

การพัฒนากระบวนการผลิตสตาร์ชซีเตรตแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยเทคนิค
ไมโครเวฟ

DEVELOPMENT OF STARCH CITRATE PRODUCTION USING
SEMI-CONTINUOUS MICROWAVE TECHNIQUE

รพีพร อังกระษี
RAPIPORN ANGKURASI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2547

ISBN 974-15-1072-1

การพัฒนากระบวนการผลิตสตาร์ชซิเตรตแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยเทคนิค
ไมโครเวฟ

DEVELOPMENT OF STARCH CITRATE PRODUCTION USING
SEMI-CONTINUOUS MICROWAVE TECHNIQUE

รพีพร อังคุระสี

RAPIPORN ANGKURASI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2547

ISBN 974-15-1072-1

DEVELOPMENT OF STARCH CITRATE PRODUCTION USING
SEMI-CONTINUOUS MICROWAVE TECHNIQUE

RAPIORN ANGKURASI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE IN FOOD SCIENCE
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2004

COPYRIGHT 2004

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการผลิตสตาร์ชซีเตรตแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยเทคนิคไมโครเวฟ
นักศึกษา	นางสาวรพีพร อังคระษี
รหัสประจำตัว	45067007
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์การอาหาร
พ.ศ.	2547
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วุฒิชัย นาครักษา

บทคัดย่อ

การผลิตสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้าแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz นั้นสามารถผลิตสตาร์ชซีเตรตที่เหมาะสมได้ โดยนำแป้งมาผสมกับสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 5 กรัม/100กรัมสตาร์ช (น้ำหนักแห้ง) ที่ pH 4.5 ในอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเป็น 2 : 1 เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง 8 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเป็นระยะเวลา 15 นาที พบว่า สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียว มีกรดซิตริกเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสตาร์ชเป็น 3.48%, 7.63% และ 7.83% ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเป็น 44.10%, 80.47% และ 86.29% ตามลำดับ การผลิตสตาร์ชซีเตรตจากแป้งทั้งสามชนิดนั้น ความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ใช้ในการผลิตมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติกับประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา ($P \leq 0.01$) โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.86 (แป้งมันสำปะหลัง) , 0.87 (แป้งข้าวเจ้า) และ 0.87 (แป้งข้าวเหนียว) สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นมีความสามารถในการอุ้มน้ำและการละลายน้ำมากขึ้น ความความคงตัวต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า ตลอดจนความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายก็เพิ่มขึ้นเช่นกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว ในการผลิตสตาร์ชซีเตรตที่ระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกและระยะเวลาในการให้ความร้อนดังกล่าวนี้ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของเม็ดสตาร์ช เมื่อตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนการตรวจสอบคุณสมบัติของของผสมจากสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิดด้วยเครื่อง RVA พบว่า ค่า Peak viscosity, Trough และ Set back จะมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

Thesis	Development of Starch Citrate Production Using Semi-continuous Microwave Technique
Student	Miss. Rapiporn Angkurasi
Student ID	45067007
Degree	Master of Science
Programme	Food science
Year	2004
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Woatthichai Narkrugsa

ABSTRACT

Starch citrate production using semi-continuous microwave technique were study with tapioca starch, glutinous rice starch and non – glutinous trice starch . Starches were mixed with citric acid solution 5 % (g/100 g starch, db) at pH 4.5. The mixture were keeps at room temperature ,8 hrs. Than the mixture were heated in microwave at 2450 MHz for 15 min. Bound citric acid (BC%), reaction efficiency (RE%) and some of physiochemical properties were analyzed and examined. The results show that starch citrate from tapioca starch BC 3.48% and RE 44.10% lower than starch citrate from non – glutinous rice starch (BC 7.83% and RE 80.40%) while starch citrate from glutinous rice starch had BC 7.63% and RE 86.29%. The RE had highly significant correlation to the concentration of citric acid reagent (X_1) with $r = 0.86$ for tapioca starch, 0.87 for rice starch and 0.87 for glutinous rice starch. Comparing with their native starches, water absorption, water solubility index of starch citrate were higher .The shearing stability were increased especially made from rice starch .Freeze-thaw stability was also increased ($P \leq 0.05$) especially starch citrate made from glutinous non – glutinous rice starch . The result from SEM show that starch citrate production using microwave did not effect on morphology of starch granules. The paste characteristics of starch citrate by RVA were significant higher peak viscosity, trough and set back comparing with native starch .

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วุฒิชัย นาครักษา ที่ให้ความเหลือในการให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยแก้ไขปัญหาลดจนให้ความรู้ทางวิชาการที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษาวิจัยครั้งนี้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ระติพร เรือนหากิจ รศ.ดร.วรรณดั่ง เจริญชัย และ ดร.กิตติชัย บรรจง คณะกรรมการในการสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณอาจารย์ศิริมา วรรณรังสี ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคลวิทยาเขตโชติเวชที่เอื้อเฟื้อในการให้ความอนุเคราะห์ให้เครื่องมือวัดความหนืดแบบเร็ว (Rapid visco analyzer)

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบคุณบิดา-มารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้าและขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตรทุกคน ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลือทั้งร่างกายและแรงใจด้วยดีเสมอมา

รพีพร อังคระษี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	I
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	2
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 สตาร์ช.....	3
2.2 แหล่งที่มาของสตาร์ช	7
2.3 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ช	9
2.4 ไมโครเวฟ.....	15
2.5 การดัดแปรแป้ง	18
2.6 วัตถุประสงค์ของการดัดแปรแป้ง	18
2.7 การดัดแปรทางกายภาพ.....	18
2.8 การดัดแปรทางชีวภาพ	19
2.9 การดัดแปรทางเคมี	19
2.10 สตาร์ชฟอสเฟต.....	21
2.11 สตาร์ชซั๊กซิเนต	23
2.12 สตาร์ชอะซิเทต	23
2.13 สตาร์ชิตเรต.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 เทคนิคการตัดแปรแบ่ง	25
2.15 การตัดแปรแบ่งด้วยเทคนิคไมโครเวฟ	25
2.16 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแบ่งหลังผ่านไมโครเวฟ	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	29
3.1 วัตถุประสงค์	29
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง	29
3.3 สถานที่ทดลอง	30
3.4 วิธีดำเนินการ	30
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	32
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	67
บรรณานุกรม	69
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางเคมีของแบ่ง	72
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ	75
ประวัติผู้เขียน	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1	ค่าการเกาะเกี่ยวของกรดซิติริกกับโมเลกุลของสตาร์ช 34
4.2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตต่อการเกาะเกี่ยวของกรดซิติริกกับโมเลกุลของสตาร์ชสตาร์ชซีเตรต 34
4.3	ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา 37
4.4	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของสตาร์ชสตาร์ชซีเตรต 38
4.5	ความสามารถในการอู่มน้ำ 41
4.6	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตต่อความสามารถในการอู่มน้ำของสตาร์ชสตาร์ชซีเตรต 42
4.7	ความสามารถในการละลายน้ำ 45
4.8	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตต่อความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชสตาร์ชซีเตรต 46
4.9	ความคงตัวต่อแรงเฉือน 49
4.10	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตต่อความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชสตาร์ชซีเตรต 50
4.11	ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย 53
4.12	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปัจจัยในระหว่างกระบวนการผลิตต่อความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของสตาร์ชสตาร์ชซีเตรต 54
4.13	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบดเส้นโค้งความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer ของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง 64
4.14	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบดเส้นโค้งความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer ของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว 65
4.15	เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบดเส้นโค้งความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer ของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า 66
ก1	องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า 73
ก2	คุณสมบัติของแป้งชนิดต่างๆในธรรมชาติและสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตด้วยไมโครเวฟ 73
ข1	ค่ามาตรฐานการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส 81

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน.....	4
2.2	โครงสร้างของอะไมโลสในสารละลาย.....	5
2.3	โครงสร้างผลึกของอะไมโลเพคติน.....	5
2.4	ความสามารถในการละลายน้ำของแป้งชนิดต่างๆ.....	10
2.5	ความสามารถในการพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ.....	11
2.6	ลักษณะการเกิดความหนืดของแป้ง.....	12
2.7	อุณหภูมิในการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ.....	12
2.8	ลักษณะการเกิดรีโทรกราเดชันของอะไมโลส.....	14
4.1	การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง.....	35
4.2	การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว.....	35
4.3	การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า.....	36
4.4	ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา.....	39
4.5	ความสามารถในการอุ้มน้ำ.....	43
4.6	ความสามารถในการละลายน้ำ.....	47
4.7	ความคงตัวต่อแรงเฉือน.....	51
4.8	ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย.....	55
4.9	ลักษณะของเม็ดแป้งจากสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง.....	57
4.10	ลักษณะของเม็ดแป้งจากสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว.....	58
4.11	ลักษณะของเม็ดแป้งจากสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า.....	59
4.12	การเปลี่ยนแปลงค่าบวบนเส้นโค้งความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง.....	62
4.13	การเปลี่ยนแปลงค่าบวบนเส้นโค้งความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว.....	62
4.14	การเปลี่ยนแปลงค่าบวบนเส้นโค้งความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบและสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง.....	63
ข1	กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ห่ออะไมโลส.....	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

แป้งเป็นอาหารหลักที่จำเป็นสำหรับมนุษย์ ที่ให้พลังงานแก่ร่างกาย แป้งนอกจากจะมีความสำคัญดังกล่าวแล้วแป้งยังมีความสำคัญใช้เป็นสารเจือปนในอาหาร (Food additive) เนื่องจากแป้งคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมีกายภาพ และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ (Functional properties) ที่เฉพาะ เช่น ใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของอาหารให้เกิดเจล ใช้เป็นสารยึดเกาะ ใช้เป็นฟิล์มเคลือบอาหาร ใช้ควบคุมความคงตัวและเนื้อสัมผัสของอาหารป้องกันเนื้อสัมผัสของอาหารเนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและการละลาย (Freeze-thaw) การพาสเจอร์ไรซ์ (Pasteurization) หรือการสเตอริไรซ์เซชัน (Sterilization) จึงได้มีการนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารกันอย่างกว้างขวาง

การเลือกใช้แป้งในการอุตสาหกรรมผลิตอาหารแต่ละชนิดนั้น แป้งที่เลือกใช้ผสมในอาหารนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงหน้าที่และคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้ง ซึ่งแป้งในธรรมชาติมีคุณสมบัติไม่เหมาะสมหรือมีคุณสมบัติไม่ครบถ้วนที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่มีความหลากหลาย เช่น มีช่วงความหนืดที่แคบหรือกว้างมากเกินไป ให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ไม่ดี การมีความต้านทานต่อแรงเฉือนหรือสภาวะต่างๆในการผลิตอาหารต่ำจึงส่งผลให้ผลิตภัณฑ์อาหารมีคุณภาพเหมาะสม ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคหรือเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเสื่อมเสียของอาหารเป็นต้น ดังนั้นถ้าหากสามารถปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเฉพาะเหล่านี้ของแป้งได้ก็จะสามารถนำแป้งมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารที่มีหลากหลายและเหมาะสมยิ่งขึ้น

ดังนั้นจึงมีการดัดแปรแป้ง(Modified starch)ตามธรรมชาติ เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้ในอาหาร เช่น ทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่ดี ทนต่อสภาวะในการผลิตได้ดี การเกิดเจลลาติไนซ์ (Gelatinization) การคืนตัว (Retrogradation) การสูญเสียน้ำของเจลลดลง มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายเพิ่มมากขึ้น มีลักษณะของเจลที่ดีขึ้น

การดัดแปรแป้งทางเคมีร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ เป็นวิธีการดัดแปรแป้งอีกวิธีหนึ่งที่สามารถลดระยะเวลาและขั้นตอนในกระบวนการผลิตแป้งดัดแปรจากวิธีดั้งเดิม (Narkruga, 1996) การดัดแปรแป้งโดยใช้เทคนิคไมโครเวฟจะต้องขึ้นอยู่กับสภาวะในการผลิตหลายปัจจัย คือ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟ อุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อน ปริมาณและระดับความเข้มข้นของสารเคมีรวมไปถึงชนิดของสารเคมีที่ใช้ แหล่งที่มาและชนิดของพืชที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตแป้ง ปริมาณน้ำและความชื้นเริ่มต้นของแป้งที่จะดัดแปร ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในหลักการทำงานของเทคนิคไมโครเวฟ ดังนั้นในกรณีวิธีการผลิตแป้งดัดแปรทางเคมีด้วยเทคนิคไมโครเวฟ จะต้องมีการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้เหมาะสม เพื่อผลิตเป็นแป้งที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่เหมาะสมต่อการใช้

ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารแต่ละชนิดที่ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณภาพดีและการผลิตแบ่งตัดแปรโดยเทคนิคไมโครเวฟยังสามารถช่วยลดระยะเวลาและขั้นตอนในการผลิตแบ่งตัดแปร จึงเป็นแนวทางในการนำมาผลิตในระดับอุตสาหกรรม

1.2 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงการผลิตสตาร์ชชีเตอรตแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยคลื่นไมโครเวฟจากแป้งสามชนิด คือ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้า โดยควบคุมสภาวะในการผลิตคือระดับความเข้มข้นของกรดซิตริก และเวลาในการให้ความร้อน ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของสตาร์ชชีเตอรตที่ผลิตได้

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษากระบวนการผลิตสตาร์ชชีเตอรตร่วมกับการใช้คลื่นไมโครเวฟ
- 1.3.2 ศึกษาอิทธิพลของปัจจัยในการผลิตสตาร์ชชีเตอรตโดยใช้คลื่นไมโครเวฟต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการของสตาร์ชชีเตอรต

บทที่ 2

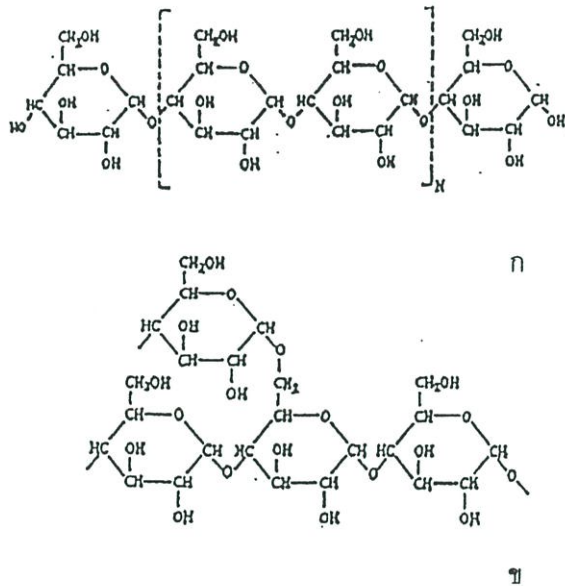
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 สตาร์ช (Starch)

2.1.1 องค์ประกอบของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสและเป็นโพลิแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งที่พบมากในพืชที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชเก็บสะสมสตาร์ชไว้ตามส่วนต่างๆ เช่น หัว ราก เมล็ด ลำต้นและ ผล โดยรวมตัวกันอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก (Starch granule) ที่มีเยื่อหุ้มหรือไม่ก็ได้เรียกว่าอะไมโลพลาสต์ (Amyloplast) (นิริยา รัตนาปนนท์. 2545) สตาร์ชประกอบด้วยโพลิเมอร์ของแอลฟา-ดี-กลูโคส 2 ลักษณะ คือ อะไมโลส (Amylose) รูปที่ 2.1ก และอะไมโลเพคติน (Amylopectin) รูปที่ 2.1ข อะไมโลสเป็นโพลิเมอร์สายตรงที่มีหน่วยกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-ดี-1,4-กลูโคซิดิกที่มีหน่วยกลูโคส (Anhydroglucose unit, AGU) ประมาณ 200-2000 หน่วย (Radley. 1976) สตาร์ชที่มีขนาดโมเลกุลของอะไมโลสสายยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรกราเดชันลดลงในหนึ่งหน่วย กลูโคสจะมี Primary hydroxyl group ที่มีคาร์บอนตัวที่ 6 และมี Secondary hydroxyl group ที่คาร์บอนตัวที่ 2 และ 3 กลูโคสที่อยู่ปลายสายจะมีหมู่แอลดีไฮด์ปลายสุดที่เรียกว่าหมู่รีดิวซิง (Reducing end group) (Wurzburg. 1986) อะไมโลสสายที่อยู่ใกล้กันสามารถเกิดเป็นสายเกลียวคู่ได้ (Double helix) และสามารถเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับโมเลกุลอื่นๆได้ เช่น ไอโอดีน กรดไขมัน บิวทานอลหรือไฮโดรคาร์บอน ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้กับ อะไมโลสจะให้คุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำ โดยอะไมโลสจะพันเป็นเกลียวล้อมรอบสารประกอบอินทรีย์ (กลัณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543) โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คลายตัว (Interrupted helix) หรือ ม้วนอิสระ (Random coil) (กลัณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543) อะไมโลเพคตินเป็นโพลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของหน่วย แอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 25-30 หน่วย ดังรูปที่ 2.3 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-ดี-1, 4-กลูโคซิดิกและส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาที่เป็นโพลิเมอร์สายสั้น ที่มีระดับของการแทนที่อยู่ในช่วง 10 ถึง 20 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-ดี-1,6-กลูโคซิดิก หน่วยกลูโคสที่เชื่อมแอลฟา-ดี-1,6-กลูโคซิดิก มีอยู่ประมาณร้อยละ 4 ถึง 5 (กลัณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543) อะไมโลเพคตินหนึ่งโมเลกุลประกอบด้วยแอนไฮโดรกลูโคสประมาณ 200,000 หน่วยซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะไมโลสมาก

(นิธิยา รัตนานพนธ์. 2545) ในส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาของอะไมโลเพกตินสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ แบบ A (A-chain) เป็นสายที่ไม่มีกิ่งก้านเกาะกับโมเลกุลอื่นโดยมีจุดเชื่อมต่อเฉพาะที่หมู่รีดิวซ์ แบบ B (B-chain) เป็นสายที่มีกิ่งก้านมีจุดเชื่อมต่อกับสายอื่น 2 จุด หรือมากกว่า ส่วนแบบ C (C-chain) มีหมู่รีดิวซ์ 1 หมู่ต่อโมเลกุล กิ่งก้านของอะไมโลเพกตินไม่กระจายตัวอย่างอิสระแต่จะอยู่รวมเป็นกลุ่ม (Cluster) และจะเกิดเป็นสายคู่พันเป็นเกลียว (Double helix) การเกิดเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินจะต้องให้พันธะไฮโดรเจนและแรงแรงแควตอร์วาลส์ในการเชื่อมต่อกัน อะไมโลเพกตินมีความสำคัญมากกว่าอะไมโลส ทั้งด้านโครงสร้าง หน้าที่ และการนำไปใช้ ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพกตินเพียงอย่างเดียวก็สามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดสตาร์ชได้ (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543)

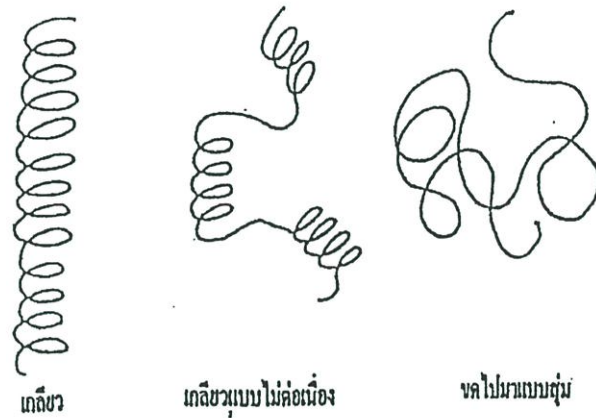


รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะไมโลส (ก) และอะไมโลเพกติน (ข)

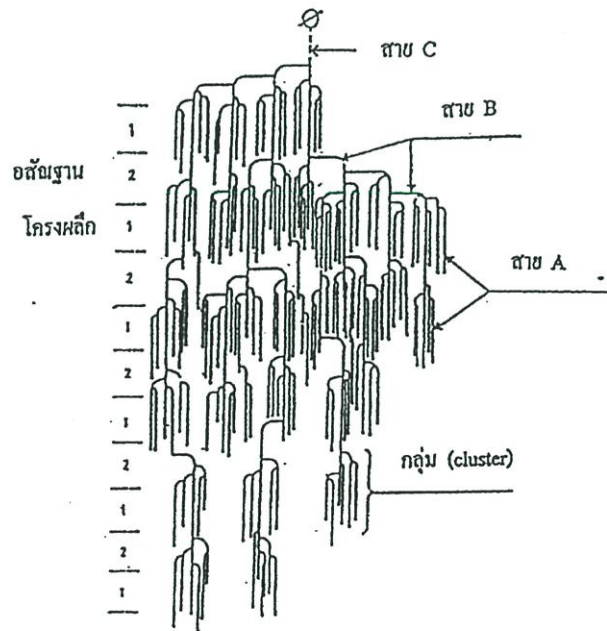
ที่มา : Hosney. (1996b)

สารตัวกลางหรือสารประกอบอื่นๆ (Intermediate material) สารตัวกลางนี้มีเพียงส่วนน้อยซึ่งปริมาณหรือสัดส่วนจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมการเพาะปลูกและสภาพอากาศรวมไปถึงชนิดของพืชด้วย เป็นองค์ประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะไมโลเพกตินแต่มากกว่าอะไมโลส หรืออาจมีโครงสร้างคล้ายกับอะไมโลเพกตินแต่มีกิ่งที่สั้นกว่า (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543) ส่วนประกอบอื่นๆภายในเม็ดสตาร์ช ได้แก่ ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) เช่น โปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนที่ติดกับพื้นที่ผิวของแป้ง

(Surface material) เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาสต์ และส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช (Internal component) เช่น ไขมัน โปรตีน เถ้า และฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ช ไขมันและโปรตีนในแป้งจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวของน้ำแป้ง อัตราการเกิดเจลลาติไนซ์เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.2 โครงสร้างอะไมโลสในสารละลาย
ที่มา :Hoseney. (1996b)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกของอะไมโลเพคติน
ที่มา : Hoseney. (1996b)

2.1.2 โครงสร้างและการรวมตัวของเม็ดสตาร์ช

เม็ดสตาร์ชในธรรมชาติมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) อันเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชด้วยพันธะไฮโดรเจน การเกาะกันนี้จะทำให้มีการจัดเรียงตัว 2 ลักษณะ คือ ลักษณะที่มีการจัดเรียงตัวหนาแน่นเป็นผลึก และเป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างมีระเบียบ (Crystalline region) ส่วนผลึกนี้ทำให้เม็ดสตาร์ชคงรูปอยู่ได้ การเรียงตัวเป็นไปในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดสตาร์ชบริเวณนี้จะเป็นส่วนที่ตอบสนองต่อแสงโพลาไรซ์ทำให้เกิดเงาดำคาดเม็ดสตาร์ชเม็ดสตาร์ชเป็นกากบาท (Cross pattern) ที่เรียกว่าไบริฟริงเจน (Birefringence) ส่วนที่มีดที่ปรากฏเป็นสองแขนตัดกันจะเป็นตำแหน่งของสายโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่อยู่ในลักษณะตั้งฉากและตั้งฉากกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ส่วนพื้นที่ที่เห็นแสงสว่างส่องผ่านเป็นตำแหน่งของสายที่ไม่ได้ตั้งฉากหรือขนานระนาบแสง ทำให้สามารถบิดแสงระนาบได้ (นิธิยา รัตนานนท์. 2545) เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้าง 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ คือ ผลึกแบบ A เกิดจากการเรียงตัวอย่างหนาแน่น ถ้ามีการจัดเรียงตัวแบบหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B ส่วนผลึกแบบ B เป็นการจัดเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543) ส่วนผลึกเป็นบริเวณที่มีการพองตัวอย่างจำกัดจึงมีความสามารถในการทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ยาก อีกส่วนหนึ่งมีการจัดเรียงตัวอย่างหลวมเรียกว่า บริเวณอสัณฐาน ประกอบด้วยโมเลกุลของอะไมโลสและสายโซ่ยาวของอะไมโลเพกติน มีการขดตัวในส่วนกึ่งก้านของอะไมโลเพกตินจำนวนมาก ทำให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นระเบียบจึงดูดซึมน้ำได้และเกิดปฏิกิริยาเคมีดีกว่าส่วนที่เป็นผลึก (Readley. 1976)

2.1.3 ลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

รูปร่างและขนาดของเม็ดสตาร์ชที่มาจากพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกันซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติบางประการของสตาร์ชด้วย (นิธิยา รัตนานนท์. 2545) จึงใช้เป็นตัวบ่งชี้ชนิดของสตาร์ชได้ ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชจะมีผลต่อคุณสมบัติของสตาร์ช เช่น อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ชันของเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่จะต่ำกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก เนื่องจากเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่จะเกิดการพองตัวได้เร็วกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็ก หรือ อาจกล่าวได้ว่าเม็ดสตาร์ชขนาดเล็กมีกำลังการพองตัวมากกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ เมื่อพิจารณาจากพื้นที่ผิวของเม็ดสตาร์ช

ทั้ง 2 ชนิดในปริมาณที่เท่ากันพบว่า เม็ดสตาร์ชขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวมากกว่าทำให้สามารถดึงน้ำและเกิดการพองตัวได้มากกว่าเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่ (Whistler et al. 1984)

2.2 แหล่งที่มาของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชชั้นสูง พบในคลอโรพลาสต์และในส่วนที่พืชใช้เป็นแหล่งเก็บอาหาร สตาร์ชส่วนใหญ่ได้มาจากพืช ดังนั้นเมื่อพิจารณาตามแหล่งที่มาของสตาร์ชสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดหลัก คือ

2.2.1 แบ่งจากเมล็ดธัญพืชหรือธัญชาติ

แบ่งข้าวโพด ข้าวสาลี แบ่งข้าวฟ่าง แบ่งข้าวเหนียวและแบ่งข้าวเจ้า ซึ่งแบ่งจากธัญพืชนั้นลักษณะการเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินอย่างหนาแน่นในเม็ดสตาร์ชจึงเกิดเป็นโครงสร้างของผลึกแบบ A โดยอะไมโลเพกตินจะรวมตัวกันเป็นผลึกส่วนอะไมโลสจะรวมตัวกับไขมันเป็นอะไมโลสลิปิดคอมเพล็กซ์ (Amyloles-lipid complex) เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ช ทำให้เม็ดสตาร์ชจากธัญพืชพองตัวได้ช้า (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543)

สตาร์ชข้าว (Rice starch) มีลักษณะเม็ดสตาร์ชจะรวมกันเป็นกลุ่ม มีรูปร่างเป็นแบบเหลี่ยม (Polygonal) เม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าเม็ดเดียวมีขนาด 1.6-8.7 ไมโครเมตร ส่วนสตาร์ชข้าวเหนียวเม็ดเดียวมีขนาด 1.9 - 8.1 ไมโครเมตร สตาร์ชข้าวเจ้าประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินโดยที่มีอะไมโลสตั้งแต่ร้อยละ 9 จนถึงมากกว่าร้อยละ 25 (Whistler et al. 1984) ประมาณร้อยละ 30-50 ของอะไมโลสของแป้งข้าวเจ้าทั้งหมดมีกิ่งก้านเล็กน้อย โดยมี 5-10 สายต่อโมเลกุล น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสมีประมาณ 325,000 ส่วนอะไมโลเพกตินในแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 75-91 มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ $2 - 4.1 \times 10^8$ โดยมากกว่าอะไมโลสประมาณ 1000 เท่า อัตราส่วนแบบ A ต่อแบบ B ในโมเลกุลอะไมโลเพกตินของแป้งข้าวเจ้ามีประมาณ 1.1 : 1.5 เมื่อตัดสายโมเลกุลอะไมโลเพกตินของ แป้งข้าวเจ้าตรงบริเวณที่มีพันธะแอลฟา-ดี-1,6-กลูโคซิดิก แล้ววิเคราะห์ความยาวของสาย อะไมโลเพกตินที่ได้ พบว่ามีขนาดประมาณ 21-22 AGU จุดที่แตกกิ่งก้านนั้นอาจอยู่ใกล้กันมากประมาณ 8-9 หน่วย บริเวณผลึกในเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าจะหักเหแสงเอกซ์เรย์เป็นแบบ A มีพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกร้อยละ 38 (Whistler and Paschall. 1967) แป้งข้าวเหนียวมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบร้อยละต่ำกว่าร้อยละ 2 (Radley. 1976) อะไมโลเพกตินแป้งข้าวเหนียวมีกลูโคสเฉลี่ย 18,500 AGU มีความยาวเฉลี่ย 17.5-18.3 AGU ส่วนเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวมีพื้นที่ส่วนที่เป็นผลึกร้อยละ 37 (Radley. 1976)

2.2.2 แป้งจากส่วนราก (Root)

แป้งมันสำปะหลัง (Cassava and Tapioca Starch) มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว โดยมีสตาร์ชมากกว่าร้อยละ 95 มีปริมาณโปรตีนค่อนข้างต่ำ มีฟอสฟอรัสต่ำกว่าร้อยละ 0.04 ซึ่งเกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสตาร์ชในรูปฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Atichokumchai and Saiyavit, 2003) เม็ดสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลังมีขนาดปานกลางอยู่ในช่วงระหว่าง 30-40 ไมโครเมตร และมีขนาดโดยเฉลี่ยประมาณ 12-15 ไมโครเมตร มีขนาดเล็กกว่าเม็ดสตาร์ชของแป้งมันฝรั่ง แต่มีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชของแป้งข้าวเจ้า ลักษณะของเม็ดสตาร์ชเมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่า มีรูปร่างเป็นเม็ดกลมหรือรูปไข่และอาจมีรอยบุ๋มที่ปลายด้านหนึ่งของเม็ดสตาร์ช แป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลเพกตินประมาณร้อยละ 80 และมีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 13-28 ซึ่งค่อนข้างต่ำ (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

แป้งมันสำปะหลังมีการพองตัวเพียงขั้นตอนเดียว กำลังการพองตัวและการละลายมีค่าสูงกว่าแป้งจากธัญพืช เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังจัดเป็นแป้งที่มีอะไมโลสต่ำ โดยค่ากำลังการพองตัวจะมีค่าประมาณร้อยละ 50 และค่าการละลายประมาณร้อยละ 35 ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ซึ่งมากกว่าแป้งข้าวโพด แต่ต่ำกว่าแป้งมันฝรั่ง ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันฝรั่งมีหมู่ฟอสเฟสที่สามารถแตกตัวและจับกับน้ำได้ดี จึงช่วยให้แป้งมันฝรั่งมีค่ากำลังการพองตัวสูงมาก ลักษณะการพองตัวของแป้งมันฝรั่งที่อุณหภูมิต่างๆจะเป็นแบบขั้นตอนเดียว (Single stage swelling) ซึ่งแตกต่างจากแป้งธัญชาติที่มีการพองตัวเป็นแบบ 2 ขั้นตอน (Two stage swelling) (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) แป้งมันสำปะหลังมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ อยู่ในช่วง 58-70 องศาเซลเซียส (Whistler and Paschall, 1967)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งมันสำปะหลังที่เปลี่ยนแปลงไปภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและมีการกวนตลอดเวลา โดยใช้เครื่องวัดความหนืดแบบเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA) และ บราเบนเดอร์ (Brabender Viscoamylograph) พบว่า แป้งมันสำปะหลังเมื่อได้รับความร้อนจะมีค่ากำลังการพองตัวสูงจึงให้ความหนืดสูง แต่เมื่อได้รับความร้อนและแรงกลจากการกวนอย่างต่อเนื่องแป้งเปียกจะมีความหนืดลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงชี้ให้เห็นว่าแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังจะไม่คงตัวมากนัก ซึ่งลักษณะเช่นนี้เป็นข้อจำกัดของการใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นสารให้ความหนืดในผลิตภัณฑ์จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรแป้งเพื่อช่วยเพิ่มความคงตัวของแป้งเปียก เมื่อแป้งเปียกของแป้งมันสำปะหลังเย็นตัวลง ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสค่อนข้างต่ำ ทำให้เกิดการจับกับของหมู่ไฮดรอกซิลของหมู่อะไมโลสในระหว่างเย็นตัวต่ำ แป้งมันสำปะหลังจึงเป็นแป้งที่เกิดการคืนตัวต่ำ และให้ลักษณะของแป้งเปียกที่ใส ไม่ทึบแสง (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543)

2.2.3 แป้งจากส่วนหัว (Corm or tuber)

แป้งมันฝรั่ง (Potato Starch) แป้งมันเทศ (Sweetpotato Starch) แป้งมันฝรั่ง มีขนาดของเม็ดสตาร์ชโดยประมาณ 37.9-50 ไมครอน มีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 22 (Eliason. 1996) แป้งมันสำปะหลังนั้นมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษ สิ่งทอ กาว สำหรับการใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารนั้น เช่น นำมาใช้เป็นส่วนประกอบในการทำผงฟู เป็นวัตถุบิบบในอาหารหมัก ใช้ในการผลิตยาเม็ด สบู่ ใช้เป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง ใช้เป็นสารทำให้น้ำใส ใช้ในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น ส่วนแป้งมันเทศนั้นมีการผลิตมากที่สุดในประเทศจีน ในหัวมันเทศมีคาร์โบไฮเดรตสูง มีแป้งเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 14-28 ซึ่งชาวจีนนิยมใช้แป้งจากมันเทศมาผลิตเป็นเส้นก๋วยเตี๋ยว หรือใช้เลี้ยงสัตว์ ขนาดของเม็ดแป้งมันเทศประมาณ 9-15 ไมโครเมตร มีอะไมโลสประมาณร้อยละ 18-22 (Eliason. 1996)

แป้งจากส่วนหัวของพืช จะมีกำลังการพองตัวสูงเนื่องจากพันธะภายในร่างแหอ่อนแอ และยังขึ้นอยู่กับปริมาณของหมู่ฟอสเฟต ยังส่งผลต่อการส่งเสริมการพองตัวให้สูงขึ้น โดยจะสามารถก่อให้เกิดแรงผลักดันทางไฟฟ้า การพองตัวจะเกิดแบบขั้นตอนเดียว และเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ (กลัณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543)

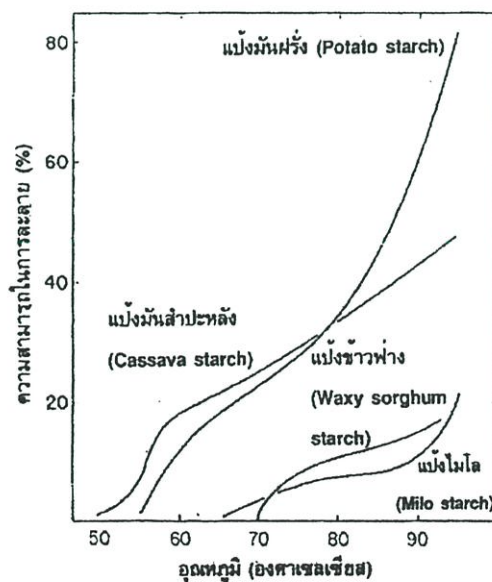
2.3 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ (Physiochemical properties)

2.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

แป้งดิบจะไม่ละลายในน้ำ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาติไนซ์เซชัน เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่ง เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ๆกัน แต่เมื่ออุณหภูมิของของผสมน้ำกับแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์เซชัน พันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลอิสระ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิดไบรฟริงเจ้นหมดไป นอกจากนี้แล้วเมื่อมีการให้ความร้อนแก่สารละลายน้ำแป้ง เม็ดสตาร์ชจะเกิดการพองตัวแล้ว บางส่วนของแป้งจะละลายออกมา กำลังการพองตัวของเม็ดสตาร์ชแสดงเป็นปริมาตรของน้ำหนักหรือน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มมากที่สุด เมื่อเม็ดสตาร์ชพองตัวได้อย่างอิสระในน้ำ สำหรับความสามารถในการละลายจะแสดงเป็นน้ำหนักของของแข็งทั้งหมดในสารละลายทั้งหมดที่สามารถละลาย (Kerr.1950)

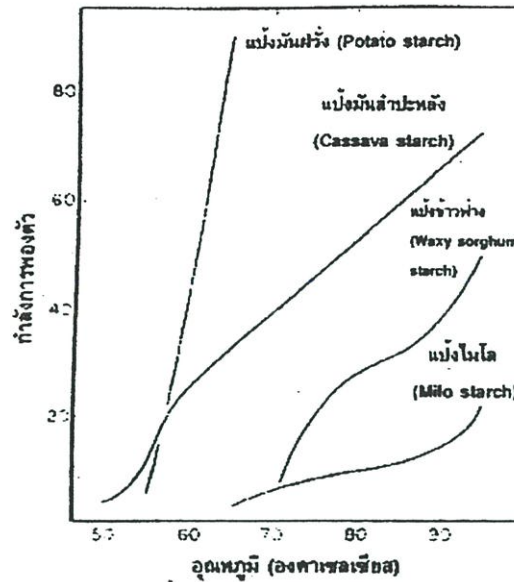
ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลายและการพองตัวคือ ชนิดของแป้ง ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5 ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งเกี่ยวข้องกับ ขนาดรูปร่าง อัตราส่วนของ อะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน ความยาวของสาขา จำนวนกิ่งก้านสาขา การจัดเรียงตัวในอะไมโลเพกติน สิ่งเจือปนที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตในเม็ดสตาร์ชก็ส่งผลต่อการพองตัวของเม็ดสตาร์ช

เช่น กรดไขมัน ในธรรมชาติของแป้งแต่ละชนิด จะยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ช โดยเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับอะไมโลส คุณสมบัติหลังการดัดแปรแป้งทางเคมีด้วยกรดหรือการเกิดออกซิเดชัน จะทำให้คุณสมบัติการพองตัวและการละลายของแป้งเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการดัดแปรแป้ง จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะภายในร่างแห ทำให้เม็ดสตาร์ชแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ การละลายและการพองตัวสูงขึ้น การดัดแปรด้วยปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันหรืออีเทอร์ริฟิเคชัน จะเกิดการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลในโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช ทำให้พันธะภายในเม็ดสตาร์ชอ่อนลง คุณสมบัติในการเกิดเจลลาตินในซึ่ต่ำลง การพองตัวสูงขึ้น ตามจำนวนและธรรมชาติของหมู่ที่เข้าแทนที่ การทำครอสลิง จะทำให้ความสามารถในการพองตัวและการละลายลดลง เพราะการทำครอสลิงช่วยในการเพิ่มความแข็งแรงของพันธะภายในเม็ดสตาร์ช นอกจากนี้ปัจจัยที่กล่าวมาแล้วนี้ ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว ซึ่งหากสารละลายมีปริมาณแป้งต่ำกว่าร้อยละ 20 ค่าการละลายจะสูงกว่าเมื่อมีแป้งสูงกว่าร้อยละ 20 เพราะการพองตัวอย่างอิสระและการละลายที่สูงขึ้นจะถูกยับยั้งในสภาวะที่มีสารละลายปริมาณน้ำน้อย ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าการพองตัวและการละลายที่แตกต่างกัน เช่น ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส แป้งมันฝรั่ง มีกำลังการพองตัวมากกว่า 1000 ค่าการละลายประมาณร้อยละ 82 แป้งมันสำปะหลัง มีกำลังการพองตัว 71 และค่าการละลายประมาณร้อยละ 48 ในขณะที่แป้งข้าวเจ้ามีกำลังการพองตัว 19 และค่าการละลายประมาณร้อยละ 18 ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ (Eliason, 1996)



รูปที่ 2.4 ความสามารถในการละลายน้ำของแป้งชนิดต่างๆ

ที่มา : Leach *et al.* (1959)

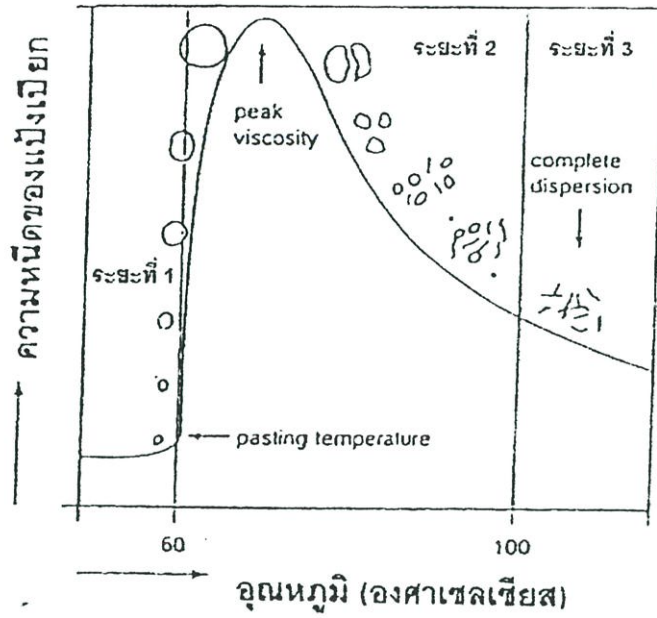


รูปที่ 2.5 ความสามารถในการพองตัวของแป้งชนิดต่างๆ
ที่มา : Leach *et al.* (1959)

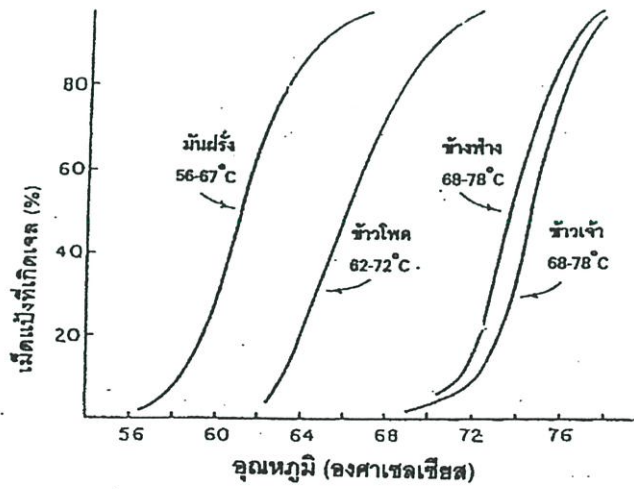
2.3.2 การเกิดเจลลาตินไนซ์เซชัน

น้ำซึมผ่านเข้าไปในส่วนที่เป็นบริเวณออสชันฐานของเม็ดสตาร์ชได้บ้าง จึงเกิดการพองตัวเพียงเล็กน้อย ปริมาตรเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 5 เนื่องจากการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในส่วนที่เป็นผลึกแข็งแรงกว่าบริเวณออสชันฐาน ดังรูปที่ 2.6 ดังนั้นปริมาตรที่เปลี่ยนแปลงและน้ำที่ดูดเข้าไปจึงผันกลับได้ นอกจากโมเลกุลของน้ำแล้ว โมเลกุลของสารอื่นๆที่มีขนาดเล็กมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1000 ดาลตันก็ดูดซึมเข้าไปในบริเวณออสชันฐานนี้ได้ (Whistler and Paschall, 1967) กระบวนการเกิดเจลลาตินไนซ์เริ่มเมื่อเม็ดสตาร์ชได้รับความร้อนจนมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกจากกัน จึงจะทำให้การจับกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชในส่วนผลึกคลายตัวลง น้ำสามารถแทรกเข้าภายในเม็ดสตาร์ชได้ เส้นพาดขวางสีดำของเม็ดสตาร์ชจะค่อยๆจางหายไปโดยมีจุดเริ่มที่ไฮลัม (Hilum) แล้วกระจายไปรอบๆเม็ดสตาร์ช เนื่องจากโมเลกุลในเม็ดสตาร์ชมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก รวมทั้งสามารถรวมตัวกับน้ำได้ดี จึงทำให้เม็ดสตาร์ชดูดน้ำและพองตัวไม่สามารถผันกลับได้ การพองตัวเกิดขึ้นครั้งแรกบริเวณออสชันฐาน ต่อจากนั้นบริเวณจะถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอีกมากแต่ยังไม่แตกเนื่องจากยึดเกาะด้วยไมเซลล์ (Micelles) ซึ่งไม่ได้ถูกทำลาย สำหรับอุณหภูมิที่เม็ดสตาร์ชมีการดูดน้ำอย่างรวดเร็ว และการพองตัวเพิ่มมากเรียกว่า อุณหภูมิเจลลาตินไนซ์เซชัน (Gelatinization temperature) สำหรับแป้งข้าวเจ้ามีอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์เซชันอยู่ระหว่าง 54–74 องศาเซลเซียส

ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิเจลลาตินไนซ์เซชันของแป้งข้าวเหนียว ดังรูปที่ 2.7 (Whistler and Paschall, 1967)



รูปที่ 2.6 ลักษณะการเกิดความหนืดของแป้ง
ที่มา : Sanders. (1996)



รูปที่ 2.7 อุณหภูมิในการเกิดเจลของแป้งชนิดต่างๆ
ที่มา : Sanders. (1996)

2.3.3 การเกิดเจล

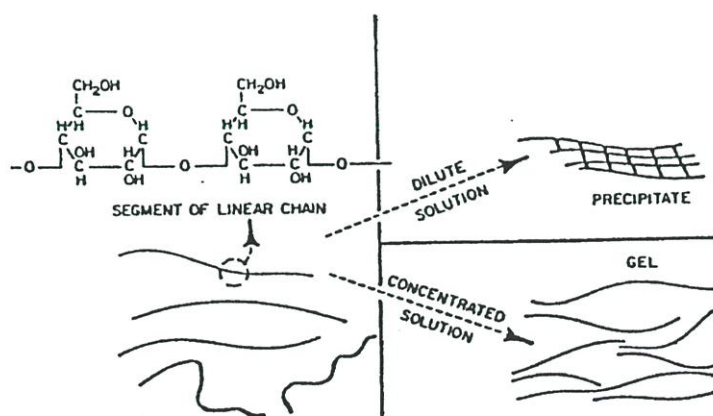
เมื่อน้ำแบ่งได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลลาตินไนต์เซชันเม็ดสตาร์ช บางส่วนพองตัวมากจนไม่มีโครงสร้าง ทำให้อะไมโลสและอะไมโลเพกตินกระจายตัวสู่สารละลาย มีลักษณะข้นหนืดและใสขึ้น เรียกว่า ของผสมของสตาร์ช (Starch paste) ประกอบด้วยเม็ดสตาร์ชที่ไม่พองตัว เม็ดสตาร์ชที่พองตัวบางส่วน เม็ดสตาร์ชที่พองตัว ขึ้นส่วนเม็ดสตาร์ชที่พองตัว กลุ่มของเม็ดสตาร์ชที่พองตัวแล้ว โมเลกุลของสตาร์ชที่ละลายและตกตะกอนของสตาร์ชที่เกิดรีโทรกราเดชัน การละลายอย่างแท้จริง ของสตาร์ชทุกชนิดจะไม่เกิดขึ้นจนกว่าจะได้รับอุณหภูมิถึง 100–160 องศาเซลเซียส โดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ชเป็นปัจจัยที่สำคัญ เช่น สตาร์ชข้าวเหนียวจะละลายหมดที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เมื่อปล่อยให้สตาร์ชที่ข้นหนืดนี้เย็นตัวลง อาจยังคงเป็นสารละลายข้นหนืด (Sol) หรือเจล (Gel) ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำในส่วนผสม ถ้ามีปริมาณน้ำมากจะเป็นสารละลายข้นหนืด แต่ถ้ามีปริมาณน้ำน้อยจะเกิดเป็นเจลได้ทันที (Whistler and Paschall, 1967) โมเลกุลอะไมโลสมีความสำคัญในการจับกันเพื่อเกิดเป็นเจล เนื่องจากโมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรง จับตัวกันได้ง่ายกว่าโมเลกุลของอะไมโลเพกตินที่เป็นกิ่งก้าน (นิธิยา รัตปนานนท์, 2545) ถ้ามีการกวนหรือให้ความร้อนเป็นเวลานาน ความหนืดของเจลก็อาจลดลงได้ สตาร์ชที่มีอะไมโลสสูงจะดูดน้ำได้เข้าและมีการพองตัวของเม็ดสตาร์ชช้าลงด้วย จึงต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าปกติ เพื่อให้มีการพองตัวของเม็ดสตาร์ชอย่างสมบูรณ์ (Wurzburg, 1986)

2.3.4 การคืนตัว

การคืนตัว (Retrogradation) ของสตาร์ชเป็นปรากฏการณ์ที่อะไมโลสสามารถจับตัวกันใหม่หรือจับกับอะไมโลเพกตินด้วยพันธะไฮโดรเจนนอกเม็ดสตาร์ช ในขณะที่เย็นลงมีผลทำให้สูญเสียโมเลกุลของน้ำ (Bound water) ที่เคยจับอยู่กับอะไมโลสและอะไมโลเพกตินบางส่วน ปัจจัยที่มีผลต่อการคืนตัว ได้แก่ ความเข้มข้นของสตาร์ช ชนิดของสตาร์ช อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และการมีสารประกอบบางชนิดอยู่ร่วมกับสตาร์ชเป็นต้น (Radley, 1976)

โมเลกุลอะไมโลสที่ละลายอยู่จะจัดเรียงตัวเองในแนวขนาน ดังนั้นจึงมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากเรียงตัวใกล้กันระหว่างสายโมเลกุลของอะไมโลส ทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโมเลกุลจะเกาะเข้ากันด้วยเกิดการรวมกลุ่ม (Aggregation) แล้วไม่ละลายน้ำ ในสารละลายที่เจือจาง สายที่รวมกลุ่มเหล่านี้จะตกตะกอนเป็นสีขาว แต่ในสารละลายที่เข้มข้นสายที่รวมกลุ่มจะจับของเหลวเข้าไว้ในตาข่ายของโมเลกุลสตาร์ชทำให้เกิดเป็นเจล ซึ่งการเกิดการคืนตัวทั้งในสภาพสารละลายที่เข้มข้นหรือเจือจางดังรูปที่ 2.8 เมื่อตรวจสอบการหักเหของแสงเอกซ์เรย์ พบว่ามีโครงสร้างผลึกเกิดขึ้นทั้ง 2 กรณีเหมือนกันซึ่งอะไมโลสเป็นปัจจัยสำคัญในการทำให้เกิดการคืนตัว

(Whistler and Paschall. 1967) โมเลกุลอะไมโลสในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีขนาดไม่เท่ากัน อัตราการคืบตัวจะมีค่าสูงสุด เมื่อโมเลกุลอะไมโลสมีขนาด 100–200 หน่วยกลูโคส ซึ่งจะเกิดเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับความยาวของโมเลกุลที่ยาวหรือสั้นกว่านี้ โดยสายยาวจะเคลื่อนที่ไปใกล้กันยากและไม่สามารถเรียงตัวขนานกันได้ตลอด ความยาวสายโมเลกุล ส่วนโมเลกุลขนาดเล็กจะไม่สามารถเกาะกันได้ดีเนื่องจากการเคลื่อนที่ตลอดเวลาและไม่มีทิศทางแน่นอนแบบบราวเนียน (Brownian) ทำให้รวมตัวกันได้ยากและขนาดของโมเลกุลอะไมโลสที่สั้นเกินไปจะเกิดได้ยากเช่นกัน(Kerr.1950) การคืบตัวเกิดได้เร็วที่อุณหภูมิ -4 องศาเซลเซียสเพราะที่อุณหภูมิต่ำทำให้โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ช้าลงที่ค่าพีเอช 5–7 จะเกิดการคืบตัวได้สูงสุด และเกิดได้ลดลงที่พีเอชมากกว่าหรือน้อยกว่านี้และจะไม่เกิดการคืบตัวที่พีเอชมากกว่า 10 เนื่องจากโมเลกุลของสตาร์ชละลาย (Dissolve) และที่พีเอชต่ำกว่า 2 เกิดการคืบตัวช้า นอกจากนี้กรดบางชนิด เช่น กรดกำมะถันที่พีเอชต่ำๆ จะทำให้สตาร์ชเกิดการคืบตัวเร็วขึ้น เนื่องจากการไฮโดรไลซิสของโมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง การคืบตัวเกิดได้น้อยลงถ้ามีเกลือที่มีประจุบวก (Cation) หรือลบแบบประจุเดียว (Monovalent anion) รวมทั้งยูเรีย นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 100-160 องศาเซลเซียสจะสามารถละลายอะไมโลสที่เกิดการคืบตัวได้ อะไมโลเพกตินเกิดการคืบตัวน้อยมากเพราะมีกิ่งก้านมากแต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นสูงมากหรือในสภาพแช่แข็งก็สามารถเกิดได้มากขึ้นอะไมโลสของธัญพืชทั่วไปรวมทั้งข้าวเจ้าจะเกิดการคืบตัวได้ดี ส่วนแป้งข้าวเหนียวจะเกิดการคืบตัวต่ำมาก อะไมโลสจากธัญชาติจะเกิดการคืบตัวเร็วกว่าพืชหัว เนื่องจากมีปริมาณอะไมโลสสูงและโมเลกุลอะไมโลสมีขนาดพอเหมาะจึงรวมตัวกันได้ง่าย (Whistler and Paschall. 1967)



รูปที่ 2.8 ลักษณะการเกิดรีโทรกราเดชันของอะไมโลส

ที่มา : Wurzburg. (1986)

2.3.5 ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย

ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของอาหาร หมายถึง การที่อาหารยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) เมื่อทำการแช่แข็งโดยไม่มีลักษณะเป็นก้อน (Lumpy) เป็นเม็ด (Grainy) หรือมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (Spongy) และปราศจากของเหลวแยกตัวออกมา (Syneresis) ในอาหารแช่แข็งและละลายสลับกันหลายๆครั้ง อาจเกิดเป็นรอบสั้นๆในช่วงการเก็บรักษาหรือการขนส่ง การละลายอาจไม่ได้เกิดอย่างสมบูรณ์ทั้งหมดโดยการเกิดเป็นจุดๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Lineback and Inglett, 1982) ในระหว่างการแช่แข็งในระบบที่มีสตาร์ชกับน้ำผสมกันอยู่จะกลายเป็นน้ำแข็งทำให้สตาร์ชเข้มข้นขึ้น ซึ่งช่วยเร่งการเกาะกันของสายโมเลกุลสตาร์ช การเกาะกันอาจเกิดอย่างถาวรหรือผันกลับได้ ถ้าสายโมเลกุลส่วนมากที่เกาะกันอยู่แสดงคุณสมบัติที่ผันกลับได้ แสดงว่าสตาร์ชมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย โมเลกุลของสตาร์ชจะละลาย ได้อีกครั้งในระหว่างการละลายของน้ำแข็ง การเกาะกันของสายโมเลกุลขึ้นกับพีเอช ปริมาณหรือวอเตอร์แอกติวิตี (Water activity) ความแรงของไอออน (Ionic strength) โคจรูป (Conformation) หรือโครงสร้างของสายโมเลกุล รวมถึงการมีส่วนร่วมประกอบอื่นๆเข้ามาเกี่ยวข้อง การแช่แข็งและการละลายหลายๆครั้งเป็นการทำลายเนื้อสัมผัสเนื่องจากการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง (Kerr, 1950) สตาร์ชที่ประกอบด้วยอะไมโลเพกตินเกือบทั้งหมดจะมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายมากกว่าสตาร์ชที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบด้วย เนื่องจากคุณสมบัติของอะไมโลเพกตินมีกึ่งก้านมาก แต่ถึงอย่างไรก็ตามจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสหลังการแช่แข็งและละลาย ในอาหารชุบแป้งทอดที่แช่แข็ง ถ้าแป้งไม่มีความคงทนต่อการแช่แข็งและละลาย แป้งที่ห่อหุ้มอาหารจะหลุดออก เนื่องจากการหดตัวของแป้งเพราะน้ำแยกตัว (Kerr, 1950)

2.4 ไมโครเวฟ (Microwave)

ไมโครเวฟเป็นพลังงานในรูปแบบใหม่ที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ในราวปี พ.ศ. 2483 และเป็นที่ยอมรับแพร่หลายจนกลายเป็นของใช้ภายในครัวเรือน ในรูปของเตาอบไมโครเวฟที่ใช้หุงต้มหรือปรุงอาหารได้ โดยเน้นประโยชน์ของพลังงานนี้ในรูปของการประหยัดเวลา ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการของคนที่ดำรงชีวิตในปัจจุบัน และเป็นส่วนสำคัญที่มีผลกระทบต่อผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการใช้พลังงานในรูปดังกล่าว มาใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารที่มีความหลากหลายได้อย่างเหมาะสม (คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหารและเทคโนโลยีการอาหาร, 2540)

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายในรูปคลื่นไปรอบทิศทางในลักษณะการส่งผ่าน (Transmission) การดูดซับ (Absorption) หรือการสะท้อนกลับได้ (Reflection) โดยขึ้นอยู่กับสารที่เป็นตัวกลาง มีแหล่งกำเนิดจากแมกนีตรอน (Magnetron) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าที่มีความถี่ต่ำ เช่น 60 เฮิร์ตซ์ ไปเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศูนย์กลางของประจุลบและประจุบวกเปลี่ยนทิศทางหลายล้านครั้งต่อวินาที แถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งออกตามความยาวคลื่นหรือความถี่ ความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะอยู่ในช่วงของ 300 ถึง 30,000 เฮิร์ตซ์ (300–30,000 ล้านรอบ/วินาที) ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า (นิรนาม. 2539)

ไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่นๆ เช่น คลื่นวิทยุ ตรงที่ความยาวและความถี่คลื่น คลื่นไมโครเวฟจะอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุและคลื่นอินฟราเรด โดยมีความยาวคลื่นประมาณ 0.025–0.75 เมตร ความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความถี่ เนื่องจากความถี่ของคลื่นไมโครเวฟจะมีค่าใกล้เคียงกับคลื่นวิทยุและซ้อนทับกับคลื่นเรดาร์ซึ่งจะรบกวนต่อระบบการสื่อสารได้ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดความถี่ของคลื่นไมโครเวฟสำหรับการใช้คลื่นไมโครเวฟในอาหารนั้นความถี่คลื่นที่อนุญาตให้ใช้ได้คือ 2,450 และ 915 MHz ในสหรัฐอเมริกาส่วนในยุโรปความถี่คลื่นที่อนุญาตให้ใช้ได้คือ 986 MHz ทั้งนี้เนื่องจากความยาวคลื่นที่ความถี่เหล่านี้สอดคล้องกับขนาดของอาหาร ซึ่งทำให้การให้ความร้อนมีประสิทธิภาพค่อนข้างมากกว่าที่จะใช้คลื่นที่ความถี่สูงหรือต่ำกว่านี้ ความลึกของการทะลุทะลวงเข้าไปในอาหารเกี่ยวข้องกับความถี่ของคลื่น (วิลโลว์ รังสาดทอง. 2543) โดยทั่วไปความถี่ของไมโครเวฟยิ่งต่ำ ความสามารถในการทะลุทะลวงยิ่งมากขึ้น เช่น พลังงานไมโครเวฟที่ความถี่คลื่น 915 MHz จะทะลุทะลวงได้ดีกว่าพลังงานไมโครเวฟที่ความถี่คลื่น 2450 MHz เนื่องจากความยาวคลื่นที่มากกว่าการประยุกต์ใช้คลื่นไมโครเวฟในอุตสาหกรรมอาหารลักษณะการให้ความร้อนแก่อาหารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟนั้นจะให้ความร้อนแก่อาหารโดยเฉพาะภายในของอาหาร ซึ่งอัตราการให้ความร้อนสูง เป็นไปอย่างรวดเร็ว ไม่ก่อให้เกิดผิวหนังอาหารร้อนเกินไป จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือความเสียหายของผิวหนังอาหารและไม่เกิดสีน้ำตาลซึ่งเป็นความน่าสนใจและดึงดูดให้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารบางชนิดที่ต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาดังกล่าวเนื่องจากพลังงานไมโครเวฟทำให้อาหารร้อนขึ้นทั้งชั้นพร้อมทั้งระเหยความชื้น จึงนับเป็นการช่วยแก้ปัญหาเรื่องที่ทำให้อาหารสามารถนำความร้อนต่ำได้ ทำให้สามารถป้องกันความร้อนจากผิวหนังอาหารได้ ช่วยปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนในช่วงท้ายของการทำแห้งและลดการเกิดเปลือกแข็ง (Case hardening) ทั้งนี้เพราะไมโครเวฟจะเลือกให้ความร้อนเฉพาะส่วนที่ชื้น โดยที่ส่วนที่แห้งจะไม่ได้รับผลกระทบแต่อย่างใดซึ่งไม่จำเป็นต้องให้ความร้อนแก่อากาศในปริมาณมาก จึงสามารถลดการเกิดออกซิเดชันโดยออกซิเจนได้ มีการใช้ไมโครเวฟสำหรับการทำแห้งอาหารที่แห้งแล้วเป็นบางส่วนในขั้นตอนสุดท้าย

2.4.1 การให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave heating)

การทำให้อาหารสุกโดยอาศัยพลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ตัวคลื่นจะส่งผ่านเข้าไปในอาหาร ในขณะที่กำลังอบอาหารอยู่คลื่นไมโครเวฟจะดูดความชื้นที่มีอยู่ในอาหารและแพร่กระจายเข้าไปในอาหาร ทำให้เกิดความร้อนและทำให้อาหารสุก ซึ่งหลักการเกิดความร้อนจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับลักษณะไดโพลของปริมาณน้ำในอาหารมีบทบาทสำคัญต่อการเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟ โครงสร้างโมเลกุลของน้ำประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนที่มีประจุลบ ซึ่งแยกออกอะตอมของไฮโดรเจน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่าไดโพลทางไฟฟ้า (Electric dipole) เนื่องจากประจุไฟฟ้าบวกและลบของโมเลกุลน้ำวางอยู่ในตำแหน่งที่สมมาตรกันเมื่อให้คลื่นไมโครเวฟหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสลับอย่างรวดเร็วแก่อาหาร ไดโพลของน้ำจะพยายามจัดเรียงตัวตามการเปลี่ยนแปลงทิศทางของสนามไฟฟ้าในแต่ละครั้ง สนามแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะเปลี่ยนหลายล้านครั้งต่อวินาที ทำให้น้ำหรือโมเลกุลที่มีขั้วต่างๆ หมุนเพื่อรักษาการจัดเรียงตัวด้วยการเปลี่ยนขั้วอย่างรวดเร็ว การหมุนของโมเลกุลต่างๆ เหล่านี้ทำให้เกิดแรงเสียดทานกับตัวกลางที่อยู่รอบๆ และเกิดความร้อนขึ้น อาหารร้อนขึ้นเมื่อมีการดูดซับคลื่นหรือพลังงานไว้ (วิลโลว์ รังสาดทอง. 2543) ไมโครเวฟเดินทางเป็นเส้นตรงเหมือนแสง ถูกสะท้อนกลับเมื่อกระทบโลหะ เคลื่อนที่ผ่านอากาศ สามารถทะลุผ่านภาชนะที่ทำด้วยแก้ว พลาสติก กระดาษ หรือไม้ หรือถูกดูดซับโดยส่วนประกอบในอาหารซึ่งมีน้ำเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นเมื่อทำปฏิกิริยากับวัตถุต่างๆ ไอออนหรืออนุภาคที่มีประจุจะถูกดึงดูดหรือผลักออกไปโดยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งถูกเร่งหรือชนกับโมเลกุลอื่นๆ ทำให้เกิดความร้อนขึ้น การให้ความร้อนที่เป็นแบบไดอิเล็กทริกหรือความร้อนที่เกิดขึ้นภายในวัตถุโดยตรงขณะที่คลื่นที่ผ่าน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าการให้ความร้อนโดยทั่วไปที่อาหารสุกโดยการถ่ายเทความร้อน 3 วิธี คือ การนำ การพา และการแผ่รังสี (นิรนาม. 2539) ดังนั้นในการให้ความร้อนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟจึงปัจจัยที่สำคัญที่ควรพิจารณา คือ อุณหภูมิเริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ ขนาด รูปร่าง ความหนาแน่นหรือความเป็นเนื้อเดียวกัน ความร้อนจำเพาะ สัมประสิทธิ์การนำความร้อน และปัจจัยทางไดอิเล็กทริก

2.5 การดัดแปรแป้ง (Modified Starch)

แป้งดัดแปร (Modified Starch) ความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งสาลี มาเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อน และ/หรือเอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ ซึ่งต้องเป็นไปตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2535)

2.6 วัตถุประสงค์ของการดัดแปรแป้ง

การดัดแปรแป้งนั้นมีความจำเป็นเนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติเฉพาะตัว โดยเฉพาะแป้งดิบในธรรมชาติมีข้อจำกัดในการใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ขนาดรูปร่าง การพองตัว การเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อรับความร้อน แรงเฉือน และมีช่วงความหนืดที่แคบ มีลักษณะเนื้อสัมผัสไม่ดี มีความคงตัวต่อแรงเฉือนหรือความคงตัวต่อสภาวะต่างๆ ในการผลิตตำราซึ่งคุณลักษณะนี้เองในบางครั้งไม่เป็นที่ต้องการต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมหรือในการผลิตอาหาร (กล้าณรงค์ ศรีรอดและเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543) ดังนั้นหากสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านี้ของแป้ง จะทำให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้มากขึ้น เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากการดัดแปรแป้ง จะทำให้เกิดคุณสมบัติบางประการของแป้งดิบ เช่น การทำให้เนื้อสัมผัสดีขึ้น ความคงตัวต่อสภาวะการผลิตทั้งที่อุณหภูมิ และกรดที่สูง หรือที่สภาวะการกวนหรือแรงเฉือน การเกิดเจลลาติไนซ์ การคืนตัว การสูญเสีย น้ำของเจลลดลง มีความคงตัวในการละลายจากการแช่แข็งเพิ่มขึ้น ลักษณะของเนื้อเจลที่ขึ้น มีคุณสมบัติในการเกิดประจุ มีคุณสมบัติในการจับตัวกับน้ำ (Hydrophobic) หรือความสามารถในการผสมกับตัวทำละลายอื่นๆ (Fausto *et al.* 1997)

2.7 การดัดแปรทางกายภาพ (Physical modification)

มีหลักการที่สำคัญคือ ให้ความร้อนแก่สารละลายสตาร์ชที่ชั้นเหนียว จนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเจลลาติไนซ์เซชัน แล้วทำให้แห้งทันทีเพื่อป้องกันการเกิดรีโทรกราเดชันโดยการนำสารละลายสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 40-50 ผ่านเครื่องทำแห้งแบบลูกกลิ้ง (Drum dryer) ชนิดลูกกลิ้งเดี่ยว (Single drum dryer) หรือลูกกลิ้งคู่ (Double drum dryer) นอกจากนี้แล้วยังสามารถใช้เครื่องทำแห้งแบบสเปรย์ (Spray dryer) หรือเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) เช่น แป้งพรีเจลลาติไนซ์ (Pre-gelatinized starch) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งจนผ่านชั้นตอนของเจลลาติไนซ์เซชันแล้วทำ

แห้งทันที ซึ่งเป็นแป้งที่สามารถได้ในละลายน้ำเย็น ส่วนแป้งละลายน้ำเย็นที่ยังคงรูปร่างของเม็ดสตาร์ชอยู่ (Granular-cold-water-soluble-starch : GCWSS) เป็นการแปรรูปแป้งจนแป้งสามารถละลายได้ในน้ำเย็นโดยไม่ผ่านขั้นตอนการเจลลาคีโนส หรือการลดขนาดเม็ดสตาร์ชโดยทางกล จะได้เม็ดสตาร์ช ที่มีขนาดเล็กกว่าปกติ รวมไปถึงการแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (Heat moisture treatment) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Fausto *et al.* 1997)

ประโยชน์ที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ช่วยให้เตรียมอาหารได้ง่าย สะดวก และรวดเร็วโดยเติมน้ำเย็นก็สามารถรับประทานได้ทันที ได้แก่ การใช้ในพุดดิ้ง (Instant-type pudding) ใช้ในส่วนผสมของเค้ก (Cake mixes) เพิ่มการดูดซึมน้ำ ใช้ในผลิตภัณฑ์เนื้อเพื่อรักษาความชุ่มชื้น (Moisture Stabilizer) ใช้ในอุตสาหกรรมของซูปผง (Dry soup mixes) (Radley. 1976)

2.8 การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnological modification)

โดยทั่วไปแป้งประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ อะไมโลสและอะไมโลเพคตินในอัตราส่วนที่แตกต่างกันของแป้งแต่ละชนิดของแป้งนั้นๆ สำหรับแป้งที่มีอะไมโลสประมาณร้อยละ 20-30 ในแป้งบางชนิดมีอะไมโลสสูงกว่าปกติหรือบางชนิดที่ไม่มีเลย จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในลักษณะที่แตกต่างกัน ซึ่งได้มีการปรับปรุงพันธุ์พืชที่นำมาใช้ในการผลิตแป้ง 2 ชนิด ได้แก่ แป้งที่มีอะไมโลสต่ำหรือไม่มีเลย (Low amylose / waxy starch) หรือแป้งที่มีอะไมโลสสูง (High-amylose starch) (Kerr. 1950)

2.9 การดัดแปรทางเคมี (Chemical Modification)

การดัดแปรสตาร์ชตามวิธีของ Greenwood (1976) สามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่

2.9.1 Degradative chemical modification

การดัดแปรสตาร์ชแบบนี้จะทำให้โครงสร้างของสตาร์ชเกิดการเปลี่ยนแปลงโมเลกุล สตาร์ชแตกตัว ซึ่งจะเกิดที่ตำแหน่ง แอลฟา-ดี-1-4-กลูโคซิดิกเป็นส่วนมากทำให้ความหนืดของสตาร์ชลดลง รวมถึงการเกิดออกซิเดชันของหมู่ไฮดรอกซิลเป็นหมู่อัลดีไฮด์ คีโตนหรือคาร์บอกซิล การดัดแปรสตาร์ชด้วยกรด เป็นกระบวนการดัดแปรสตาร์ชที่มีผลทำลายโมเลกุลสตาร์ชให้มีขนาดเล็ก ลดความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ช ความสามารถในการพองตัวและความข้นหนืดลดลง ทำให้เกิดแป้งที่มีความหนืดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Fausto *et al.* 1997 เป็นวิธีการแตกสลายโมเลกุลของแป้ง (Degradation of the starch molecule : Converted starch) ทำให้สตาร์ชละลายได้ในความเข้มข้นที่สูงกว่าสตาร์ชธรรมชาติ (Wurzburg. 1986) กรดที่นิยมใช้ คือ

กรดกำมะถัน และกรดไฮโดรคลอริกโดยกรดที่ใช้ในการผลิตนั้นจะตัดตรงพันธะ แอลฟา-ดี-กลูโคซิดิกของอะไมโลเพคตินได้ง่าย ทำให้ขนาดเล็กลง

วัตถุประสงค์หลักของการดัดแปรสตาร์ชวิธีนี้ก็เพื่อให้สามารถใช้สตาร์ชได้หลากหลายมากขึ้น เพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ ควบคุมความแข็งแรงของเจล การดัดแปรความคงตัวของสตาร์ช โดยทั่วไปแล้วจะใช้สตาร์ชได้ไม่เกินร้อยละ 6 เพราะจะให้ความหนืดสูงมาก แต่ในผลิตภัณฑ์บางอย่าง เช่น ลูกกวาดที่มีลักษณะกัมที่นุ่ม ต้องการสตาร์ชความหนืดต่ำที่ปริมาณของแข็งสูงๆ เพื่อให้เกิดโครงสร้างของเจลและการแข็งตัว (Radley. 1976)

การไฮโดรไลซ์ด้วยกรด ใช้กรดเกลือ หรือกรดกำมะถันเจือจาง ทำปฏิกิริยากับของผสมสตาร์ชเข้มข้น ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลลาติไนซ์เซชันของสตาร์ช เป็นเวลานานพอเพียงจนกระทั่งมีคุณสมบัติตามที่ต้องการสตาร์ชดัดแปรที่ได้ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปเม็ดสตาร์ช มีความหนืดต่ำขณะร้อน ความเหนียวในการยึดเกาะเพิ่มมากขึ้น (Cohesiveness) สตาร์ชที่สูงจะมีริโทรกราเดชันที่สูงและได้เจลที่แข็งแรงเมื่อทิ้งไว้ให้เย็น เหมาะสำหรับการผลิตลูกกวาด สตาร์ชที่ดัดแปรที่ได้จากวิธีผลิตนี้อาจเรียกได้อีกว่าแอซิดทินสตาร์ช (Acid-thin starch)

เด็กตริไนเซชัน (Dextrinization) เป็นการให้ความร้อนแก่แป้ง แห้งในสภาพที่มีกรดเกลือหรือกรดกำมะถัน เกิดการไฮโดรไลซ์โมเลกุลสตาร์ช ทำให้มีขนาดเล็กลงเป็นเด็กซ์ตริน ซึ่งต่างจากแอซิดทินสตาร์ช ตรงที่เด็กซ์ตรินจะมีสีน้ำตาลหรือของแข็งอื่นๆที่สามารถละลายน้ำได้รวมอยู่ด้วย เด็กซ์ตรินให้ความหนืดต่ำ แต่ความสามารถในการละลายสูง อาจสูงถึงร้อยละ 100 จึงใช้เด็กซ์ตรินที่ความเข้มข้นสูงๆในการแปรรูปอาหารได้ เด็กซ์ตรินอาจทำให้เกิดเจลหรือไม่ก็ได้ขึ้นอยู่กับระดับการเกิดเด็กซ์ตริไนซ์เซชัน มักใช้เด็กซ์ตรินเป็นสารทำให้เกิดฟิล์ม และสารยึดเกาะที่กินได้ สำหรับเคลือบลูกกวาดหรือเคลือบถั่ว นอกจากนี้ยังใช้เด็กซ์ตรินในการผลิต ขนมอบอาหารว่าง ของหวาน สารให้กลิ่นรส และสี (Lineback and Inglett. 1982) การดัดแปรสตาร์ชด้วยการออกซิเดชัน (Oxidation) ออกซิไดซ์สตาร์ชเป็นแป้งที่มีประจุลบ เกิดจากการใช้สารที่เคมีที่มีคุณสมบัติในการออกซิไดซ์แป้งในสภาพที่เป็นสารแขวนลอย โดยปกติจะเตรียมสารละลายให้มีความเข้มข้นของแป้งร้อยละ 35 ซึ่งสารที่ก่อให้เกิดการออกซิไดซ์ คือ สารละลายโซเดียมไฮโปคลอไรด์ ที่มีคลอรีนความเข้มข้นร้อยละ 5-10 เป็นองค์ประกอบ ควบคุมให้เกิดปฏิกิริยาในสภาวะที่เป็นด่างและที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส การออกซิไดซ์จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่สำคัญ คือ ดีโพลีเมอไรซ์เซชัน (Depolymerization) และคุณสมบัติของหมู่คาร์บอกซิลโดยหมู่คาร์บอกซิล หรือหมู่คาร์บอนิลที่อยู่ในโมเลกุลของอะไมโลสเป็นตำแหน่งที่สำคัญในการตอบสนอง ต่อสารออกซิไดซ์ ส่งผลให้เกิดแป้งเปียก และเจลที่มีการเกิดริโทรกราเดชันลดลง เกิดแป้งเปียกที่ใส มีความหนืดต่ำเมื่อให้ความร้อนเกิด Peak viscosity ต่ำ หากใช้ในการผลิตฟิล์มจะมีความยืดหยุ่นสูง และให้ลักษณะของแป้งที่มีขาว (Fausto *et al.* 1997)

2.9.9 Nondegradative chemical modification ได้แก่

2.9.2.1 การแทนที่ด้วยหมู่ทางเคมี (Chemical substitution)

การดัดแปรนี้จะป้องกันการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชในสารละลาย โดยเฉพาะอะไมโลสซึ่งไหลออกมาในระหว่างการให้ความร้อน ทำโดยการลดจำนวนหมู่ไฮดรอกซิลลง ทำให้การรวมตัวระหว่างโมเลกุลลดลง (Kerr, 1950) ปฏิกริยานี้จะเติมหมู่ทางหน้าที่ (Functional group) เข้าไปแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ช แบ่งการดัดแปรโดยวิธีนี้เป็น 2 แบบ คือ เอสเตอริฟิเคชันและอีเทอร์ิฟิเคชัน ไฮเดียมเมตาฟอสเฟต ไฮเดียมออโทฟอสเฟต ได้แก่ สตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ (Starch phosphate monoester) หรือ สตาร์ชฟอสเฟตไดเอสเทอร์ (Starch phosphate diester) (Wurzburg, 1986)

2.9.2.1.1 เอสเตอริฟิเคชัน ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ เช่น โพรพิลีนออกไซด์ ได้ ไฮดรอกซีโพรพิลสตาร์ช (Hydroxypropyl starch) สตาร์ชที่ได้คุณสมบัติเจลลาติโนเซชันลดลง สตาร์ชที่มีความใสเพิ่มมากขึ้น และมีความคงตัวต่อการแช่แข็ง และการละลายมากขึ้น ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร คือ ใช้ในอาหารแช่เย็น หรือแช่แข็งแต่ไม่เหมาะที่จะใช้ในอาหารที่เป็นกรด มีแรงเฉือน หรืออุณหภูมิสูง อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติโนเซชันลดลง ความหนืดสูงขึ้น ความใสเพิ่มมากขึ้น การเกิดรีโทรกราเดชันและซินเนอริซิซลดลง มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย แต่สามารถปรับโดยการดัดแปรร่วมกับครอสลิงกิง (Fausto *et al.* 1997)

2.9.2.1.2 การทำให้เกิดพันธะข้าม (Crosslink) การดัดแปรด้วยวิธีการทำให้เกิดพันธะข้าม เป็นการใส่สารเคมีชนิดต่างๆ ซึ่งมีกลุ่มทำปฏิกิริยาได้ตั้งแต่ 2 กลุ่ม (Multifunctional reagent) ขึ้นไปทำปฏิกิริยากับสตาร์ช โดยจะเป็นปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันหรืออีเทอร์ิฟิเคชันขึ้นอยู่กับสารเคมีที่ใช้ โดยสามารถจะทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชมากกว่า 1 หมู่ ทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้าม ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชซึ่งเป็นพันธะโควาเลนต์ ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชไว้มีกำลังมากขึ้น ดังตัวอย่างสตาร์ชที่เกิดสามารถทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามได้

2.10 สตาร์ชฟอสเฟต

เป็นการดัดแปรสตาร์ชแบบพันธะข้ามโดยใช้สารเคมี คือ ไฮเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ซึ่งเป็นสารประกอบโพลีฟอสเฟตแบบวงแหวน (Cyclic-polyphosphate) ลักษณะทั่วไปจะเป็นผลึก ปริมาณสารเคมีชนิดนี้ที่ใช้ในการดัดแปรประมาณร้อยละ 0.05-0.3 ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง (Wurzburg, 1986) ปฏิกริยาจะเกิดด้านนอกของเม็ดสตาร์ช และเกิดที่อะไมโลเพคตินมากกว่า อะไมโลส (Jane *et al.* 1992) ลักษณะปฏิกิริยาเป็นเอสเตอริฟิเคชัน ปัจจัยที่มีผลต่อ

การดัดแปรสสารโดยใช้สารเคมีชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต หากมี ปริมาณที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาตั้งแต่ 0.01-3.0 (Wurzburg. 1986) และ ความเข้มข้นร้อยละ 1.4-2 จะให้ผลดีในการดัดแปรสสารข้าวเจ้าเพื่อใช้เป็นแป้งชุปทอดใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต ในปริมาณต่ำมีผลทำให้ความชื้นเหน็ด เมื่อน้ำแป้งได้รับความร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นมีความคงตัวต่อการ กวนดีขึ้นจึงมาเสถียรภาพความเหน็ดสูงขึ้น เนื่องจากพันธะข้ามที่เกิดขึ้นระหว่างสายโมเลกุลสสาร ทำให้เม็ดสสารมีความแข็งแรงมากขึ้นสามารถที่จะอุ้มน้ำ พองตัว ให้ความเหน็ดได้มาก และ เมื่อปริมาณของสารในการทำปฏิกิริยามากขึ้น ความเหน็ดจะไม่ปรากฏเป็นยอดสูงสุด แต่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆระหว่างที่ได้รับความร้อน เนื่องจากพันธะข้ามที่มากขึ้นทำให้เม็ดสสารมีความแข็งแรง มากสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ไม่แตกออก ทำให้ความเหน็ดไม่ลดลง เมื่อปริมาณ สารสูงขึ้นจนกระทั่งเกิดปฏิกิริยาพันธะข้ามในระดับสูงมาก มีผลทำให้ความเหน็ดลดต่ำลง เนื่อง จากเกิดปฏิกิริยาพันธะข้ามในระดับสูงมาก เม็ดสสารมีความแข็งแรงมากจึงยอมให้โมเลกุลของ น้ำเข้าได้น้อย จึงเกิดการพองตัวน้อย ทำให้ความเหน็ดต่ำลง (Wurzburg. 1986) สำหรับปริมาณ สารชนิดนี้ในอุตสาหกรรมอาหาร มีเกณฑ์ที่กำหนด คือ ปริมาณฟอสเฟต ไม่เกินร้อยละ 0.14 สำหรับสสารดัดแปรที่มาจากแป้งมันฝรั่งหรือแป้งจากข้าวสาลี และไม่เกินร้อยละ 0.04 สำหรับ พืชชนิดอื่นๆ (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2535) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา พบว่า การใช้โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตทำให้ปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้ามเกิดได้ดีที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และในสภาพเดียวกันหากใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 50 องศาเซลเซียส จะต้องใช้ ปริมาณสารเคมีมากขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารเคมี อุณหภูมิและเวลาในการทำ ปฏิกิริยาเป็นไปในทิศทางเสริมกัน สภาพพิเศษ โดย เบสจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาพันธะข้าม โดยระดับของการเกิดพันธะข้ามจะเพิ่มตามพีเอชที่เพิ่มขึ้น (Whistler and Paschall. 1967)

Napapron and Saiyavit (2003) ได้มีการศึกษาคุณลักษณะและการใช้ประโยชน์จากการ ดัดแปรแป้งมันสำปะหลังทางเคมีแบบเกิดการเชื่อมข้ามโดยใช้กรดในการผลิตยา กรดที่ใช้คือ โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และ กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 6 ที่อุณหภูมิห้อง นาน 192 ชั่วโมงเปรียบเทียบกับ แป้งดิบและแป้งที่ดัดแปรทางเคมีด้วยกรด พบว่า การเกิดเชื่อมข้ามของ แป้งจะไม่มีผลต่อการเพิ่มโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกหรือการใช้แรงกดในแป้งที่เกิดเชื่อมข้ามจะใช้ แรงในการกดน้อย กว่าแป้งดิบและแป้งที่ดัดแปรทางเคมีด้วยกรด เพราะการย่อยแป้งด้วยกรดจะ ไปเพิ่มส่วนของโครงสร้างที่เป็นผลึกเนื่องจากการกำจัดส่วนที่เป็นอสัณฐาน ดังนั้นการเตรียมแป้ง ดัดแปรจากแป้งมันสำปะหลังทางเคมีแบบเกิดการเชื่อมข้ามโดยใช้กรดจะให้ลักษณะของเม็ดยาที่ ดีกว่าแป้งที่ดัดแปรทางเคมีด้วยกรดเพียงอย่างเดียว

2.11 สตาร์ชซัคซิเนต

สตาร์ชซัคซิเนตได้จากการนำสตาร์ชไปทำปฏิกิริยากับซัคซิินิกแอนไฮไดรต์ได้สตาร์ชดัดแปรที่มีสูตรโครงสร้างดังนี้ การเตรียมสตาร์ชซัคซิเนตที่มีระดับการแทนที่สูง ทำได้โดยการใช้กรดแอซิดิกเข้มข้นที่มีไฮเดียมอะซิเตตอยู่ด้วย และควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส ซัคซิินิกแอนไฮไดรต์จะทำปฏิกิริยากับสตาร์ชได้ ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดในรูปเม็ดสตาร์ช ถ้าใช้ซัคซิเนตแอนไฮไดรต์เกินกว่าร้อยละ 3 สตาร์ชจะพองตัวจนถึงระดับที่ทำให้ทรงได้ยากมาก เนื่องจากคุณสมบัติในการจับกับน้ำได้มากของหมู่คาร์บอกซิลิกที่อยู่ในรูปของเกลือแอลคาลิซึ่งสามารถจับกับน้ำได้มาก ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัว สตาร์ชซัคซิเนตมีแนวโน้มที่จะพองตัวได้ในน้ำเย็น โดยเฉพาะที่ระดับของการใช้ซัคซิเนตแอนไฮไดรต์ ความเข้มข้นร้อยละ 3-4 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ต่ำลง หมู่ซัคซิเนตซึ่งสามารถจับกับน้ำได้มากสูงมากทำให้สตาร์ชมีความข้นหนืดสูง มีความคงตัวต่ออุณหภูมิต่ำและการละลายหลังการแช่แข็ง ให้ความใส และยังมีคุณสมบัติในการเกิดฟิล์มที่ดี ในอาหารจะใช้ซัคซิเนตเป็นตัวยึดเกาะและให้ความข้นหนืด ในผลิตภัณฑ์อาหารพวกซूप อาหารว่าง อาหารกระป๋อง อาหารแช่เย็นและอาหารแช่เยือกแข็ง (Whistler and Paschall, 1967)

2.12 สตาร์ชอะซิเตต

สตาร์ชอะซิเตตที่มีระดับการแทนที่ต่ำ ได้จากปฏิกิริยาในสภาพเบสที่มีน้ำเป็นตัวกลางเพื่อให้สารประกอบเชิงซ้อนของแอลคาลิ สตาร์ชทำปฏิกิริยากับอะซิติกแอนไฮไดรต์ แอซิทิลเลชัน (Acetylation) เป็นปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน หมู่แอซิทิลที่จะเกาะกับโมเลกุลของสตาร์ชด้วยพันธะโควาเลนต์ (Whistler *et al.* 1984) ระดับการแทนที่มากที่สุด คือ 3 โมลของแอซิทิล ต่อ 1 โมลของหน่วยแอนไฮโดรกลูโคส หมู่แอซิทิลจะเข้าแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลอิสระได้ 3 หมู่ที่อยู่ในแต่ละหน่วย ค่าระดับการแทนที่จะเท่ากับ 3 เรียกว่า สตาร์ชไตรอะซิเตต ปฏิกิริยาเกิดที่บริเวณออสันฐานของเม็ดสตาร์ชซึ่งสารเคมีและสารเร่งปฏิกิริยาเข้าไปถึงได้มากกว่าบริเวณผลึก ในการทำปฏิกิริยาแอซิทิลเลชัน จะมีการแข่งขันระหว่าง ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของแอนไฮไดรต์ ปฏิกิริยาการเติมหมู่แอซิทิลเลชันในสตาร์ช และปฏิกิริยาดีแอซิเลชัน จึงควรเลือกพีเอชในการทำปฏิกิริยาในช่วง 8.0-8.5 ให้คงที่ พร้อมกับกำกับการเติมสารเคมีที่ละน้อย ควบคุมอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาประมาณ 15-25 องศาเซลเซียส ซึ่งภายใต้สภาวะการควบคุมดังกล่าวนี้จะให้ผลดีที่สุด คือประมาณร้อยละ 70-80 ของส่วนที่ทำปฏิกิริยาจะเกาะติดอยู่บนโมเลกุลแป้ง สตาร์ชอะซิเตตสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่เยือกแข็งได้เนื่องจากมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายป้องกันการเปลี่ยนแปลงเนื้อสัมผัสของอาหารจากการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ช (Kerr, 1950)

Moorthy, S.N (1985) ได้ศึกษาถึงกระบวนการอะซิติลเลชัน (Acetylation) แป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กรดเปอร์คลอริกที่ก่อให้เกิดอนุพันธ์ของแป้ง พบว่า อุณหภูมิที่ก่อให้เกิดระดับของการแทนที่และได้ผลิตภัณฑ์มากที่สุดคือ 30 องศาเซลเซียส แป้งที่ได้มีคุณสมบัติของเจลที่ใสและคงตัวมากขึ้นในขณะที่ความหนืดลดลง

2.13 สตาร์ชซีเตรต

เป็นการดัดแปรแป้งที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน โดยใช้สารเคมีในกลุ่มคาร์บอกซิลิก ซึ่งกรดซิตริกมีคุณสมบัติเฉพาะสำหรับการนำมาใช้เนื่องจาก กรดซิตริกจะไม่ทำปฏิกิริยาในสภาพที่เป็นของเหลว ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาจะต้องอาศัยการให้ความร้อนร่วมด้วย ซึ่งแตกต่างจากการใช้กรดชนิดอื่นๆ ที่สามารถทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน ในสภาพที่เป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง การผลิตสตาร์ชเอสเตอริฟิเคชัน นั้นสามารถผลิตได้โดยใช้กรดคาร์บอกซิลิกโดยตรงหรือการใช้อนุพันธ์ของกรดเหล่านี้ก็ได้ เช่น แอนไฮไดรด์ แอซิลคลอไรด์ หรือสารประกอบ ซึ่งมีสิ่งที่จะต้องควบคุมสมดุลย์และอัตราการเกิดปฏิกิริยาให้เหมาะสม (Wurzburg. 1986)

Klaushofer and Berghofer (1978) ได้ศึกษาถึงการผลิตสตาร์ชซีเตรตและการใช้ประโยชน์ โดยการผลิตสตาร์ชซีเตรตจากปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันในสภาพที่มีความชื้นต่ำ จากแป้งที่มาจากธัญพืชและจากส่วนรากด้วยสารอินทรีย์ เช่นการใช้กรดซิตริกซึ่งผสมลงโดยตรงที่ระดับความเข้มข้นต่างๆในสภาพที่เป็นสารละลายภายใต้สภาวะที่มีค่ากรดต่างที่เหมาะสม รวมไปถึงการควบคุมอัตราส่วนของกรดต่อแป้งที่ใช้ความเข้มข้นเริ่มตั้งแต่ร้อยละ 5-40 ค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 4-6.5 ซึ่งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมนี้จะทำให้ได้แป้งที่มีความคงทนต่อการแช่แข็งและการละลาย ทนต่อการให้แรงเฉือน หรือกรด และเมื่อทดสอบการย่อยพบว่าแป้งที่เกิดเอสเตอริฟิเคชันจะสามารถย่อยได้ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปรแบบเกิดอนุพันธ์

Narkrgsa *et al* (1992) ได้ใช้เครื่องเอกซทรูเดอร์ทำการผลิตสตาร์ชดัดแปรสตาร์ชซีเตรต สตาร์ชฟอสเฟต และสตาร์ชแคทไอออนิก โดยใช้กรดชนิดต่างๆตามลำดับ กรดซิตริก โซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต และ 2,3- epoxypropyl trimethyl ammonium chloride กับ 3- chloro-2-hydroxypropyl- trimethyl ammonium chloride พบว่า คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชทั้งสามชนิดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการคือระดับของการเกาะเกี่ยวระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกและความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาจากเครื่องเอกซทรูเดอร์ โดยหากระดับของการเกาะเกี่ยวระหว่างกรดคาร์บอกซิลิกและความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น จะส่งผลต่อการส่งเสริมต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพให้ดีขึ้น เช่น มีความคงทนต่อแรงเฉือน คงทนต่อการแช่แข็งและการละลาย

2.14 เทคนิคการดัดแปรแป้ง

การแปรรูปไม่ว่าจะเป็นแบบกายภาพ หรือทางเคมี มีปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นได้ในลักษณะต่างๆกัน และมีผลต่างๆกัน เช่น ปฏิกิริยาที่ใช้กับเม็ดสตาร์ชแห้งหรือกึ่งแห้ง ในปฏิกิริยานี้มีการผลิตอนุพันธ์ของแป้งโดยการให้ความร้อนแก่แป้งดิบแห้งและสารอนุพันธ์ ที่อุณหภูมิ 100–200 องศาเซลเซียส ในบางปฏิกิริยาใช้แป้งที่มีความชื้นร้อยละ 5-10 จึงเรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยากึ่งแห้ง นิยมใช้อุตสาหกรรมอาหารได้แก่

2.14.1 ปฏิกิริยาภายใน Rotating kiln (Rotating dryer)

การผลิตด้วยวิธีนี้จะต้องมีถังปฏิกรณ์ (Reactor) ชนิดนี้เป็นรูปทรงกระบอก เดินเครื่องด้วยความเร็วต่ำประมาณ 25 รอบต่อนาที ใช้อุณหภูมิในช่วง 100–200 องศาเซลเซียส ใช้ในการผลิตเด็กซ์ตริน (Dextrin) และโมโนสตาร์ชฟอสเฟต (Monostarch phosphate) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเป็นการดัดแปรแป้งโดยใช้ความร้อนสูง ในลักษณะเม็ดสตาร์ชแห้งหรือกึ่งแห้ง

2.14.2 ปฏิกิริยาภายใน Mixer โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการผสมทั่วไป เช่น มิกเซอร์ (Mixer) และ เบนเดอร์ (Blender) หรือที่เรียกกันว่าเทอร์โมเบนเดอร์ (Thermoblender) และ เทอร์โมมิกเซอร์ (Thermomixer) เช่น การผลิต Ungelatinization Starch ether โดยผสมแป้งความชื้น 10–20 % กับอัลคาไลด์ (Alkali) และ สารอิมัลชัน

2.14.3 ปฏิกิริยาภายใน Fluidization-bed reactor ในปฏิกิริยานี้แป้งจะอยู่ในสภาพของไหล โดยใช้ Fluidizing gas ที่ความหนืดและอุณหภูมิที่ต้องการ พ่นแป้งให้เคลื่อนไหวตลอดเวลา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 100–200 องศาเซลเซียส เช่น การผลิตเด็กซ์ตริน หรือโมโนสตาร์ชฟอสเฟต

2.14.4 ปฏิกิริยาภายในเอ็กซ์ทรูเดอร์ (Extruder) เอ็กซ์ทรูชัน ใช้สำหรับการผลิตแป้งพรีเจลลาติไนซ์และแป้งอีเทอร์ ในรูปแบบที่ผ่านเจลลาติไนซ์แล้ว โดยใช้ส่วนผสมของแป้ง สารเคมีดัดแปรแป้ง ตัวเร่ง และน้ำปริมาณร้อยละ 10–60 ของปริมาณแป้ง อุณหภูมิที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 100–200 องศาเซลเซียส

2.15 การดัดแปรแป้งด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

Narkruga (1993) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยไมโครเวฟเทคนิค โดยนำแป้งมันสำปะหลังมาผสมกับสารละลายกรดซิตริก ทำการให้ความร้อนโดยใช้ไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต พบว่าการผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยไมโครเวฟเทคนิคนี้มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาอยู่ระหว่างร้อยละ 59-87 มีการเกาะเกี่ยวกันระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชและกรด

ชนิดที่ร้อยละ 3-8.7 โดยประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยามีความสัมพันธ์ขึ้นอยู่กักระยะเวลาในการให้ความร้อนและความเข้มข้นของกรดซิดริก

สุปราณี เต็มเตชาตพงศ์ และณัฐศิณี เลาหุ่ง (2538) ศึกษาการเกิดเจลลาตินไนซ์ของแป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลังเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟโดยนำแป้งมาปรับปริมาณความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 13 15 20 25 และ 27 ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต เป็นเวลา 3.2 8.5 และ 10 นาที พบความสัมพันธ์ของเวลาในการให้ความร้อนและปริมาณความชื้นเริ่มต้นต่ออัตราการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชันของแป้งทั้งสองชนิด

Muzimbaranda and Tomasik (1994) ทำการดัดแปรแป้งทางกายภาพและทางเคมีโดยใช้ไมโครเวฟความถี่ 2450 เมกะเฮิร์ต เมื่อปรับสภาพความชื้นของแป้งแล้วนำไปให้ความร้อนโดยไมโครเวฟ พบว่าเมื่อเวลาการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟเพิ่มขึ้นความหนืดของแป้งลดลง อุณหภูมิในการเกิดเจลลดลงและเกิดสีน้ำตาล การเปลี่ยนแปลงนี้ขึ้นอยู่กัปริมาณความชื้น รูปทรงของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากความสามารถในการแพร่กระจายของน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ช ในโครงสร้างเฮลิกซ์รวมทั้งอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน จะเกิดการเด็คซ์ทรินไนเซชัน ส่วนแป้งที่ผสมกับสารฟอรัมาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 40 เพื่อทำการดัดแปรแป้งทางเคมี เมื่อผ่านไมโครเวฟที่เวลาสูงขึ้น และปริมาณสารฟอรัมาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 40 สูงขึ้นแล้วแป้งมีคุณสมบัติสามารถเกิดเจลที่มีความหนืดต่ำได้ ความคงทนของเจลขึ้นอยู่กัปริมาณสารฟอรัมาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 40 โดยที่ปริมาณสารฟอรัมาลดีไฮด์เข้มข้นร้อยละ 40 แป้งสามารถ ละลายน้ำได้ดีและจากการดัดแปรแป้งทางเคมีโดยเติมทีเทรียมคลอไรด์ ($TiCl_4$) ความเข้มข้นร้อยละ 5 แล้วนำมาให้ความร้อนโดยไมโครเวฟนาน 10 นาที แป้งสามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิห้องแสดงให้เห็นว่าไมโครเวฟมีคุณสมบัติในการ Depolymerization และช่วยให้เกิดปฏิกิริยาร่วมกันได้ดีด้วย

Maneeseriraj *et al.* (1998) ทำการผลิตสตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์และสตาร์ชฟอสเฟตไดเอสเทอร์จากสตาร์ชข้าวเจ้าและมันสำปะหลังด้วยไมโครเวฟ พบความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟตที่ใช้กัระยะเวลาในการให้ความร้อน โดยสตาร์ชฟอสเฟตที่ได้จากสตาร์ชแป้งข้าวเหนียวมีคุณสมบัติคงทนต่อการแช่แข็งและการละลายเหมาะที่จะนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารแช่แข็ง

Lewandowicz *et al.* (2000) ศึกษาถึงโครงสร้างและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชเอสเทอร์ จากแป้งมันฝรั่งด้วยไมโครเวฟเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม โดยใช้สารละลายยูเรีย โซเดียมฟอสเฟตและกรดฟอสฟอรัส พบว่าการใช้ไมโครเวฟจะสามารถผลิตแป้งที่มีคุณสมบัติจำเพาะที่หลากหลายมากกว่าวิธีดั้งเดิม การใช้ไมโครเวฟ จะไม่มีผลต่อการเข้าแทนที่ของชนิดหมู่สารเคมีในโมเลกุลของแป้งอีกทั้งการใช้ไมโครเวฟจะทำให้เกิดระดับของการแทนที่ในระดับที่ต้องการโดยใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการผลิตแบบดั้งเดิม โดยที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง โครงสร้างทางเคมี

โครงสร้างภายในอนุภาค (Microstructure) หรือโครงสร้างของผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิม และต่อมาในปี 2002 ศึกษาแป้งดัดแปรที่ทนต่อการย่อยสลาย (Resistant starch) จากพืชหัวเมื่อผ่านกระบวนการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟ เพื่อช่วยในการย่อยสลายของแป้งชนิดนี้ในร่างกาย ได้ดีขึ้นโดยนำแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันฝรั่งมาปรับปริมาณความชื้นร้อยละ 35 ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแล้วอุณหภูมิจะสูงขึ้นเป็นเส้นตรง คุณสมบัติของแป้งที่ได้จะมีอุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์สูงขึ้น และที่ปริมาณความชื้นสูงตั้งแต่ ร้อยละ 20-35 ความสามารถในการละลายต่ำลงแป้งที่ได้มีปริมาณ Resistant starch ต่ำลง ทำให้ร่างกายสามารถย่อยแป้งจากพืชหัวเพื่อเป็นพลังงานได้ง่ายขึ้น

Gonzalez and Perez (2002) ศึกษาถึงผลของการดัดแปรแป้งจากถั่วแดงโดยใช้ไมโครเวฟเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นที่อุณหภูมิสูงและแป้งดิบต่อคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี ลักษณะการไหล และคุณลักษณะทางสัณฐานวิทยา พบว่า การผลิตทั้งสองวิธีจะทำให้ มีความชื้น โปรตีน เยื่อใย การอุ้มน้ำ การละลายน้ำ เกิดการคืนตัวของแป้งค่าความหนืด และ การพองตัวลดลง แต่ปริมาณ เถ้า ริดิทซึ่งซูการ์ และความหนาแน่นสัมบูรณ์เพิ่มขึ้นการดัดแปรแป้งทั้งสองวิธีนี้จะแตกต่างกันที่ การใช้ไมโครเวฟจะมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดสตาร์ช

2.16 คุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งหลังผ่านไมโครเวฟ

MacArthur *et al.* (1981) นำแป้งสาธิตพันธุ์ฮาร์ดเรดสปริง (Hard red spring) มาให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 625 วัตต์ เป็นเวลา 480 วินาที และเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 6 เดือน นำแป้งดังกล่าวมาผลิตเป็นขนมปัง พบว่าการใช้ไมโครเวฟให้แก่แป้งทำให้ขนมปังมีลักษณะของปริมาตรและการอุ้มน้ำดีกว่าขนมปังที่มาจากแป้งที่ไม่ผ่านการใช้ไมโครเวฟ เนื่องจากไมโครเวฟจะไปทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางชีวเคมีของแป้ง เมื่อตรวจสอบคุณสมบัติของของผสมแป้ง พบว่าไมโครเวฟไปลดคุณสมบัติความคงทนของของผสม ช่วยลดอัตราการเกิดริโทรกราเดชั่น ลดความหนืดของแป้ง ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดจะสูงขึ้นเมื่อเก็บไว้นาน 4-6 เดือน

Narkrugsa. (1995) ได้ศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟต่อสภาวะการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวพบว่า ระยะเวลาในการให้ความร้อนจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่เริ่มต้นและระดับการเกิดการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของแป้ง ทั้งสองชนิดจะสูงที่สุดเมื่อให้ความร้อนโดยไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz นาน 10 นาที โดยที่การควบคุมระดับความชื้นเริ่มต้นที่ประมาณร้อยละ 20 ซึ่งแป้งมันสำปะหลังมีระดับการเกิดการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันเป็นร้อยละ 82.88 ส่วนแป้งข้าวเหนียวมีค่านี้ร้อยละ 77.38 และต่อมาในปี 1996 ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว เมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟที่ความถี่ 2450 MHz ที่เวลา 0, 3.5, 5, 8.5 และ 10 นาทีและระดับความชื้นร้อยละ

15, 20, 25, 27 เปรียบเทียบกับแป้งดิบ พบว่าแป้งที่ผ่านการให้ความร้อนโดยไมโครเวฟมีคุณสมบัติความคงทนต่อแรงเฉือน ความคงทนต่อการแช่เยือกแข็งและการละลายลดลง เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนและลดปริมาณความชื้นเริ่มต้น ส่วนความสามารถในการดูดซับน้ำสูงขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนและเพิ่มปริมาณความชื้นเริ่มต้น

Lewandowicz *et al.* (1997) พบว่าปริมาณน้ำหรือความชื้นเริ่มต้นในแป้งนั้นมีผลต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งจากพืชหัวได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่งเพื่อให้ไมโครเวฟกำลัง 800 วัตต์ ความถี่ 2450 MHz ที่ปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแป้งร้อยละ 21-35 โดยไมโครเวฟจะทำให้แป้งมีอุณหภูมิสูงขึ้นแบบไอโซเทอม (Isotherm) อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์สูงขึ้น จากการตรวจคุณสมบัติของของผสมแป้งเมื่อผ่านไมโครเวฟด้วยบราเวนเดอร์ พบว่าแป้งมีความหนืดลดลง ในขณะที่อุณหภูมิในการเกิดเจลลาติไนซ์ไม่เปลี่ยนแปลง

Anderson *et al.* (2001) ทำการให้ไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz แก่แป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียวพบว่า แป้งข้าวเหนียวมีอัตราการเกิดความร้อนด้วยไมโครเวฟสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า เนื่องจากก้านอะไมโลเพคตินของแป้งข้าวเหนียว เวลาในการให้ความร้อนนั้นทำให้การย่อยสลายแป้งนานขึ้นคุณสมบัติด้านความหนืดเมื่อวัดด้วย Rapid visco analyzer มีค่า Peak viscosity Final viscosity และ Set back ลดลง ผลของไมโครเวฟต่อแป้งทำให้เกิดการตัดแปรคุณค่าทางโภชนาการ โดยมีระยะเวลาในการให้ความร้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญ แป้งข้าวโพดที่ได้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานขึ้น จึงช่วยควบคุมและป้องกันโรคเบาหวาน และความดันโลหิตสูงได้ด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบ

3.1.1 แป้งที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชซีเตรต

3.1.1.1 แป้งข้าวเหนียว ตราช้างสามเศียร จากบริษัท โรงเส้นหมี่ช่อเฮง จำกัด

3.1.1.2 แป้งมันสำปะหลัง ตราปลาไทย 5 ดาว จากบริษัท อี.ที.ซี เอียบตงจัน จำกัด

3.1.1.3 แป้งข้าวเจ้า ตราดอกทานตะวันจากบริษัท ไทยอินเตอร์เนชั่นแนลโร้ฟลาว จำกัด

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชซีเตรต

3.1.2.1 Citric Acid (food grade)

3.1.2.2 Acetic acid

3.1.2.3 Cupper (II) sulphate

3.1.2.4 Borate buffer

3.1.2.5 Sodium hydroxide (food grade)

3.1.2.6 Ethanol 95%

3.1.2.7 Ethanol 75%

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือในการทดลอง

3.2.1 อูโมคี่ไมโครเวฟ ความถี่ 2450 MHz

3.2.2 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield viscometer)RVF-100 อเมริกา

3.2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) Centrikon T-42 K อิตาลี

3.2.4 เครื่องผสม (Rotor mixer) R2R 2 , Heidolph KG เยอรมัน

3.2.5 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ Memmert เยอรมัน

3.2.6 ชุดสกัดไขมัน Gerhardt Soxtherm เยอรมัน

3.2.7 เครื่องวัดความหนืดแบบเร็ว RV-A-4 ออสเตรเลีย

3.2.8 เครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope)

LEO Model 1455VP-0313

อังกฤษ

3.3 สถานที่ทดลอง

- 3.3.1 ห้องปฏิบัติการภาควิชาอุตสาหกรรมอาหารโครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3.3.1 ตึก Processing ภาควิชาอุตสาหกรรมอาหาร โครงการคณะอุตสาหกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3.3.2 ห้องปฏิบัติการศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์กลาง คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- 3.3.3 ห้องปฏิบัติการอาหาร ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล
วิทยาเขตโชติเวช กรุงเทพฯ

3.4 วิธีดำเนินการ

3.4.1 การผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ

นำแป้งมันสำปะหลัง แบ่งข้าวเหนียว และแบ่งข้าวเจ้า 500 กรัม มาผสมกับสารละลายกรดซิตริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 0, 5 และ 10%(ก./100ก. สตาร์ช) (น้ำหนักแห้ง) ในอัตราส่วนของแข็งต่อของเหลวเป็น 1: 2 ที่พีเอช 4.5 (Klaushofer *et al.*,1978 ; Narkrugsa. 1993) ด้วยเครื่องผสม (Kitchen aid model K5SS, Hobert Corporation, Troy, Ohio USA) แล้วนำแป้งที่ได้เก็บ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 8 ชั่วโมง บรรจุลงในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท ความชื้นประมาณ 30-35% เคลี่ยลงในถาดพลาสติกสำหรับไมโครเวฟ แล้วไปให้ความร้อนด้วยอุโมงค์ไมโครเวฟ โดยใช้เวลา 5,10 และ 15 นาที ทั้งไว้ให้เย็นประมาณ 15-20 นาที กำจัดกรดซิตริกที่ไม่เกิดปฏิกิริยาออกด้วยเอทานอลร้อยละ 75% ด้วย Soxhlet extractor นาน 4 ชั่วโมง ทำให้แห้งโดยใช้แสงแดด บดและร่อนผ่านตระแกรงขนาด < 0.25 มิลลิเมตร แล้วบรรจุลงในภาชนะปิด

3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ของสตาร์ชซีเตรตด้วยเทคนิคไมโครเวฟ

- 3.4.2.1 การวิเคราะห์หากรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Bound citric acid ,%BC) ตามวิธีที่ดัดแปลงมาจากวิธีของ Klaushofer *et al.*,1978. โดย Narkrugsa 1992.

3.4.2.2 ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification reaction efficiency, % RE)

$$\% \text{ RE} = \frac{\% \text{BC (db)}}{\% \text{ Citric acid (g / 100 g. strach)}}$$

3.4.2.3 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water absorption index) ตามวิธี Narkruga.(1996) ที่ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch. (1968)

3.4.2.4 ความสามารถในการละลาย (Water solubility index) ตามวิธี Narkruga. (1996) ที่ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch. (1968)

3.4.2.5 ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย (Freeze –thaw stability) ตามวิธี Narkruga. (1996) ที่ดัดแปลงจากวิธีของ Schoch. (1968)

3.4.2.6 ความคงตัวต่อแรงเฉือน(Shearing stability) ตามวิธี Klaushofer et al. (1978)

3.4.2.7 ศึกษาลักษณะของเม็ดแป้งโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบแสกน (Scanning electron microscopy) กำลังขยาย 1,500 เท่า

3.4.2.8 การเปลี่ยนแปลงของของผสม(Paste) ที่ผ่านการให้ความร้อนในขณะที่การกวนด้วย Rapid visco analyzer. โดยใช้ Standard 1 (Newport scientific. 1996)

3.3.4 ศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกรดซิตริก และเวลาในการให้ความร้อนด้วยคลื่นไมโครเวฟต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชซีเตรดในการศึกษาระหว่างปัจจัยในการผลิตต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพในครั้งนี้

ใช้แบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial in Complete Randomized) โดยศึกษา 2 ปัจจัยคือปัจจัยที่ 1 ความเข้มข้นของกรดซิตริก ที่ระดับความเข้มข้น ร้อยละ 0 5 และ 10

ปัจจัยที่ 2 ระยะเวลาในการให้ความร้อน ที่ระดับ 5 10 และ 15 นาที

นำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพที่ได้มาวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป Statistic Package for the Social Science (SPSS) Version 12 .0 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี ANOVA ระดับความเชื่อมั่น 95 %และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้าที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชชิตเรต

จากการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส (ภาคผนวก ข) ในแป้งทั้ง 3 ชนิดพบว่า แป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณอะไมโลสใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 38.9 และ ร้อยละ 36.02 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวที่มีปริมาณอะไมโลสเพียงร้อยละ 6.9 ในการผลิตสตาร์ชชิตเรตนั้น แป้งมันสำปะหลังมีความชื้นความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 37.2-38.6 แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีค่านี้ร้อยละ 35.6-36.8 และ 34.5-36.1 ตามลำดับ แต่เมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแป้งมีความชื้นลดลงโดยแป้งมันสำปะหลังมีความชื้นร้อยละ 11.2-17.3 แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีค่านี้ร้อยละ 10.2-17.2 และร้อยละ 10.7-19.2 ตามลำดับ จะเห็นว่าการผลิตนั้นแป้งมีปริมาณความชื้นเริ่มต้นค่อนข้างสูง จากการศึกษาของ Lewandowicz. *et al.* (1997) ได้กล่าวไว้ว่าการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของแป้งดัดแปรโดยใช้ไมโครเวฟนั้น มีความสัมพันธ์ กับปริมาณความชื้นเริ่มต้นของแป้ง เมื่อความชื้นเริ่มต้นแป้งสูงขึ้นทำให้เกิดเจลลาติไนซ์ของแป้งมีแนวโน้มสูงขึ้น จึงต้องมีการควบคุมปริมาณความชื้นเริ่มต้นไม่เกินร้อยละ 25-30 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Narkrugsa. (1995) ในระหว่างกระบวนการผลิตด้วยไมโครเวฟความถี่ 2450 MHz มีอุณหภูมิในการผลิต 114-156 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ค่า pH ของสตาร์ชชิตเรตจากแป้งทั้ง 3 ชนิดพบว่า มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ โดยสตาร์ชชิตเรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีค่า pH 4.56 สตาร์ชชิตเรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีค่า pH 4.48 และ 4.38 ตามลำดับ ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดิบมี ค่า pH 6.89 แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า มีค่านี้ 6.34 และ 7.01 ตามลำดับ

4.2 การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ช

การผลิตสตาร์ชชิตเรตโดยใช้ไมโครเวฟ พบว่า การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชจะมีค่าสูงที่สุด เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกและเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้น โดยการผลิตที่ใช้กรดซิตริกร้อยละ 10 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที มีการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชสูงที่สุด ($P \leq 0.05$)

จากการวิเคราะห์หาการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชชิตเรต(ภาคผนวก ข) ดังตารางที่ 4.1 พบว่า การผลิตสตาร์ชชิตเรตจากแป้งมันสำปะหลัง รูปที่ 4.1 แป้งข้าวเหนียว

รูปที่ 4.2 และแป้งข้าวเจ้า รูปที่ 4.3 เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกและเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้น การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชมีแนวโน้มสูงขึ้น ที่ระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 10 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที ในการผลิต การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชที่เตรตจากแป้งทั้งสามชนิดมีค่าสูงที่สุด สตาร์ชที่เตรตจากแป้งมันสำปะหลัง มีการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชร้อยละ 3.46 ซึ่งมีค่าต่ำกว่า สตาร์ชที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้ามีค่าร้อยละ 7.59 และสตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวมีค่าสูงที่สุดร้อยละ 7.70 การผลิตที่ระดับดังกล่าวนี้ มีค่าการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชสูงกว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 5 นาทีในการผลิต โดยการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชผลิตสตาร์ชที่เตรตจากแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 1.39 สตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว ร้อยละ 2.74 และ ร้อยละ 3.46 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ตารางที่ 4.2 พบว่า การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในเชิงบวก ($P \leq 0.01$) กับความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.93 (high positive) สตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว 0.99 (high positive) และการเกาะเกี่ยวระหว่างกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า 0.99 (high positive)

สตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิด พบว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกสูงขึ้นและเวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนานขึ้น การเกาะเกี่ยวระหว่างกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชจะมีค่าสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Narkrugsa. (1993) สตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังมีการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชต่ำกว่า สตาร์ชที่เตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า อาจเกิดเนื่องจากองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังมีฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl group) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส ซึ่งจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน กับหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส (Wurzburg. 1986) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของไมโครเวฟต่อแป้งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชและปริมาณอะไมโลสด้วย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชจะเกิดกับแป้งมันสำปะหลังมากกว่าแป้งจากธัญพืช (Lewandowicz *et al.* 1997) ผลิตสตาร์ชที่เตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นจากคลื่นไมโครเวฟ จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ในระยะเวลาสั้น โดยเกิดจากภายในโมเลกุลของอาหาร (Lewandowicz *et al.* 2000) ซึ่งแตกต่างจากการให้ความร้อนโดยวิธีการอื่นๆ เช่น การใช้เอกซ์ทราซัน ลักษณะการให้ความร้อนที่เกิดจากการนำและการพา ร่วมกัน ดังนั้นการเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบการใช้เอกซ์ทราซัน ซึ่งต้องใช้เวลาในการให้ความร้อนนาน 1-5 ชั่วโมง (Klaushofer *et al.* 1978)

ตารางที่ 4.1 ค่าการเกาะเกี่ยวระหว่างกรดซิติริกกับโมเลกุลสตาร์ช

ความเข้มข้น ของกรดซิติริก (ร้อยละ)	เวลาในการ ให้ความร้อน (นาที)	แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ)	แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ)
5	5	1.39±0.01 ^f	3.46±0.03 ^e	2.74±0.29 ^d
	10	1.72±0.07 ^e	3.73±0.67 ^d	3.86±0.03 ^c
	15	2.28±0.03 ^c	4.34±0.06 ^c	4.02±0.06 ^c
10	5	2.08±0.11 ^d	6.46±0.02 ^b	6.09±0.03 ^b
	10	3.32±0.07 ^b	7.67±0.00 ^a	7.37±0.14 ^a
	15	3.46±0.03 ^a	7.70±0.23 ^a	7.59±0.06 ^a

หมายเหตุ

abc... หมายถึง ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวเลขที่อักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

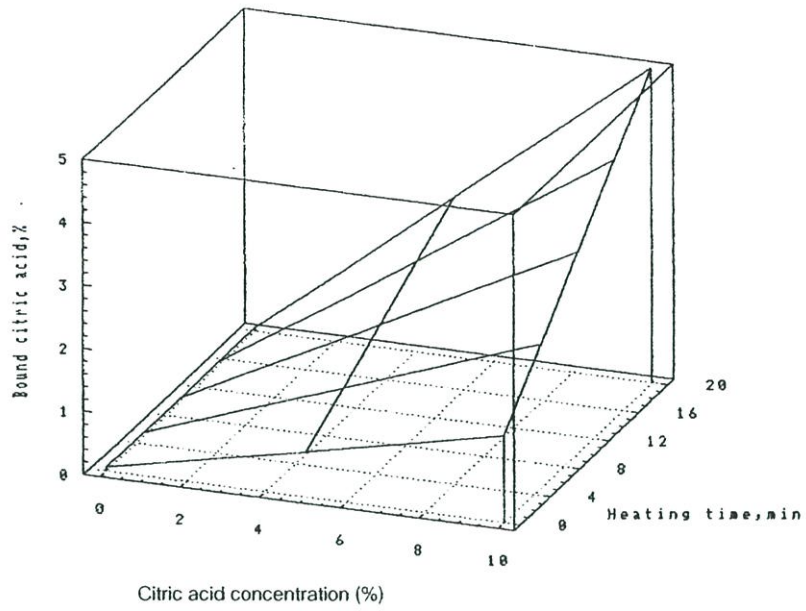
ตารางที่ 4.2 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ของปัจจัยในกระบวนการผลิตต่อการเกาะเกี่ยวของกรดซิติริกกับโมเลกุลสตาร์ช (BC) ของสตาร์ชซีเทรตที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

ปัจจัยในการผลิต	แป้งมันสำปะหลัง BC	แป้งข้าวเหนียว BC	แป้งข้าวเจ้า BC
ความเข้มข้นของ กรดซิติริก (X ₁)	0.94**	0.99**	0.99**
เวลาในการให้ความ ร้อนด้วยไมโครเวฟ (X ₂)	0.41 ^{ns}	0.29 ^{ns}	0.31 ^{ns}
X ₁ * X ₂	0.97**	0.91**	0.92**

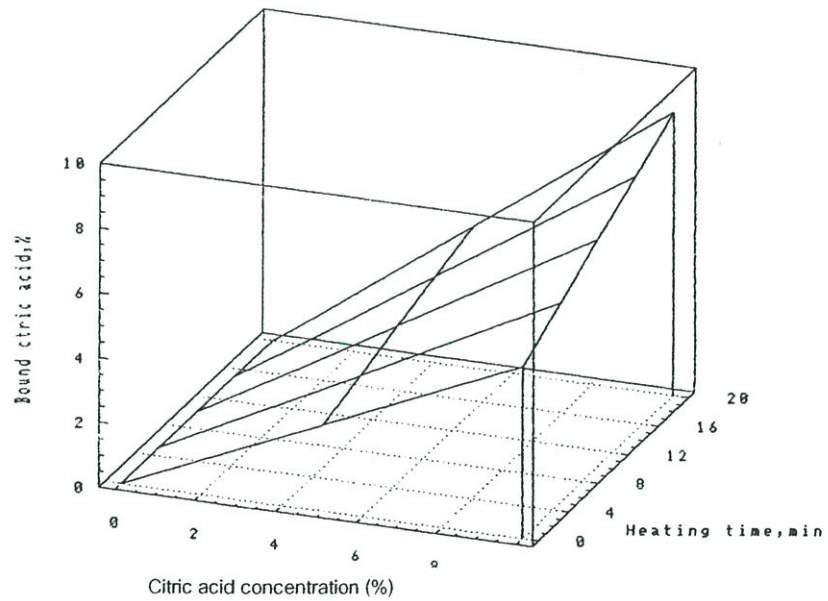
หมายเหตุ ** หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 (P≤0.01)

* หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 (P≤0.05)

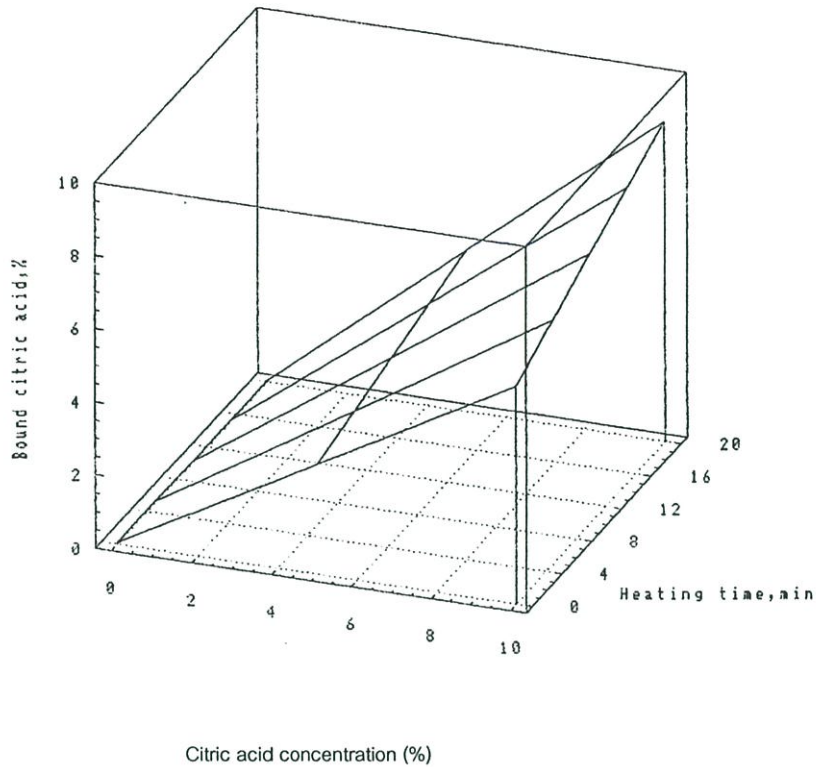
^{ns} หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



รูปที่ 4.1 การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชที่เตรตจากแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.2 การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชที่เตรตจากแป้งข้าวเหนียว



รูปที่ 4.3 การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

4.3 ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification)

จากค่าการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ช ในการผลิตสตาร์ชซีเตรตด้วยไมโครเวฟนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันได้ (ภาคผนวก ข) ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันมากที่สุด

ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของสตาร์ชซีเตรต พบว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) ดังตารางที่ 4.4 และ (รูปที่ 4.4) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการเกิดปฏิกิริยาเมื่อใช้กรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 10 เมื่อใช้เวลาในการให้ความร้อน 15 นาที ซึ่งมีการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ชสูงที่สุด เมื่อนำมาคำนวณมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันเพียงร้อยละ 34.60 ของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง ร้อยละ 75.94 สำหรับสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า และร้อยละ 78.60 สำหรับสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว ซึ่งมีค่าต่ำกว่า การผลิตสตาร์ชซีเตรตจากแป้งทั้งสามชนิดที่ระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาทีในการผลิต โดยประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังร้อยละ 44.10 สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 80.47 และสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 86.29

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.4 พบว่าประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในเชิงบวก ($P \leq 0.01$) กับความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.86 (high positive) ในขณะที่สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า 0.87 (high positive)

สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิด แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพียง 15 นาที การผลิตสตาร์ชซีเตรตประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจะมีค่าสูงที่สุด อาจเนื่องจากรูปแบบการให้ความร้อนของไมโครเวฟที่เกิดความร้อนขึ้นภายในอย่างรวดเร็ว (Lewandowicz *et al.* 1997)

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน

ความเข้มข้น ของกรดซิตริก (ร้อยละ)	เวลาในการ ให้ความร้อน (นาที)	แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ)	แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ)
5	5	27.74±0.09 ^e	61.02±0.61 ^e	50.67±0.22 ^f
	10	32.43±0.15 ^c	74.44±1.16 ^c	77.09±0.22 ^b
	15	44.10±0.75 ^a	86.29±1.35 ^a	80.47±1.18 ^a
10	5	30.81±1.07 ^d	64.59±0.19 ^d	61.08±0.43 ^e
	10	34.17±0.69 ^b	76.63±0.11 ^b	73.79±1.32 ^d
	15	34.60±0.26 ^b	78.60±0.09 ^b	75.94±0.57 ^c

หมายเหตุ^{abc...} หมายถึง ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวเลขที่อักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

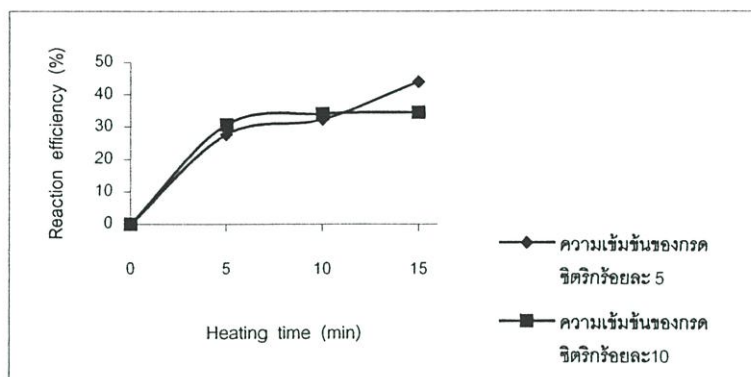
ตารางที่ 4.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ของปัจจัยในกระบวนการผลิตต่อประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (RE) ของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

ปัจจัยในการผลิต	แป้งมันสำปะหลัง RE	แป้งข้าวเหนียว RE	แป้งข้าวเจ้า RE
ความเข้มข้นของกรดซิตริก (X_1)	0.86**	0.87**	0.87**
เวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (X_2)	0.38 ^{ns}	0.36 ^{ns}	0.37 ^{ns}
$X_1 * X_2$	0.83**	0.82**	0.82**

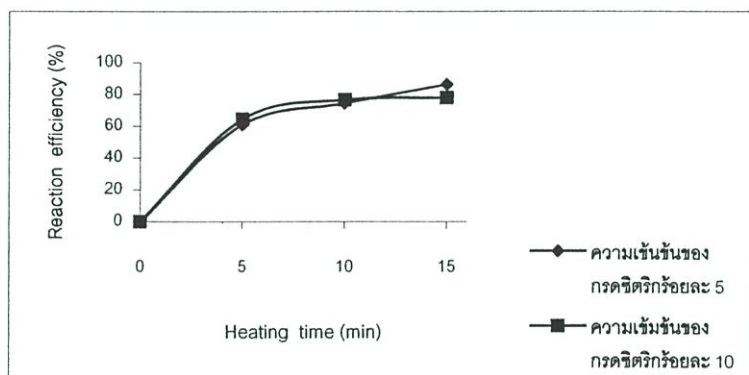
หมายเหตุ ** หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 ($P \leq 0.01$)

* หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($P \leq 0.05$)

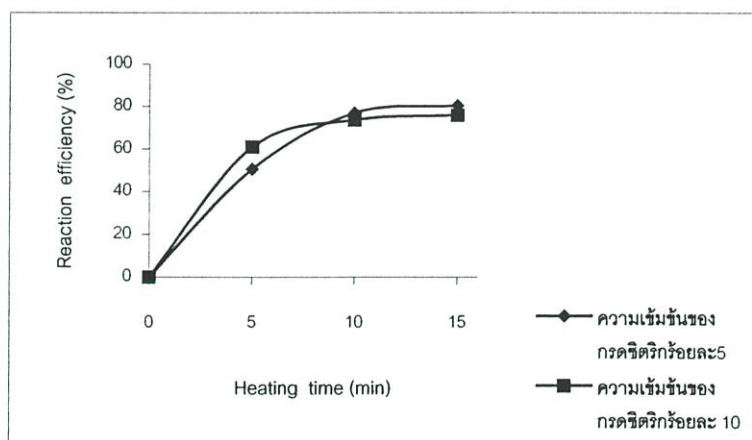
^{ns} หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ก



ข



ค

รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction efficiency)

ก = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง

ข = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว

ค = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

4.4 ผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของกรดซिटริกและเวลาในการให้ความร้อนต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของสตาร์ชซีเตรด

4.4.1 ความสามารถในการอุ้มน้ำ

การตรวจสอบความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชซีเตรด (ภาคผนวก ข) โดยแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักของเม็ดสตาร์ชที่เพิ่มขึ้น เมื่อละลายเม็ดสตาร์ชด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส การผลิตสตาร์ชซีเตรดโดยใช้ไมโครเวฟนั้นทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

ความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชซีเตรด ที่ผลิตจากจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า ดังตารางที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าเมื่อความเข้มข้นของกรดซिटริกและเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้น สตาร์ชซีเตรดมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น รูปที่ 4.5 ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ($P \leq 0.05$) สตาร์ชซีเตรดที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้ความเข้มข้นของกรดซिटริกร้อยละ 10 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงที่สุดร้อยละ 104.75 ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดิบมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพียงร้อยละ 66.58 และที่ระดับความเข้มข้นของกรดซिटริกและเวลาในการให้ความร้อนที่ระดับดังกล่าวนี้ สตาร์ชซีเตรดที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า มีความสามารถในการอุ้มน้ำร้อยละ 108.2 ซึ่งแป้งข้าวเจ้าดิบมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพียงร้อยละ 94.42 ส่วนสตาร์ชซีเตรดที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวมีความสามารถในการอุ้มน้ำร้อยละ 117.71 เมื่อการผลิตโดยใช้กรดซिटริกความเข้มข้นร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที ในขณะที่แป้งข้าวเหนียวดิบมีความสามารถในการอุ้มน้ำเพียงร้อยละ 97.13 แสดงให้เห็นว่าระดับของประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันจะส่งต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ

การใช้ไมโครเวฟให้ความร้อนในการผลิตสตาร์ชซีเตรดนั้นพบว่า สตาร์ชซีเตรดที่ผลิตได้มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าแป้งดิบในธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Narkrugsas. (1996) เนื่องจากการเกิดความร้อนที่มีคุณลักษณะเฉพาะของไมโครเวฟโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งอาจจะทำให้เสียหายแก่เม็ดสตาร์ชและอาจเกิดจากการเจลลาคีในช่บางส่วน โครงสร้างของโครงสร้างภายในของเม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเวลานานขึ้น (Lewandowicz *et al.* 2000) ซึ่งส่งผลให้การแทรกผ่านของน้ำเข้าสู่เม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังตารางที่ 4.6 พบว่า ความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับเวลาในการให้ความร้อน 0.70 (medium positive) เช่นเดียวกับสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว 0.60 (medium positive) ส่วนความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับความเข้มข้นของกรดซิตริก 0.88 (high positive)

ตารางที่ 4.5 ความสามารถในการอุ้มน้ำของสตาร์ชซีเตรต

ความเข้มข้น ของกรดซิตริก (ร้อยละ)	เวลาในการให้ ความร้อน (นาที)	แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ)	แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ)
0	0	66.58±0.08 ^g	97.13±0.14 ^f	94.42±0.54 ^f
0	5	95.07±1.15 ^c	115.22±0.23 ^c	95.89±0.34 ^f
	10	95.88±1.32 ^c	122.87±0.09 ^a	95.89±0.23 ^f
	15	98.37±0.19 ^b	123.49±0.40 ^a	98.48±0.08 ^e
5	5	73.32±1.47 ^f	114.14±2.00 ^c	101.89±0.56 ^d
	10	82.15±0.18 ^e	115.66±0.79 ^c	102.20±0.33 ^d
	15	86.69±0.60 ^d	117.71±0.60 ^b	103.91±0.39 ^c
10	5	87.69±0.06 ^d	104.96±1.32 ^e	104.48±1.08 ^c
	10	97.47±1.47 ^b	107.01±0.07 ^d	106.75±0.76 ^b
	15	104.75±4.41 ^a	114.56±0.23 ^c	108.20±0.41 ^a

หมายเหตุ

abc... หมายถึง ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวเลขที่อักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.6 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ของปัจจัยในกระบวนการผลิตต่อความสามารถในการอุ้มน้ำ (WAI) ของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

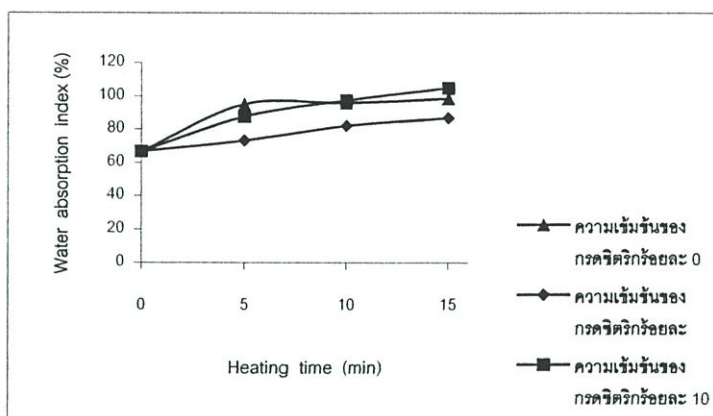
ปัจจัยในการผลิต	แป้งมันสำปะหลัง WAI	แป้งข้าวเหนียว WAI	แป้งข้าวเจ้า WAI
ความเข้มข้นของกรดซิตริก (X_1)	0.24 ^{ns}	-0.30 ^{ns}	0.88**
เวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ(X_2)	0.70**	0.60**	-0.02 ^{ns}
$X_1 * X_2$	0.42 ^{ns}	-0.16 ^{ns}	0.80**

หมายเหตุ

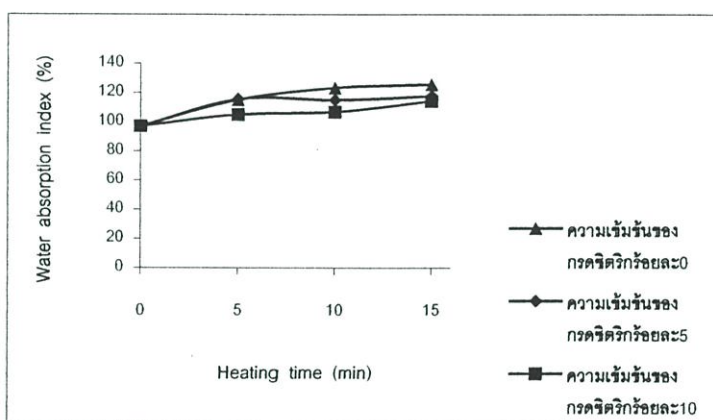
** หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 ($P \leq 0.01$)

* หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($P \leq 0.05$)

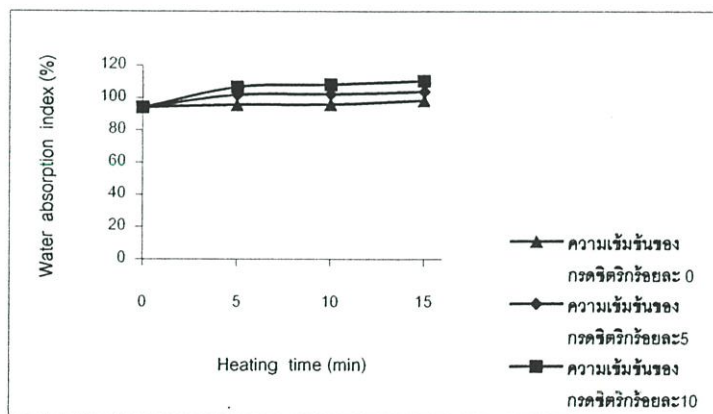
^{ns} หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ก



ข



ค

รูปที่ 4.5 ความสามารถในการอุ้มน้ำ(Water absorption index)

ก = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง

ข = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว

ค = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

4.4.2 ความสามารถในการละลายน้ำ

การตรวจสอบความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรต (ภาคผนวก ข) โดยแสดงเป็นร้อยละของน้ำหนักของแข็งทั้งหมดในสารละลายที่สามารถละลายได้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรต จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังตารางที่ 4.7 พบว่า ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำสูงที่สุดรูปที่ 4.6 เมื่อใช้กรดซिटริกความเข้มข้นร้อยละ 10 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาทีในการผลิตสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังมีค่านี้ร้อยละ 1.44 สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 1.95 และสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวร้อยละ 2.11 ซึ่งแป้งข้าวเจ้าดิบ มีความสามารถในการอุ้มน้ำเพียงร้อยละ 0.21 แป้งมันสำปะหลังดิบและแป้งข้าวเหนียวดิบมีค่านี้ร้อยละ 0.63 และร้อยละ 0.93 ตามลำดับ ในขณะที่ความสามารถในการละลายน้ำของแป้งดิบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟเพียงอย่างเดียวก็เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันนี้ เมื่อเวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนานขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับของการเกาะเกี่ยวของกรดซिटริกกับโมเลกุลของสตาร์ชและประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันทำให้ความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้น สตาร์ชซีเตรตมีความสามารถในการละลายน้ำสูงกว่าแป้งดิบ เนื่องจากการเกิดความร้อนที่มีคุณลักษณะเฉพาะของไมโครเวฟโดยความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายในเม็ดสตาร์ช อาจจะทำให้เกิดความเสียหายแก่เม็ดสตาร์ชและเม็ดสตาร์ชอาจเกิดการเจลลาคติในดีบบางส่วน (Lewandowicz *et al.* 2000) ซึ่งส่งผลให้การละลายน้ำของเม็ดสตาร์ชเกิดได้มากขึ้น รวมทั้งชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชแบบเชื่อมข้ามที่มีคุณสมบัติสามารถละลายน้ำได้สูง (Hydrophilic) ส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรตให้สูงขึ้นเช่นเดียวกัน (Yook *et al.* 1993) ซึ่งกรดซिटริกมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.8 พบว่า ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับความเข้มข้นของกรดซिटริก 0.79 (medium positive) ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับจากความเข้มข้นของกรดซिटริก 0.65 (medium positive) และเวลาในการให้ความร้อน 0.48 (medium positive) ส่วนความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า มีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับความเข้มข้นของกรดซिटริก 0.83 (high positive) และเวลาในการให้ความร้อน 0.60 (medium positive)

ตารางที่ 4.7 ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเดรต

ความเข้มข้น ของกรดซิตริก (ร้อยละ)	เวลาในการให้ ความร้อน (นาที)	แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ)	แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ)
0	0	0.63±0.02 ^g	0.93±0.08 ^e	0.21±0.01 ^g
0	5	0.71±0.01 ^f	0.85±0.12 ^f	0.60±0.09 ^f
	10	0.95±0.02 ^d	0.67±0.03 ^g	0.74±0.04 ^e
	15	1.24±0.06 ^c	1.30±0.08 ^c	0.88±0.06 ^c
5	5	0.89±0.09 ^e	1.17±0.01 ^d	1.21±0.09 ^d
	10	0.91±0.05 ^d	1.35±0.01 ^c	1.50±1.03 ^c
	15	0.96±0.03 ^d	1.40±0.03 ^b	1.87±1.56 ^a
10	5	1.28±0.01 ^c	1.04±0.01 ^e	1.49±0.42 ^c
	10	1.32±0.01 ^b	1.44±0.95 ^b	1.67±0.04 ^b
	15	1.44±0.03 ^a	2.11±0.06 ^a	1.95±0.06 ^a

หมายเหตุ

^{abc...} หมายถึง ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวเลขที่อักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ของปัจจัยในกระบวนการผลิตต่อความสามารถในการละลายน้ำ (WSI) ของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

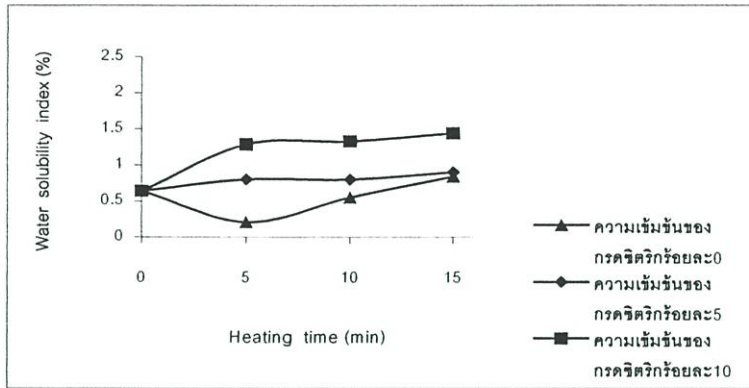
ปัจจัยในการผลิต	แป้งมันสำปะหลัง WSI	แป้งข้าวเหนียว WSI	แป้งข้าวเจ้า WSI
ความเข้มข้นของกรดซิตริก (X_1)	0.79 **	0.65**	0.83**
เวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ(X_2)	0.14 ^{ns}	0.48*	0.60*
$X_1 * X_2$	0.66**	0.81**	0.81**

หมายเหตุ

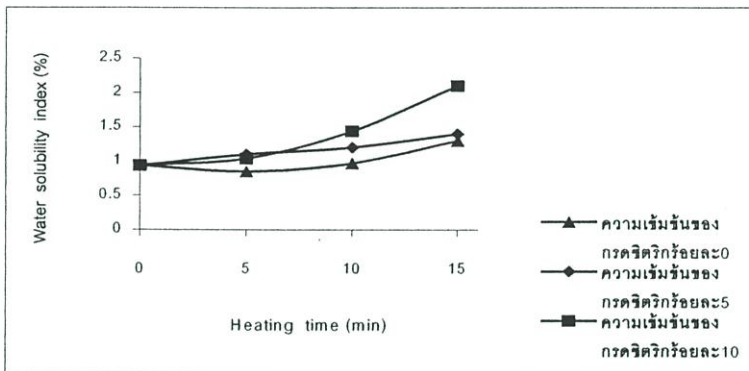
** หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 ($P \leq 0.01$)

* หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($P \leq 0.05$)

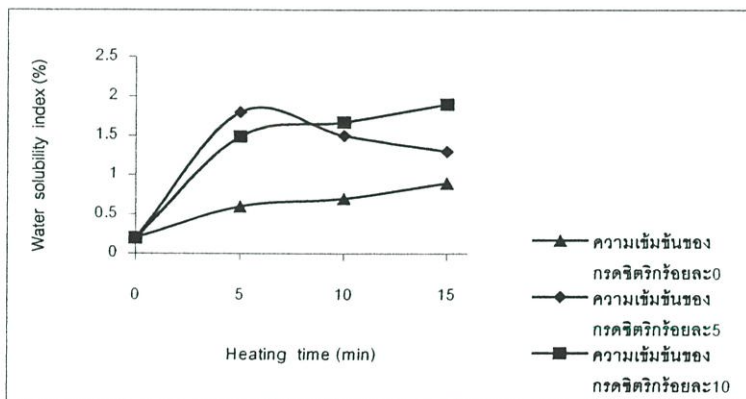
^{ns} หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ก



ข



ค

รูปที่ 4.6 ความสามารถในการละลายน้ำ (Water solubility index)

ก = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง

ข = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว

ค = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

4.4.3 ความคงตัวต่อแรงเฉือน

เมื่อนำของผสมสตาร์ชซีเตรตเข้มข้นร้อยละ 8 มาทำการวิเคราะห์ค่าความคงตัวต่อแรงเฉือน (ภาคผนวก ข) เมื่อมีการให้ความร้อนแก่ของผสมที่เตรียมจากสตาร์ชซีเตรตในน้ำไปพร้อมกับการกวนที่ความเร็ว 2000 ต่อนาที โดยการกวนจะตัดเม็ดสตาร์ชที่พองตัวบางส่วน ทำให้ความหนืดของของผสมลดลง ความคงตัวต่อแรงเฉือนแสดงเป็นร้อยละของการเปลี่ยนแปลงความหนืดหลังการให้แรงเฉือนต่อความหนืดก่อนการให้แรงเฉือน

ความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า ดังตารางที่ 4.9 พบว่า ความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิดมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ รูปที่ 4.7 สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิด มีความคงตัวต่อแรงเฉือนสูงสุด ที่ระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที ซึ่งเป็นระดับที่มีการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูงที่สุดในการผลิตสตาร์ชซีเตรตจากแป้งทั้งสามชนิด โดยสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังมีค่านี้ร้อยละ 49.34 (ไม่แตกต่างจากการผลิตที่ให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 10 นาทีที่ระดับความเข้มข้นของกรดซิตริกเดียวกันนี้) แต่มีความคงตัวต่ำกว่าสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้าที่ผลิตในระดับดังกล่าว ซึ่งมีค่านี้ร้อยละ 59.08 สำหรับสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว และร้อยละ 61.30 สำหรับสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ใช้ในการผลิตสูงขึ้นความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชซีเตรตทั้งสามชนิดลดลง แต่ยังคงสูงกว่าแป้งดิบ โดยแป้งข้าวเหนียวดิบมีความคงตัวต่อแรงเฉือนเพียงร้อยละ 35.56 แป้งมันสำปะหลังดิบ และแป้งข้าวเจ้าดิบมีความคงตัวต่อแรงเฉือนเพียงร้อยละ 38.60 และร้อยละ 43.03 ตามลำดับ การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟแก่แป้งดิบเพียงอย่างเดียวจะทำให้ความคงตัวต่อแรงเฉือนลดลง เมื่อเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้นซึ่งใช้ผลเช่นเดียวกันจากแป้งทั้งสามชนิด การผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นทำให้ค่าความคงตัวต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.10 พบว่าความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับความเข้มข้นของกรดซิตริก -0.99 (high negative) และสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับเวลาในการให้ความร้อน -0.45 (medium negative)

การใช้ไมโครเวฟให้ความร้อนในการผลิตสตาร์ชซีเตรตนั้นพบว่า สตาร์ชซีเตรตมีความคงตัวต่อแรงเฉือนสูงกว่าแป้งดิบในธรรมชาติ เนื่องมาจากพันธะทางเคมีแบบเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงภายในเม็ดสตาร์ชไม่ให้เกิดตัวในขณะที่มีการให้ความร้อนร่วมกับการให้ความร้อน สตาร์ชซีเตรตจึงยังคงรักษาความหนืดไว้ได้ดีแม้พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายไป (Kerr. 1950 ; Radley. 1976 ; Whistler *et al.* 1984 ; Wurzburg. 1986)

ตารางที่ 4.9 ความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชซีเตรต

ความเข้มข้นของกรดซิตริก (ร้อยละ)	เวลาในการให้ความร้อน (นาที)	แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ)	แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ)
0	0	38.60±0.78 ^f	35.56±0.22 ^e	43.03±0.44 ^f
0	5	28.27±1.06 ^e	35.82±0.62 ^e	45.99±0.68 ^e
	10	28.66±1.85 ^e	32.95±1.12 ^f	48.06±0.26 ^d
	15	29.12±0.67 ^e	23.62±0.11 ^g	29.72±0.19 ^g
5	5	46.90±0.86 ^b	56.60±0.62 ^b	57.83±0.31 ^b
	10	48.33±0.82 ^a	57.76±0.71 ^b	58.89±1.01 ^b
	15	49.34±0.07 ^a	59.08±1.15 ^a	61.30±1.17 ^a
10	5	41.04±2.47 ^d	42.92±0.56 ^d	53.00±0.35 ^c
	10	43.85±0.77 ^c	47.05±2.56 ^c	53.47±0.78 ^c
	15	43.12±0.37 ^c	49.62±0.32 ^c	54.00±0.21 ^c

หมายเหตุ

abc... หมายถึง ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวเลขที่อักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ของปัจจัยในกระบวนการผลิตต่อความคงตัวต่อแรงเฉือน (SHS) ของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

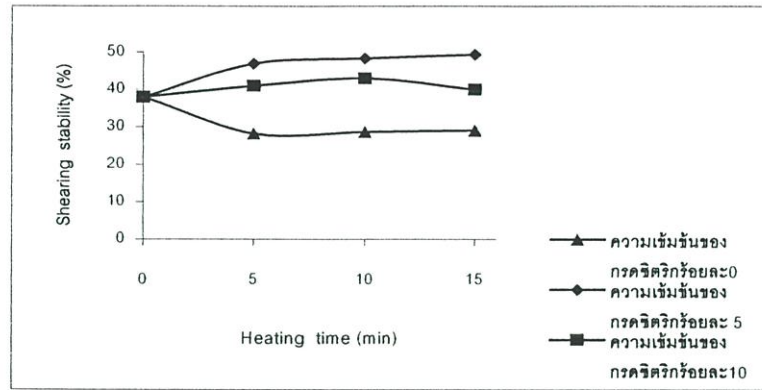
ปัจจัยในการผลิต	แป้งมันสำปะหลัง SHS	แป้งข้าวเหนียว SHS	แป้งข้าวเจ้า SHS
ความเข้มข้นของ กรดซิตริก (X_1)	-0.99 **	0.20 ^{ns}	0.20 ^{ns}
เวลาในการให้ความร้อน ด้วยไมโครเวฟ(X_2)	-0.26 ^{ns}	-0.33 ^{ns}	-0.45*
$X_1 * X_2$	-0.85**	-0.05 ^{ns}	-0.01 ^{ns}

หมายเหตุ

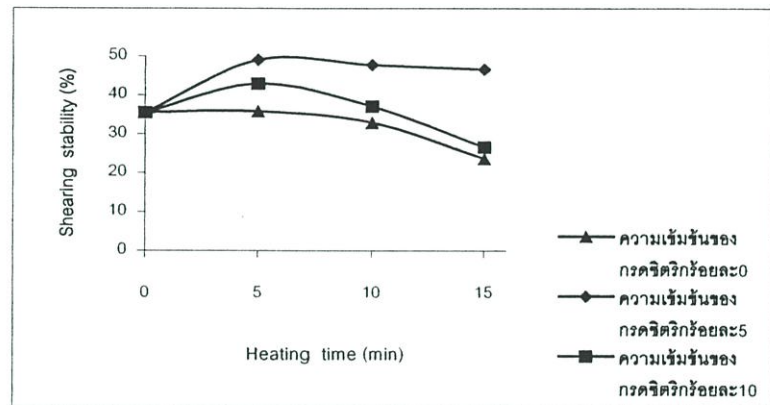
** หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 ($P \leq 0.01$)

* หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($P \leq 0.05$)

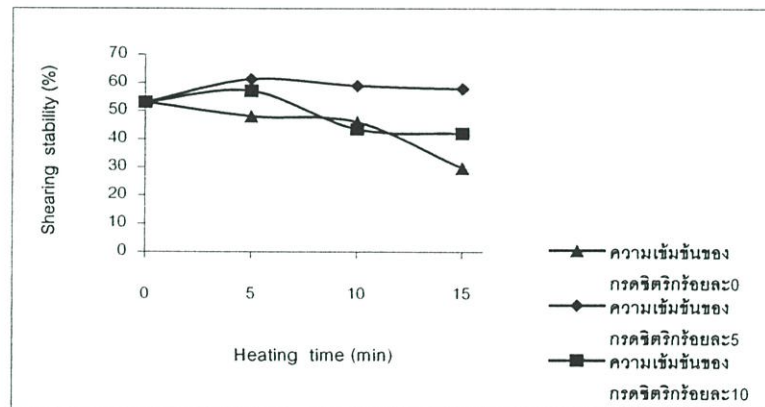
^{ns} หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ก



ข



ค

รูปที่ 4.7 ความคงตัวต่อแรงเฉือน (Shearing stability)

ก = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง

ข = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว

ค = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

4.4.4 ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย

จากการนำของผสมสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 มาแช่แข็งใน deep freezer ที่อุณหภูมิ-10 องศาเซลเซียสเป็นเวลานาน 7 วัน จากนั้นนำมาละลายที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง และรายงานเป็นร้อยละของปริมาณน้ำที่แยกจากของผสม (ภาคผนวก ข) จากสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้า

ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของสตาร์ชซีเตรต จากการวิเคราะห์ทางสถิติความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า จากตารางที่ 4.11 พบว่า มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิด รูปที่ 4.8 มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูงที่สุดเมื่อใช้กรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 10-15 นาทีในการผลิต ซึ่งเป็นระดับที่มีการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูงที่สุดในการผลิตสตาร์ชซีเตรตจากแป้งทั้งสามชนิด สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณน้ำที่แยกจากของผสมเพียงร้อยละ 0.59-0.70 ในขณะที่สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเจ้ามีค่านี้อ้อยละ 25.17 และร้อยละ 42.97 ตามลำดับ ซึ่งมีความคงตัวสูงกว่าสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตโดยใช้ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 10 โดยความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายจะลดลงเมื่อเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้น แต่คุณสมบัติดังกล่าวนี้จะสูงกว่าแป้งดิบ แป้งมันสำปะหลังดิบความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายเพียงร้อยละ 47.41 แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้าดิบมีค่านี้อ้อยละ 54.11 และร้อยละ 62.87 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นทำให้ค่าความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายเพิ่มขึ้น โดยสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 และผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนาน 10-15 นาที มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายดีที่สุดเพราะว่าเกิดการแยกชั้นระหว่างน้ำกับส่วนอื่นๆในของผสมต่ำมาก

จากการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ดังตารางที่ 4.12 พบว่า ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของสตาร์ชซีเตรต พบว่า สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับความเข้มข้นของกรดซิตริก -0.56 (medium negative) ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับความเข้มข้นของกรดซิตริก -0.78 (medium negative) และความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับความเข้มข้นของกรดซิตริก -0.51 (medium negative)

ในการผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นพบว่า สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิดมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูงกว่าแป้งดิบในธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Klashofer *et al.* (1978) เนื่องจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ช (Wurzburg, 1986) หรือเกิดโครงสร้างร่างแหที่สามารถเก็บน้ำไว้ภายในได้ดีจึงทำให้มีปริมาณของน้ำที่แยกออกมาในปริมาณน้อยกว่า อีกทั้งพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นนั้นจะช่วยขัดขวางการจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินของของผสมภายหลังจากการแช่แข็งและการละลายซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำแยกออกจากของผสม ลดลง (Radley, 1976)

ตารางที่ 4.11 ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสตาร์ชซีเตรต

ความเข้มข้นของ กรดซิตริก (ร้อยละ)	เวลาในการให้ ความร้อน (นาที)	แป้งมันสำปะหลัง (ร้อยละ)	แป้งข้าวเหนียว (ร้อยละ)	แป้งข้าวเจ้า (ร้อยละ)
0	0	47.41±1.34 ^d	54.11±0.64 ^d	62.87±2.00 ^b
0	5	54.02±0.24 ^c	57.46±0.60 ^c	57.89±0.95 ^c
	10	60.72±0.07 ^b	65.39±0.88 ^b	61.17±1.10 ^b
	15	67.92±1.30 ^a	71.51±0.97 ^a	75.17±2.46 ^a
5	5	44.91±0.39 ^e	1.68±0.05 ^g	53.41±0.06 ^d
	10	39.86±1.13 ^g	0.70±0.00 ^h	47.90±0.14 ^e
	15	25.17±0.74 ^h	0.59±0.02 ⁱ	42.97±1.12 ^f
10	5	42.08±0.37 ^f	13.16±0.41 ^f	54.07±0.34 ^d
	10	44.34±0.17 ^e	14.39±0.51 ^f	54.55±0.28 ^d
	15	45.15±0.97 ^e	17.21±0.60 ^e	56.78±0.20 ^c

หมายเหตุ

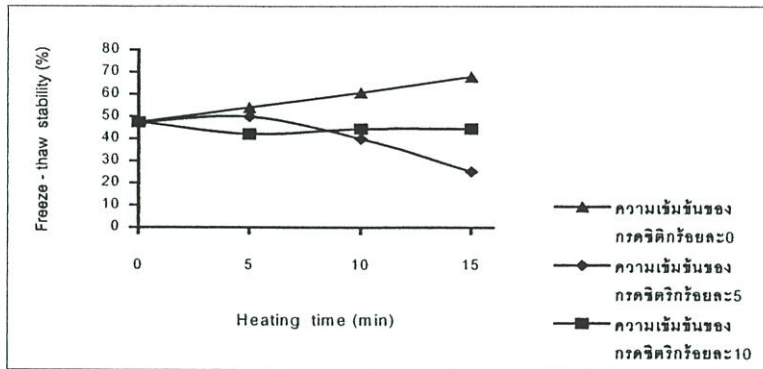
abc... หมายถึง ในคอลัมน์เดียวกัน ตัวเลขที่อักษรกำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient : r) ของปัจจัยในกระบวนการผลิตต่อความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย (FTS) ของสตาร์ชซีเตรดที่ผลิตจากแป้งชนิดต่างๆ

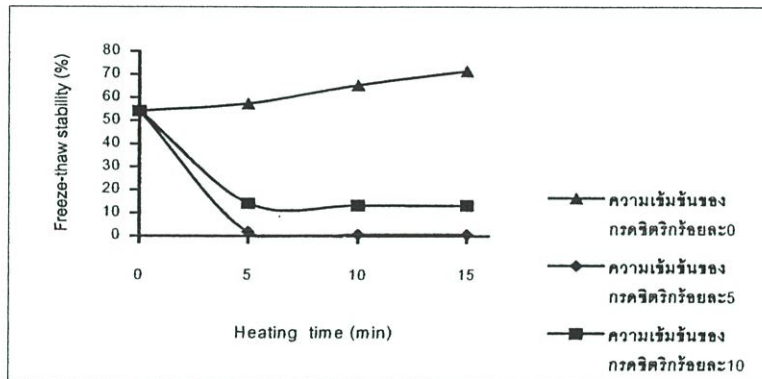
ปัจจัยในการผลิต	แป้งมันสำปะหลัง FTS	แป้งข้าวเหนียว FTS	แป้งข้าวเจ้า FTS
ความเข้มข้นของกรดซิตริก (X_1)	-0.56*	-0.78**	-0.51*
เวลาในการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ(X_2)	-0.80 ^{ns}	-0.14 ^{ns}	-0.09 ^{ns}
$X_1 * X_2$	-0.58**	-0.67**	-0.53*

หมายเหตุ

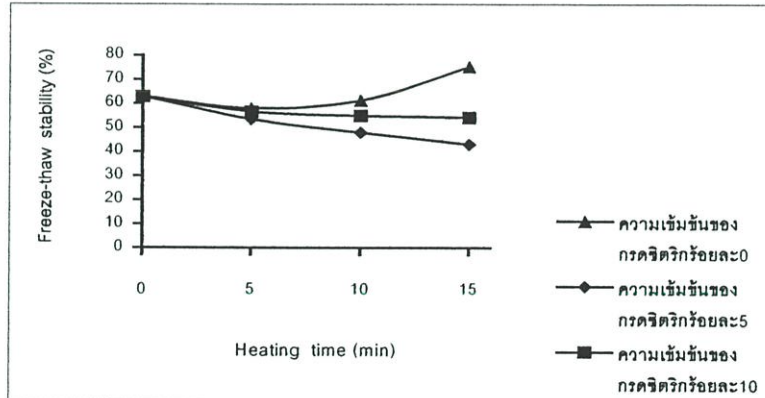
- ** หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.01 ($P \leq 0.01$)
- * หมายถึง มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05 ($P \leq 0.05$)
- ^{ns} หมายถึง ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ก



ข



ค

รูปที่ 4.8 ความคงตัวต่อการแช่แข็งและละลาย (Freeze-thaw stability)

ก = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง

ข = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียว

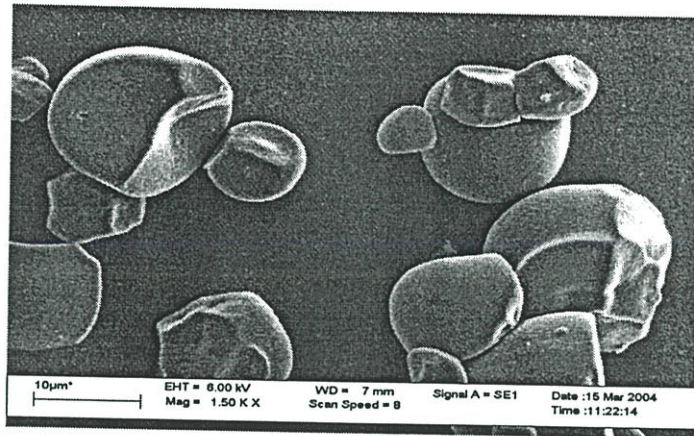
ค = สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

4.5 ลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตเมื่อตรวจโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน

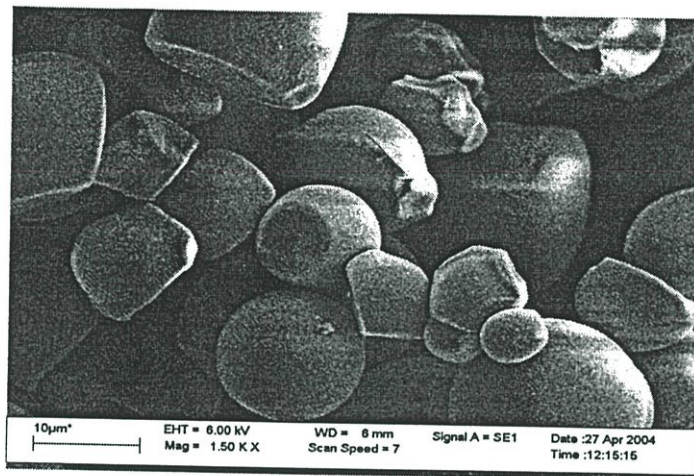
เมื่อพิจารณาลักษณะของเม็ดสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้า เมื่อใช้กรดซิดริกร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที ในการผลิตซึ่งเป็นระดับที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูงที่สุด ศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่า การผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดเพิ่มขึ้น และเม็ดสตาร์ชมีการเกาะตัวกันหนาแน่นมากขึ้น โดยที่ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง ดังรูปที่ 4.9 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 1.10-1.20 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชของแป้งมันสำปะหลังดิบซึ่งมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 0.80-0.90 และเม็ดสตาร์ชแป้งมันสำปะหลังดิบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 1.20-3.20 ไมโครเมตร ลักษณะของเม็ดสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว ดังรูปที่ 4.10 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 2.25-2.85 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชข้าวเหนียวดิบซึ่งมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 0.8-1.2 และเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเหนียวดิบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 0.8-1.1 ไมโครเมตร ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า ดังรูปที่ 4.11 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตมีขนาดเฉลี่ยระหว่าง 1.50-1.89 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้าดิบ ที่มีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 0.60-1.0 และเม็ดสตาร์ชแป้งข้าวเจ้าดิบที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟมีขนาดเม็ดสตาร์ชเฉลี่ย 0.8-1.1 ไมโครเมตร

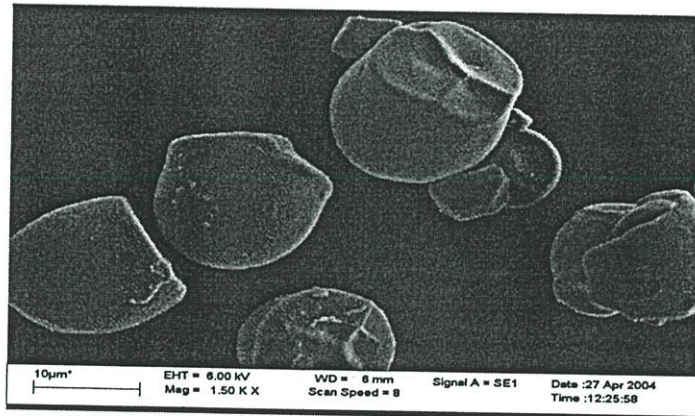
สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นเม็ดสตาร์ชมีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้นเป็นการให้ความร้อนจากภายในโมเลกุลสุภายนอก เม็ดสตาร์ชจึงพองตัวออกและจะทำให้เกิดความเสียหายแก่เม็ดสตาร์ชบางส่วน (Leandowicz *et al.* 2000) เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของเม็ดสตาร์ชจะเห็นว่า ที่บริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชมีลักษณะไม่เรียบและมีการเกาะตัวรวมกันหนาแน่นขึ้น พบในสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งจะเห็นได้ชัดเจนในสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว แต่ไม่พบลักษณะดังกล่าวนี้ในสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง อาจเกิดเนื่องจากกรดซิดริกที่เกาะเกี่ยวกับโมเลกุลของสตาร์ช โดยสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเจ้า มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูงกว่าแป้งมันสำปะหลัง จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้



ก



ข



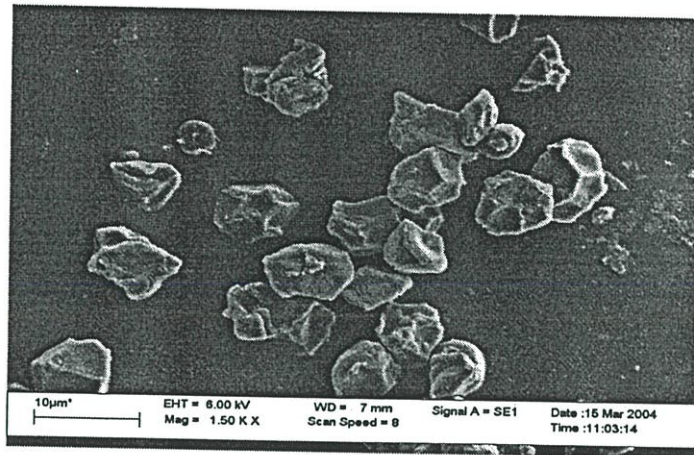
ค

รูปที่ 4.9 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเทรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง

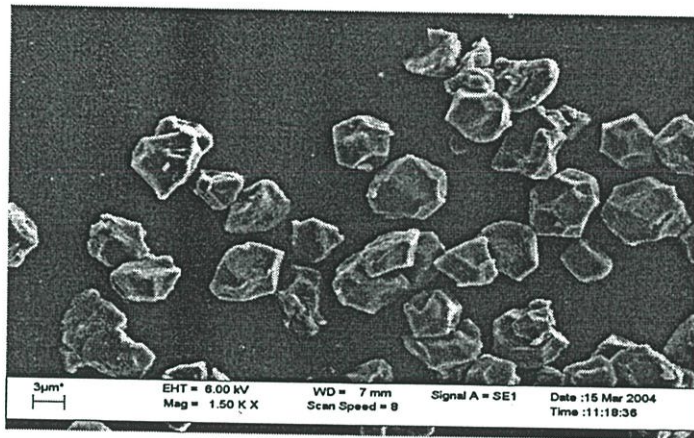
ก = แป้งมันสำปะหลังตามธรรมชาติ

ข = กรดซिटริกเข้มข้นร้อยละ 0 เวลาให้ความร้อน 15 นาที

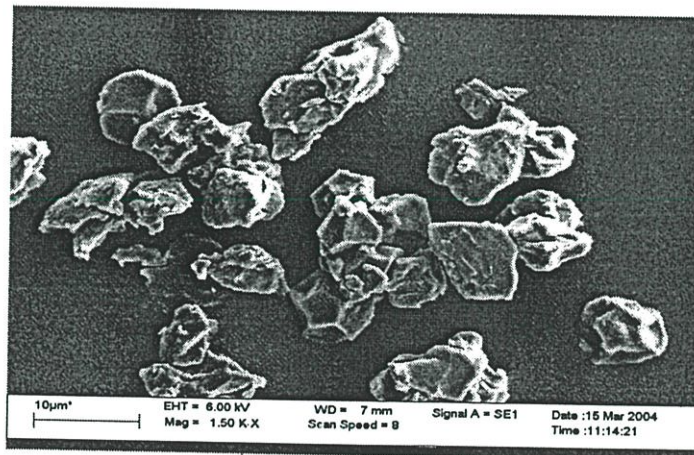
ค = กรดซिटริกเข้มข้นร้อยละ 5 เวลาให้ความร้อน 15 นาที



ก



ข



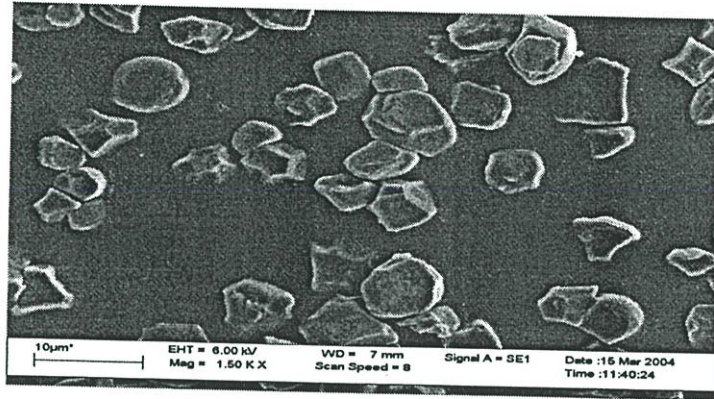
ค

รูปที่ 4.10 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว

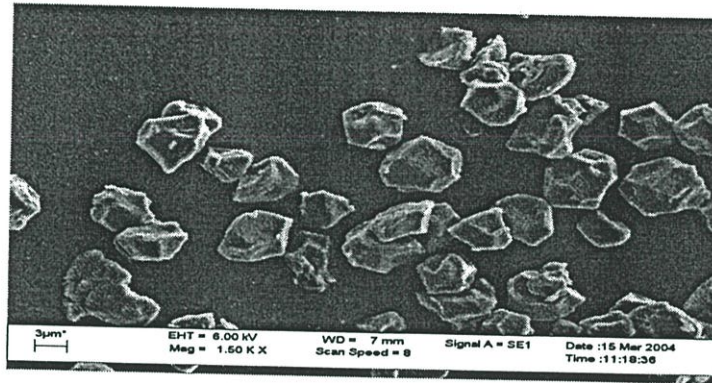
ก = แป้งข้าวเหนียวตามธรรมชาติ

ข = กรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0 เวลาให้ความร้อน 15 นาที

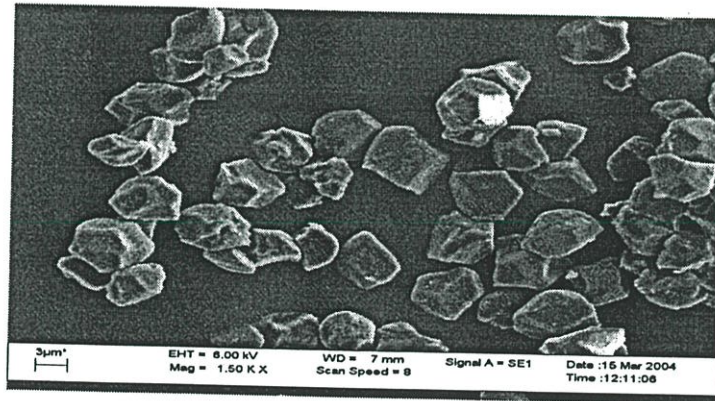
ค = กรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 5 เวลาให้ความร้อน 15 นาที



ก



ข



ค

รูปที่ 4.11 ลักษณะของเม็ดสตาร์ชของสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า

ก = แป้งข้าวเจ้าตามธรรมชาติ

ข = กรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 0 เวลาให้ความร้อน 15 นาที

ค = กรดซิตริกเข้มข้นร้อยละ 5 เวลาให้ความร้อน 15 นาที

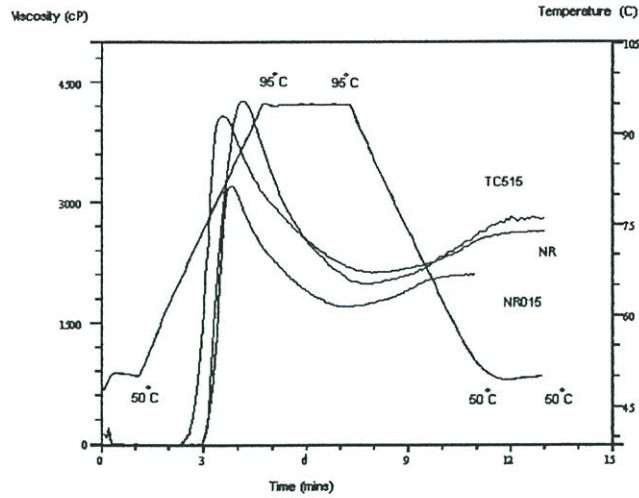
4.6 ศึกษาคุณสมบัติความหนืดของของผสมเมื่อตรวจสอบโดยใช้เครื่อง

Rapid visco analyzer

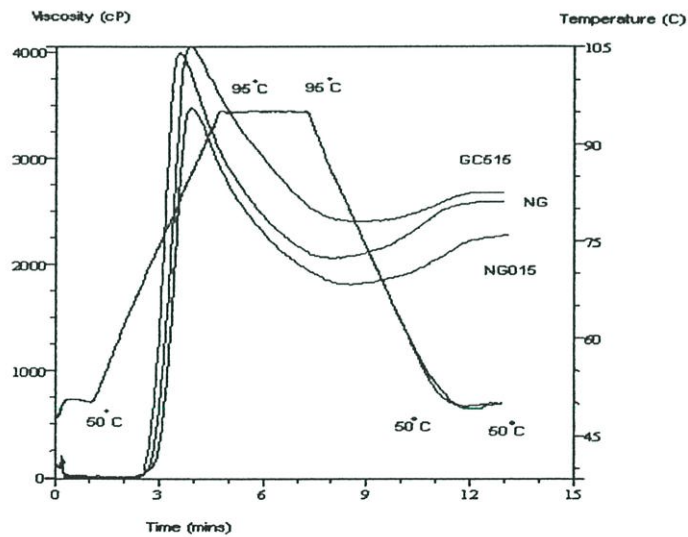
จากการตรวจสอบคุณสมบัติของความหนืดของสตาร์ชซีเตรตที่ความเข้มข้นร้อยละ 8 (ภาคผนวก ข) ด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer สตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง รูปที่ 4.12 แป้งข้าวเหนียว รูปที่ 4.13 และแป้งข้าวเจ้า รูปที่ 4.14 ที่ผลิตโดยใช้กรดซิตริกร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที

คุณสมบัติความหนืดของของผสมสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังดังตารางที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่า มีผลให้ค่า Trough และ Set back แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังดิบ ในขณะที่ Pasting temperature, Peak viscosity, Peak time, Break down และ Final viscosity มีค่าใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังดิบ ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลังโดยสตาร์ชซีเตรตมีค่า Trough 1985.04 cP และ Set back 820.50 cP ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังดิบมีค่า Trough 1798.34 cP และ Set back 1203.48 cP ส่วนคุณสมบัติความหนืดของของผสมสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว ดังตารางที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่า มีค่า Peak viscosity, ค่า Trough, Break down และ Final viscosity ซึ่งมีค่าสูงขึ้น แต่ค่า Set back จะลดลง ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ ในขณะที่การผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวนั้นไม่ทำให้ Pasting temperature แตกต่างจากแป้งข้าวเหนียวดิบ สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียว มีค่า Peak viscosity 4610 cP ค่า Trough 2392 cP Break down 1618 cP และ Final viscosity 2621 cP ซึ่งมีค่าสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวดิบที่มีค่า Peak viscosity 4082.90 cP ค่า Trough 2127.50 cP Break down 1581.50 cP และ Final viscosity 2066.82 cP แต่สตาร์ชซีเตรตมีค่า Set back 270 cP ซึ่งต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียวดิบที่มีค่านี้ 463.02 cP และเกิดลักษณะเดียวกันนี้กับคุณสมบัติความหนืดของของผสมสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเจ้า ดังตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่า ค่า Peak viscosity, Trough, Break down และ Final viscosity สูงขึ้น ในขณะที่ Set back มีค่าลดลงซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าดิบ โดยสตาร์ชซีเตรตมีค่า Peak viscosity 3590.42 cP ค่า Trough 2765.02 cP ค่า Break down 903 cP และค่า Final viscosity 5847.98 cP ซึ่งแป้งข้าวเจ้าดิบมีค่า Peak viscosity 2428 cP ค่า Trough 1970 cP ค่า Break down 458 cP และค่า Final viscosity 3822 cP สตาร์ชซีเตรตมีค่า Set back 1829 cP ซึ่งต่ำกว่า แป้งข้าวเจ้าดิบที่มีค่านี้ 3967.16 cP ในขณะที่ Peak time ไม่แตกต่างจากแป้งข้าวเจ้าดิบ

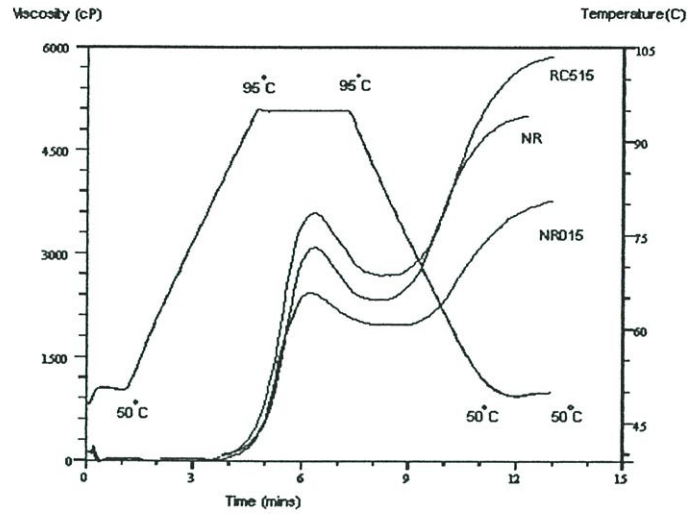
สตาร์ชิตเรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิด มีความหนืดสูงในขณะที่มีการให้ความร้อนนั้น เกิดเนื่องจากสตาร์ชิตเรตที่ผลิตได้มีความแข็งแรงของเม็ดสตาร์ชเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถอุ้มน้ำและพองตัวได้มากขึ้น (Radley. 1976) โดยที่เม็ดสตาร์ชไม่แตกตัวแม้ในขณะที่ให้ความร้อนสูงร่วมกับการกวน และยังคงรักษาความหนืดเมื่อเย็นตัวลง ส่วนค่าการคืนตัวที่ลดลงนั้นเนื่องมาจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้นจะช่วยในการยึดเกาะระหว่างโมเลกุลของเม็ดสตาร์ช จึงป้องกันการจัดเรียงตัวใหม่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (Wurzburg. 1986) สตาร์ชิตเรตที่ผลิตจากแป้งข้าวเหนียวมีการคืนตัวต่ำที่สุดเนื่องจากองค์ประกอบที่เป็นอะไมโลสค่อนข้างต่ำซึ่งจะทำให้การคืนตัวลดลงเช่นกัน (กล้าณรงค์ ศรีรอดและ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543)



รูปที่ 4.12 กราฟความหนืดของแป้งมันสำปะหลังดิบ (NT) แป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 15 นาที (NT015) และสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลังที่ใช้กรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที (TC515)



รูปที่ 4.13 กราฟความหนืดของแป้งข้าวเหนียวดิบ (NG) แป้งข้าวเหนียวที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 15 นาที (NG015) และสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเหนียวที่ใช้กรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที (GC515)



รูปที่ 4.14 กราฟความหนืดของแป้งข้าวเจ้าดิบ (NR) แป้งข้าวเจ้าที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 15 นาที (NR015) และสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้าที่ใช้กรดซิตริกความเข้มข้นร้อยละ 5 และเวลาในการให้ความร้อน 15 นาที (RC515)

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบ่งชี้ความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดความหนืดเร็ว (Rapid visco analyzer) ของสตาร์ชที่เตร็ดจากแป้งมันสำปะหลัง

Citric acid (ร้อยละ)	Heating Time (min)	Pasting temperature (°C)	Peak time (min)	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Break down (cP)	Final viscosity (cP)	Set back (cP)
0	0	72.72±0.03 ^{ns}	4.13±0.45 ^b	4219.04±0.04 ^a	1798.34±74.08 ^b	2139.00±9.56 ^{ns}	2847.78±6.96 ^a	1203.48±8.28 ^a
0	15	75.10±0.00 ^{ns}	4.20±0.00 ^a	3210.96±0.00 ^b	1417.50±26.21 ^c	2145.52±4.74 ^{ns}	2364.54±2.12 ^b	946.98±4.01 ^b
5	15	73.05±0.85 ^{ns}	4.13±0.01 ^b	4286.22±6.79 ^a	1985.04±50.91 ^a	2206.50±8.35 ^{ns}	2805.48±7.10 ^a	820.50±1.60 ^c

หมายเหตุ

abc...ตัวอักษรกำกับแสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) ในแนวตั้ง

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบดค่าบดความหนืดจากภากรวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือวัดความหนืดเร็ว (Rapid visco analyzer) ของ
สตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวงาเหนียว

Citric acid (ร้อยละ)	Heating Time (min)	Pasting temperature (°C)	Peak time (min)	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Break down (cP)	Final viscosity (cP)	Set back (cP)
0	0	66.02±9.05 ^{ns}	3.60±0.00 ^a	4082.90±1.80 ^b	2127.50±1.21 ^b	1581.50±5.45 ^b	2066.82±3.80 ^b	463.02±6.49 ^b
0	15	67.35±0.57 ^{ns}	3.47±0.00 ^b	3749.00±7.37 ^c	1447.00±4.95 ^c	1301.00±2.42 ^c	1914.00±7.98 ^c	468.50±4.84 ^b
5	15	69.02±0.60 ^{ns}	3.37±0.42 ^c	4610.50±1.60 ^a	2392.50±7.77 ^a	1618.00±8.38 ^a	2621.00±4.14 ^a	270.50±1.92 ^a

หมายเหตุ

abc...ตัวอักษรกำกับแสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) ในแนวตั้ง

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าบดเคี้ยวความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความหนืดเร็ว (Rapid visco analyzer) ของสตาร์ชซีเตรตจากแป้งข้าวเจ้า

Citric acid (ร้อยละ)	Heating Time (min)	Pasting temperature (°C)	Peak time (min)	Peak viscosity (cP)	Trough (cP)	Break down (cP)	Final viscosity (cP)	Set back (cP)
0	0	88.42±3.35 ^a	6.26±0.09 ^{ns}	2428.00±8.79 ^b	1970.00±1.91 ^b	458.00±6.87 ^c	3822.00±9.90 ^b	3967.16±6.00 ^a
0	15	72.65±0.00 ^b	6.20±0.00 ^{ns}	1611.54±6.36 ^c	1652.04±9.39 ^c	949.00±5.30 ^a	2720.89±8.66 ^c	1551.52±1.45 ^c
5	15	87.82±1.16 ^a	6.23±0.49 ^{ns}	3590.42±3.64 ^a	2765.02±8.77 ^a	903.00±2.62 ^b	5847.98±8.57 ^a	1829.00±7.98 ^b

หมายเหตุ

abc...ตัวอักษรกำกับแสดงความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05) ในแนวนอน

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

1. การผลิตสตาร์ชซีเตรตจากแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และ แป้งข้าวเจ้า โดยใช้ไมโครเวฟนั้น การเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกกับโมเลกุลของสตาร์ช และประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน จะความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ กับความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ใช้การผลิต โดยที่ความเข้มข้นของกรดซิตริกร้อยละ 5 และให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ 15 นาที สตาร์ชซีเตรตที่ผลิตจากแป้งทั้งสามชนิดมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ไมโครเวฟสามารถผลิตสตาร์ชซีเตรตได้ภายในระยะเวลาที่สั้นและมีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูง ดังนั้นการผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้นสามารถควบคุมระดับของประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาได้โดยการควบคุมความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ใช้และเวลาในการให้ความร้อน ให้เหมาะสม ซึ่งชนิดของและองค์ประกอบของแป้งมีผลต่อการเกาะเกี่ยวของกรดซิตริกประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน
2. การผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟนั้น มีผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำสูงกว่าแป้งดิบ($P \leq 0.05$) โดยเวลาในการให้ความร้อนในการผลิตมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับความสามารถในการอุ้มน้ำ เมื่อเวลาในการให้ความร้อนสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากที่เม็ดสตาร์ชเกิดความเสียหายเนื่องจากรูปแบบการให้ความร้อนที่เฉพาะและเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้นโดยไมโครเวฟ ทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดเจลาติไนซ์บางส่วน โมเลกุลของน้ำจึงสามารถแทรกเข้าสู่ภายในได้มากขึ้น
3. การผลิตสตาร์ชซีเตรตโดยใช้ไมโครเวฟในการให้ความร้อนนั้น ส่งผลทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของสตาร์ชซีเตรตสูงกว่าแป้งดิบ($P \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของกรดซิตริกที่ใช้ในการผลิตมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อความเข้มข้นของกรดซิตริกสูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้น เนื่องจากกรดซิตริกที่ใช้ในการผลิตสตาร์ชซีเตรตมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ดังนั้นเม็ดสตาร์ชจึงละลายน้ำได้สูงขึ้น ร่วมกับการใช้ไมโครเวฟทำให้เม็ดสตาร์ชเกิดความเสียหายโมเลกุลของน้ำจึงสามารถแทรกเข้าสู่ภายในได้มากขึ้น

4. การผลิตสตาร์ชซีเตอรต โดยใช้ไมโครเวฟนั้นมีความคงตัวต่อแรงเฉือนของสตาร์ชซีเตอรตสูงกว่าแป้งดิบ ($P \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของกรดซิดริกที่ใช้ในการผลิตมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับความคงตัวต่อแรงเฉือน เมื่อความเข้มข้นของกรดซิดริกสูงขึ้นส่งผลให้ความคงตัวต่อแรงเฉือนลดลง โดยระดับที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูงขึ้น สตาร์ชซีเตอรตจะมีความคงตัวต่อแรงเฉือนเพิ่มขึ้น ซึ่งการผลิตสตาร์ชซีเตอรตจะทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นเนื่องมาจากพันธะทางเคมีแบบเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นภายในเม็ดสตาร์ช
5. การผลิตสตาร์ชซีเตอรตโดยใช้ไมโครเวฟมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูงกว่าแป้งดิบ ($P \leq 0.05$) โดยความเข้มข้นของกรดซิดริกที่ใช้ในการผลิตมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P \leq 0.01$) กับความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย ซึ่งสตาร์ชซีเตอรตที่มีระดับของประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูงที่สุด จะมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูงที่สุด โดยพันธะทางเคมีแบบเชื่อมข้ามที่เกิดขึ้นจะช่วยขัดขวางต่อการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ชนิดของแป้งที่นำมาใช้ในการผลิตก็เป็นปัจจัยสำคัญ โดยแป้งที่มีอะไมโลสต่ำนั้นจะมีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลายสูงกว่าแป้งที่มีอะไมโลสสูง
6. ลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชสตาร์ชซีเตอรตที่ผลิตผลิตโดยใช้ไมโครเวฟ นั้นไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช ถึงแม้ระดับที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันสูง แต่เม็ดสตาร์ชมีขนาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการพองตัวของเม็ดสตาร์ชเมื่อผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ
7. คุณสมบัติด้านความหนืดเมื่อตรวจสอบด้วยเครื่อง Rapid visco analyzer จากสตาร์ชซีเตอรตทั้งสามชนิด มีความหนืดสูง เนื่องจากพันธะทางเคมีแบบเชื่อมข้ามทำให้เม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้นจึงมีความสามารถในการอุ้มน้ำและพองตัวสูงขึ้นโดยที่เม็ดสตาร์ชไม่แตกออกเมื่อมีการให้ความร้อนร่วมกับการให้แรงกวน ซึ่งมีค่า Trough สูงขึ้น และ ป้องกันการคืนตัวของแป้ง ค่า Set back จึงลดลง ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบ

บรรณานุกรม

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่2. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2545. เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ : โอเดียนสโตร์.
- นิรนาม . 2539. เอกสารประกอบการสอนชุดวิชาการถนอมและแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช.
- คณาจารย์ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. 2540. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วิไล รั้งสาดทอง. 2543. เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯพระนครเหนือ.
- สุปราณี เต็มเตชาพงษ์และณัฐสิณี เลาหรั่งพิสิฐ. 2538. การศึกษาอัตราการเกิดเจลลาติไนซ์เซชันของแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวด้วยไมโครเวฟเทคนิค. ปัญหาพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. มอก. 1073-2535 : แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. กรุงเทพฯ .11น.
- AOAC. 1995. Official Method of Analysis. 16th ed. Virginia : The Association of Analysis Chemistry.
- Anderson , R.A. 1982. "Water Absorption and Solubility and Amylograph Character of Roll-Cooked Grain Product". Cereal Chemistry. 59 : 265-269.
- Antichokudomchi, N. and Varavinit , S. 2003. "Characterization and Utilization of Acid – Modified Cross-Linked Tapioca Starch Pharmaceutical Tablets". Carbohydrate polymer. 53 : 263-270.
- Eliasson, A.C. 1996. Carbohydrate in food : Starch physico chemical and functional aspects. New York : Marcel Dekker.
- Fausto, F., Harish, K. and Darshan, M. 1997. "Modified Starch and Their Use by Food Industry". Indian Food Industry. 6(4) : 33-39.
- Gonzalez, Z. and Perez, E. 2002. "Evaluation of Lentil Starches Modified by Microwave Irradiation and Extrusion Cooking". Food research international. 35 : 415-420.

- Jane, J., Xu, A., Radosavljevic, M. and Seib, P.A. 1992. "Location of Amylose in Normal Starch Granule : Susceptibility of Amylose and Amylopectin to Cross-linking Reagents". *Cereal Chemistry* . 69 (4) : 405-409.
- Kerr, W. 1950. *Chemistry and industry of starch* .New York : Academic Press.
- Klaushofer, H., Berghofer, E. and Steyrer, W. 1978. "Starchcitrate-Production and Technical Application Properties". *Starch/Stärke*. 30(2) : 47-51.
- Lewandowicz ,G. Fornal, J., and Walkowski., A. 1997. " Effect of Microwave Radiation on Physio - chemical Properties and Structure of Potato and Tapioca Starches". *Carbohydrate polymer*. 34: 213-220.
- Lewandowicz ,G. Fornal, J., and Walkowski., A., 2000. "Starch Ester Obtained by Microwave Radiation – structure And Functionality" . *Industrial crops and product*. 11 : 249-257.
- Lewandowicz ,G. Fornal, J., and Walkowski., A. 2000. " Effect of Microwave Radiation on Physio - chemical Properties and Structure of Cereal Starches". *Carbohydrate polymer*. 42 : 193-199.
- Lineback, D.R. and Inglett, G.E. 1982. *Food Carbohydrate*. Connecticut : AVI.
- MacArthur, L.A. and Appolonia, B.L. 1981. "Effect of Microwave Radiation and Storage on Hard Red Spring Wheat Flour". *Cereal Chemistry* . 58 : 53-58.
- Maneesriroj, P., Phetkoa, S. and Narkrugsa, W. 1998. "Starch Phosphate by Microwave Technique". *Kasertsart Journal(Nat.Sci.)*. 32 : 234-241.
- Moorthy, S.N. 1985. "Acetylation of Cassava Starch Using Perchloric Acid Catalysis". *Starch/Stärke*. 37(9) : 307- 308.
- Muzimbaranda, C. and Tomasik, P. 1994. "Microwave in Physical and Chemical Modification of Starch". *Starch/Stärke*. 12 : 469-474.
- Narkrugsa, W., Berghofer, E. and Carmago, L.A.C. 1992. "Herstellung Von Stärkederivaten Durch Heißextrusion". *Starch/Stärke*. 44(3) : 81-90.
- Narkrugsa, W. 1993. Study on Feasibility of Starch Citrate Production by Microwave Technique. In Proceeding of the 31st Kasertsart University Annual Conference Februry 3-6. Kasertsart University. Bangkok. 270 –280.

- Narkrugsa, W. 1995. "Microwave Effect on the Gelatinization Conditions on Tapioca and Glutinous Rice Starches". *Kasertsart Journal(Nat.Sci.)*. 29 : 515-520.
- Narkrugsa, W. 1996. "Change in Some Physiochemical Properties of Tapioca and Glutinous Rice Starches After Microwave Heating". *Kasertsart Journal(Nat.Sci.)*. 30 : 532-538.
- Radley, J.A. 1976. *Starch and its derivatives*. 4th ed. London : Chapman and Hall.
- Whistler, L. and Paschall, F. 1984. *Starch : Chemistry and Technology* . New York : Academic press .
- Wurzburg, O.B. 1986. *Modified Starch : Properties and Uses*. New York : CRC Press.
- Yook, C., Pek, U.H. and Park, K.H. 1993. "Gelatinization and Retrogradation Character of Hydroxypropylated and Cross-Liked Rice". *Journal of Food Science*. 58 : 405- 407.

ภาคผนวก ก
คุณสมบัติทางเคมีของแป้ง

ตารางที่ ก1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวเจ้าในธรรมชาติ

ชนิดของแป้ง	ขนาดของเม็ดแป้ง (μm)	ปริมาณอะไมโลส (ร้อยละ)	รูปแบบผลึกผลึก	ความเป็นผลึก (ร้อยละ)	ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ)
แป้งมันสำปะหลัง	3-35	17-34	A หรือ C	38	0.04
แป้งข้าวเหนียว	1.6-8.7	0-6	A	37	0.02-0.03
แป้งข้าวเจ้า	1.9-8.1	14-32	A	38	0.12-0.45

ที่มา : ดัดแปลงจาก Oates. (1996)

ตารางที่ ก2 คุณสมบัติของแป้งชนิดต่างๆในธรรมชาติและสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตด้วยไมโครเวฟ

ชนิดของแป้ง	ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	ความชื้นหลังให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ (ร้อยละ)	อุณหภูมิในกระบวนการ (°C)	pH
แป้งมันสำปะหลังดิบ	37.2-38.6	11.6-19.7	114-121	6.89
สตาร์ชซีเตรต (กรดซิตริกร้อยละ5, เวลาให้ความร้อน15 นาที)	36.1-37.7	16.8-17.3	144-152	4.56
สตาร์ชซีเตรต (กรดซิตริกร้อยละ10, เวลาให้ความร้อน15 นาที)	37.1-37.6	11.2-19.6	147-156	4.53
แป้งข้าวเหนียวดิบ	35.9-36.6	10.9-18.2	119-143	6.43
สตาร์ชซีเตรต (กรดซิตริกร้อยละ5, เวลาให้ความร้อน15 นาที)	35.6-36.8	14.2-17.2	135-150	4.48
สตาร์ชซีเตรต (กรดซิตริกร้อยละ10, เวลาให้ความร้อน15 นาที)	35.9-36.5	10.2-15.4	145-156	4.49

ตารางที่ ก2 (ต่อ) คุณสมบัติของแป้งชนิดต่างๆในธรรมชาติและสตาร์ชซีเตรตที่ผลิตด้วย
ไมโครเวฟ

ชนิดของแป้ง	ความชื้นเริ่มต้น (ร้อยละ)	ความชื้นหลังให้ ความร้อนด้วย ไมโครเวฟ (ร้อยละ)	อุณหภูมิใน กระบวนการ (°C)	pH
แป้งข้าวเจ้าดิบ	34.5-35.3	14.9-19.1	118-129	7.01
สตาร์ชซีเตรต (กรดซิตริกร้อยละ5, เวลาให้ ความร้อน15 นาที)	35.1-36.1	10.7-18.7	151-157	4.38
สตาร์ชซีเตรต (กรดซิตริกร้อยละ10, เวลา ให้ความร้อน15 นาที)	35.3-36.2	15.9-16.9	151-155	3.50

ภาคผนวก ข
วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีกายภาพ

1. การวิเคราะห์หากรดซิตริกที่เกาะเกี่ยวกับสตาร์ช (Bound Citric Acid, %BC : Narkruksa. 1992 ที่ดัดแปลงจาก Klaushofer et al. 1978)

- 1.1. นำตัวอย่างสตาร์ชซีเตรต มาบดและร่อนผ่านตระแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร
- 1.2. กำจัดกรดซิตริกที่ไม่เกิดปฏิกิริยาหรืออิสระออกด้วยแอลกอฮอล์ 95% นาน 4 ชั่วโมง โดยใช้ Soxhlet extractor วางให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 1 คืน
- 1.3. นำตัวอย่างแบ่งที่แบ่งแล้ว ชั่งน้ำหนัก 0.4–0.5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์เติมน้ำกลั่น 2 มิลลิลิตร
- 1.4. เติมสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 1N 50 มิลลิลิตรคนให้เข้ากัน ด้วย Magnetic stirrer ต้มในน้ำเดือด อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้เป็น 8.5 ด้วยสารละลายกรดอะซิติก เข้มข้น 5N

1.5. เติมสารละลาย borate buffer 25 มิลลิลิตร และ murexid indicator 0.3 กรัม

- 1.6. นำไปไตเตรตกับสารคอปเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 0.05 M จนสารละลายเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเหลือง นำไปคำนวณหา %BC จากสูตรดังนี้

$$\%BC (db) = \frac{9.61Y * 10}{X * (100-Z)}$$

$$\text{โดยที่ } X = \text{น้ำหนักตัวอย่างเป็นกรัม (น้ำหนักเปียก)}$$

$$Y = \text{ปริมาตรของสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต 0.05 M ที่ใช้ในการไตเตรตจนถึงจุดยุติ}$$

$$Z = \text{เปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่างที่ผ่านการล้างด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ 96 % แล้วทิ้งไว้ให้แห้ง 1 คืน}$$

$$9.61 = \text{calibration factor}$$

การคำนวณประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา (Reaction efficiency , %RE)

$$\%RE = \frac{\%BC(db)}{\% \text{ Citric acid (g / 100g starch)}} \times 100$$

$$\% \text{ Citric acid (g / 100g starch)}$$

2. ความสามารถในการอุ้มน้ำและความสามารถในการละลาย

(Water Absorption Index and Water Solubility Index , WAI and WSI : Schoch. 1968)

- 2.1. ชั่งตัวอย่างแป้ง 2.5 กรัม (W_0) ผสมกับน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร
- 2.2. เขย่าใน water bath ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
- 2.3. นำของผสมมาชั่งน้ำหนัก (W_1) จากนั้นทำการหมุนเหวี่ยง ที่ความเร็ว 8000 รอบต่อนาที นาน 10 นาที
- 2.4. เทน้ำส่วนใสออกจากของผสม จากนั้นชั่งน้ำหนักของผสมที่เหลือ (W_2)
- 2.5. คำนวณหาค่าความสามารถในการอุ้มน้ำจากสูตร

$$\text{Water Absorption Index} = [(W_1 - W_2) / W_0] \times 100$$
- 2.6. บีบน้ำส่วนใสที่เทออกจากของผสม 10 มิลลิลิตร ใน aluminium can ที่ทราบน้ำหนักแน่นอนนำไปอบที่ 120 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
- 2.7. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่งน้ำหนักของแข็งที่ละลายได้
- 2.8. คำนวณหาค่าความสามารถในการละลายเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของของแข็ง ทั้งใน ส่วนใสที่สามารถละลายได้

3. ความคงตัวต่อแรงเฉือน (Shearing Stability . SHS : Klaushofer et al. 1975)

- 3.1. ชั่งตัวอย่างแป้ง 20 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นโดยให้มีน้ำหนักสุดท้าย 300 กรัม
- 3.2. ผสมของผสมด้วย rotor mixer ที่ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ด้วย Blade no. 1
- 3.3. นำของผสมมาวัดความหนืด (V_a) ด้วย Brookfield viscometer ,Spindle no.2 4. นำของผสมไปกวนผสมอีกครั้งด้วย rotor mixer ที่ความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที ด้วย Blade no. 3
- 3.4. วัดความหนืด (V_b) อีกครั้งด้วย Brookfield viscometer ,Spindle no.2
- 3.5. คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ความคงตัวต่อแรงเฉือนด้วยสูตร

$$\% \text{ Shearing Stability} = (V_b / V_a) \times 100$$

เมื่อ V_b = ความหนืดของตัวอย่างก่อนการให้แรงเฉือน ในหน่วยเซนติพอยด์

V_a = ความหนืดของตัวอย่างหลังการให้แรงเฉือน ในหน่วยเซนติพอยด์

4. ความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย (Freeze – Thaw Stability , FTS : Narkrugs. 1996. ที่ดัดแปลงจาก Schoch. 1968)

- 4.1. ชั่งตัวอย่าง 15 กรัม ผสมจนมีน้ำกลั่นเป็นน้ำหนักสุดท้ายเป็น 300 กรัม ในถ้วย stainless steel ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ด้วย rotor mixer ที่ ความเร็วรอบ 240 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที ด้วย Blade no. 1
- 4.2. นำของผสมเทลงในถ้วยพลาสติกแช่แข็งที่อุณหภูมิ -10 องศาเซลเซียส ใน deep freezer เป็นเวลา 7 วัน
- 4.3. นำของผสมมาละลายน้ำแข็งออกใน Water bath ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 4 ชั่วโมง
- 4.4. นำของผสมมา 100 กรัม ทำการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) ที่ 8000 รอบต่อนาที นาน 30 นาที
- 4.5 รายงานผลเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำที่แยกออกมาก

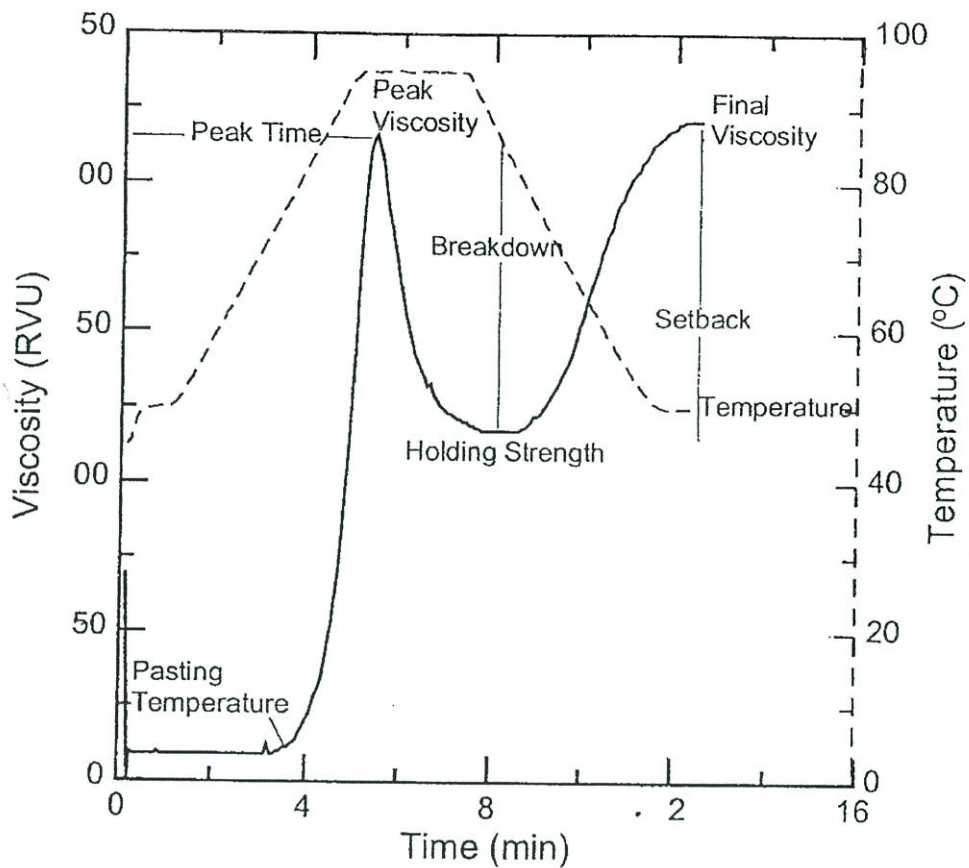
5. คุณสมบัติของของผสมเมื่อได้รับความร้อนในขณะที่มีการกวนและการคน จากเครื่องตรวจความหนืดแบบรวดเร็ว (Standard 1. Newport Scientific. 1996)

วิธีการวิเคราะห์

การเตรียมตัวอย่าง ใช้แป้ง 3 กรัม น้ำกลั่น 25 กรัม ผสมให้เข้ากัน

สภาวะที่ใช้ในการทดสอบ

อุณหภูมิเริ่มต้น 50 องศาเซลเซียส	ใช้เวลา 1 นาที
เพิ่มอุณหภูมิจาก 50 องศาเซลเซียส ถึง 95 องศาเซลเซียส	ใช้เวลา 4 นาที
อัตราการให้ความร้อน 12 องศาเซลเซียสต่อนาที	
คงไว้ที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส	ใช้เวลา 2 นาที
ลดอุณหภูมิจาก 95 องศาเซลเซียส ถึง 50 องศาเซลเซียส	ใช้เวลา 4 นาที
อัตราการลดความร้อน 12 องศาเซลเซียสต่อนาที	ใช้เวลา 2 นาที



Peak viscosity	=	ความหนืดสูงสุด
Peak time	=	เวลาที่เกิด peak ความหนืดมีหน่วยเป็นนาที
Peak temperature	=	อุณหภูมิที่เกิด peak ความหนืด มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส
Holding strength (trough)	=	ความหนืดสุดท้ายในช่วงให้ความร้อนมีหน่วยเป็น RVU
Break down	=	ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดมีหน่วยเป็น RVU
Final viscosity	=	ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
Set back	=	ความแตกต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดมีหน่วยเป็น RVU
Pasting temperature	=	อุณหภูมิเริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืดมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

5. การวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส (Juliano et al., 1981)

5.1 สารเคมี

- 5.1.1. เอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น ร้อยละ 95
- 5.1.2. เมทานอลความเข้มข้นร้อยละ 85
- 5.1.3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 N
- 5.1.4. สารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 N
- 5.1.5. Potato amylose (pure)
- 5.1.6. สารละลายไอโอดีน : สารละลายไอโอดีน 2 กรัม + โพแทสเซียมไอโอไดด์ 20 กรัม ในน้ำกลั่นปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร

5.2 วิธีวิเคราะห์

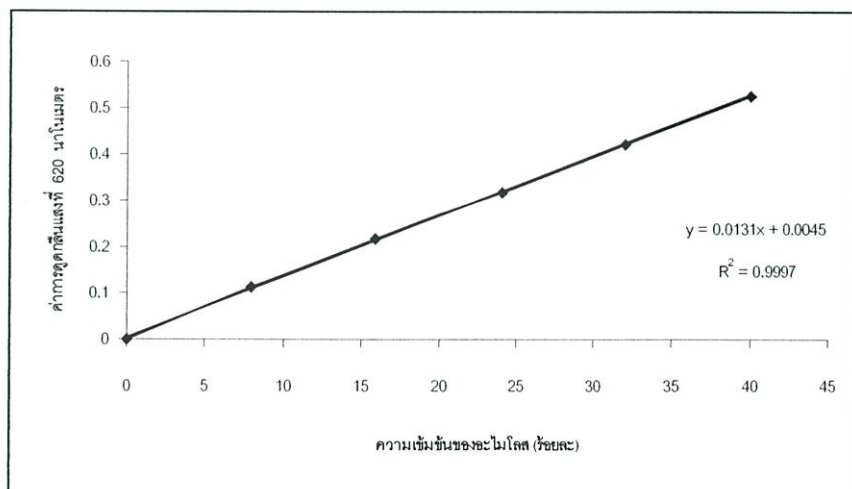
การทำกราฟมาตรฐานอะไมโลส

- 5.2.1 ชั่ง Potato amylose (pure) 0.04 กรัม ใน 100 มิลลิลิตร volumetric flask
- 5.2.2 เติมเอทิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้น ร้อยละ 95 1 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน
- 5.2.3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 N 9 มิลลิลิตร โดยไม่ต้องเขย่า
- 5.2.4 นำไปต้มใน Water bath 10 นาที ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น จากนั้นตั้ง standard solution ที่ได้ไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 5.2.5 บีบ standard solution 1 2 3 4 และ 5 มิลลิลิตร ลงใน volumetric flask
- 5.2.6 เติมสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้น 1 N 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตรลงในแต่ละ volumetric flask ตามลำดับ
- 5.2.7 เติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร
- 5.2.8 ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
- 5.2.9 วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร
- 5.2.10 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของอะไมโลส (ร้อยละ 0, 8, 16, 24, 32, และ 40) และค่าการดูดกลืนแสง

- 5.3.3. นำไปต้มใน Water bath 10 นาที ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
- 5.3.4. ปิเปตสารละลายตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ลงใน volumetric flask ที่มีน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร
- 5.3.5. เติมสารละลายไอโอดีน 2 มิลลิลิตร
- 5.3.6. ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น
- 5.3.7. วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร
- 5.3.8. คิดเป็นเปอร์เซ็นต์อะไมโลสโดยเทียบจากกราฟมาตรฐาน

ตารางที่ ข1 ค่ามาตรฐานการดูดกลืนแสงในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส

ความเข้มข้นอะไมโลส (ร้อยละ)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ 620 นาโนเมตร
0	0
8	0.1125
16	0.2180
24	0.3190
32	0.4220
40	0.5280



รูปที่ ข1 กราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวรพีพร อังคระษี
วัน เดือน ปีเกิด	15 กันยายน 2520
ที่อยู่	200/280 หมู่บ้านศิษย์โรจน์ ถ.พหลโยธิน ต.คูคต อ. ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12130
ประวัติการศึกษา	2542 คณะเทคโนโลยี สาขาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ประสบการณ์การทำงาน	
2543-2545	ตำแหน่งผู้ช่วยหัวหน้าแผนกควบคุมและประกันคุณภาพ บริษัทอุตสาหกรรมพันท้ายนรสิงห์ จำกัด จ.สมุทรสาคร