

## การศึกษาผลของสถานะในกระบวนการเจลาทีไนซันและเวลาการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช ต่อสมบัติของสตาร์ชต้านทานการย่อยจากกล้วยน้ำว้า (MUSA SAPIENTUM LINN.)

สาวิณี แก้วสวัสดิ์<sup>1</sup>, สมเกียรติ ปรัชญารากร<sup>1</sup> และ สมชาติ โสภณภรณ์<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประจักษ์ศิลปาคม แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

<sup>2</sup>สาขาวิชาเทคโนโลยีพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 126 ถนนประจักษ์ศิลปาคม แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

ผู้เขียนติดต่อ: สาวิณี แก้วสวัสดิ์ E-mail: kaewsawat.s@gmail.com

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีผู้ป่วยเกี่ยวกับระบบทางเดินอาหาร เช่นมะเร็งลำไส้ใหญ่ และเบาหวานมากขึ้นเนื่องจากการรับประทานอาหารที่ไม่ถูกหลักโภชนาการสตาร์ชต้านทานการย่อย (Resistant starch, RS) ซึ่งมีสมบัติคล้ายเส้นใยจึงได้เข้ามาเป็นบทบาทเป็นส่วนผสมของอาหารเพื่อทดแทนการรับประทานเส้นใยจากธรรมชาติ ในการทดลองเริ่มด้วยการสกัดสตาร์ชออกจากกล้วยน้ำว้าดิบด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05N จากนั้นนำสตาร์ชที่สกัดได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 50°C นาน 6 ชั่วโมงตามด้วยกระบวนการเจลาทีไนซันโดยผสมน้ำกับสตาร์ชให้มีความเข้มข้น 8% w/v แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจและอุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศนาน 30 นาทีจากนั้นแบ่งสตาร์ชออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเติมเอนไซม์พอลิกลูคานเนสลงในเจลาสตาร์ชเพื่อตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชเป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมงและส่วนที่สองไม่เติมเอนไซม์ จากนั้นนำเจลาสตาร์ชทั้งสองส่วนมาบ่มที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 วันจากการทดลองพบว่าระยะเวลาในการบ่มเจลาสตาร์ชไม่มีผลต่อปริมาณของ RDS, SDS และ RS เมื่อเปรียบเทียบผลของการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชต่อปริมาณของ RDS, SDS และ RS พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการตัดกิ่งมีปริมาณRS มากกว่าสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดกิ่ง รวมถึงมีค่า RDS, SDS กำลังการพองตัว และร้อยละการละลายที่ต่ำกว่าสำหรับระยะเวลาในการตัดกิ่งที่ 24 และ 48 ชั่วโมง ต่อค่าของ RDS, SDS, RS กำลังการพองตัว และร้อยละการละลาย พบว่าเวลาในการตัดกิ่งทั้งสองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของอุณหภูมิและความดันในการเจลาทีไนซันสตาร์ชต่อปริมาณ RS (พิจารณาที่เวลาการตัดกิ่ง 24 ชั่วโมง) พบว่าการเจลาทีไนซันที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ให้ปริมาณ RDS ต่ำกว่าการเจลาทีไนซันสตาร์ชที่อุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศ แต่ค่า SDS,RS กำลังการพองตัว และการละลายไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: สตาร์ชต้านทานการย่อย; การตัดกิ่งสตาร์ช; กระบวนการเจลาทีไนซัน; กระบวนการคินตัว

### บทนำ

กล้วยเป็นพืช ที่เจริญเติบโตได้ดีในประเทศไทย และให้ผลผลิตออกมามากตลอดทั้งปี ดังนั้นกล้วยจึงจัดได้ว่าเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่ง ไพลาภา[1] ได้สกัดสตาร์ชจากกล้วยสามสายพันธุ์ ได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหอมทอง และกล้วยไข่ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 N พบว่าร้อยละของปริมาณผลได้ของการสกัดสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้า ให้ปริมาณมากที่สุดคือ 33.18% ส่วน กล้วยหอมทอง และ กล้วยไข่ได้ปริมาณของสตาร์ชใกล้เคียงกัน คือ

29.67 % และ 30.37 % ตามลำดับ วสันต์ [2] ได้ทำการทดลองสกัดสตาร์ชจากกล้วยดิบ โดยใช้ตัวแปรในการศึกษา คือสายพันธุ์ของกล้วยและสารละลายที่ใช้สกัด สายพันธุ์กล้วยที่นำมาศึกษาได้แก่ กล้วยน้ำว้า กล้วยหักมุก และกล้วยตานี ส่วนสารละลายที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ สารละลายโซเดียมไบซัลไฟต์ (NaHSO<sub>3</sub>) ความเข้มข้น 1 % สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.05 N และน้ำ พบว่าการสกัดสตาร์ชจากกล้วยชนิดต่างๆ ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 N ให้ปริมาณสตาร์ชสูงสุดเมื่อเทียบกับสารละลายชนิดอื่น ซึ่งกล้วยน้ำว้า กล้วย

หักมุม และกล้วยตานีให้ปริมาณสตาร์ชเท่ากับ 34.09%, 34.09% และ 21.07% ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้น เห็นได้ว่าปริมาณของสตาร์ชในกล้วยน้ำว้ามีถึง 33-34% ซึ่งมากกว่ากล้วยสายพันธุ์อื่นๆ รวมทั้งสามารถหาซื้อได้ง่าย และราคาถูก ดังนั้นกล้วยน้ำว้าจึงเป็นพืชที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสตาร์ชต้านทานการย่อย (RS)

สตาร์ชเป็นโพลีแซ็กคาไรด์พบในพืช ประกอบด้วยสายโซ่พอลิเมอร์กลูโคส 2 ชนิด คือพอลิเมอร์เชิงเส้น (มีกิ่งก้านเล็กน้อย) หรืออะมิโลส และพอลิเมอร์เชิงกิ่งหรืออะมิโลเพกทิน [3-6] เมื่อพิจารณาความสามารถในการย่อยต่อเอนไซม์ภายในร่างกาย เช่น เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ของสตาร์ชแล้ว พบว่าสตาร์ชสามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท [7,9,10] ได้แก่ (1) สตาร์ชที่ถูกย่อยอย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch; RDS) สตาร์ชชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักเป็นโครงสร้างแบบบอสัญฐาน และมีส่วนของผลึกอยู่น้อยชนิดพบในอาหารที่หุงสุกใหม่ๆ เมื่อให้สตาร์ชชนิดนี้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส สตาร์ชจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโมเลกุลน้ำตาลกลูโคสในเวลา 20 นาที (2) สตาร์ชที่มีการย่อยอย่างช้า ๆ (slow digestible starch; SDS) สตาร์ชชนิดนี้ มีองค์ประกอบหลักเป็นโครงสร้างแบบบอสัญฐาน เช่นเดียวกับ RDS แต่มีส่วนของผลึกมากกว่า RDS ส่งผลให้ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ช้ากว่า และคาดว่าถูกย่อยสลายได้สมบูรณ์ในลำไส้เล็ก โดยจะถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลกลูโคสหลังจากที่มีการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แล้ว 100 นาที พบได้ในสตาร์ชจากพืช ธัญชาติ และผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุกแล้ว (3) สตาร์ชต้านทานต่อการย่อย (resistant starch; RS) สตาร์ชชนิดนี้เป็นส่วนของสตาร์ชที่มีความสามารถทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ โดยที่เอนไซม์ไม่สามารถย่อยสตาร์ชชนิดนี้ได้ หลังจากปล่อยให้ทำปฏิกิริยาย่อยสลายเป็นเวลา 120 นาที ซึ่งทำให้สตาร์ชชนิดนี้มีสมบัติคล้ายเส้นใย European FLAIR Concerted Action on Resistant Starch (EURESTA) ได้ให้นิยามของ RS ว่าหมายถึง สตาร์ชและผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์และดูดซึมในลำไส้เล็กของมนุษย์สุขภาพดี จากข้อมูลดังกล่าว RS จึงน่าสนใจที่จะนำมาผลิตเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ RS ในอุตสาหกรรมอาหาร โดยใช้เป็นส่วนผสมในอาหารประเภทต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณเส้นใย เช่น

ขนมอบกรอบ ขนมขบเคี้ยว ผลิตภัณฑ์ธัญชาติสำเร็จรูป อาหารเส้น เป็นต้น [1, 3, 10-12]

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด RS คือสภาวะในกระบวนการเจลลิตาไนเซชัน (Gelatinization) ความยาวสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช และสภาวะในกระบวนการคืนตัว (Retrogradation) ของเจลสตาร์ช [3, 12-15] กระบวนการเจลลิตาไนเซชัน เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนกับน้ำสตาร์ชจนถึงอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่ง (ประมาณ 60-70°C) พันธะไฮโดรเจนภายในผลึกสตาร์ชจะถูกทำลาย ทำให้อะมิโลสและอะมิโลเพกทินคลายตัวจากผลึก หมู่ไฮดรอกซิลภายในสายโซ่จะเกิดพันธะกับโมเลกุลของน้ำ เป็นผลให้สตาร์ชเกิดการพองตัว อะมิโลสสายสั้นบางส่วนเริ่มละลายออกมากับน้ำเกิดเป็นเจลสตาร์ช เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นอีกพันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลายมากขึ้น และผลึกของสตาร์ช ลดน้อยลงเนื่องจากการคลายตัวออกของอะมิโลเพกทิน การละลายของอะมิโลสมากขึ้นและการพองตัวจะมีมากขึ้นเช่นกัน [16-18] ทั้งนี้อุณหภูมิที่ใช้ในการเจลลิตาไนซ์และการแตกตัวของผลึกสตาร์ชมีผลมากต่อการตัดกิ่งสตาร์ช เนื่องจากหากมีการแตกตัวของผลึกสตาร์ชสูง เอนไซม์ที่ใช้ในการตัดกิ่งจะสามารถเข้าตัดกิ่งของอะมิโลเพกทินได้มากนั่นเอง

กระบวนการตัดกิ่งอะมิโลเพกทินภายในเจลสตาร์ชสามารถทำได้ด้วยเอนไซม์พุลูลานเนส หรือเอนไซม์โอโซอะไมเลส [9, 13, 18, 19] ลงในเจลสตาร์ช โดยเอนไซม์จะเข้าไปทำลายพันธะระหว่างสายโซ่กิ่งและสายโซ่หลัก (แอลฟา-1,6 กลูโคซิดิก) ของสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชทำให้มีสายโซ่ตรงภายในเจลสตาร์ชมากขึ้น ซึ่งเมื่อนำเจลสตาร์ชที่ผ่านการตัดกิ่งไปทำการคืนตัวโดยการบ่มที่ระยะเวลาต่างๆ พบว่าเจลสตาร์ชที่ผ่านการตัดกิ่งแล้วนำไปบ่มนั้น มีปริมาณของ RS มากกว่าการบ่มเจลสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดกิ่ง Lehmann et al. [21] ได้เปรียบเทียบผลของการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชต่อปริมาณของ RS โดยเจลลิตาไนซ์สตาร์ชที่อุณหภูมิ 121°C นาน 30 นาที และตัดกิ่งด้วยเอนไซม์พุลูลานเนส (อัตราส่วน สตาร์ช : เอนไซม์ เท่ากับ 20:1) นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำไปบ่มที่ 25°C พบว่าการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชให้ RS เท่ากับ 45.7% และสตาร์ชที่ไม่ถูกตัดกิ่งให้ RS เท่ากับ 5.9% Gonzalez-Solo et al. [12], Leeman et al. [15] พร้อมด้วย Shamai et al. [22] พบว่าสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชที่

มีความยาวเท่ากับ 20 หน่วยกลูโคส มีการฟอร์มตัวเป็น RS สูงที่สุด เนื่องจากความยาวสายโซ่ขนาดดังกล่าว เป็นขนาดที่เหมาะสมในการฟอร์มตัวเป็นเกลียวคู่ (double helices) ได้ดีที่สุด ซึ่งในกระบวนการคั้นตัวนั้น การเกิดเกลียวคู่ของสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชเกิดจากโมเลกุลที่มีรูปร่างเกลียวคู่ของอะมิโลส (random coil) เคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นสายเกลียวคู่ ปัจจัยที่มีผลต่อการคั้นตัวนอกจากความยาวของสายโซ่ตรงกลูโคสแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นทั้งในเรื่องอุณหภูมิและระยะเวลาบ่ม โดย ยูรี [7], Gonzalez-Solo et al. [12] พร้อมด้วย Schmiel et al. [23] พบว่าอุณหภูมิที่ทำให้การคั้นตัวได้ดีที่สุดคือ 4°C และเมื่อเพิ่มระยะเวลาบ่มมากขึ้นจะทำให้ปริมาณของ RS เพิ่มขึ้น

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีความประสงค์ที่จะศึกษาสภาวะของการเจลาติไนซ์ และผลของการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชด้วยเอนไซม์พุลูลานเนส โดยบ่มเจลาสตาร์ชที่อุณหภูมิ 4°C ต่อปริมาณ RS

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการ

### วัสดุ

กล้วยน้ำว้าดิบ, เอนไซม์พุลูลานเนส จากบริษัท Novo Nordisk A/S,

### การสกัดสตาร์ชจากกล้วยน้ำว้าดิบ

การสกัดเริ่มจากสับกล้วยดิบที่ปอกเปลือกแล้วให้ละเอียด เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.05 N อัตราส่วนเนื้อกล้วยต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1:2 w/v ปั่นกวนด้วยเครื่องผสม ความเร็วรอบ 1000 rpm นาน 2 ชั่วโมง จากนั้นนำของผสมไปหมุนเหวี่ยงโดยใช้ความเร็วรอบ 10,000 rpm นาน 10 นาที นำตะกอนที่ได้มาผสมน้ำแล้วกรองด้วยตะแกรงร่อนขนาด 100, 200 และ 325 เมช ตามลำดับ ทิ้งสตาร์ชให้ตกตะกอน เทน้ำส่วนบนทิ้ง รินน้ำลงไปอีกครั้งแล้วกรองซ้ำ ทำเช่นนี้ต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งน้ำส่วนบนใส กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง สุดท้ายนำไปบดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 100 เมช เก็บสตาร์ชไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

### การเตรียมสตาร์ชตัดกิ่ง

ผสมสตาร์ชกับน้ำกลั่น (อัตราส่วน 8% w/v) ปรับ pH เป็น 5.0 โดย สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท เจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ และ 100°C ความดันบรรยากาศ นาน 30 นาที ลดอุณหภูมิเป็น 50°C ใน water bath shaker จากนั้นเติมเอนไซม์พุลูลานเนส จำนวน 5% v/w บ่มนาน 24 และ 48 ชั่วโมง จากนั้นหยุดปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยให้ความร้อนกับเจลาสตาร์ช ที่อุณหภูมิ 85°C นาน 20-30 นาที [8,10] และบ่มเจลาสตาร์ชที่อุณหภูมิ 4 ° C นาน 1, 3, 5 และ 7 วัน สุดท้ายนำไปไล่น้ำออกโดยเติมเอทานอล (absolute, >99.8%, Merck, Germany) เขย่าให้เข้ากัน กรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 และอบที่ 50 ° C นาน 6 ชั่วโมง บดแล้วกรองผ่านตะแกรงร่อนเบอร์ 100 เก็บสตาร์ชตัดกิ่งไว้ในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท

### การหาองค์ประกอบทางเคมี

การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ไขมัน เกล็ด และความชื้นของสตาร์ช ใช้วิธีตาม AOAC (2000) ส่วนปริมาณสตาร์ชทั้งหมดใช้วิธีของ Mahin และ Carr [24]

### การกระจายตัวของสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช ด้วยเครื่อง High Performance Size Exclusion Chromatography (HPSEC)

ซึ่งสตาร์ชตัดกิ่งที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง (เจลาติไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ 30 นาที) จำนวน 4 mg นำไปละลายในสารละลาย Dimethyl Sulfoxide (DMSO) ความเข้มข้น 90%v/v จำนวน 1 mL แช่ในน้ำร้อนจนสตาร์ชละลายหมด ตามวิธีของ Jiranuntakul et al. [25] จากนั้นนำมากรองผ่านเมมเบรนขนาด 0.45 µm เริ่มแรกให้ล้างคอลัมน์ (Zorbax PSM 60 ขนาด 6.2 x 250 mm ซึ่งภายในบรรจุด้วยเม็ดซิลิกาที่มีรูพรุนขนาด 5 µm) โดยฉีดสารละลายสตาร์ชเข้าไปในเครื่อง HPSEC (LC-20AD; Shimadzu) จำนวน 100 µL อัตราการไหลของ DMSO ความเข้มข้น 90%v/v ซึ่งถูกใช้เป็นเฟสเคลื่อนที่ เท่ากับ 0.5 mL ต่อนาที อุณหภูมิ 50°C detector ของเครื่องเป็นแบบ RI detector (RID-10A; Shimadzu) จากนั้นฉีดสารละลายสตาร์ชไปในเครื่อง HPLC อีกครั้ง

จำนวน 40 µL เพื่อทำการทดสอบการกระจายตัวของสายโซ่  
กลูโคส และวิเคราะห์กราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยซอฟต์แวร์  
Shimadzu CLASS-VP (version 6.14 SP2)

Sw = น้ำหนักตัวอย่างที่ละลายน้ำ  
Sd = น้ำหนักตัวอย่างเปียก  
W = น้ำหนักตัวอย่างแห้ง

### การหาปริมาณ RDS, SDS และ RS

การวิเคราะห์ RDS, SDS และ RS ดัดแปลงมาจากวิธี  
ของ Zhang et al. [26] โดยชั่งสตาร์ช 100 mg ในขวดกัน  
แบน ใส่ลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 mm จำนวน 15  
ลูก แล้วเติมน้ำกลั่น 2 mL สารละลายโซเดียมอะซิเตท  
บัฟเฟอร์ pH 5.2 จำนวน 5 mL และเอนไซม์ผสม  
(แอลฟาอะไมเลส 600 U/mL และอะไมโลกลูโคซิเดส 26  
U/mL จำนวน 54 และ 6 mL ตามลำดับ) จำนวน 5 mL  
จากนั้นนำไปบ่มที่ 37°C ใน water bath shaker ตูด  
สารละลายออกมา 0.5 mL เมื่อครบเวลา 20 และ 120 นาที  
หยุดปฏิกิริยาด้วยสารละลายเอทานอล ความเข้มข้น 80%  
จำนวน 4.5 mL ( $G_{20}$  และ  $G_{120}$  ตามลำดับ) หมุนเหวี่ยงที่  
ความเร็วรอบ 5000 rpm นาน 10 นาที วิเคราะห์หาปริมาณ  
กลูโคสด้วยชุดทดสอบหาปริมาณกลูโคส Kit Glucose  
Oxidase/Peroxidase (Sigma Glucose (GO) Assay kit,  
Sigma GAGO20) แล้วคำนวณหาค่า RDS, SDS และ RS ดัง  
ในสมการ

$$RDS = (G_{20} \times 0.9)/TS \dots \dots \dots (2)$$

$$SDS = ((G_{120} - G_{20}) \times 0.9)/TS \dots \dots \dots (3)$$

$$RS = [TS - (RDS+SDS)]/TS \dots \dots \dots (4)$$

### ร้อยละการละลายและกำลังการพองตัว

ผสมสตาร์ชจำนวน 100 mg ลงในหลอดทดลอง  
จากนั้นเติมน้ำกลั่นจำนวน 10 mL นำไปให้ความร้อนที่  
อุณหภูมิ 60, 80, และ 100°C นาน 30 นาที (นำออกมาเขย่า  
ทุกๆ 5 นาที) ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ  
4500 rpm นาน 15 นาที แยกส่วนใสใส่ลงในจานอะลูมิเนียม  
แล้วอบที่ 120° C จนน้ำระเหยหมด ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วชั่ง  
น้ำหนัก นำตะกอนที่ได้จากการหมุนเหวี่ยงไปชั่งน้ำหนัก แล้ว  
คำนวณตามสมการ

$$\text{ร้อยละการละลาย (\%S)} = (Sw/W) \times 100 \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{กำลังการพองตัว (Sp)} = (Sd \times 100) / (W \times (100 - S)) \dots \dots \dots (6)$$

โดย

## 3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

### 3.1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

ร้อยละขององค์ประกอบทางเคมีสามารถแสดงได้ดัง  
ตารางที่ 3 – 1

ตารางที่ 3-1 องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ช

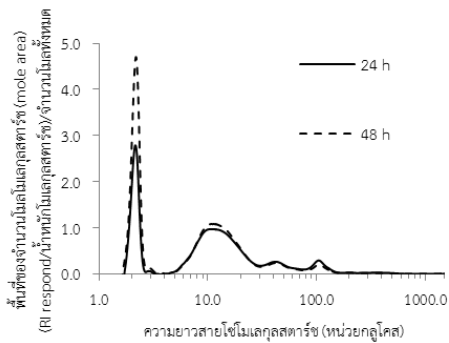
สตาร์ช	ปริมาณ (ร้อยละ)				
	เส้นใย	โปรตีน	ไขมัน	ความชื้น	เถ้า
92.88	1.80±0.	0.29	0.01	4.86	0.16
±0.3	1	±0.1	±0.2	±0.8	±0.1

จากตารางที่ 3-1 พบว่าสตาร์ชที่สกัดได้จากกล้วย  
น้ำว่ามีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง คือมีสตาร์ชร้อยละ 92.88  
ในขณะที่ เส้นใย โปรตีน ไขมัน และเถ้า มีปริมาณที่น้อยมาก  
เมื่อนำค่าในตารางไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น เช่น ไพลา  
ภา [1] ซึ่งได้รายงานปริมาณขององค์ประกอบทางเคมี คือ  
ความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า ของสตาร์ชกล้วยน้ำว่า ว่ามี  
ปริมาณเท่ากับ 7.16%, 0.2%, 0.12% และ 0.05%  
ตามลำดับ Lehmann et al. [21] ได้ศึกษาองค์ประกอบทาง  
เคมีของสตาร์ชกล้วย (*Musa acuminata* Var.) แล้วพบว่า  
สตาร์ชกล้วยมีองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น 14.3%,  
ไขมัน 0.18%, โปรตีน 0.44% และเถ้า 0.04% Zhang et al.  
[26] ได้รายงานผลจากการหาปริมาณขององค์ประกอบทาง  
เคมีภายในสตาร์ชกล้วย ว่ามีปริมาณของความชื้น 11.9%,  
โปรตีน 0.39% และเถ้า 0.1% ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของ  
องค์ประกอบทางเคมีของสตาร์ชในตารางที่ 3-1 และของ  
นักวิจัยท่านอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน

### 3.2 ความยาวสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช

ผลของระยะเวลาในการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช  
ต่อความยาวสายโซ่ แสดงดังในรูปที่ 3-1 โดยเห็นได้ว่าเมื่อ  
เพิ่มเวลาในการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช มากขึ้นจาก 24  
ชั่วโมง เป็น 48 ชั่วโมง จะได้สายโซ่โมเลกุลสตาร์ชที่มีขนาดที่  
สั้น มากขึ้น ดังจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงความยาวสายโซ่เท่ากับ  
100-1,000 หน่วยกลูโคส แต่เมื่อพิจารณาความยาวของสาย  
โซ่โมเลกุลสตาร์ชในช่วงที่ความยาวต่ำกว่า 100 หน่วยกลูโคส

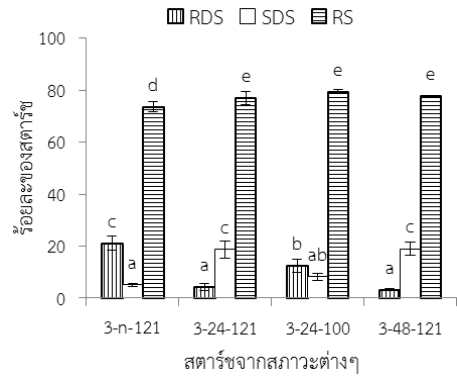
พบว่าระยะเวลาในการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ช ที่ 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ให้ค่าไม่แตกต่างกัน



รูปที่ 3-1 ความยาวสาย โซ่โมเลกุลสตาร์ชตัดกิ่งที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง (เจลาทีโนสที่ 121 °C ความดัน 1.1 บาร์เกจ )

### 3.3 ปริมาณของ RDS, SDS และ RS

ร้อยละของ RDS, SDS และ RS สามารถแสดงได้ในรูปที่ 3 - 2 ซึ่งพบว่าสตาร์ชที่ได้จากการคั้นตัวของเจลสตาร์ชที่ผ่านการตัดกิ่งให้ปริมาณของ RS มากกว่าการต้มเจลสตาร์ชที่ไม่ผ่านการตัดกิ่ง เมื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาการตัดกิ่ง ที่เวลา 24 และ 48 ชั่วโมง (เจลาทีโนสสตาร์ชที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ) ต่อปริมาณของ RDS, SDS และ RS พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สำหรับผลของอุณหภูมิและความดันในการเจลาทีโนสสตาร์ชต่อปริมาณ RS (ตัดกิ่งสตาร์ชนาน 24 ชั่วโมง) พบว่าการเจลาทีโนสที่อุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศ ให้ปริมาณ RDS มากกว่าสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีโนสที่ อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ และปริมาณของ SDS มีน้อยกว่า ส่วน RS ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์ภายในเจลถูกทำลายเนื่องมาจากกระบวนการเจลาทีโนสในเซนที่อุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศ ได้เกือบสมบูรณ์ ซึ่งอาจเหลือผลึกของสตาร์ชจำนวนเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเจลาทีโนสเป็น 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ จึงมีผลกระทบต่อผลึกในเจลสตาร์ชไม่มากนัก

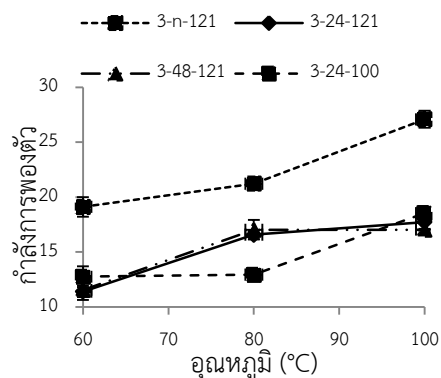


รูปที่ 3-2 ร้อยละของ RDS, SDS และ RS ภายในสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วบ่มที่ 4°C นาน 3 วัน โดยที่ 3-n-121, 3-24-121, 3-48-121 คือ สตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีโนสที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ไม่ตัดกิ่ง, ตัดกิ่งที่ 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วน 3-24-100 คือ สตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีโนสที่ 100°C ความดันบรรยากาศ ตัดกิ่งที่ 24 ชั่วโมง

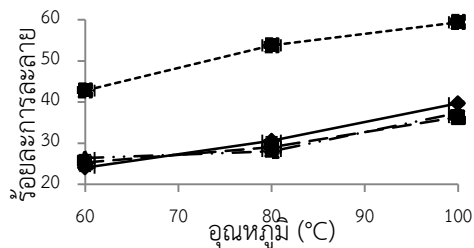
\*หมายเหตุ อักษรที่ต่างกันบนกราฟ แสดงถึงค่าที่ต่างกันทางสถิติ ( $p \leq 0.05$ )

### 3.3 กำลังพองตัวและการละลาย

กำลังพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3 - 3 พบว่าสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีโนสที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ไม่ตัดกิ่ง และบ่ม 3 วันมีกำลังพองตัวและการละลายสูงที่สุด เนื่องจากผลึกสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการนี้เกิดจากการจับตัวกันของสายโซ่อะไมโลเพกทิน กิ่งก้านของอะมิโลเพกทินจะไปขัดขวางไม่ให้เกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกที่เป็นระเบียบ ดังนั้นสตาร์ชชนิดนี้จึงไม่มีความแข็งแรง และขาดเสถียรภาพทางความร้อน นั่นคือเมื่อนำไปต้มผลึกสตาร์ชจะถูกทำลายไปอย่างรวดเร็ว



(ก)



(ข)

รูปที่ 3-3 (ก) กำลังพองตัวและ (ข) ร้อยละการละลายของสตาร์ชสตาร์ชที่ผ่านกระบวนการต่างๆ แล้วบ่มที่ 4°C นาน 3 วัน โดยที่ 3-n-121, 3-24-121, 3-48-121 คือ สตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ไม่ตัดกิ่ง, ตัดกิ่งที่ 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วน 3-24-100 คือ สตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ที่ 100°C ความดันบรรยากาศ ตัดกิ่งที่ 24 ชั่วโมง

ส่วนสตาร์ชที่ได้จากกระบวนการเจลาทีไนซ์ ตามด้วยการตัดกิ่งสายโซ่อะมิโลเพกทิน การรวมตัวเป็นผลึกใหม่นั้นจะเป็นระเบียบ และมีการอัดตัวกันแน่นมากกว่าสตาร์ชที่ได้จากการคืนตัวของเจลสตาร์ชที่ไม่ถูกตัดกิ่ง เนื่องจากมันไม่มีกึ่งก้านมาขัดขวางการจัดเรียงตัว ผลคือมันจะมีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่าสตาร์ชชนิดดังกล่าว สตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ตัดกิ่ง ที่ 24 และ 48 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังพองตัวและการละลายไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนสตาร์ชที่ได้จากกระบวนการเจลาทีไนซ์ที่ 100°C ความดันบรรยากาศ ตัดกิ่งที่ 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังพองตัวต่างจากสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ตัดกิ่ง ที่ 24 และ 48 ชั่วโมงเล็กน้อย คือในช่วงอุณหภูมิ 60-80 °C สตาร์ชที่ได้จากกระบวนการนี้จะยังไม่เกิดการพองตัว แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 100 °C สตาร์ชจะเกิดการพองตัวอย่างรวดเร็ว แต่สุดท้ายแล้วสตาร์ชที่ได้จาก 3 กระบวนการคือสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ ตัดกิ่ง ที่ 24 และ 48 ชั่วโมงกระบวนการเจลาทีไนซ์ที่ 100°C ความดันบรรยากาศ ตัดกิ่งที่ 24 ชั่วโมง ให้ค่ากำลังพองตัวและการละลายไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 4.สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่าการตัดกิ่งของสายโซ่โมเลกุลอะมิโลเพกทิน สามารถเพิ่มปริมาณของ RS และลด

ปริมาณของ RDS, SDS, กำลังการพองตัว, และร้อยละการละลายได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาในการตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชนาน 24 ชั่วโมงและ 48 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาการตัดกิ่งทั้งสอง ให้ปริมาณ RDS, SDS RS, กำลังการพองตัว, ร้อยละการละลายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนผลของสภาวะในกระบวนการเจลาทีไนซ์ขึ้นต่อปริมาณของ RS (ตัดกิ่งสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชที่ 24 ชั่วโมง) พบว่าการเจลาทีไนซ์ที่อุณหภูมิ 100°C ความดันบรรยากาศ ให้ปริมาณ RDS มากกว่าสตาร์ชที่ผ่านการเจลาทีไนซ์ที่อุณหภูมิ 121°C ความดัน 1.1 บาร์เกจ แต่ปริมาณของ SDS และ RS ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ช่วยสนับสนุนทุนวิจัย ซึ่งทำให้นักวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

#### 6.เอกสารอ้างอิง

- ไพลาภา นิมสังข์ (2550). คุณสมบัติของแป้งและสตาร์ชจากกล้วยดิบเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร, กรุงเทพฯ:วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- วสันต์ ศิริวงศ์ (2543). สมบัติเคมีกายภาพของสตาร์ชที่สกัดได้จากกล้วยไทยบางชนิด, กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- Eerlingen, R. C. and Delcour, J. A. (1995). Formation, Analysis, Structure and Properties of Type III Enzyme Resistant Starch, Journal of Cereal Science, vol. 22, pp. 129-138.
- Fuentes-Zaragoza, E., Riquelme-Navarrete, M. J., Sanchez-Zapata, E. and Perez-Alvarez, J. A. (2010). Resistant starch as functional

- ingredient: A review, Food Research International, vol.43, pp. 931-942
- Haralampu, S. G. (2000). Resistant starch – a review of the physical properties and biological impact of RS3, Carbohydrate polymers, vol. 41, pp.285-292.
- Peroni-Okita, F. H. G., Simao, R. A., Cardoso, M. B., Soares, C. A., Lajolo, F. M. and Cordenunsi, B. R. (2010). In vivo degradation of banana starch: Structural characterization of the degradation process, Carbohydrate Polymers, vol.81, pp.291-299.
- ยุรี วันดี ( 2553). ผลของการเจลาติไนซ์และการเก็บเจลที่สภาวะต่างๆ ต่อการเกิด RESISTANT STARCH ของแป้งพุดดิ้ง, กรุงเทพฯ: วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- วรวิมลยา เกียรติพงษ์ลาภ และ สุนันทา ทองทา (2007). สมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลังตัดกิ่ง, วารสารเทคโนโลยีสุรนารี, 14(2), เมษายน-มิถุนายน 2550, หน้า 195-204.
- Miao, M., Jiang, B. and Zhang, T. (2009). Effect of pullulanase debranching and recrystallization on structure and digestibility of waxy maize starch, Carbohydrate Polymer, vol. 76, pp. 214-221.
- สุรีย์พร บุญนา (2552). ผลของสภาวะการบ่มและวิธีการแยกน้ำต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยของแป้งข้าว, นครราชสีมา: วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- Faraj, A., Vasanthan, T. and Hoover, R. (2004). The effect of extrusion cooking on resistant starch formation in waxy and regular barley flours, Food research International, vol. 37, pp. 517-525
- Gonzalez-Solo, R. A., Mora-Escobedo, R., Hernandez-Sanchez, H., Sanchez-Rivera, M. and Bello-Perez, L.A. (2007). The influence of time and storage temperature on resistant starch formation from autoclaved debranched banana starch, Food Research International, vol. 40, pp.304-310.
- วิไล สันติโสภาศร, วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์, เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ และกล้าณรงค์ ศรีรอด (2543). การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังโดยเอนไซม์พุลูลานเนส, การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 38 สาขาวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ, หน้า 454-461.
- Escarpa, A., Gonzalez, M. C., Manas, E., Garcia-Diz, L. and Saura-Calixto, F. (1996). Resistant Starch Formation: Standardization of a High-Pressure Autoclave Process, Journal of Agriculture and Food Chemistry, vol.44, pp.924-928..
- Leeman, A. M., Karlsson, M. E., Eliasson, A. C. & Bjorck, I. M. E. (2006). Resistant starch formation in temperature treated potato starches varying in amylase/amylopectin ratio, Journal of Carbohydrate Polymers, vol.65, pp.306-313.
- Baik, M., Kim, K. and Kim, W. (1997), Recrystallization Kinetics and Glass Transition of Rice Starch Gel System, Journal of Agriculture and Food Chemistry, vol.45, pp.4242-4248
- Eerlingen, R. C., Crombez, M. and Delcour, J. A. (1993). Enzyme-Resistant Starch. I. Quantitative and Qualitative Influence of Incubation Time and Temperature of



- Autoclaved Starch on Resistant Starch Formation, *Cereal Chemistry Journal*, vol.70, pp.339-344.
- Eliasson, C. A. (2004). *Starch in food Structure, function and applications*, Woodhead Publishing Limited, England, pp.264-270
- Cai, L., Shi, Y. Ch., Rong, L. and Hsiao, B. S. (2010). Debranching and crystallization of waxy maize starch in relation to enzyme digestibility, *Carbohydrate Polymers*, vol. 81, pp.385-393.
- Milasinovic, M., Radosavljevic, M. and Dokic, Lj. (2010). Effect of autoclaving and pullulanase debranching on the resistant starch yield of normal maize starch, *Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 75 (4), pp. 449-458.
- Lehmann, U., Jacobasch, G. & Schmiedl, D. (2002). Characterization of resistant starch type III from banana (*Musa acuminata*), *Journal Agriculture and Food Chemistry*, vol.50, pp.5536-5240.
- Shamai, K., Binco-Peled, H. and Shimoni, E. (2003). Polymorphism of resistant starch type III, *Journal of Carbohydrate Polymers*, vol.54, pp.363-369.
- Schmiedl, D., Bauerlein, M., Bengs, H. and Jacobasch, G. (2000). Production of heat-stable, butyrogenic resistant starch, *Journal of Carbohydrate Polymers*, vol.43, pp.183-193.
- Mahin, Edward G. and Carr, Ralph H. (1923). *Quantitative agricultural analysis*, First ed. McGraw-Hill, N. Y.
- Jiranuntakul, W., Puttanlek, Ch., Rungsardthong, V., Pancha-amon, S. and Uttapap, D. (2012). Amylopectin structure of heat-moisture treated starches, *Starch/Stärke*, vol. 64, pp.470-480.
- Zhang, P. and Hamaker, B. R. (2012). Banana starch structure and digestibility, *Journal of Carbohydrate Polymers*, vol.87, pp.1552-1558