12.52 ± 2.51	n.d	n.d	n.d
70	15.99 ± 1.19	n.d	n.d	n.d	100.00 ± 0.00
90	27.93 ± 0.81	n.d.	n.d	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00

หมายเหตุ n.d = not detected หมายถึง ตัวอย่างน้ำแป้งที่ได้ไม่เกิดการแยกชั้นหลังการเหวี่ยงแยก จึง  
ไม่มีส่วนน้ำใสแยกออกจากส่วนของเม็ดแป้งที่บวมพอง

**ตารางที่ 7** ค่าร้อยละการละลายที่อุณหภูมิต่างๆของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารี  
แอมโมเนียมสตาโรซอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ  
0.01 ถึง 0.07

อุณหภูมิ (°C)	แป้งดิบ (Native)	ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรซอเทอร์ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		0.01	0.03	0.05	0.07
50	2.84 ± 0.21	19.95 ± 0.64	n.d	n.d	n.d
60	4.89 ± 0.26	n.d	n.d	n.d	100.00 ± 0.00
70	15.99 ± 1.19	n.d	n.d	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00
90	27.93 ± 0.81	n.d	n.d	100.00 ± 0.00	100.00 ± 0.00

หมายเหตุ n.d = not detected หมายถึง ตัวอย่างน้ำแป้งที่ได้ไม่เกิดการแยกชั้นหลังการเหวี่ยงแยก จึง  
ไม่มีส่วนน้ำใสแยกออกจากส่วนของเม็ดแป้งที่บวมพอง

## 2.4 ความหนืดของแป้ง

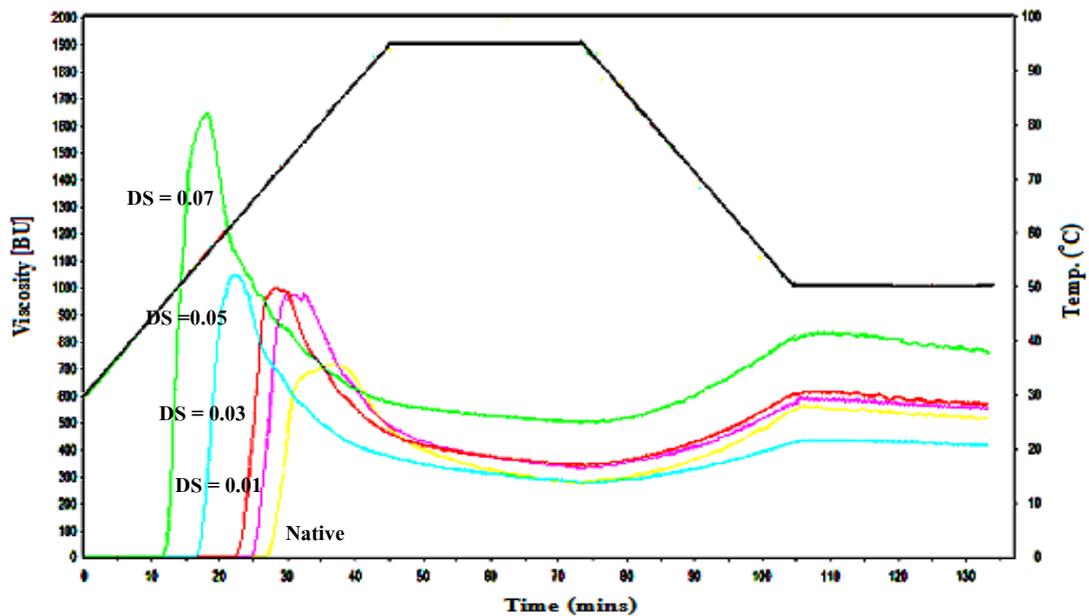
จากการวิเคราะห์ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตโดยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ แสดงผลดังตารางที่ 8 พบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีค่าอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืด (pasting temperature) ต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ และมีความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มากกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ ดังแสดงในภาพที่ 19 นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นก็จะทำให้ค่าอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืดมีค่าลดลง ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุดจะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าระดับการแทนที่ที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากการแทนที่ของหมู่ประจุบวกในโมเลกุลแป้งจะทำให้โครงสร้างทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) มีความอ่อนแอลง เนื่องจากการผลัดกันระหว่างหมู่ประจุบวก ทำให้การจับกันของโมเลกุลแป้งเป็นไปอย่างหลวมๆ เป็นผลให้การกระจายตัว (dispersion) ของเม็ดแป้งเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วในช่วงที่มีการให้ความร้อน ค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จึงมีค่าลดลง และการมีหมู่ประจุบวกในโมเลกุลแป้ง ทำให้โมเลกุลแป้งสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้นหรือมีค่ากำลังการพองตัวที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่ามากขึ้นด้วย

**ตารางที่ 8** ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืดของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ

ตัวอย่าง	A	B1	B2	C	D	E	F
	[°C]	[BU]	[°C]	[BU]	[BU]	[BU]	[BU]
แป้งมันสำปะหลังดิบ	69.2 <sup>a</sup>	716.0 <sup>g</sup>	84.9 <sup>a</sup>	525.0 <sup>d</sup>	278.5 <sup>h</sup>	536.0 <sup>d</sup>	513.0 <sup>b</sup>
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก							
DS = 0.01	65.9 <sup>ab</sup>	976.0 <sup>f</sup>	73.7 <sup>c</sup>	529.0 <sup>d</sup>	334.0 <sup>f</sup>	550.5 <sup>d</sup>	560.0 <sup>b</sup>
DS = 0.03	62.5 <sup>ba</sup>	999.5 <sup>ef</sup>	70.8 <sup>d</sup>	483.5 <sup>e</sup>	343.0 <sup>f</sup>	578.5 <sup>d</sup>	510.5 <sup>b</sup>
DS = 0.05	53.7 <sup>d</sup>	1067.5 <sup>e</sup>	61.8 <sup>e</sup>	410.0 <sup>f</sup>	303.0 <sup>g</sup>	443.0 <sup>e</sup>	421.5 <sup>c</sup>
DS = 0.07	46.3 <sup>e</sup>	1643.4 <sup>b</sup>	55.0 <sup>f</sup>	585.0 <sup>c</sup>	499.0 <sup>d</sup>	797.0 <sup>b</sup>	762.5 <sup>a</sup>
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง							
DS = 0.01	43.6 <sup>c</sup>	1620.0 <sup>bc</sup>	76.0 <sup>b</sup>	800.0 <sup>a</sup>	575.5 <sup>b</sup>	982.5 <sup>a</sup>	551.0 <sup>b</sup>
DS = 0.03	58.2 <sup>cd</sup>	1556.5 <sup>c</sup>	72.7 <sup>c</sup>	814.5 <sup>a</sup>	625.5 <sup>a</sup>	1033.0 <sup>a</sup>	563.0 <sup>b</sup>
DS = 0.05	37.5 <sup>f</sup>	1191.0 <sup>d</sup>	61.6 <sup>c</sup>	634.0 <sup>b</sup>	517.0 <sup>c</sup>	802.0 <sup>b</sup>	443.5 <sup>c</sup>
DS = 0.07	30.4 <sup>g</sup>	1872.5 <sup>a</sup>	44.8 <sup>g</sup>	536.0 <sup>d</sup>	466.0 <sup>c</sup>	705.0 <sup>c</sup>	762.5 <sup>a</sup>

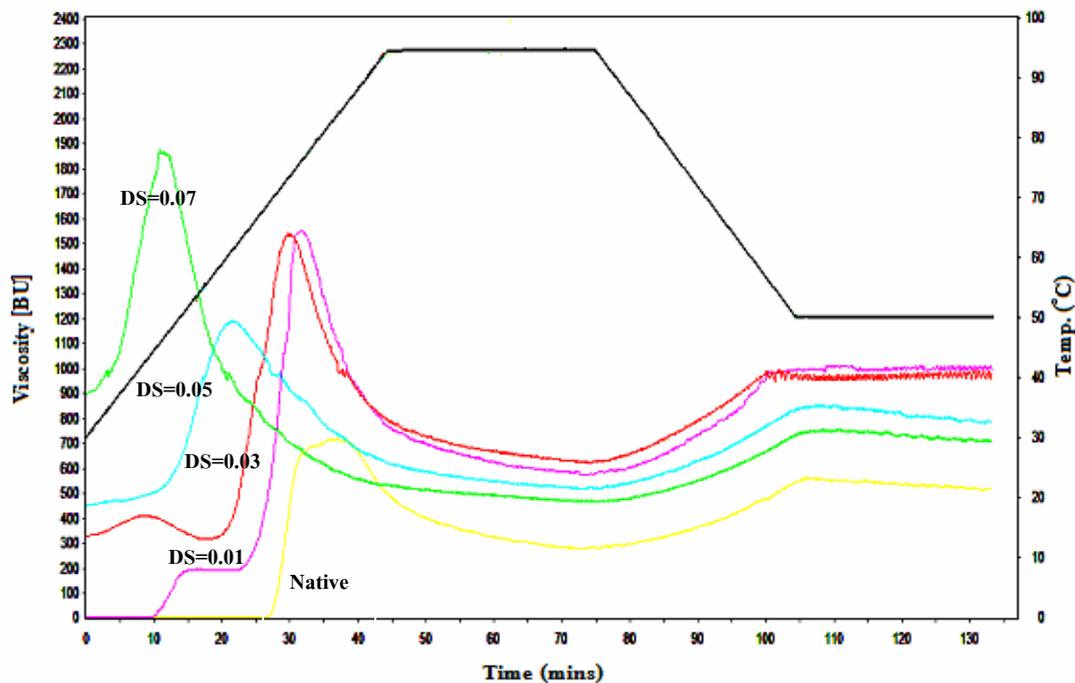
หมายเหตุ อักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ( $p < 0.05$ )

- [A] คือ อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาทีไนซ์ (°C)  
 [B1] คือ ความหนืดสูงสุด (BU)  
 [B2] คือ อุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด (BU)  
 [C] คือ ความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 95 °C (BU)  
 [D] คือ ความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 95 °C (BU)  
 [E] คือ ความหนืดเริ่มต้นที่อุณหภูมิ 50 °C (BU)  
 [F] คือ ความหนืดสุดท้ายที่อุณหภูมิ 50 °C (BU)



ภาพที่ 19 ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ที่ความเข้มข้นแป้ง 6% (w/w)

เมื่อพิจารณาสมบัติด้านความหนืดของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิต ด้วยวิธีแบบแห้ง พบว่ามีแนวโน้มที่คล้ายคลึงกับควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วย วิธีแบบเปียก คือค่าอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืด (pasting temperature) ต่ำกว่าของแป้ง มันสำปะหลังดิบ และมีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มากกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ แต่ สำหรับควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่เตรียมด้วยวิธีแบบแห้งนี้ พบว่าแป้งที่มีค่าระดับ การแทนที่ (DS) ตั้งแต่ 0.03 ขึ้นไปสารละลายแป้งจะเริ่มมีความหนืดตั้งแต่ที่อุณหภูมิห้องและ ความหนืดที่อุณหภูมิห้องนี้จะสูงขึ้นตามค่าระดับการแทนที่ (DS) ที่เพิ่มขึ้นด้วย (ภาพที่ 20) ผลที่ได้นี้สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการศึกษาความสามารถในการละลายน้ำเย็นของควอเทอนารี แอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่พบว่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นจะเพิ่ม มากขึ้นเมื่อค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่าสูงขึ้นและสอดคล้อง กับลักษณะของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวมากขึ้น เมื่อค่าระดับการแทนที่ของแป้งดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในสภาวะการผลิตแบบแห้ง เม็ดแป้งมีการสัมผัสกับด่างและความร้อนโดยตรง ทำให้ โครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดแป้งถูกทำลายไป แป้งจึงสามารถบวมพองและเกิดความหนืดได้ที่ อุณหภูมิน้ำเย็น



ภาพที่ 20 ลักษณะความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ที่ความเข้มข้นแป้ง 6% (w/w)

เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุดของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่เตรียมด้วยวิธีแบบแห้ง (ภาพที่ 20) จะเห็นว่า มีลักษณะที่แตกต่างจากควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่เตรียมด้วยวิธีแบบเปียก โดยถึงแม้ว่าทุกตัวอย่างของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์จะมีค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ แต่ค่าความหนืดสูงสุดไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าระดับการแทนที่ (DS) ของแป้งแคโทนิคที่ได้ ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่มีค่า DS ระดับปานกลาง (โดยเฉพาะที่ DS=0.05) จะมีค่าความหนืดสูงสุดต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับแป้งตัวอย่างนี้ ทำให้เกิดแป้งที่มีสมบัติที่หลากหลาย (heterogeneous) อยู่ร่วมกัน โดยมีแป้งบางส่วนที่อ่อนแอลงจึงสามารถดูดน้ำและบวมพองที่อุณหภูมิต่ำได้ ในขณะที่ยังมีแป้งอีกกลุ่มที่ค่อนข้างแข็งแรง จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น จึงจะเริ่มบวมพองและให้ความหนืดได้ ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้น อาจมีผลทำให้เม็ดแป้งในกลุ่มแรกซึ่งบวมพองเต็มที่แล้วเกิดการแตกออก ดังนั้นการที่มีเม็ดแป้งซึ่งมีสมบัติที่หลากหลายอยู่ร่วมกัน จึงทำให้ไม่สามารถบวมพองในช่วงอุณหภูมิเดียวกันได้ ทำให้ค่าความหนืดสูงสุดที่วิเคราะห์ได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น อย่างไรก็ตาม ปรากฏการณ์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่มีค่า DS เท่ากับ

0.07 อาจเป็นไปได้ว่าเม็ดแป้งส่วนใหญ่มีความอ่อนแอลงในระดับที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถบวมพองในช่วงอุณหภูมิเดียวกันได้ แป้งตัวอย่างนี้จึงมีค่าความหนืดสูงสุดที่สูงขึ้น

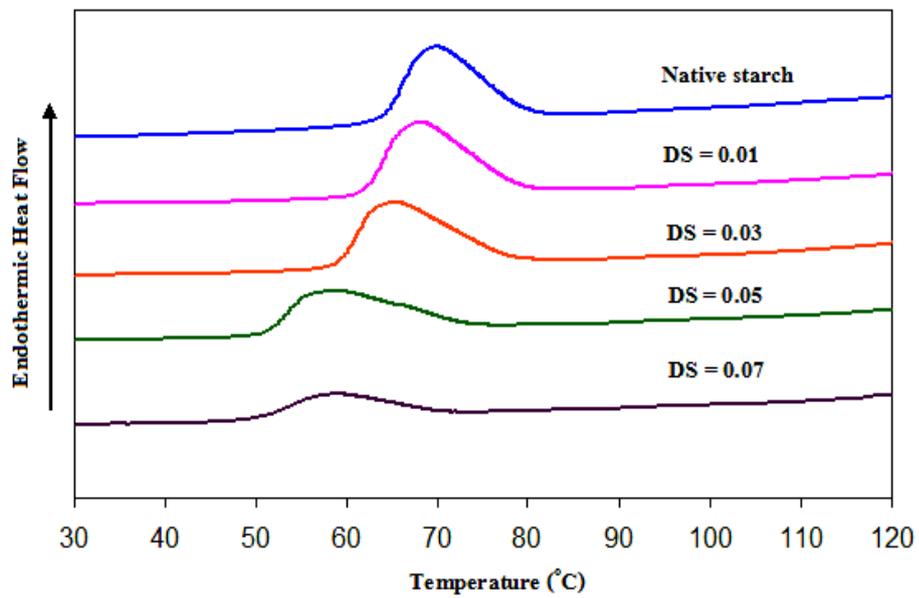
## 2.5 สมบัติการเกิดเจลลิตในเซชันของแป้ง วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

เมื่อนำแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ มาทดสอบสมบัติการเกิดเจลลิตในเซชัน โดยการใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature,  $T_o$ ) อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature,  $T_p$ ) และอุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature,  $T_c$ ) ในการเกิดเจลลิตในเซชันของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ทั้งที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งมีค่าต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ และจะมีค่าลดลงตามค่าระดับการแทนที่ (DS) ที่เพิ่มขึ้น (ดังแสดงในภาพที่ 21 และตารางที่ 9) ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลจากการตรวจสอบสมบัติด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ที่พบว่าอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตในเซชันของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่าต่ำกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ และจะลดต่ำลงอีกเมื่อค่าระดับการแทนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าเป็นผลจากการมีหมู่ประจุบวกในโมเลกุลแป้ง ทำให้เกิดแรงผลักระหว่างหมู่ประจุบวกที่ส่งผลทำให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดจับกันภายในโครงสร้างของอะมิโลเพคตินที่บริเวณโครงสร้างผลึก (crystalline region) เกาะกันอย่างหลวมๆ จึงมีผลทำให้โมเลกุลแป้งสามารถดูดซับน้ำได้ดี เกิดการพองตัวและการละลายได้ง่ายขึ้น ส่งผลทำให้แป้งเกิดการเจลลิตในเซชันได้ที่อุณหภูมิต่ำลง

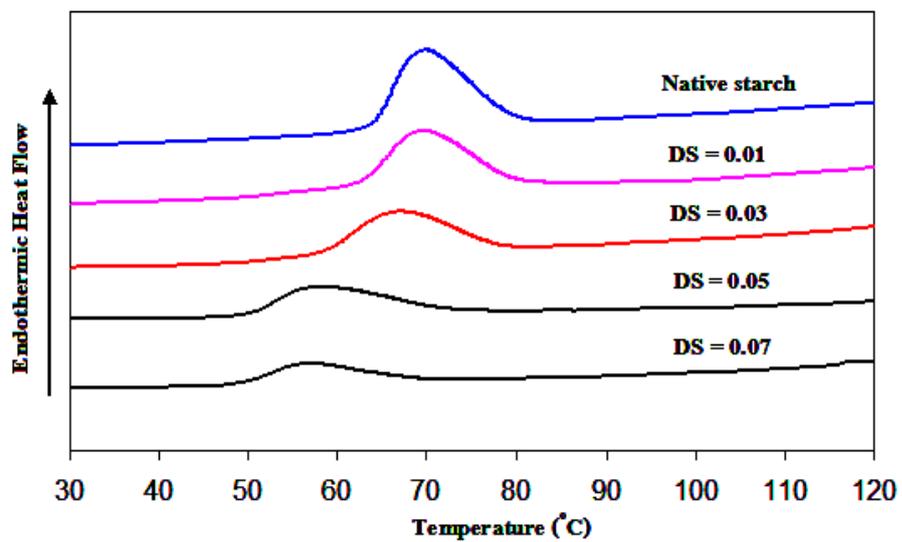
เมื่อพิจารณาที่ค่าพลังงานความร้อนในการทำให้เกิดเจลลิตในเซชัน พบว่าแป้งมันสำปะหลังดิบมีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 16.59 จูลต่อกรัม ส่วนควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.07 มีค่าพลังงานความร้อนเท่ากับ 16.96, 16.25, 13.66 และ 5.97 จูลต่อกรัม ตามลำดับ ดังที่แสดงในตารางที่ 9 จะเห็นว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) ต่ำ ( $\leq 0.03$ ) มีค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเกิดเจลลิตในเซชันไม่แตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังดิบ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการทำปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) ของเม็ดแป้ง และอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในส่วนโครงสร้างผลึก (crystalline region) ของเม็ดแป้งน้อยมากหรือไม่เกิดเลย อย่างไรก็ตามเมื่อควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์มีค่าระดับการแทนที่สูงขึ้น ( $DS \geq 0.05$ ) จะเห็นว่าค่าพลังงานความร้อน

ที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันมีค่าต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบและลดลงตามค่าระดับการแทนที่ที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าในสภาวะการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่มีค่าระดับการแทนที่สูงขึ้น นอกจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโครงสร้างอณูฐานแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในส่วนของโครงสร้างที่เป็นระเบียบของเม็ดแป้ง ทำให้โครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดแป้งถูกทำลายไป

จากตารางที่ 9 จะเห็นว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาทีโนเซชันต่ำกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (เมื่อเปรียบเทียบที่ค่าระดับการแทนที่เดียวกัน) แสดงว่าการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างผลึกในเม็ดแป้งและทำให้มีการสูญเสียโครงสร้างผลึกไปมากกว่าวิธีการผลิตแบบเปียก ทั้งนี้สอดคล้องกับเหตุผลที่ได้อธิบายไปแล้วว่าในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้งเม็ดแป้งได้สัมผัสกับสารละลายด่างที่ค่อนข้างเข้มข้นโดยตรง ทำให้โครงสร้างผลึกบางส่วนของเม็ดแป้งมีโอกาสถูกทำลายได้มากกว่า



(a)



(b)

ภาพที่ 21 ลักษณะเทอร์โมแกรมแสดงการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (รูป a) และวิธีแบบแห้ง (รูป b) ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

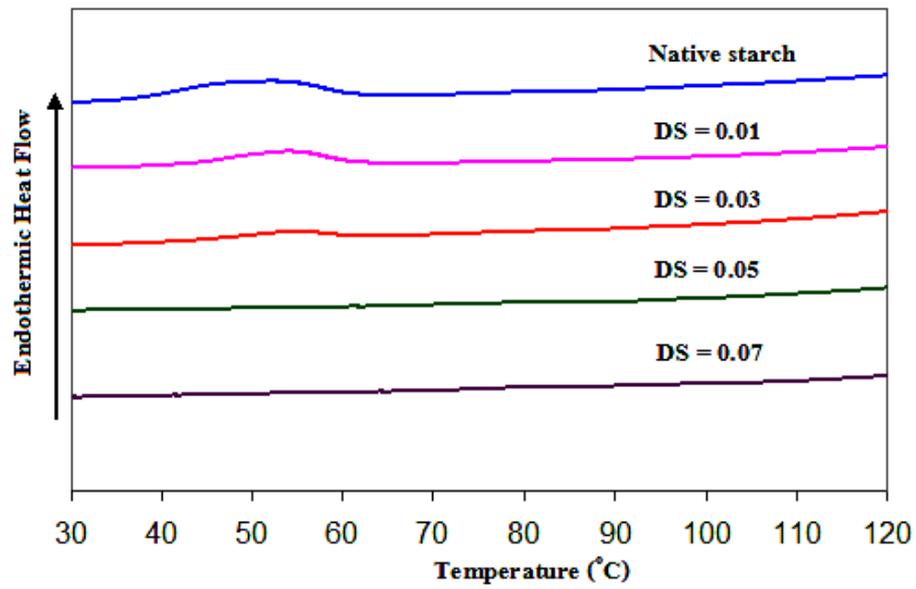
**ตารางที่ 9** อุณหภูมิและพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีโนเซชันของแป้งมันสำปะหลังดิบและ  
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่า  
ระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Sample	To (°C)	Tp (°C)	Tc (°C)	Enthalpy (J/g)
แป้งมันสำปะหลังดิบ	64.21 ± 0.03 <sup>a</sup>	69.85 ± 0.07 <sup>a</sup>	79.13 ± 0.64 <sup>ab</sup>	16.59 ± 0.14 <sup>a</sup>
วิธีแบบเปียก				
DS = 0.01	62.29 ± 0.06 <sup>b</sup>	68.20 ± 0.14 <sup>b</sup>	79.38 ± 0.42 <sup>ab</sup>	16.96 ± 0.22 <sup>a</sup>
DS = 0.03	59.30 ± 0.00 <sup>c</sup>	65.35 ± 0.21 <sup>d</sup>	78.04 ± 0.11 <sup>b</sup>	16.25 ± 0.11 <sup>a</sup>
DS = 0.05	51.78 ± 0.39 <sup>e</sup>	58.35 ± 0.07 <sup>e</sup>	74.16 ± 1.17 <sup>c</sup>	13.66 ± 0.40 <sup>b</sup>
DS = 0.07	50.50 ± 0.48 <sup>f</sup>	58.20 ± 0.42 <sup>e</sup>	68.97 ± 0.35 <sup>e</sup>	5.97 ± 0.15 <sup>e</sup>
วิธีการแบบแห้ง				
DS = 0.01	62.59 ± 0.03 <sup>b</sup>	69.55 ± 0.07 <sup>a</sup>	79.75 ± 0.06 <sup>a</sup>	13.36 ± 0.33 <sup>b</sup>
DS = 0.03	58.29 ± 0.21 <sup>d</sup>	66.85 ± 0.21 <sup>c</sup>	78.54 ± 0.43 <sup>ab</sup>	11.32 ± 0.30 <sup>c</sup>
DS = 0.05	50.22 ± 0.16 <sup>f</sup>	58.05 ± 0.07 <sup>e</sup>	72.66 ± 0.02 <sup>d</sup>	8.48 ± 0.00 <sup>d</sup>
DS = 0.07	49.18 ± 0.13 <sup>e</sup>	56.45 ± 0.49 <sup>f</sup>	67.35 ± 1.18 <sup>f</sup>	4.68 ± 0.59 <sup>f</sup>

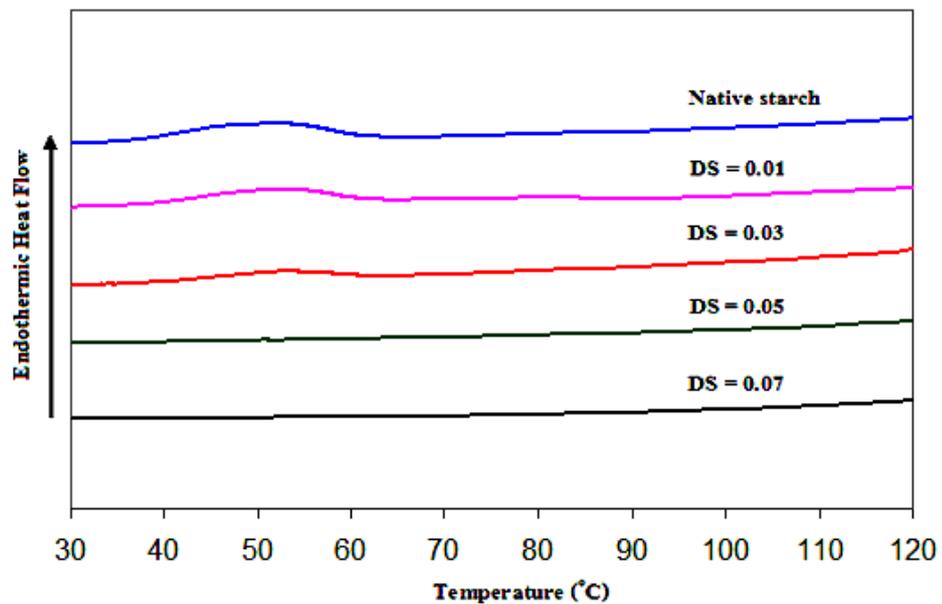
หมายเหตุ อักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ  
( $p < 0.05$ )

## 2.6 สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

เมื่อนำ pan ตัวอย่างแป้งที่ผ่านการวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาทีโนเซชันด้วยเครื่อง DSC (จากหัวข้อ 2.5) มาเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงนำ pan ตัวอย่างข้างต้นมาวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยทดสอบในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ผลที่ได้แสดงดังในภาพที่ 22 และตารางที่ 10



(a)



(b)

ภาพที่ 22 ลักษณะเทอร์โมแกรมของเจลแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ช อีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (รูป a) และวิธีแบบแห้ง (รูป b) ที่มีค่าระดับการแทนที่ เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 หลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

**ตารางที่ 10** อุณหภูมิและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำลายโครงสร้างผลึกในเจลแป้ง  
มันสำปะหลังดิบและควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก  
และแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่ (DS) เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07 หลังการเก็บรักษาที่  
อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน เมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC

Sample	To (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)	Enthalpy (J/g)
แป้งมันสำปะหลังดิบ	37.02 ± 1.26 <sup>c</sup>	50.65 ± 0.21 <sup>c</sup>	61.48 ± 0.05 <sup>a</sup>	6.32 ± 0.25 <sup>a</sup>
วิธีแบบเปียก				
DS = 0.01	42.73 ± 1.02 <sup>a</sup>	54.05 ± 0.35 <sup>a</sup>	61.98 ± 0.83 <sup>a</sup>	3.39 ± 0.13 <sup>c</sup>
DS = 0.03	44.65 ± 0.87 <sup>a</sup>	54.05 ± 0.49 <sup>a</sup>	61.00 ± 0.18 <sup>a</sup>	1.57 ± 0.05 <sup>c</sup>
DS = 0.05	n.d	n.d	n.d	n.d
DS = 0.07	n.d	n.d	n.d	n.d
วิธีแบบแห้ง				
DS = 0.01	39.27 ± 0.53 <sup>b</sup>	52.95 ± 0.49 <sup>b</sup>	61.87 ± 0.32 <sup>a</sup>	4.23 ± 0.37 <sup>b</sup>
DS = 0.03	39.57 ± 0.07 <sup>b</sup>	53.45 ± 0.35 <sup>ab</sup>	61.57 ± 0.72 <sup>a</sup>	2.26 ± 0.32 <sup>d</sup>
DS = 0.05	n.d	n.d	n.d	n.d
DS = 0.07	n.d	n.d	n.d	n.d

หมายเหตุ 1. อักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ  
( $p < 0.05$ )

2. n.d = not detected หมายถึงไม่เกิดการคืนตัวของโมเลกุลหลังการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ  
4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน

ค่าพลังงานความร้อนที่ใช้ในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกของแป้งเปียกที่ผ่านการ  
เก็บรักษาในสภาพเย็น (retrogradation enthalpy,  $\Delta H_r$ ) ซึ่งวิเคราะห์ได้จากเครื่อง DSC เป็นค่าที่  
แสดงระดับของการกลับมาจัดเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลอะมิโลเพกทินในตัวอย่างแป้ง ซึ่งจากผล  
การทดลองจะเห็นว่าควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์มีค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมละลาย  
โครงสร้างผลึกของโมเลกุลอะมิโลเพกทินน้อยกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ และมีค่าลดลงตามค่า  
ระดับการแทนที่ที่สูงขึ้น และเมื่อควอเทอร์นารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์มีค่าระดับการแทนที่สูง  
ตั้งแต่ 0.05 ขึ้นไป พบว่าไม่ปรากฏผลของการหลอมละลายโครงสร้างผลึกของโมเลกุล  
อะมิโลเพกทิน เนื่องจากหมู่ประจุบวกสามารถทำหน้าที่ในการขัดขวางการกลับมาจัดเรียงตัวกัน  
ใหม่ของโมเลกุลแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เมื่อเปรียบเทียบควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง พบว่าที่ค่าระดับการแทนที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.03 ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง มีค่าพลังงานในการหลอมละลายโครงสร้างผลึกของโมเลกุลแข็งสูงกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก (ตารางที่ 10) แสดงว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชันสูงกว่า ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะการกระจายตัวของหมู่ประจุบวกในโมเลกุลแข็งที่ต่างกัน ในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ด้วยวิธีแบบเปียก สารเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยาภายในเม็ดแข็งได้อย่างทั่วถึง หมู่ประจุบวกจึงมีการกระจายตัวในโมเลกุลแข็งอย่างสม่ำเสมอ แต่ในควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ปฏิกิริยาส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่บริเวณผิวรอบนอกของเม็ดแข็ง การกระจายตัวของหมู่ประจุบวกจึงอาจจะไม่ทั่วถึงและเกิดขึ้นเฉพาะบางส่วนของโมเลกุลแข็ง ดังนั้น โอกาสที่โมเลกุลแข็งจะกลับมาจับเรียงตัวกันใหม่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งจึงมีมากกว่าของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก เป็นผลทำให้ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งต้องใช้พลังงานความร้อนในการทำละลายโครงสร้างผลึกสูงกว่าของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก

## 2.7 ความใสของแป้งเปียก(Paste Clarity)

ค่าความใสจะแปรผันไปตามแหล่งของแป้งและเปลี่ยนแปลงไปเมื่อเม็ดแป้งถูกตัดแปรด้วยวิธีทางเคมี ซึ่งค่าดังกล่าวสามารถวัดได้จากค่าการส่องผ่านแสงของน้ำแป้งสุกเข้มข้นร้อยละ 1 ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร จากตารางที่ 11 แสดงค่าความใส (% แสงส่องผ่าน) ของแป้งเปียกที่เตรียมจากควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและวิธีแบบแห้ง เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ จะเห็นว่าแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังดิบมีความใสอยู่ในระดับปานกลางเท่านั้น (ค่าแสงส่องผ่านเท่ากับ 59.5%) ทั้งนี้ Craig *et al.* (1989) ได้อธิบายไว้ว่าถึงแม้เม็ดแป้งมันสำปะหลังดิบจะแตกออกและเกิดการกระจายตัวอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิน้ำเดือดของสภาวะที่ใช้ในการเตรียมแป้งเปียก แต่เมื่อเย็นตัวลงโมเลกุลแป้งมีการกลับมาสร้างพันธะระหว่างกัน เกิดเป็น junction zone ซึ่งจะปลดปล่อยปริมาณแสงส่องผ่านลงได้

จากผลการทดลองจะเห็นว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ส่วนใหญ่จะมีความใสสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ (ยกเว้นควอเทอนารีแอมโมเนียมสตา์ซอ์เทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01) และค่าความใสจะสูงขึ้นตาม

ค่าระดับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าแรงผลักดันระหว่างประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันใน โมเลกุลแป้งแคทไอออนิก ช่วยลดการกลับมาสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งได้ ซึ่ง ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นตามปริมาณประจุบวกที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าร้อยละการส่องผ่านแสง ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลิซอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีค่าสูงกว่าของควอเทอนารี แอมโมเนียมสตาบิลิซอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 11 แสดงให้เห็นว่าโมเลกุล ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลิซอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีแนวโน้มในการกลับมาเกิด พันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้มากกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลิซอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบ เปียก ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลเพกทินด้วยเครื่อง DSC ซึ่งอาจเนื่องมาจากลักษณะการกระจายตัวของหมู่ประจุบวกที่เกิดขึ้นในเม็ดแป้งตามที่ได้ อธิบายไปแล้ว

ในกรณีของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาบิลิซอร์ที่ผลิตด้วยวิธีการแบบแห้งที่มีค่า ระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 พบว่ามีค่าการส่องผ่านแสงของแป้งเปียกต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (side reaction) ดังที่ Radosta *et al.* (2004) รายงาน ว่าสาร CHPTAC ในรูปคลอโรไฮไดริน (chlorohydrin) และสารประกอบ diol ที่เกิดจากปฏิกิริยา ข้างเคียง (ตามสมการที่ 4 ในภาพที่ 12) อาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเชื่อมข้าม (crosslink) ระหว่างโมเลกุล แป้งได้ ซึ่งปฏิกิริยานี้จะเกิดได้ดีในสภาวะการผลิตแบบแห้ง ทำให้มีการจับตัวกันระหว่างโมเลกุล แป้งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความใสของแป้งมีค่าลดลงได้ ทั้งนี้พฤติกรรมดังกล่าวจะสังเกตเห็นได้ชัดเจน ในกรณีที่แป้งคัดแปรที่มีปริมาณประจุบวกอยู่ค่อนข้างน้อย

**ตารางที่ 11** ค่าร้อยละการส่องผ่านแสง (%Transmittance) ของสารละลายน้ำแป้งความเข้มข้นร้อยละ 1 ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01 ถึง 0.07

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการส่องผ่านแสง (%T)
แป้งดิบ	59.5 <sup>h</sup>
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก	
ที่มี DS = 0.01	66.5 <sup>f</sup>
ที่มี DS = 0.03	67.7 <sup>g</sup>
ที่มี DS = 0.05	84.0 <sup>b</sup>
ที่มี DS = 0.07	86.6 <sup>a</sup>
ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง	
ที่มี DS = 0.01	52.8 <sup>i</sup>
ที่มี DS = 0.03	63.3 <sup>g</sup>
ที่มี DS = 0.05	76.2 <sup>d</sup>
ที่มี DS = 0.07	78.9 <sup>c</sup>

หมายเหตุ อักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

1. ในการศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียก พบว่า เมื่ออัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU อัตราส่วนโมลของสาร NaOH ต่อ CHPTAC และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) มีแนวโน้มที่สูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณต่างจนถึงระดับหนึ่งจะมีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าลดลง ทั้งนี้สภาวะในการผลิตที่ให้ค่าระดับการแทนที่สูงที่สุด คือที่อัตราส่วนโมลของสาร NaOH ต่อ CHPTAC เท่ากับ 2.0-3.0, 1.5-2.0, 1.5-2.0 และ 1.5 สำหรับการผลิตที่มีอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 ตามลำดับ และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 22 ชั่วโมง

2. ในการศึกษาผลของสภาวะที่ใช้ในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้ง พบว่า เมื่ออัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU อัตราส่วนโมลของสาร NaOH ต่อ CHPTAC และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าระดับการแทนที่ (DS) และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) มีแนวโน้มที่สูงขึ้น และการเพิ่มปริมาณต่างยังช่วยทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาลดลง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณต่างจนถึงระดับหนึ่งจะมีผลทำให้ค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตได้มีค่าลดลง ซึ่งจากการทดลองพบว่าสภาวะในการผลิตที่ให้ค่าระดับการแทนที่สูงที่สุด คือที่อัตราส่วนโมลของสาร NaOH ต่อ CHPTAC เท่ากับ 2.0, 1.5, 1.5 และ 1.5 สำหรับการผลิตที่มีอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12 ตามลำดับ และใช้ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 4 ชั่วโมง

3. ในการศึกษาเปรียบเทียบสภาวะและประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง พบว่าปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ ที่ผลิตด้วยวิธีการทั้งสองนี้มีค่าเท่ากัน เมื่อใช้อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU ในระดับที่เท่ากัน แต่แตกต่างกันตรงที่ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ที่พบว่าการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกต้องใช้เวลานานถึง 22 ชั่วโมง ในขณะที่การผลิตด้วยวิธีแบบแห้งใช้เวลา

เพียง 4 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการผลิตแบบแห้งมีอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยาสูงกว่าวิธีแบบเปียก

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของปฏิกิริยาในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง พบว่าที่อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU ที่ระดับต่ำ (เท่ากับ 0.02 และ 0.04) ประสิทธิภาพของปฏิกิริยาในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้งจะสูงกว่าวิธีแบบเปียก แต่ที่อัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU ที่สูงขึ้น (เท่ากับ 0.08 และ 0.12) กลับพบว่าค่าประสิทธิภาพของปฏิกิริยาในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้งมีแนวโน้มลดลงและมีแนวโน้มที่จะน้อยกว่าของวิธีแบบเปียกด้วย

4. ในการศึกษาผลของสภาวะในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ทั้งด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง พบว่าเมื่อแปรค่าอัตราส่วนโมลของสาร CHPTAC ต่อ AGU ในช่วง 0.02 ถึง 0.12 จะสามารถผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่มีค่าระดับการแทนที่อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.07 จากนั้นนำควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่มีค่าระดับการแทนที่เท่ากับ 0.01, 0.03, 0.05 และ 0.07 ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งมาทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

4.1 ลักษณะของเม็ดแป้งและความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกคล้ายคลึงกับแป้งมันสำปะหลังดิบ ส่วนลักษณะเม็ดแป้งของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งนั้นมีความแตกต่างจากแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก โดยเม็ดแป้งของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งจะเกิดการบวมพองมากกว่าและจะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่าระดับการแทนที่ของแป้งสูงขึ้น และเมื่อนำมาส่องภายใต้แสงโพลาไรซ์ พบว่าความสามารถในการเบี่ยงเบนระนาบแสงโพลาไรซ์จะน้อยกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอียเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก และจะยิ่งลดน้อยลงเมื่อค่าระดับการแทนที่ของแป้งสูงขึ้น

4.2 ความสามารถในการละลายน้ำเย็นของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีค่าใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังดิบ และค่าระดับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ไม่ส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำเย็นมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีความสามารถในการละลายน้ำเย็นมากกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบและควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก และค่าความสามารถในการละลายน้ำเย็นจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่าระดับการแทนที่ของแป้งมีค่าสูงขึ้น

4.3 ในการศึกษาค่ากำลังการพองตัวและการละลายของแป้ง พบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ทั้งที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง มีความสามารถในการพองตัวและการละลายมากกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ และจะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าระดับการแทนที่ของแป้งที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีการที่ต่างกัน พบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีค่ากำลังการพองตัวและความสามารถในการละลายมากกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก เนื่องจากเม็ดแป้งของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีความอ่อนแอกว่าของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก

4.4 การวิเคราะห์ค่าความหนืดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ พบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ทั้งที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง มีค่าอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืด (pasting temperature) ลดลง และค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ และค่าระดับการแทนที่ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มมีความหนืดมีค่าลดลง ส่วนค่าความหนืดสูงสุดก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สำหรับควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีความแตกต่างจากควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก คือสารละลายแป้งจะเริ่มมีความหนืดตั้งแต่อุณหภูมิห้อง เมื่อแป้งแคทไอออนิกดังกล่าวมีค่าระดับการแทนที่ตั้งแต่ 0.03 ขึ้นไป และความหนืดนี้ก็จะเพิ่มสูงขึ้นตามค่าระดับการแทนที่ที่มากขึ้น

4.5 ในการศึกษาสมบัติการเกิดเจลลาทีนเซชันของแป้ง ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter พบว่าการแทนที่ของหมู่ประจุบวกในโมเลกุลแป้ง ทำให้อุณหภูมิและพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้แป้งเกิดเจลลาทีนเซชันลดลง และเมื่อค่าระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นค่าอุณหภูมิและพลังงานความร้อนที่ใช้ก็จะลดต่ำลง เนื่องจากแรงผลักระหว่างหมู่ประจุบวก

ทำให้พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแข็งอ่อนแอลง มีผลทำให้แข็งเกิดเจลาทิโนเซชันได้ที่อุณหภูมิต่ำลง และพบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งมีค่าพลังงานความร้อนที่ต้องใช้ในการทำให้แข็งเกิดเจลาทิโนเซชันต่ำกว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก เนื่องจากโครงสร้างของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้งถูกทำลายมากกว่าวิธีแบบเปียก

4.6 ในการศึกษาสมบัติการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง ที่ผ่านการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน ด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter พบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ทั้งที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ใช้พลังงานความร้อนในการทำลายโครงสร้างผลึกของโมเลกุลแป้งต่ำกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ แสดงให้เห็นว่าโอกาสที่โมเลกุลของแป้งจะกลับมาจับเรียงตัวกันใหม่หรือเกิดรีโทรเกรเดชันของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์น้อยกว่าของแป้งมันสำปะหลังดิบ เพราะหมู่ประจุบวกที่อยู่ในโมเลกุลควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์เป็นตัวขัดขวางการกลับมาจับเรียงตัวกันใหม่ของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้กัน และยังพบว่าเมื่อค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ทั้งที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้การเกิดรีโทรเกรเดชันลดน้อยลง เป็นผลให้พลังงานความร้อนที่ใช้มีค่าต่ำลงจนกระทั่งไม่พบการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกใช้พลังงานในการทำลายโครงสร้างผลึกของโมเลกุลแป้งน้อยกว่าของวิธีการแบบแห้ง

4.7 ค่าการส่องผ่านแสงของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ทั้งที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้งมีค่าสูงกว่าแป้งมันสำปะหลังดิบ เพราะแรงผลักรันระหว่างประจุบวกของหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลแป้งแคทไอออนิก ช่วยลดการกลับมาสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งได้ ทำให้ความใสของแป้งเปียกมีค่าเพิ่มขึ้น แสงจึงส่องผ่านตัวอย่างแป้งได้มากขึ้นและพบว่าเมื่อค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์สูงขึ้น ก็จะทำให้ค่าการส่องผ่านแสงของแป้งเปียกมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าการส่องผ่านแสงของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียกมีค่าสูงกว่าของวิธีแบบแห้ง

### ข้อเสนอแนะ

1. การผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์ด้วยวิธีแบบเปียกและแบบแห้ง ส่งผลให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ต่างกัน ซึ่งถ้ามีการวิเคราะห์หลักขณะโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้ง โดยเครื่อง X-ray diffractometer ด้วย ก็จะทำให้ทราบว่าการผลิตที่ต่างกันส่งผลต่อลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกอย่างไร ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจส่งผลทำให้คุณสมบัติของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์ที่ผลิตได้แตกต่างกัน

2. ในการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์มีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อสีของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์ที่ได้ ดังนั้นการวัดค่าความขาวของแป้งก็จะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของสีแป้งได้ ซึ่งจะช่วยในการพิจารณาสถานะที่ใช้ในการผลิตและการนำไปใช้ที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น

3. การผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์ด้วยวิธีแบบแห้ง สามารถใช้อุณหภูมิในการผลิตที่สูงกว่าวิธีแบบเปียกได้ ซึ่งถ้าทำการผลิตที่อุณหภูมิสูงขึ้นอาจจะทำให้ควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์ที่ได้มีค่าระดับการแทนที่และประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้

4. ปริมาณน้ำในระบบที่ใช้ในการผลิต พบว่าปริมาณน้ำที่ไม่เหมาะสมอาจจะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงและทำให้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สูงเกินไป ทำให้การทำปฏิกิริยาระหว่างแป้งกับสารเคมีเกิดขึ้นอย่างไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ค่าระดับการแทนที่ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาโรอ์เทอร์ลดต่ำลงได้

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์. 2543. การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยเอนไซม์พุลูลานเนสเพื่อใช้ในการทำแผ่นฟิล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศูนย์สารสนเทศการเกษตร สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักนโยบายและแผนพัฒนาการเกษตร. 2549. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตร ปี 2549. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. แหล่งที่มา: [http://www.oae.go.th/oae\\_website/](http://www.oae.go.th/oae_website/), 7 มกราคม 2551.
- เอกพันธ์ แก้วมณีชัย. 2538. การดัดแปรสตาร์ชในแป้งมันสำปะหลังและข้าวด้วยวิธีเอซิทิลเลชัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2521. มาตรฐานผลิตภัณฑ์มันสำปะหลัง. มอก. 274-2521.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. มอก. 1073-2535.
- American Association of Cereal Chemists (AACC). 1980. **The amylograph handbook**, The American Association of Cereal Chemists. Minnesota.
- Chen, F., Y. Long, L. Xie and D. Liu. 1996. Cationic corn starch prepared by dry process and its use in paper making, pp. 57-62. *In Proceeding of The International Symposium* . Nanning, Guangxi, China.
- Chen, J. and J. Jane. 1994. Preparation of granular cold-water-soluble starches by alcoholic-alkaline treatment. **Cereal Chemistry** 71 (6): 618-622.

- Craig, A.S., C. Maningat, A. Seib and R.C. Hosney. 1989. Starch paste clarity. **Cereal Chemistry** 66 (3): 173-182.
- Han, H.L. and F.W. Sosulski. 1998. Cationization of potato and tapioca starches using an aqueous alcoholic-alkaline process. **Starch/Starke** 50: 487-492.
- Harley, D.H., T.H. Bernard and J.E. Adrian. 1977. **Method of Making Nongelling Aqueous Cationic Dialdehyde Starch Compositions**. U.S. Patent 4,001,032.
- Heinze, T., V. Haack and S. Rensing. 2004. Starch derivatives of high degree of functionalization. 7. Preparation of cationic 2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride starches. **Starch/Starke** 56: 288-296.
- Hellwig, G., D. Bischoff and A. Rubo. 1992. Production of cationic starch ethers using an improved dry process. **Starch/Starke** 44: 69-74.
- Jarowenko, W. and D.B. Solarek. 1981. **Pollution-Free Cationization of Starch**. U.S. Patent 4,281,109.
- Jin, S., Y. Li, J. He, L. He, J. Chen and C. Ma. 2001. Preparation of cationic starch by dry-method process, pp. 33-40. *In* **Proceeding of The 1<sup>st</sup> National Conference on Starch Technology**. Queen Sirikit National Convention Center, Bangkok, Thailand.
- Kerr, R.W. 1950. **Chemistry and Industry of Starch**. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press Inc., New York.
- Khalil, M.I. and S.F. Dokki. 1998. Preparation of some cationic starches using the dry process. **Starch/Starke** 50: 267-271.

- Kim, Y.S., D.P. Wiesenborn, P.H. Orr and L.A. Grant. 1995. Differential scanning calorimetry. **J. Food Sci.** 60 (5): 1060-1065.
- Knight, J.W. 1969. **The Starch Industry.** Pergamon Press Ltd., London.
- Kweon, M.R., F.W. Sosulski and H.S. Han. 1997. Effect of aqueous ethanol cationization on functional properties of normal and waxy starches. **Starch/Starke** 49: 202-207.
- Kweon, M.R., P.R. Bhirud and F.W. Sosulski. 1996. An aqueous alcoholic-alkaline process for cationization of corn and pea starches. **Starch/Starke** 48: 214-220.
- Langan, R.E. 1987. Food industry, pp. 199-212. In O.B. Wurzburg, ed. **Modified Starches : Properties and Uses.** CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Leach, H.W., L.D. McCowen and T.J. Schoch. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. **Cereal Chemistry** 36: 534-544.
- Liu, H., H. Corke and L. Ramsden. 1999. Functional properties and enzymatic digestibility of cationic and cross-linked cationic *ae*, *wx*, and normal maize starch. **J. Agric. Food Chem.** 47: 2523-2528.
- Manelius, R., A. Buleon, K. Nurmi and E. Bertoft. 2000. The substitution pattern in cationised and oxidized potato starch granules. **Carbohydrate research** 329: 621-633.
- Newport Scientific. 1995. **Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyzer.** Warriewood, New South Wales, Australia. 93 p.
- Radosta, S., W. Vorwerg, A. Ebert, A.H. Begli, D. Grölz and M. Wastyn. 2004. Properties of low-substituted cationic starch derivatives prepared by different derivatisation processes. **Starch/Starke** 56: 277-287.

- Rutenberg, M.W. and D. Solarek. 1984. Starche derivatives : production and uses, pp. 312-388. *In* R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschall, eds. **Starch : Chemistry and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, Inc., Florida.
- Schoch, T.J. 1964. Swelling power and solubility of granular starches, pp. 106-108. *In* R.L. Whistler, R.J. Smith and J.N. BeMiller, eds. **Method in Carbohydrates Chemistry**. Vol. 4, Academic Press, New York.
- Solarek, D.B. 1987. Cationic starches, pp. 113-129. *In* O.B. Wurzburg, ed. **Modified Starches: Properties and Uses**. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Solarek, D.B., T.A. Dirscherl, H.R. Hernandez and W. Jarowenko. 1989. **Amphoteric Starches and Process for Their Preparation**. U.S. Patent 4,876,336.
- Wurzburg, O.B. 1987. Introduction, pp. 3-15. *In* O.B. Wurzburg, ed. **Modified Starches: Properties and Uses**. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.
- Yook, C., F. Sosulski and P.R. Bhirud. 1994. Effects of cationization on functional properties of pea and corn starches. **Starch/Starke** 46: 393-399.
- Zeleznak, K.J. and R.C. Hosney. 1987. The glass transition in starch. **Cereal Chemistry** 64(2): 121-124.
- Zobel, H.F. 1984. Gelatinization of starch and mechanical properties of starch pastes, pp. 285-309. *In* R.L. Whistler, J.N. Bemiller and E.F. Paschall, eds. **Starch : Chemical and Technology**. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press, Florida.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก  
วิธีวิเคราะห์

## วิธีการวิเคราะห์

### การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้ง

#### 1. การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ มอก. 274-2521

##### เครื่องมือ

1. เครื่องย่อย (2006 Digestor Exhaust system)
2. เครื่องกลั่นไนโตรเจน (รุ่น 1026 Kjeltac<sup>®</sup> System, Tecator, Sweden)
3. ขวดแก้วเจดาห์ล (Kjeldahl flask)
4. บิวเรต
5. ตู้ดูดควัน

##### สารเคมี

1. กรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีความถ่วงจำเพาะ 1.84
2. สารละลายกรดบอริก ร้อยละ 4 ของน้ำหนัก
3. สารละลายมาตรฐานไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
4. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 40 ของน้ำหนัก
5. ตัวเร่งปฏิกิริยา ประกอบด้วย 3.5 กรัม โพแทสเซียมซัลเฟต ( $K_2PO_4$ ) และ 0.4 กรัม คอปเปอร์ซัลเฟต ( $CuSO_4$ )

##### วิธีวิเคราะห์

ตามวิธีการของ มอก.274-2521 ซึ่งตัวอย่างประมาณ 0.5 กรัม ใส่ลงขวดแก้วเจดาห์ล โดยระวังอย่าให้ติดข้างขวด ใส่ตัวเร่งปฏิกิริยา 1 ช้อน เติมกรดซัลฟูริก 15 มิลลิลิตร แล้วเขย่าเบาๆ จากนั้นวางขวดลงบนเครื่องย่อยในตู้ดูดควัน ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส นานประมาณ 30 นาที จนกระทั่งได้สารละลายใส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำไปเข้าเครื่องกลั่นไนโตรเจน โดยต่อท่อให้ปลายจุ่มในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุกรดบอริก 4 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 25

มิลลิลิตร เพื่อเก็บแอมโมเนีย กลั่นประมาณ 5 นาที แล้วนำไปไตเตรตด้วยสารละลายมาตรฐาน ไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล จนกระทั่งเปลี่ยนเป็นสีชมพู แล้วนำไปคำนวณหาร้อยละไนโตรเจน

วิธีคำนวณ

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)} = \frac{(S-B) \times N \times 1.4001 \times 100}{W \times (100-M)}$$

เมื่อ S = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรตสารตัวอย่าง (มิลลิลิตร)

B = ปริมาตรไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไตเตรต Blank

N = ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกรดไฮโดรคลอริกเป็นนอร์มอล

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

M = ร้อยละความชื้น

## 2. ศึกษาลักษณะของเม็ดแป้งด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดัดแปลงจากวิธีการของ Kerr (1950)

เครื่องมือ

1. แผ่นสไลด์กระจก (Glass slide)
2. กระจกปิดสไลด์ (Cover slide)
3. หลอดหยดสารละลาย
4. แท่งแก้ว
5. กล้องจุลทรรศน์ (Meiji Techno, Japan) ที่ใช้ร่วมกับเลนส์โพลาไรซ์ (Polarized lense)

สารเคมี

1. สารละลายน้ำตาลซูโครส ความเข้มข้น 80 เปอร์เซ็นต์

### วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมแผ่นสไลด์แข็งตัวอย่าง โดยใช้ปิเปตดูดสารละลายซูโครส 80 เปอร์เซ็นต์ ประมาณ 40 ไมโครลิตร และหยดลงบนแผ่นสไลด์ที่สะอาด

2. เตรียมน้ำแข็งเข้มข้นร้อยละ 1.25% และนำมากระจายลงบนหยดของสารละลายซูโครส บนแผ่นสไลด์ ผสมให้เกรนูลแข็งกระจายตัวมากที่สุดและปิดด้วยกระจกปิดสไลด์

3. นำแผ่นสไลด์ของแข็งตัวอย่างมาตรวจดูลักษณะอนุภาคแข็งด้วยกล้องจุลทรรศน์ภายใต้แสงธรรมดาที่ก้ำกัวยาว 160 เท่า และบันทึกภาพเมื่อดึงไว้ จากนั้นใส่เลนส์ปรับแสงโพลาไรซ์ลงบนช่องกำเนิดแสง หมุนปรับที่ตัวเลนส์โพลาไรซ์เพื่อทำให้เกิดระนาบแสงโพลาไรซ์ ศึกษาลักษณะ Birefringence ของอนุภาคแข็ง บันทึกภาพไว้แล้วทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพลักษณะอนุภาคแข็งที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงธรรมดาและแบบใช้แสงโพลาไรซ์ ภายในกรอบภาพและตำแหน่งอนุภาคเดียวกัน

### 3. การหาความสามารถในการละลายน้ำเย็น (Cold Water Solubility) ดัดแปลงจากวิธีการของ Chen and Jane (1994)

#### เครื่องมือ

1. เครื่องปั่นผสม (Moulinex, French)
2. เครื่องปั่นเหวี่ยง (Sigma 2K15, Germany)
3. หลอดเซนตริฟิวจ์ (Centrifuge tube)

#### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่าง 0.5 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ทำการตวงน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 60 นาที เพื่อให้แป้งดูดซับน้ำ

3. ทำการปั่นผสมที่ความเร็วรอบระดับต่ำเป็นเวลา 2 นาที เทสารละลายตัวอย่างใส่ในหลอดเซนตริฟิวส์ และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 1200 x g เป็นเวลา 15 นาที

4. ปิเปิดส่วนใสด้านบนปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในงานอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

5. นำออกมาชั่งน้ำหนัก และทำการหาค่าร้อยละการละลายน้ำขึ้นดังสูตร

$$\text{ร้อยละการละลายน้ำขึ้น} = \frac{(\text{นน.งานและตัวอย่างหลังอบ} - \text{นน.งานอะลูมิเนียม}) \times 2 \times 100}{\text{นน.ตัวอย่างเริ่มต้น}}$$

(%CWS)

4. การวัดค่ากำลังการพองตัวและ ร้อยละการละลายของแป้ง (Swelling power and solubility of granular starch) ดัดแปลงจากวิธีการของ Schoch (1964)

เครื่องมือ

1. เครื่องปั่นเหวี่ยงไมโครเซนตริฟิวส์ (Spectrafuge 16M Labnet, USA)
2. หลอดเหวี่ยงปริมาตร 30 มิลลิลิตร
3. แท่งแก้ว
4. อ่างน้ำแบบควบคุมอุณหภูมิ (Waterbath, WB 14, Germany)

วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้ง 0.1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ใส่ลงในหลอดเหวี่ยงที่ทราบน้ำหนักแล้วเติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากัน

2. นำไปต้มในอ่างน้ำไฟฟ้าแบบควบคุมอุณหภูมิได้ โดยทดสอบที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยกวนตลอดเวลา อย่าให้แป้งตกตะกอนเป็นก้อน

3. นำหลอดเหวี่ยงออกมาทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ปรับน้ำหนักแล้วนำเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง โดยตั้งความเร็ว 2,200 รอบต่อนาที นาน 15 นาที

4. แยกส่วนใส่ออกจากหลอดเหวี่ยง ใส่งในจานอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นอนแล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

5. ชั่งน้ำหนักเพื่อหาปริมาณส่วนที่ละลายน้ำได้ เพื่อคำนวณหาความสามารถในการละลายเป็นค่าร้อยละการละลาย

6. นำหลอดเหวี่ยงที่มีแป้งที่ตกตะกอนอยู่มาชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่ชั่งได้ลบด้วยน้ำหนักหลอดเหวี่ยงจะเป็นน้ำหนักของแป้งที่พองตัว

7. คำนวณค่ากำลังการพองตัวจากน้ำหนักของแป้งที่พองตัว ตามสูตร

$$\text{ร้อยละการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g น้ำหนักแห้ง)}}$$

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

## 5. การวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender Viscoamylograph) ตามวิธีการของ AACC (1980)

เครื่องมือ

1. เครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ (Brabender, Germany)
2. เครื่องชั่งละเอียด 3 ตำแหน่ง

### วิธีวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้งคิดเป็น 30 กรัม ใส่น้ำลงไป โดยน้ำหนักทั้งหมด 500 กรัม ใสลงในเครื่องบรอนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ซึ่งได้จัดเตรียมพร้อมสำหรับการทดสอบแล้ว

2. ตั้งค่าที่เครื่องโดยเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นในอัตรา 1.5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ 30 นาที แล้วค่อยๆลดอุณหภูมิลงในอัตราเดียวกันจนถึงอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และคงไว้ที่อุณหภูมินี้ 30 นาที

3. เมื่อเครื่องบรอนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟวัดเสร็จ จะปรากฏค่าความหนืดต่างๆ และอุณหภูมิที่สารละลายแป้งเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) จากกราฟที่ได้

6. การวิเคราะห์สมบัติการเกิดเจลลาทีนในเซชันและการเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งด้วยเครื่อง **Differential Scanning Calorimeter** ดัดแปลงจากวิธีการของ Kim *et al.* (1995)

### เครื่องมือ

1. เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC 7, Perkin Elmer, USA)
2. Stainless steel pan
3. เครื่องปิดผนึก Stainless steel pan

### วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่างแป้ง โดยชั่งแป้ง 3 มิลลิกรัม (น้ำหนักแห้ง) ใสลงใน Stainless steel pan เติมน้ำกลั่นลงไป โดยคำนวณให้ได้น้ำแป้งที่มีความเข้มข้นร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก บ่มไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

2. นำ Stainless steel pan เข้าเครื่อง DSC และใช้อินเดียม (indium) ในการเปรียบเทียบและตั้งค่าของเครื่องในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 3. ตรวจสอบค่าเทอร์โมไดนามิกที่ได้จากการวิเคราะห์ของเครื่อง มีดังนี้

$T_o$  = อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

$T_p$  = อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

$T_c$  = อุณหภูมิที่จุดสุดท้าย (conclusion temperature) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

$\Delta H_g$  = พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างการเกิดเจลลาทีไนซ์ (enthalpy) เป็นจูลต่อกรัม

เมื่อได้พารามิเตอร์ทั้ง 4 ข้างต้นนี้ ก็จะสามารถทราบถึงสมบัติการเกิดเจลลาทีไนเซชันของตัวอย่างแป้งได้ จากนั้นนำตัวอย่างแป้งที่ผ่านการเกิดเจลลาทีไนเซชันแล้วมาทำการวิเคราะห์การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้งด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter ด้วยวิธีการต่อไปนี้

4. นำ Stainless steel pan ที่ผ่านการทดสอบการเกิดเจลลาทีไนเซชันแล้วจากข้อ 3 มาเก็บไว้ในหลอดฝาเกลียว และปิดฝาให้สนิท

5. นำหลอดดังกล่าวมาเก็บไว้ในตู้เย็น ที่ 4 องศาเซลเซียส เก็บไว้เป็นเวลา 7 วัน และเมื่อเก็บจนครบตามระยะเวลาที่กำหนดก็นำหลอดที่เก็บ Stainless steel pan มาตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง

6. นำ Stainless steel pan เข้าเครื่อง DSC และใช้อินเดียม (indium) ในการเปรียบเทียบและตั้งค่าของเครื่องในช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 120 องศาเซลเซียส โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

### 7. ตรวจสอบค่าเทอร์โมไดนามิกที่ได้จากการวิเคราะห์ของเครื่อง มีดังนี้

$T_o$  = อุณหภูมิที่จุดเริ่มต้น (onset temperature) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

$T_p$  = อุณหภูมิที่จุดสูงสุด (peak temperature) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

$T_c$  = อุณหภูมิที่จุดสุดท้าย (final temperature) หน่วยเป็นองศาเซลเซียส

$\Delta H_r$  = พลังงานความร้อน (enthalpy) ในการทำลายโครงสร้างผลึก หน่วยเป็นจูลต่อกรัม

## 7. การวิเคราะห์ค่าความใสของแป้งเปียก ตามวิธีการของ Craig *et al.* (1989)

### เครื่องมือ

1. เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectronic Genesys 5, Milton Roy Company, USA)

### วิธีวิเคราะห์

ชั่งตัวอย่างแป้งหนัก 0.1 กรัม (น้ำหนักแห้ง) เติมน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้แป้งกระจายตัวดี แล้วเจลาทีไนซ์ในอ่างน้ำเดือดโดยเขย่าตลอดเวลา 5 นาทีแรก ตั้งทิ้งไว้ในอ่างน้ำเดือดเป็นเวลา 30 นาที โดยทำการเขย่าทุกๆ 10 นาที เมื่อครบเวลานำมาวางให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นถ่ายสารละลายน้ำแป้งใส่ใน cuvette พลาสติก วัดค่าร้อยละการส่องผ่านแสง (%T) ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร

ภาคผนวก ข  
การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

## 1. ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบเปียก

1.1 ผลของปริมาณสาร NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อค่าระดับการแทนที่ของแป้งและประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU ที่ระดับต่างกัน

**ตารางผนวกที่ ข1** ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก<sup>1</sup>

อัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU	ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC			
		1.0	1.5	2.0	3.0
0.02	1	0.0005 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.002 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	0.005 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.005 ± 0.00 <sup>c,A</sup>
	2	0.001 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	0.004 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.007 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	0.008 ± 0.00 <sup>d,A</sup>
	4	0.001 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	0.004 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.008 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	0.011 ± 0.00 <sup>c,A</sup>
	7	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.006 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.012 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	0.013 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
	22	0.003 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	0.009 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.013 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.014 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
0.04	1	0.0003 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.005 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	0.011 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.013 ± 0.00 <sup>d,A</sup>
	2	0.001 ± 0.00 <sup>bc,D</sup>	0.009 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.015 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	0.017 ± 0.00 <sup>c,A</sup>
	4	0.001 ± 0.00 <sup>bc,C</sup>	0.013 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	0.019 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.020 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
	7	0.002 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.018 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	0.023 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	0.022 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	22	0.006 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.024 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.026 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.021 ± 0.00 <sup>ab,B</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในกลุ่มนี้เดียวกัน และอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

อัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC			
		1.0	1.5	2.0	3.0
0.08	1	0.003 ± 0.00 <sup>d,D</sup>	0.016 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.028 ± 0.00 <sup>d,A</sup>	0.024 ± 0.00 <sup>b,B</sup>
	2	0.003 ± 0.00 <sup>d,D</sup>	0.025 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.038 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.028 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	4	0.005 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	0.036 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	0.047 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	0.028 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	7	0.010 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.045 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	0.052 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.029 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	22	0.027 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.053 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.052 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.029 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
0.12	1	0.002 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	0.032 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	0.042 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.024 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	2	0.004 ± 0.00 <sup>d,D</sup>	0.043 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	0.051 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	0.026 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	4	0.008 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.057 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.058 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.026 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	7	0.019 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.069 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	0.062 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.026 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	22	0.045 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.077 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.058 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.026 ± 0.00 <sup>a,D</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกัน ในคอลัมน์เดียวกัน และอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกัน ในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU

**ตารางผนวกที่ ข2** ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบเปียก<sup>1</sup>

อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE)			
		อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC			
		1.0	1.5	2.0	3.0
0.02	1	2.3 ± 1.06 <sup>d,C</sup>	10.0 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	25.0 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	27.5 ± 3.54 <sup>c,A</sup>
	2	5.0 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	17.5 ± 3.54 <sup>c,C</sup>	35.0 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	40.0 ± 0.00 <sup>d,A</sup>
	4	5.0 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	22.5 ± 3.54 <sup>c,C</sup>	40.0 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	55.0 ± 0.00 <sup>c,A</sup>
	7	10.0 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	30.0 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	60.0 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	65.0 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
	22	15.0 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	45.0 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	65.0 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	70.0 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
0.04	1	0.5 ± 0.35 <sup>c,D</sup>	12.5 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	27.5 ± 3.54 <sup>e,B</sup>	32.5 ± 0.00 <sup>d,A</sup>
	2	2.5 ± 0.00 <sup>bc,D</sup>	22.5 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	36.3 ± 1.77 <sup>d,B</sup>	42.5 ± 0.00 <sup>c,A</sup>
	4	3.8 ± 1.77 <sup>b,C</sup>	32.5 ± 1.77 <sup>c,B</sup>	47.5 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	48.8 ± 1.77 <sup>b,A</sup>
	7	5.0 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	45.0 ± 3.54 <sup>b,B</sup>	57.5 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	53.8 ± 1.77 <sup>a,A</sup>
	22	16.3 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	61.3 ± 1.77 <sup>a,A</sup>	65.0 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	51.3 ± 1.77 <sup>ab,B</sup>
0.08	1	3.8 ± 0.00 <sup>d,D</sup>	20.6 ± 0.88 <sup>c,C</sup>	35.6 ± 0.88 <sup>d,A</sup>	30.6 ± 0.88 <sup>b,B</sup>
	2	3.8 ± 0.00 <sup>d,D</sup>	31.9 ± 0.88 <sup>d,C</sup>	48.1 ± 0.88 <sup>c,A</sup>	35.0 ± 1.77 <sup>a,B</sup>
	4	6.3 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	45.0 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	58.8 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	35.6 ± 0.88 <sup>a,C</sup>
	7	13.1 ± 0.88 <sup>b,D</sup>	56.3 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	65.0 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	36.3 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	22	33.1 ± 0.88 <sup>a,C</sup>	65.6 ± 0.88 <sup>a,A</sup>	65.6 ± 0.88 <sup>a,A</sup>	35.6 ± 0.88 <sup>a,B</sup>
0.12	1	1.7 ± 0.00 <sup>c,D</sup>	26.3 ± 0.59 <sup>e,B</sup>	35.0 ± 0.00 <sup>d,A</sup>	20.0 ± 0.00 <sup>a,C</sup>
	2	3.8 ± 0.59 <sup>d,D</sup>	35.8 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	42.5 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	21.3 ± 0.59 <sup>a,C</sup>
	4	7.1 ± 0.59 <sup>c,C</sup>	47.1 ± 0.59 <sup>c,A</sup>	48.3 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	21.3 ± 0.59 <sup>a,B</sup>
	7	15.8 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	57.9 ± 0.59 <sup>b,A</sup>	51.3 ± 1.77 <sup>a,B</sup>	21.3 ± 0.59 <sup>a,C</sup>
	22	37.5 ± 1.18 <sup>a,C</sup>	64.2 ± 1.18 <sup>a,A</sup>	48.8 ± 1.77 <sup>a,B</sup>	21.3 ± 1.18 <sup>a,D</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกัน ในคอลัมน์เดียวกัน และอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกัน ในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU

## 2. ปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ด้วยวิธีแบบแห้ง

2.1 ผลของปริมาณสาร NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาต่อค่าระดับการแทนที่ของแป้งและประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยา โดยใช้อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU เท่ากับ 0.02, 0.04, 0.08 และ 0.12

**ตารางผนวกที่ ข3** ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อค่าระดับการแทนที่ (DS) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชอีเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง<sup>1</sup>

อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		อัตราส่วนโมล NaOH ต่อ CHPTAC			
		0.5	1.0	1.5	2.0
0.02	1	0.002 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.003 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.010 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	0.014 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	2	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.003 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.010 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	0.014 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	4	0.003 ± 0.00 <sup>ab,D</sup>	0.005 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.011 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	0.015 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	7	0.003 ± 0.00 <sup>ab,D</sup>	0.007 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.013 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.015 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	22	0.003 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	0.010 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.012 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	0.016 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
0.04	1	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.004 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.023 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	0.027 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
	2	0.002 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.006 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	0.027 ± 0.00 <sup>d,A</sup>	0.028 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
	4	0.002 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.007 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	0.030 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	0.030 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	7	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.011 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.031 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.030 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	22	0.003 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	0.017 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.030 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	0.029 ± 0.00 <sup>a,B</sup>

**หมายเหตุ** <sup>1</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกัน และอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

อัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ค่าระดับการแทนที่ (DS)			
		อัตราส่วน โมล NaOH ต่อ CHPTAC			
		0.5	1.0	1.5	2.0
0.08	1	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.014 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.049 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	0.045 ± 0.00 <sup>d,B</sup>
	2	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.019 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.053 ± 0.00 <sup>ab,A</sup>	0.046 ± 0.00 <sup>c,B</sup>
	4	0.003 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.024 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.053 ± 0.00 <sup>ab,A</sup>	0.047 ± 0.00 <sup>b,B</sup>
	7	0.003 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.032 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.054 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.048 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	22	0.006 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	0.043 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.051 ± 0.00 <sup>ab,A</sup>	0.047 ± 0.00 <sup>bc,B</sup>
0.12	1	0.002 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.023 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.070 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.049 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	2	0.003 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.030 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	0.072 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.050 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	4	0.004 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.037 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	0.072 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.052 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	7	0.005 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	0.046 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	0.072 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.051 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	22	0.009 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	0.062 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	0.072 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	0.050 ± 0.00 <sup>a,C</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกัน ในคอลัมน์เดียวกัน และอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกัน ในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วน โมล CHPTAC ต่อ AGU

**ตารางผนวกที่ ข4** ผลของปริมาณ NaOH และระยะเวลาการทำปฏิกิริยาที่มีต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE) ของควอเทอนารีแอมโมเนียมสตาร์ชไอเทอร์ที่ผลิตด้วยวิธีแบบแห้ง<sup>1</sup>

อัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU	ระยะเวลาใน การทำปฏิกิริยา (ชั่วโมง)	ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (%RE)			
		อัตราส่วนโมล NaOH ต่อ CHPTAC			
		0.5	1.0	1.5	2.0
0.02	1	10.0 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	15.0 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	50.0 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	70.0 ± 7.07 <sup>a,A</sup>
	2	10.0 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	15.0 ± 0.00 <sup>d,C</sup>	50.0 ± 0.00 <sup>d,B</sup>	72.5 ± 3.54 <sup>a,A</sup>
	4	15.0 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	25.0 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	55.0 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	72.5 ± 3.54 <sup>a,A</sup>
	7	15.0 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	35.0 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	65.0 ± 0.00 <sup>a,B</sup>	75.0 ± 0.00 <sup>a,A</sup>
	22	17.5 ± 3.54 <sup>a,D</sup>	47.5 ± 3.54 <sup>a,C</sup>	65.0 ± 0.00 <sup>b,B</sup>	77.5 ± 3.54 <sup>a,A</sup>
0.04	1	3.8 ± 1.77 <sup>b,D</sup>	11.3 ± 1.77 <sup>d,C</sup>	57.5 ± 0.00 <sup>e,B</sup>	67.5 ± 0.00 <sup>b,A</sup>
	2	5.0 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	15.0 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	67.5 ± 0.00 <sup>d,A</sup>	68.8 ± 1.77 <sup>b,A</sup>
	4	5.0 ± 0.00 <sup>b,C</sup>	17.5 ± 0.00 <sup>c,B</sup>	75.0 ± 0.00 <sup>c,A</sup>	73.8 ± 1.77 <sup>a,A</sup>
	7	5.0 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	26.3 ± 1.77 <sup>b,C</sup>	77.5 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	75.0 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	22	7.5 ± 0.00 <sup>a,D</sup>	42.5 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	75.0 ± 0.00 <sup>b,A</sup>	72.5 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
0.08	1	1.9 ± 0.88 <sup>b,D</sup>	17.5 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	61.9 ± 0.88 <sup>b,A</sup>	56.3 ± 0.00 <sup>d,B</sup>
	2	2.5 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	24.4 ± 0.88 <sup>d,C</sup>	65.6 ± 0.88 <sup>ab,A</sup>	57.5 ± 0.00 <sup>c,B</sup>
	4	3.8 ± 1.77 <sup>b,D</sup>	29.4 ± 2.56 <sup>c,C</sup>	65.6 ± 0.88 <sup>ab,A</sup>	58.8 ± 0.00 <sup>b,B</sup>
	7	3.8 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	39.4 ± 0.88 <sup>b,C</sup>	66.9 ± 0.88 <sup>a,A</sup>	60.0 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	22	7.5 ± 0.00 <sup>a,C</sup>	54.4 ± 1.9 <sup>a,B</sup>	63.8 ± 3.54 <sup>ab,A</sup>	58.1 ± 0.88 <sup>bc,B</sup>
0.12	1	2.1 ± 0.59 <sup>b,D</sup>	19.2 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	58.3 ± 1.18 <sup>a,A</sup>	41.3 ± 0.59 <sup>a,B</sup>
	2	2.5 ± 0.00 <sup>b,D</sup>	25.4 ± 0.59 <sup>d,C</sup>	59.6 ± 1.77 <sup>a,A</sup>	41.3 ± 1.77 <sup>a,B</sup>
	4	3.3 ± 1.18 <sup>b,D</sup>	30.8 ± 0.00 <sup>c,C</sup>	60.0 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	42.9 ± 0.59 <sup>a,B</sup>
	7	4.2 ± 1.18 <sup>b,D</sup>	38.8 ± 0.59 <sup>b,C</sup>	60.0 ± 0.59 <sup>a,A</sup>	42.5 ± 0.00 <sup>a,B</sup>
	22	7.1 ± 0.59 <sup>a,D</sup>	52.1 ± 0.59 <sup>a,B</sup>	60.0 ± 0.00 <sup>a,A</sup>	41.7 ± 0.00 <sup>a,C</sup>

หมายเหตุ <sup>1</sup> ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ต่างกัน ในคอลัมน์เดียวกัน และอักษรตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกัน ในแถวเดียวกัน แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) โดยที่วิเคราะห์แยกแต่ละอัตราส่วนโมล CHPTAC ต่อ AGU

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาววนิดา วงษ์กุหลาบ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 10 พฤศจิกายน 2523
สถานที่เกิด	อำเภอมนรมย์ จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	วทบ. (อุตสาหกรรมเกษตร) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการค้นคว้าและวิจัยประเภทวิทยานิพนธ์ พ.ศ. 2549 ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ปี 2549