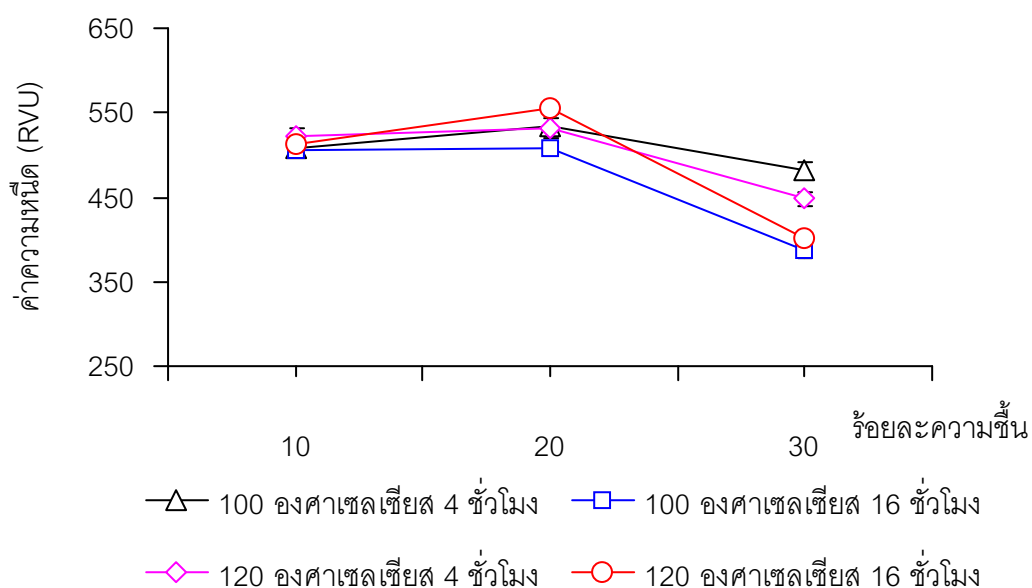


มีการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดแตกต่างออกไป โดยความหนืดสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรและดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 แต่มีแนวโน้มไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 ส่วนค่าความหนืดสุดท้ายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นกันแต่ไม่ส่งผลทำให้ค่าเซตแบคมีความแตกต่างเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรและดัดแปรในระดับต่ำ ส่วนการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 จะมีผลเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าต่ำที่สุด โดยพบว่าการเพิ่มระดับอุณหภูมิและระยะเวลาในการดัดแปรมีผลทำให้ค่าความหนืดสูงสุด เบรกดาวน์ และเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุดที่มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ค่าความหนืดที่เหลือ ได้แก่ ค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็น ค่าความหนืดสุดท้าย ค่าเซตแบค และอุณหภูมิที่เริ่มเกิดความหนืด มีแนวโน้มไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

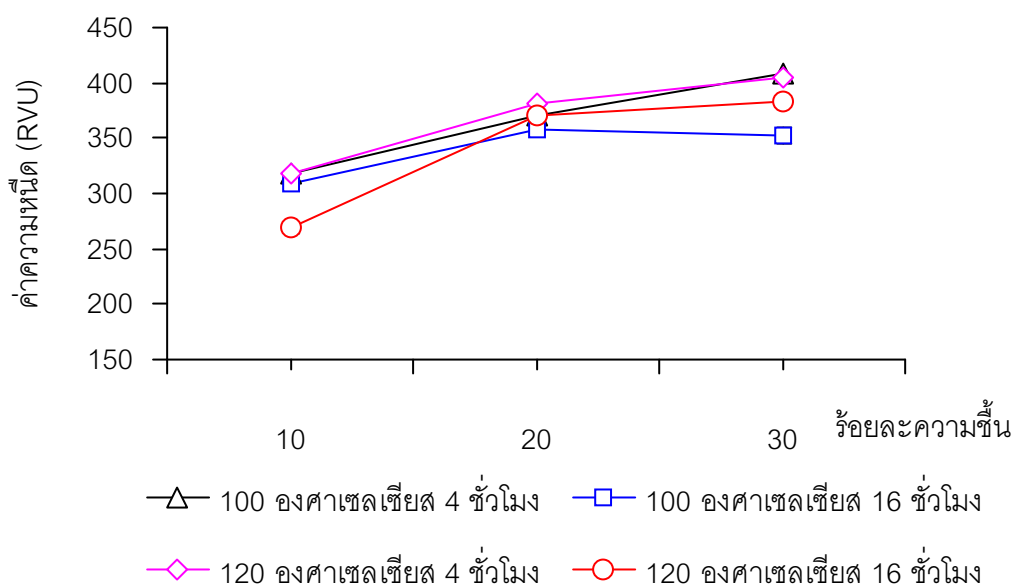
การที่สตาร์ช HMT มีค่าความหนืดสูงสุดเรียงจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้คือ สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรในระดับความชื้นร้อยละ 20 และ $10 >$ สตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร $>$ สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 ตามลำดับ ค่าความหนืดสูงสุดที่เพิ่มขึ้นมีสาเหตุเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลจากการยึดเกาะกันระหว่างสาย อะไมโลสด้วยกันเอง และ/หรือการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไซมันภายในเม็ด สตาร์ชระหว่างการดัดแปรด้วยวิธี HMT (Hoover และ Manuel, 1996b) ซึ่งในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของพันธะในระดับหนึ่งจะส่งผลในทางบวก คือทำให้เม็ดสตาร์ชสามารถทนต่อความร้อนและแรงเฉือนหรือเกิดการพองตัวได้มากขึ้นทำให้ความหนืดสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในสตาร์ช HMT ที่ถูกดัดแปรในระดับต่ำและปานกลาง และในกรณีที่มีการเพิ่มขึ้นของพันธะเป็นจำนวนมากจนทำให้เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงมาก ๆ จะส่งผลในทางลบ คือจะเป็นการขัดขวางหรือเกิดการยับยั้งการพองตัวของเม็ดสตาร์ชขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สตาร์ช HMT ที่ถูกดัดแปรในระดับสูงมีค่าความหนืดสูงสุดลดลง ดังนั้นจึงต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อจะทำลายพันธะดังกล่าวซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืดของสตาร์ชดัดแปรมีค่าสูงขึ้น

เบรกดาวน์ เป็นค่าที่อธิบายถึงความทนทานของเม็ดสตาร์ชต่อการให้ความร้อนและการกวน การที่ค่าเบรกดาวน์มีค่าลดลงหลังการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้า แสดงให้เห็นว่า HMT จะมีผลทำให้เม็ดสตาร์ชมีความคงตัวต่อความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการหุงต้มได้เพิ่มขึ้นจึงมีการแตกสลายของเม็ดสตาร์ชลดลง ซึ่งถ้าหากเบรกดาวน์มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าเม็ดสตาร์ชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายขึ้นกว่าเดิมเมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือน (พิณทิพย์, 2547)

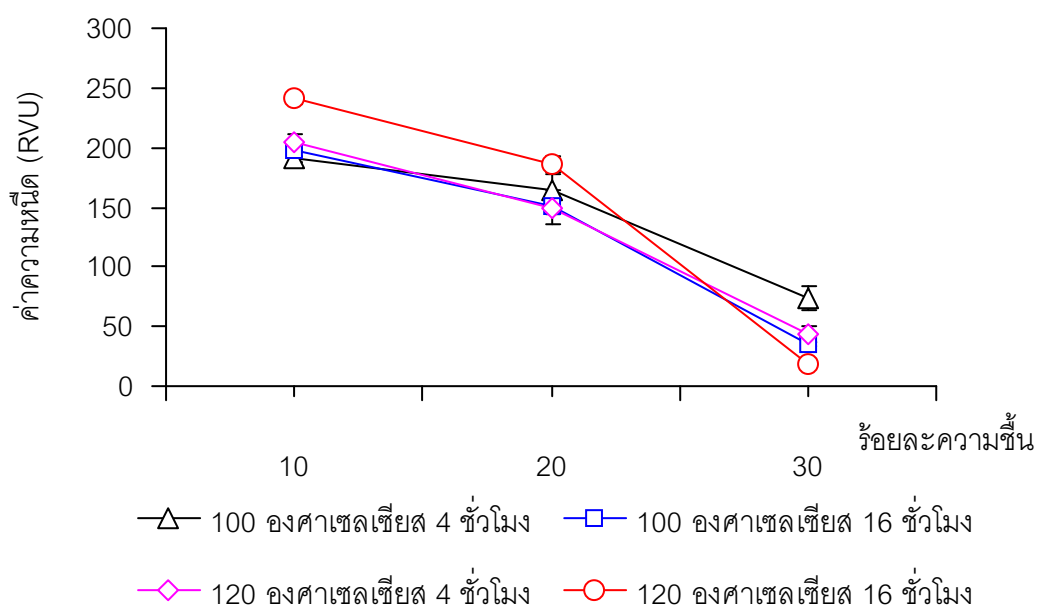
เซตแบค เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการเกิดรีโทรเกรดชัน หรือการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลอะมิโนเอสที่อยูใกล้กันเมื่อสารแขวนลอยสตาร์ชเย็นตัวลง ซึ่งสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ในระดับสูงมีค่าเซตแบคลดลง แสดงว่าการคืนตัวหรือการเกิดรีโทรเกรดชันของสตาร์ชดัดแปรจะลดลงเช่นเดียวกัน Lawal (2005) และ Adebawale และคณะ (2005a) ให้เหตุผลว่าการที่สตาร์ช HMT มีค่าการคืนตัวลดลงมีสาเหตุโดยตรงมาจากเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (reorganization) ภายในเม็ดสตาร์ชในระหว่าง HMT ทำให้เม็ดสตาร์ชถูกจำกัดการพองตัว สอดคล้องกับ Adebawale และคณะ (2005a) ซึ่งกล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสตาร์ชในระหว่างการดัดแปรจะเกี่ยวกับการสร้างพันธะชนิดใหม่โดยมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl groups) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยการที่หมู่ไฮดรอกซิลอิสระมีจำนวนลดลงอาจมีส่วนจำกัดการเข้ามารวมกลุ่มกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนของโมเลกุลสตาร์ชที่อยูใกล้กันในการเกิดรีโทรเกรดชัน ดังนั้นจึงส่งผลให้สตาร์ชดัดแปรมีค่าเซตแบคลดลง



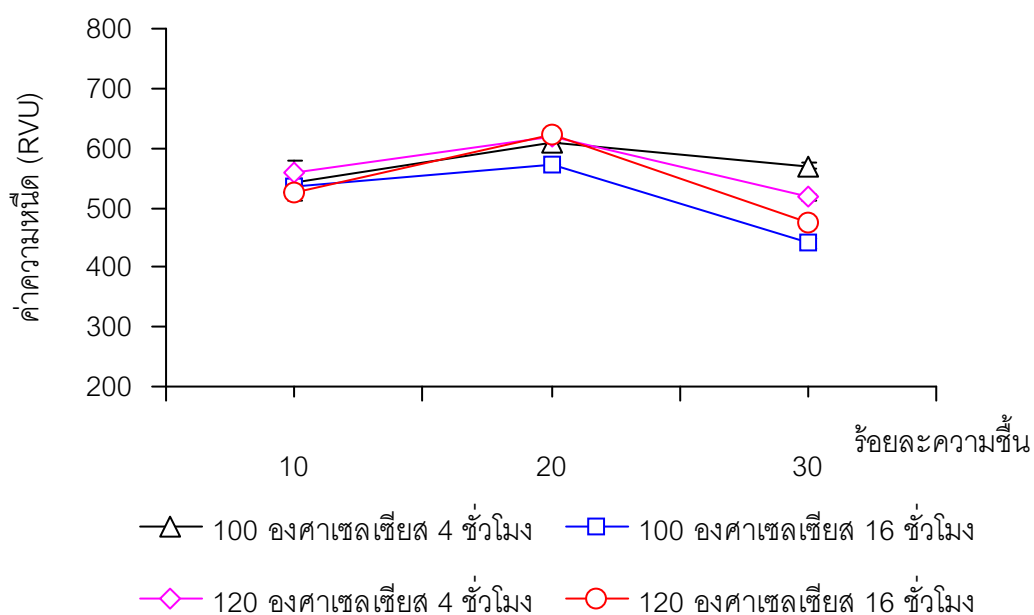
ภาพที่ 25 ค่าความหนืดสูงสุดของสตร้าข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความเข้มข้น ร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าความหนืดสูงสุดของสตร้าข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 491.05 ± 0.91 RVU)



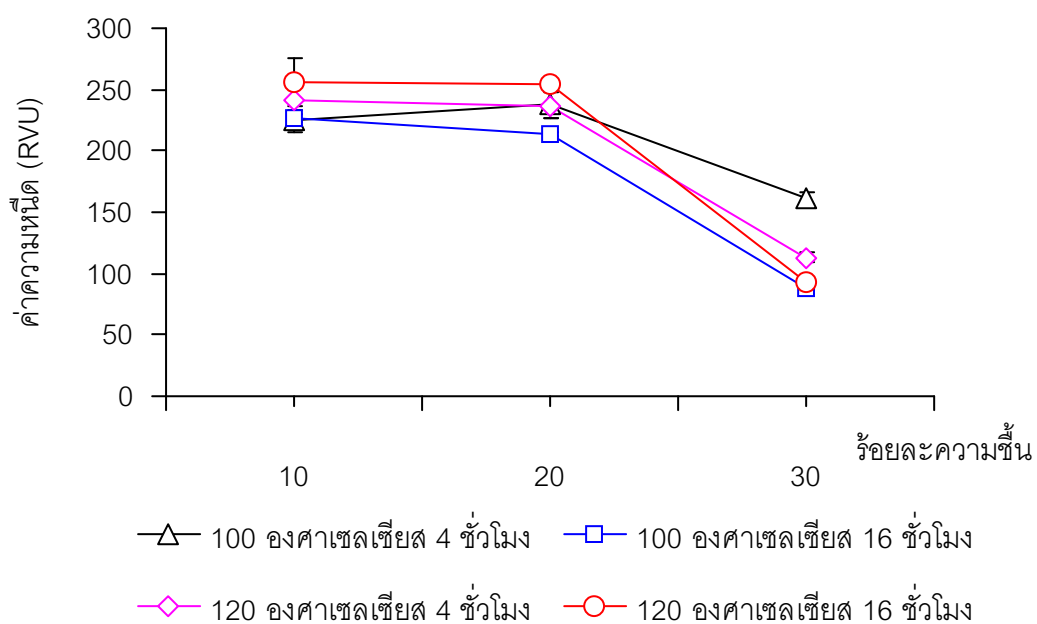
ภาพที่ 26 ค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นของสตร้าข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความเข้มข้น ร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นของสตร้าข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 314.04 ± 9.84 RVU)



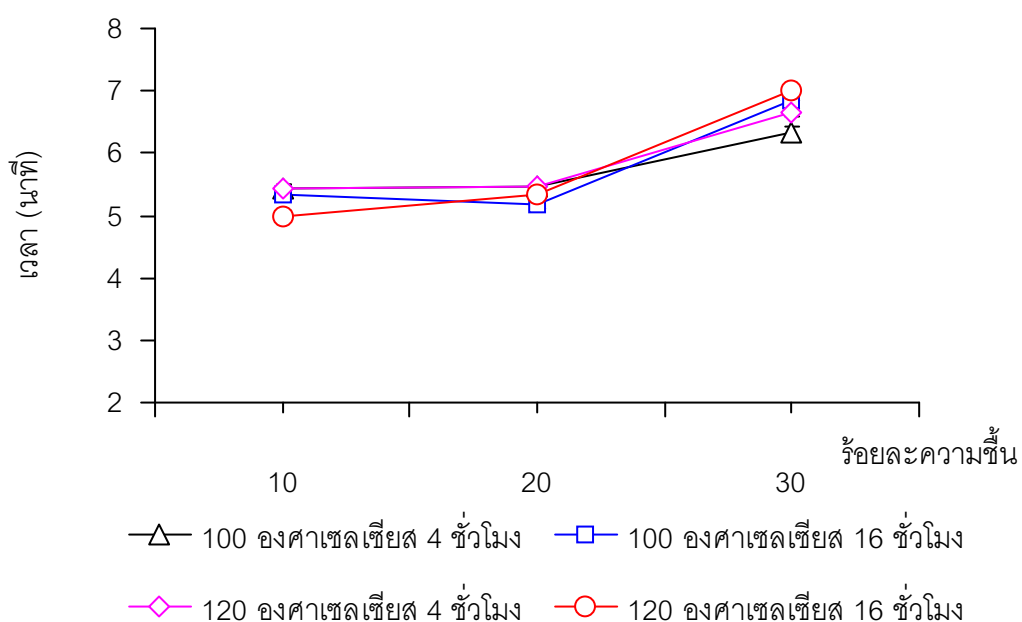
ภาพที่ 27 ค่าเบรกดาวนซ์ของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความขึ้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าเบรกดาวนซ์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 177.00 ± 5.42 RVU)



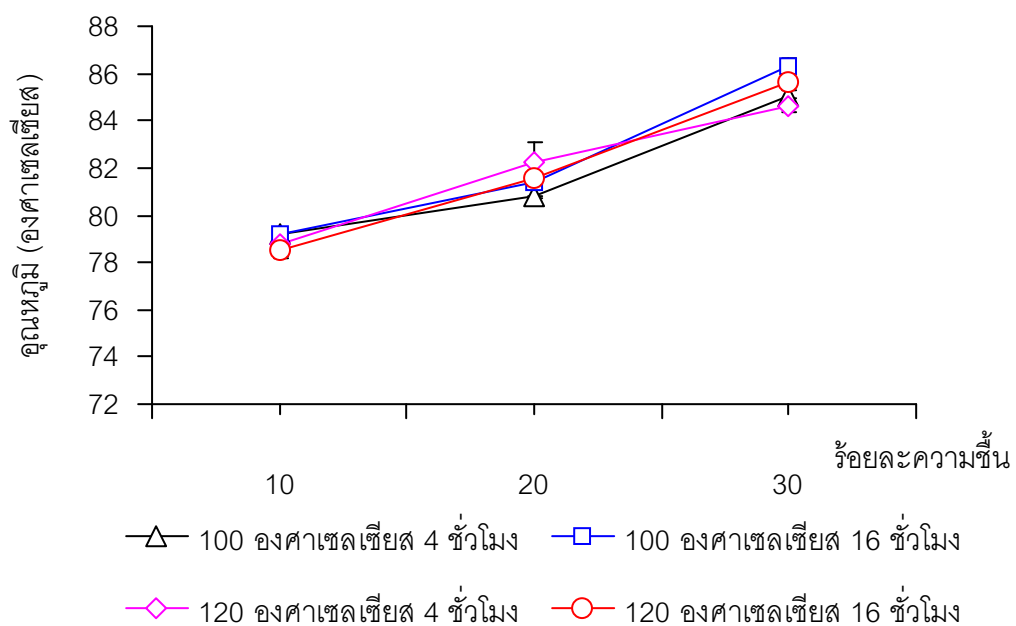
ภาพที่ 28 ค่าความหนักสุดท้ายของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความขึ้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าความหนักสุดท้ายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 557.17 ± 5.78 RVU)



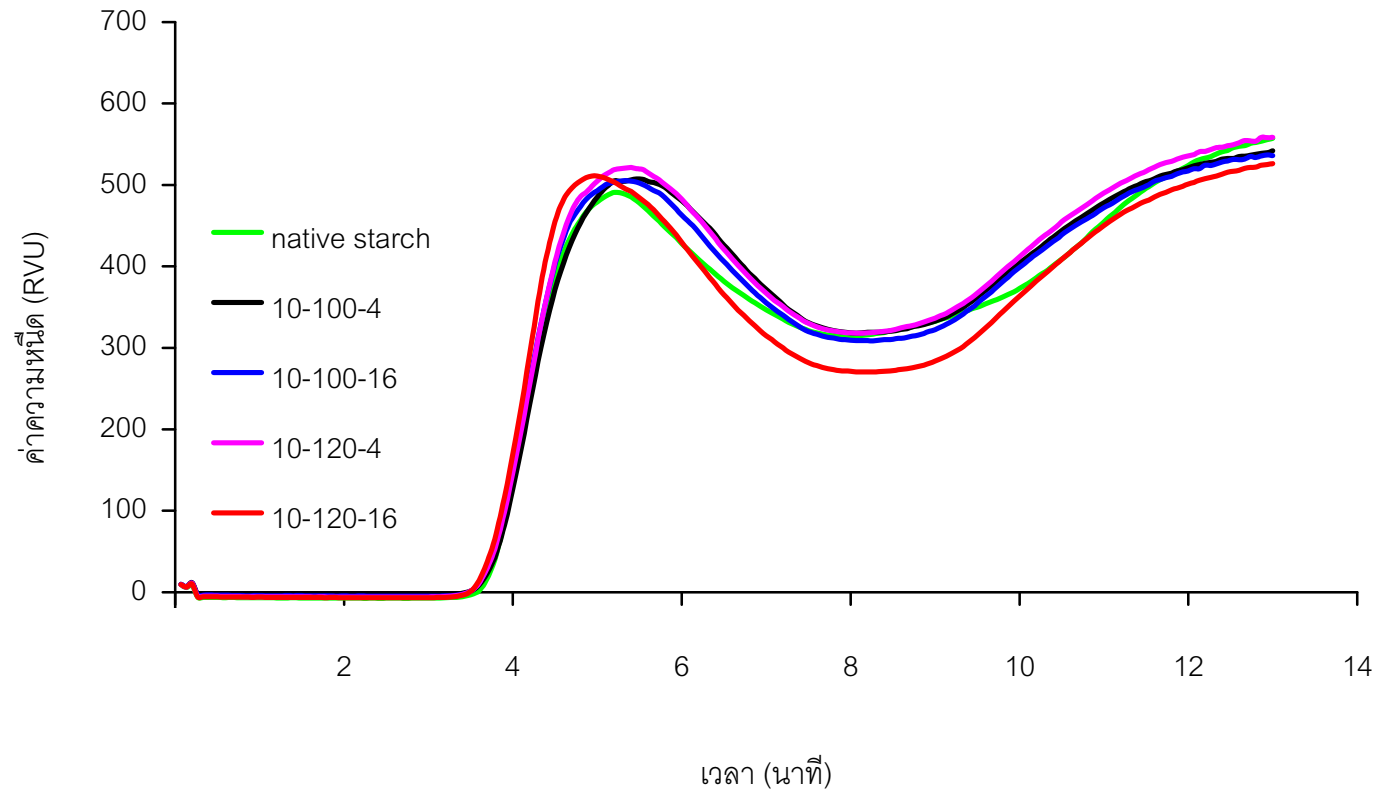
ภาพที่ 29 ค่าเซตแบบคของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความขึ้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าเซตแบบคของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 243.13 ± 4.07 RVU)



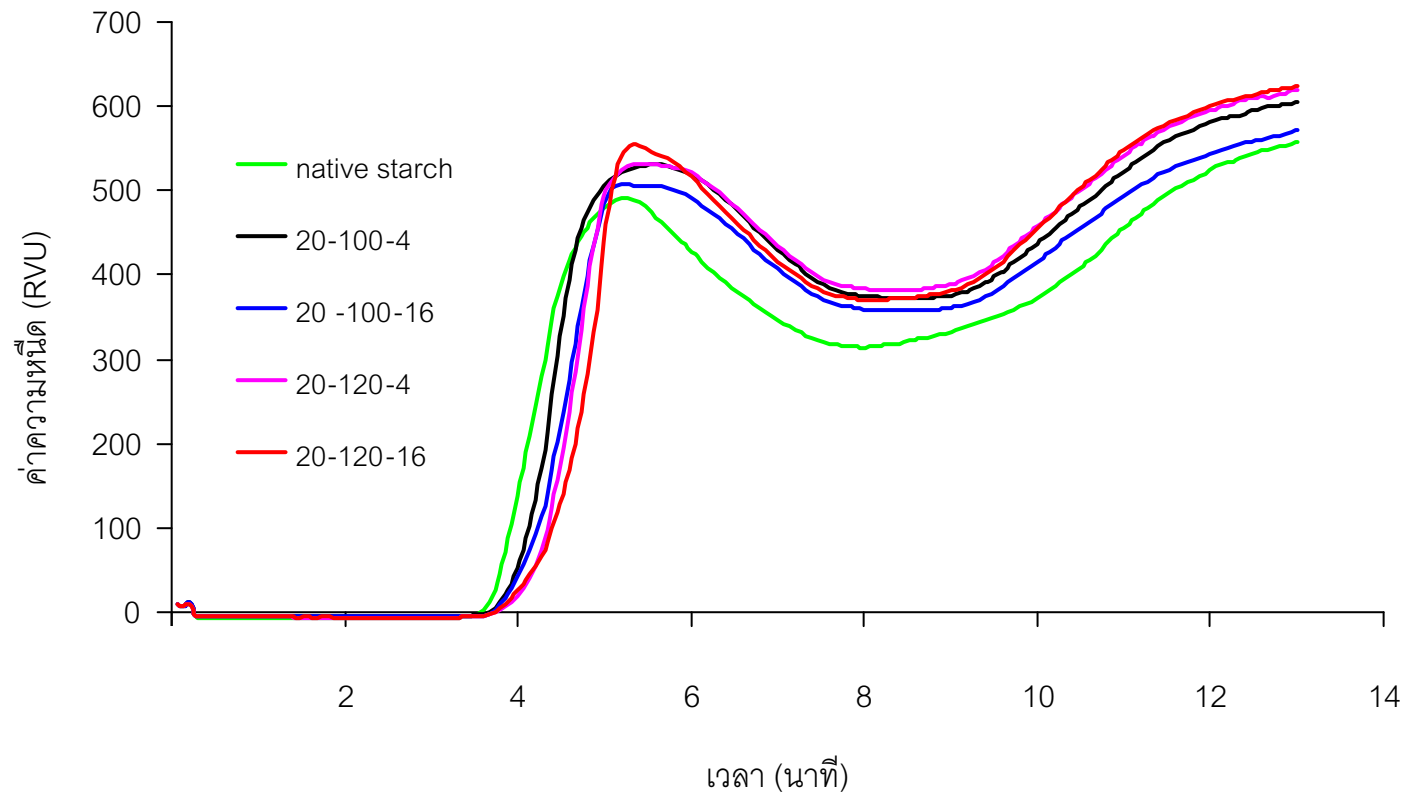
ภาพที่ 23 เวลาที่เกิดความเหน็ดสูงสุดของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความขึ้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (เวลาที่เกิดความเหน็ดสูงสุดของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 5.12 ± 0.12 นาที)



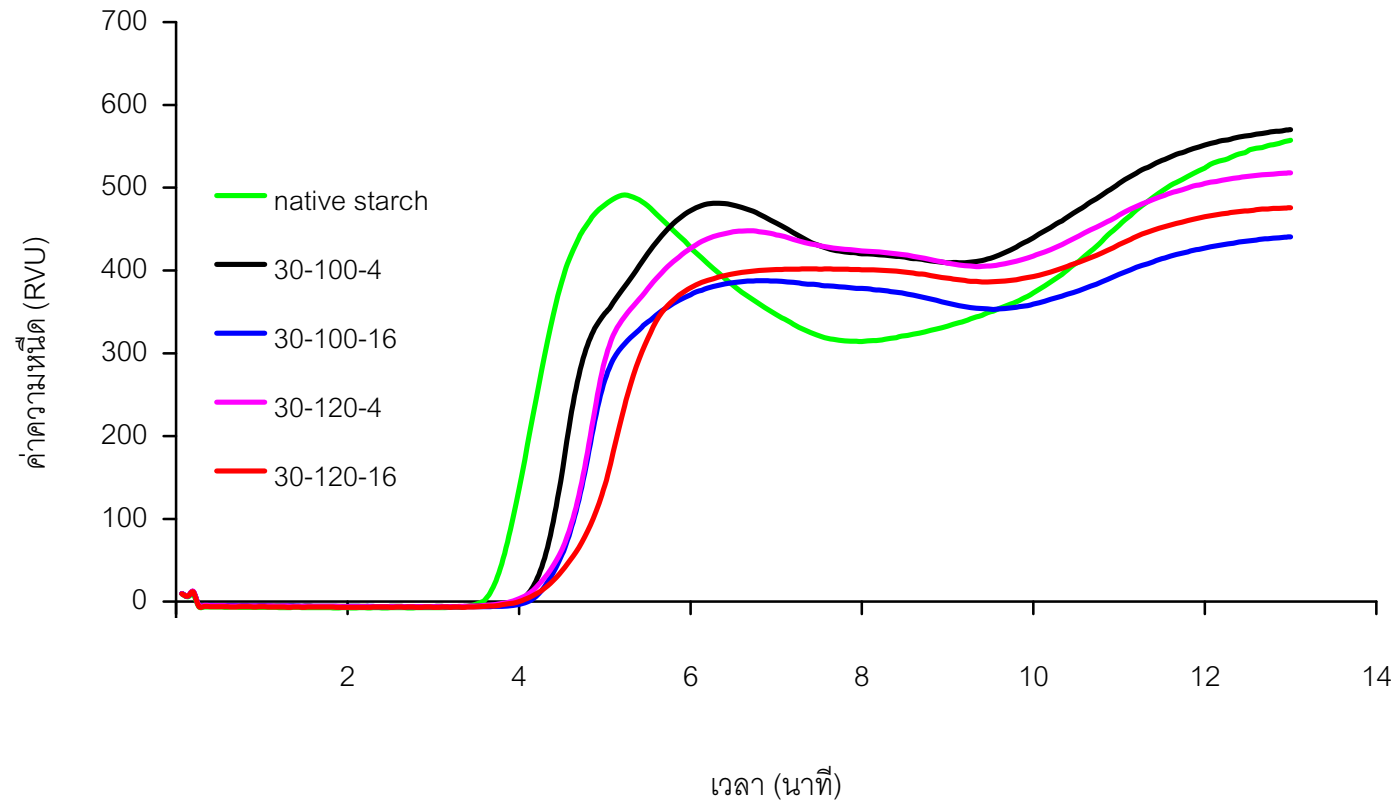
ภาพที่ 31 อุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนของสตาร์ชข้าวเจ้าหลังผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซเลเชียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (อุณหภูมิเริ่มเกิดความร้อนของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 79.15 ± 0.00 องศาเซเลเชียส)



ภาพที่ 32 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง



ภาพที่ 33 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง



ภาพที่ 34 กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความเข้มข้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง

4.6 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้า

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_O) อุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุด (peak temperature, T_P) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_C) ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_C - T_O$) และพลังงานเอนทาลปี (gelatinization enthalpy, ΔH) ต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของ สตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ได้แสดงไว้ในภาพที่ 35 36 และ 37 และตารางที่ 2

จากภาพที่ 35 36 และ 37 แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธี HMT จะมีผลทำให้เกิดการแยกฟีดเป็น 2 ฟีด ในสภาวะที่มีความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ในทุกระดับอุณหภูมิและระยะเวลาของการดัดแปร (อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการดัดแปร 4 และ 16 ชั่วโมง) ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Donovan และคณะ (1983); Lim และคณะ (2001) ที่พบการแยกของฟีดเป็น 2 ฟีดเช่นเดียวกันในการศึกษาผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าลิ้มฝรั่งและข้าวโพดด้วยวิธี HMT โดยได้ให้เหตุผลว่าการปรากฏของฟีดแยกเป็น 2 ฟีดดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อาจมีการสร้างผลึกชนิดใหม่หรือมีการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ในขณะที่สตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรและดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 ที่ทุกระดับอุณหภูมิและระยะเวลาของการดัดแปรปรากฏฟีดเพียง 1 ฟีด แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT ในระดับความชื้นต่ำๆ อาจไม่ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อลักษณะผลึกหรือโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชมากนัก

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติในตารางผนวกที่ ค-12 ถึง ค-17 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้น อุณหภูมิและระยะเวลาในการดัดแปรมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนในการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าในทุกค่า ซึ่งได้แก่ T_O , T_{P1} , T_{P2} , T_C , ($T_C - T_O$) และ ΔH กล่าวคือ ปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้นกับอุณหภูมิมิมีผลต่อค่าอุณหภูมิและพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลิตีในเซชันทุกค่า ปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้นกับเวลาและอุณหภูมิกับเวลามีผลต่ออุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันทุกค่า และปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้น อุณหภูมิและเวลามีผลต่อ T_O , T_{P1} และ ($T_C - T_O$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งจากผลการทดลองในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าในสภาวะความชื้นร้อยละ 10 ที่ระดับอุณหภูมิและระยะเวลาของการดัดแปรแตกต่างกันไม่ทำให้ค่า T_O , T_P , T_C , ($T_C - T_O$) และ

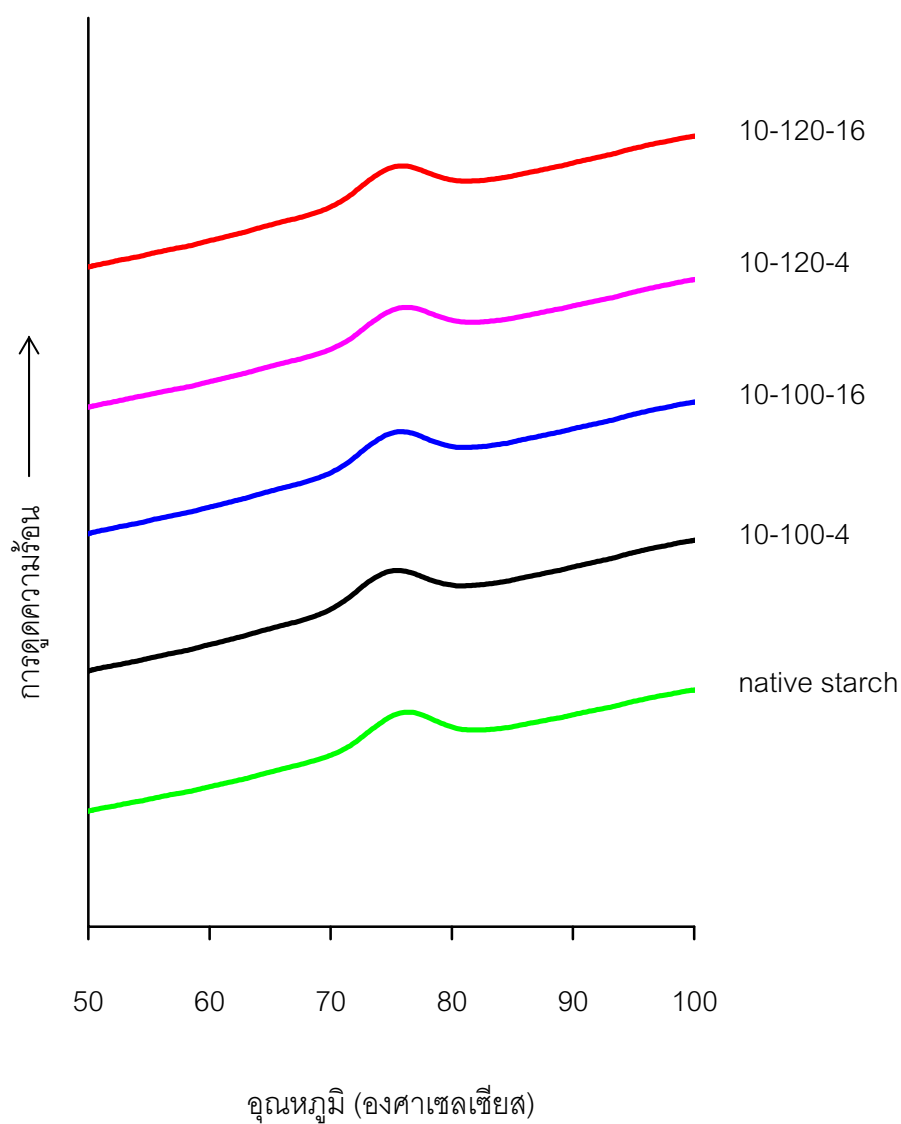
ΔH มีความแตกต่างกัน รวมทั้งไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ยกเว้นค่า ΔH ที่มีแนวโน้มลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ขณะการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 และ 30 ในทุกระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปร T_O , T_{P1} , T_{P2} , T_C และ $(T_C - T_O)$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร ยกเว้นการดัดแปรที่สภาวะ 20-100-4 ที่ค่า T_{P1} ไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การเพิ่มระดับของสภาวะการดัดแปร (ความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลา) มีผลทำให้ T_O , T_{P1} และ $(T_C - T_O)$ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ขณะที่ T_{P2} และ T_C จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าในสภาวะสูงๆ จะส่งผลทำให้ค่า ΔH ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรและดัดแปรในระดับที่ต่ำกว่า

Hoover และ Vasanathan (1994) ได้ศึกษาการดัดแปรสตาร์ชข้าวโพด (ข้าวโพดธรรมชาติ ข้าวโพดอะไมโลสสูงและข้าวโพดข้าวเหนียว) ด้วยการให้ความร้อนขึ้น พบว่า T_O , T_P และ T_C ที่เพิ่มขึ้นไม่เพียงแต่เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงความคงตัวภายในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชเท่านั้น แต่ยังมีปัจจัยสำคัญที่เกิดจากการเกิดพันธะระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลสและอะไมโลสกับ ไชมันเป็นหลักโดยไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดพันธะระหว่างสายอะไมโลเพคติน ซึ่งการเกิดพันธะดังกล่าวจะไปขัดขวางการเคลื่อนที่ในส่วนอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ช ดังนั้นจึงต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อจะทำลายพันธะในส่วนอสัณฐานที่จะทำให้เกิดการจับกับโมเลกุลน้ำและเกิดการพองตัว จนกระทั่งทำลายโครงสร้างในส่วนผลึกต่อไป

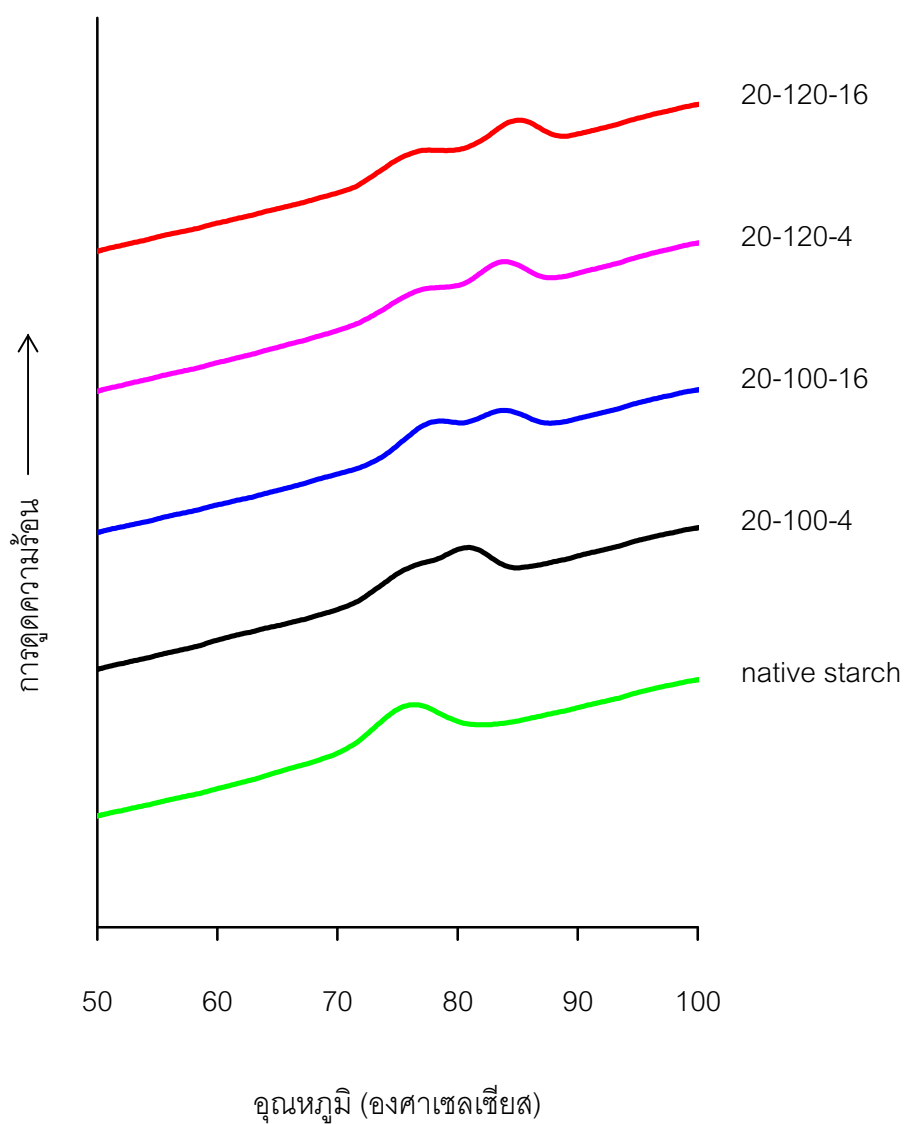
การเกิดเจลลิตีในเซชันเกี่ยวข้องกับการคลายตัวและการหลอมเหลวของพันธะภายนอก (external chain) ของอะไมโลเพคตินซึ่งอยู่รวมกันในลักษณะสายเกลียวคู่ภายในกลุ่ม (cluster) ซึ่งการที่ส่วนผลึกและสายเกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินจะเกิดการหลอมเหลวในระหว่างการเกิดเจลลิตีในเซชันนั้นจะเกี่ยวข้องโดยเริ่มต้นจากสตาร์ชมีการจับกับน้ำและเกิดการพองตัวของส่วนอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ชซึ่งจะส่งผลให้เกิดการยืดตัวและทำลายโครงสร้างส่วนผลึกตามมา (Hoover และ Manuel, 1996a) ดังนั้นการที่ T_O , T_P (T_{P1} และ T_{P2}) และ T_C มีค่าเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธี HMT น่าจะเกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงความคงตัวภายในโครงสร้างส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชระหว่างการให้ความร้อนขึ้นและการเกิดพันธะระหว่างอะไมโลสกับ อะไมโลสและอะไมโลสกับ ไชมันที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของส่วนอสัณฐานภายในเม็ดสตาร์ช ทำให้ต้องการอุณหภูมิที่สูงขึ้นเพื่อทำลายพันธะในส่วนอสัณฐานดังกล่าวซึ่งจะส่งผลต่อระดับอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันของสตาร์ชต่อไป

ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น หรือช่วงกว้างของพีคในการเกิดเจลลาติไนเซชัน ($T_c - T_o$) ที่แตกต่างกัน จะแสดงถึงระดับการไม่เป็นชนิดเดียวกัน (heterogenous) ของลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ช (Gunaratne และ Hoover, 2002) ซึ่งจากผลการทดลองที่พบว่า ช่วงกว้างของพีคมีค่าเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธี HMT แสดงว่า HMT มีผลเปลี่ยนแปลงและทำให้โครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชไม่เป็นชนิดเดียวกันมากขึ้น (Takaya และคณะ, 2000) Hoover และ Manuel (1996b) ซึ่งศึกษาผลของ HMT ใน สตาร์ชข้าวโพด ให้เหตุผลว่าการเกิดพันธะระหว่างอะไมโลสกับอะไมโลสและอะไมโลสกับไขมันในระหว่าง HMT นั้นอาจทำให้เกิดผลึกที่มีความแตกต่างกันขึ้นซึ่งจะมีความคงตัวที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วย

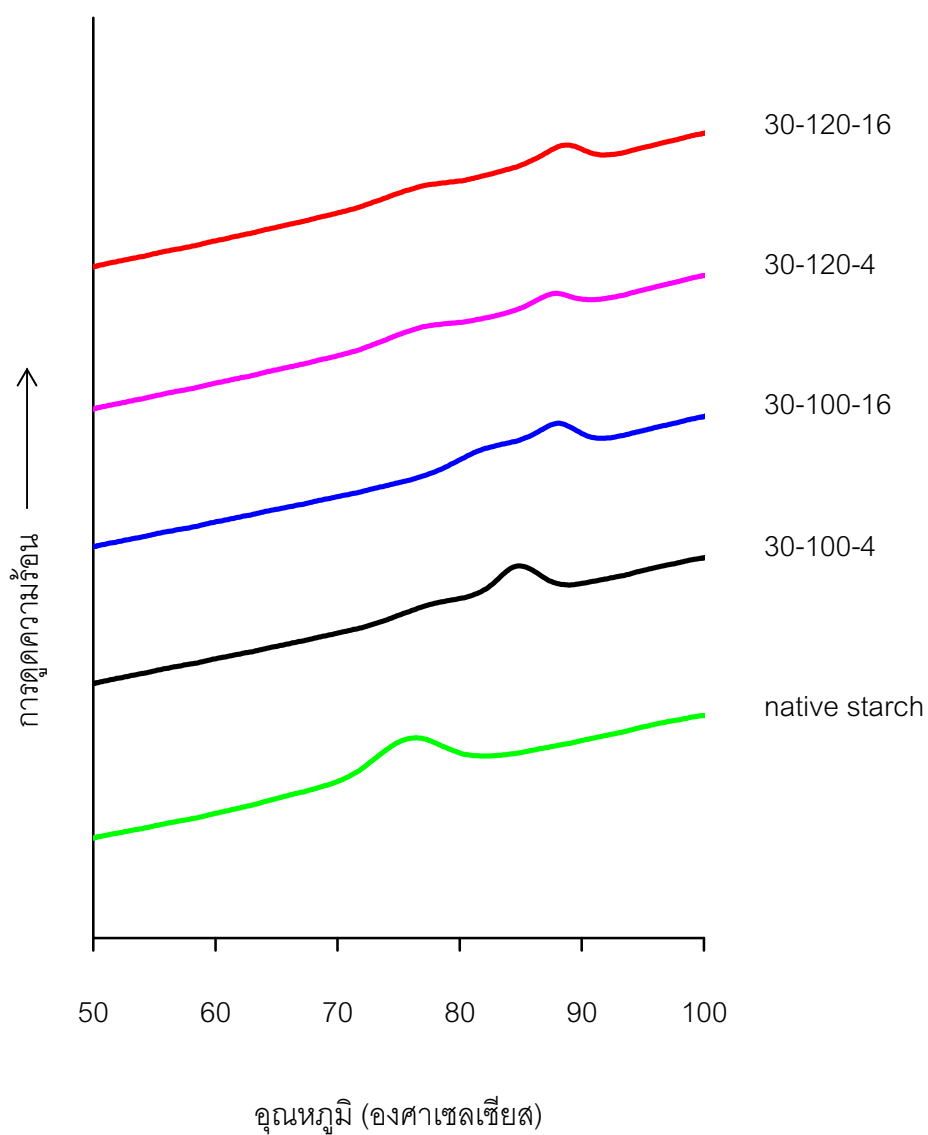
ค่า ΔH คือค่าที่บ่งบอกถึงจำนวนของสายเกลียวคู่ (double helices) ที่เกิดการคลายตัวและหลอมละลายในขณะเกิดเจลลาติไนซ์ จากผลการทดลองที่พบว่าค่า ΔH ลดลงภายหลังดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธี HMT บ่งชี้ว่าสตาร์ช HMT มีความต้องการในการใช้ (ดูด) พลังงานเพื่อทำให้เกิดการคลายตัวและหลอมละลายของพันธะที่เหลือในระหว่างการเกิดเจลลาติไนเซชันลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พันธะของสายเกลียวคู่ภายในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชมีการถูกทำลายลงบางส่วนในระหว่างการให้ความร้อนขึ้น (Gunaratne และ Hoover, 2002)



ภาพที่ 35 รูปแบบการเกิดเจลในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง



ภาพที่ 36 รูปแบบการเกิดเจลในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง



ภาพที่ 37 รูปแบบการเกิดเจลในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 ค่าการเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	อุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชัน (องศาเซลเซียส)					เอนทาลปี (ΔH ; J/g)
	T_o	T_{p1}	T_{p2}	T_c	$(T_c - T_o)$	
native starch	70.41 ± 0.08^e	75.77 ± 0.01^e	-	81.00 ± 0.14^g	10.59 ± 0.06^g	11.37 ± 0.15^{cd}
10-100-4	70.26 ± 0.01^e	75.41 ± 0.04^e	-	80.74 ± 0.03^g	10.48 ± 0.01^g	10.55 ± 0.12^e
10-100-16	70.15 ± 0.26^e	75.48 ± 0.42^e	-	80.49 ± 0.17^g	10.35 ± 0.10^g	10.81 ± 0.25^{de}
10-120-4	70.19 ± 0.23^e	75.32 ± 0.42^e	-	80.60 ± 0.37^g	10.42 ± 0.13^g	10.31 ± 0.03^{ef}
10-120-16	71.12 ± 0.04^e	75.40 ± 0.08^e	-	80.56 ± 0.01^g	10.45 ± 0.05^g	10.60 ± 0.08^e
20-100-4	71.60 ± 0.06^d	75.52 ± 0.02^e	80.15 ± 0.54^e	84.44 ± 0.04^f	12.84 ± 0.02^f	12.03 ± 0.14^b
20-100-16	72.96 ± 0.15^b	77.85 ± 0.10^b	82.86 ± 0.66^d	87.07 ± 0.45^e	14.11 ± 0.30^e	13.06 ± 0.09^a
20-120-4	71.81 ± 0.18^d	76.67 ± 0.23^d	83.41 ± 0.18^d	87.09 ± 0.48^e	15.29 ± 0.30^d	10.95 ± 0.53^{cde}
20-120-16	71.62 ± 0.34^d	76.75 ± 0.17^d	85.00 ± 0.17^c	88.56 ± 0.08^d	16.93 ± 0.42^c	11.56 ± 0.17^{cb}
30-100-4	72.79 ± 0.23^b	77.54 ± 0.33^{bc}	84.53 ± 0.01^c	87.97 ± 0.04^d	15.19 ± 0.26^d	9.79 ± 0.04^f
30-100-16	78.10 ± 0.25^a	82.19 ± 0.11^a	88.07 ± 0.27^{ab}	91.31 ± 0.46^b	13.22 ± 0.21^f	9.69 ± 0.42^f
30-120-4	71.94 ± 0.00^{cd}	77.13 ± 0.00^{cd}	87.30 ± 0.35^b	90.00 ± 0.37^c	18.05 ± 0.38^b	7.26 ± 0.08^g
30-120-16	72.26 ± 0.07^c	77.02 ± 0.41^d	89.13 ± 0.83^a	92.07 ± 0.65^a	19.81 ± 0.58^a	7.57 ± 0.71^g

a,...,g = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าในตาราง คือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

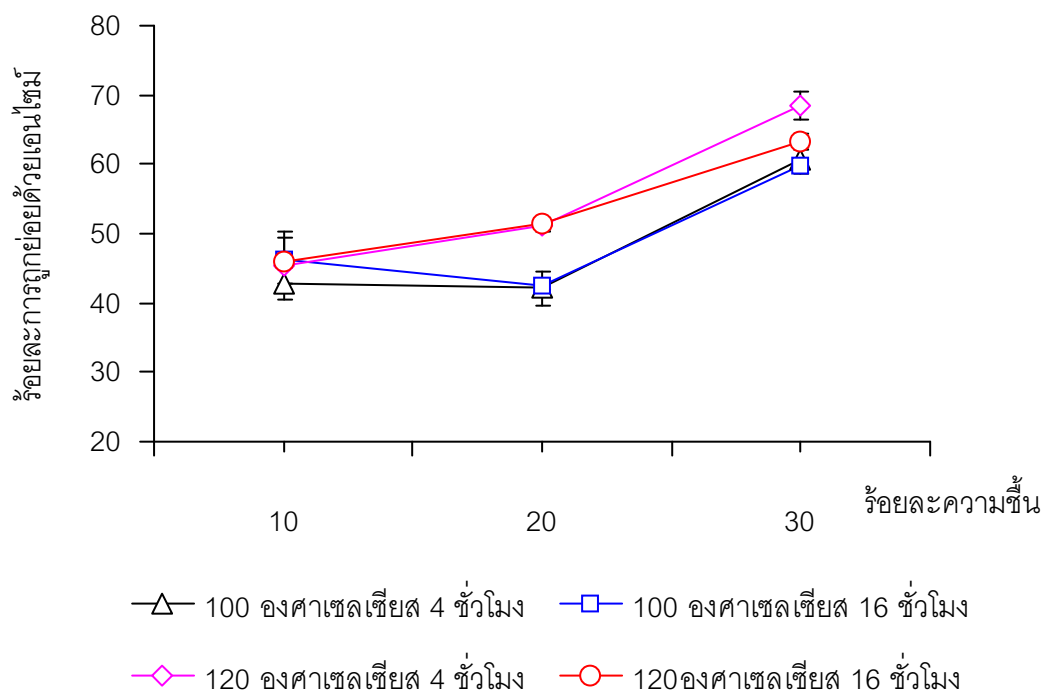
4.7 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นต่อความคงตัวต่อการย่อยด้วย เอนไซม์ของสตาร์ชข้าวเจ้า

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการถูกย่อยของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น (HMT) ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสนาน 6 ชั่วโมง ได้แสดงไว้ในภาพที่ 38 และตารางผนวกที่ ข-5 และภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 20 และ 30 แสดงไว้ในภาพที่ 39 40 41 และ 42 ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติในตารางผนวกที่ ค-18 พบว่า อิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยระดับของความชื้นและอุณหภูมิในการดัดแปรที่เพิ่มขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้สตาร์ชข้าวเจ้ามีความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ได้มากขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือมีความคงตัวต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งจากจากภาพที่ 38 และตารางผนวกที่ ข-5 แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 (ในทุกะดับของอุณหภูมิและเวลาการดัดแปร) และร้อยละ 20 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (สภาวะ 20-100-4 และ 20-100-16) ไม่ทำให้ค่าร้อยละของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แต่เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิในการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 เป็น 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (สภาวะ 20-120-4 และ 20-120-16) สตาร์ชดัดแปรจะมีค่าร้อยละของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มขึ้น และมีค่าเพิ่มขึ้นมากที่สุดในการดัดแปรที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 (ในทุกะดับของอุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปร) ซึ่งสตาร์ชดัดแปรใน 2 สภาวะหลังนี้จะมีความคงตัวของการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร

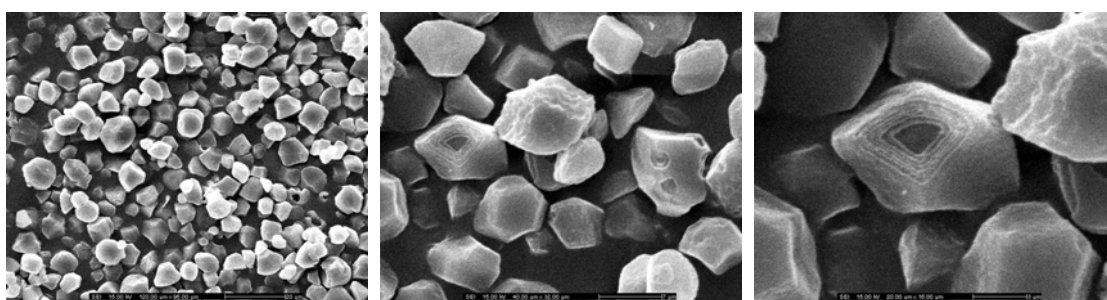
การที่สตาร์ชดัดแปรด้วยวิธี HMT ในสภาวะสูงๆ มีความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มมากขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือ มีความคงตัวต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ลดลง เป็นผลมาจากการที่พันธะของสายเกลียวคู่ภายในโครงสร้างส่วนผลึกที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบในเม็ดสตาร์ชถูกทำลายลง เกิดลักษณะอสัณฐานมากขึ้น ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าจับ (adsorption) และทำการย่อยพันธะได้ง่ายขึ้นและมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการศึกษาการย่อยสตาร์ชดัดแปรด้วยวิธี HMT ด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในสตาร์ชถั่ว (Hoover และ

Manuel, 1996a) ข้าวโพด (Kurakake และคณะ, 1996) ข้าวสาลีและมันฝรั่ง (Kulp และ Lorenz, 1996a) และสตาร์ชจากพืชประเภทหัวและราก (Gunaratne และ Hoover, 2002)



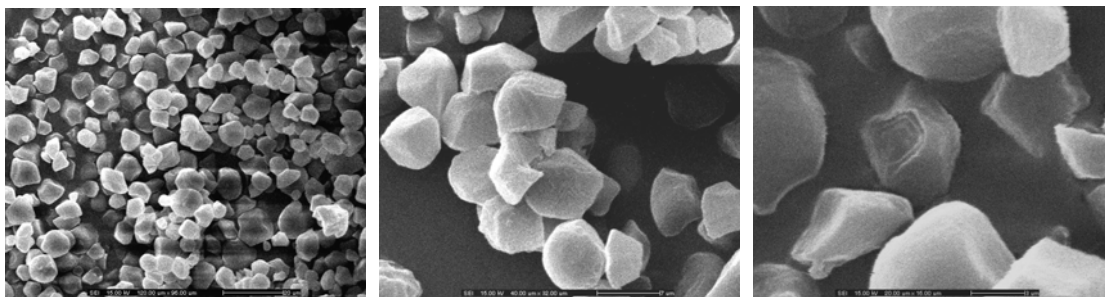
ภาพที่ 38 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 46.34 ± 3.49)

ภาพถ่ายจาก SEM ในภาพที่ 39 40 41 และ 42 แสดงให้เห็นว่าเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส จะพบทั้งแบบที่มีการผุกร่อนภายนอก (exocorrosion) โดยมีลักษณะของการถูกย่อยจากบริเวณผิวของเม็ดสตาร์ชเป็นชั้นๆ เข้าไปภายใน หรือมีการย่อยที่บริเวณเหลี่ยมมุมของเม็ดสตาร์ชทำให้เม็ดสตาร์ชข้าวเจ้ามีลักษณะกลมมนมากขึ้น และแบบที่มีการผุกร่อนภายใน (endocorrosion) โดยการย่อยทำให้เกิดลักษณะช่องลึกลงไปภายในเม็ดสตาร์ชเนื่องจากเอนไซม์บางส่วนจะมีการแทรกตัวผ่านทางรูพรุนบนผิวเม็ดสตาร์ชเข้าไปภายในทำให้รูพรุนและช่องภายในนั้นมีลักษณะกว้างขึ้น (ตัวอย่างเช่น สภาวะ 20-100-4 ในภาพที่ 41) นอกจากนี้ยังพบว่าสตาร์ชในส่วนที่มีการเกิดเจลาติไนเซชันจะมีการถูกย่อยด้วยเอนไซม์มากกว่าส่วนที่ยังคงรูปเป็นเม็ดสตาร์ช

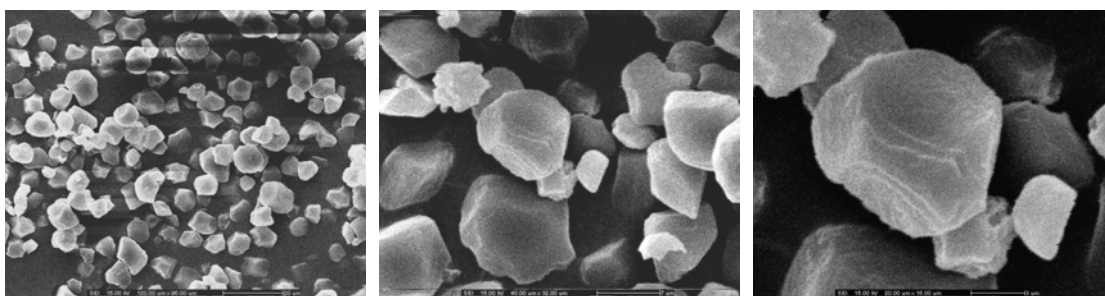


สตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร

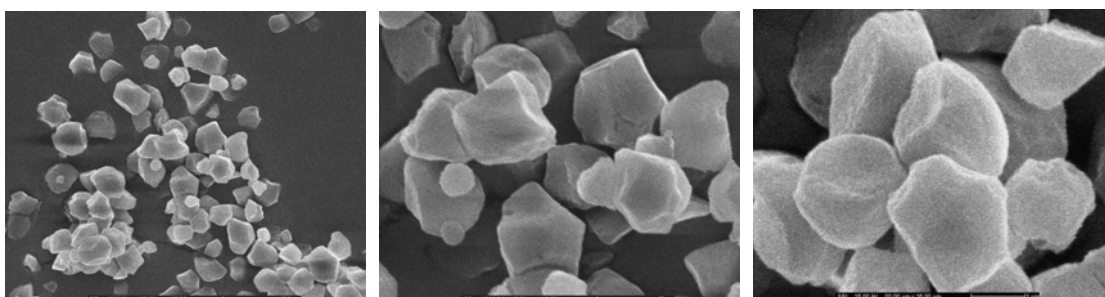
ภาพที่ 39 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 400 1,200 และ 2,300 เท่า ตามลำดับ แสดงลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร (native starch) ภายหลังจากย่อยด้วยเอนไซม์อัลฟาอะไมเลส



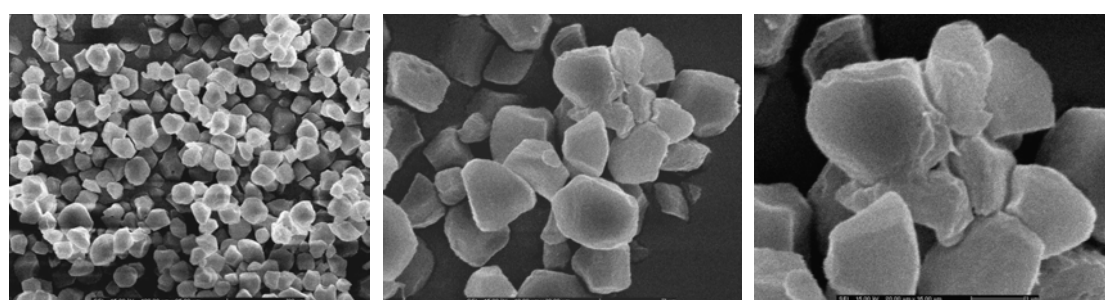
สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

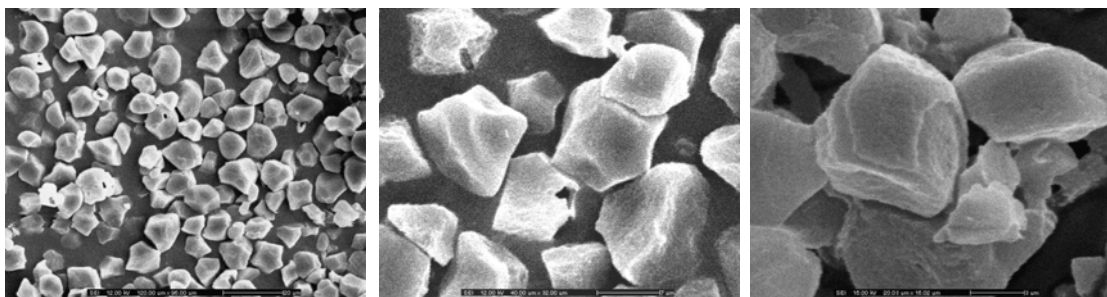


สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

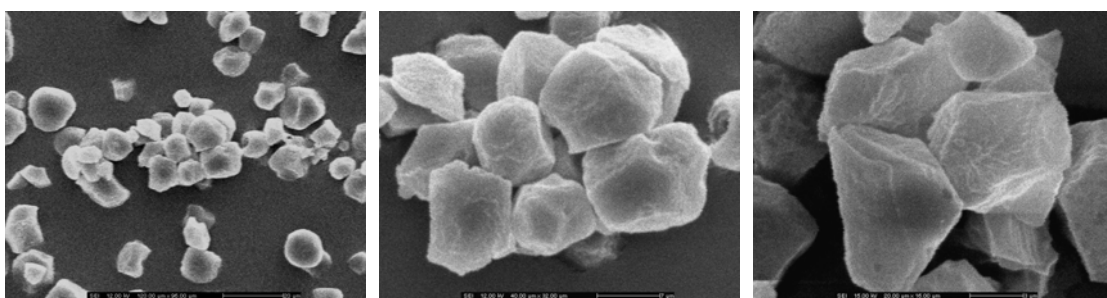


สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

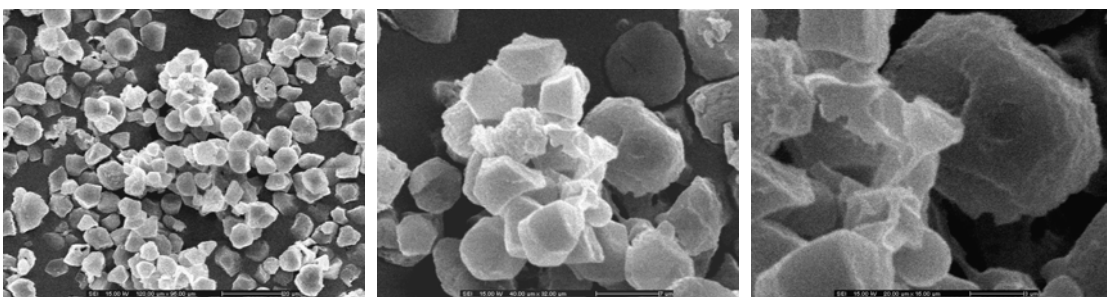
ภาพที่ 40 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 400 1,200 และ 2,300 เท่า ตามลำดับ แสดงลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับความชื้นร้อยละ 10 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการให้ความร้อนนาน 4 และ 16 ชั่วโมง ภายหลั้ย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส



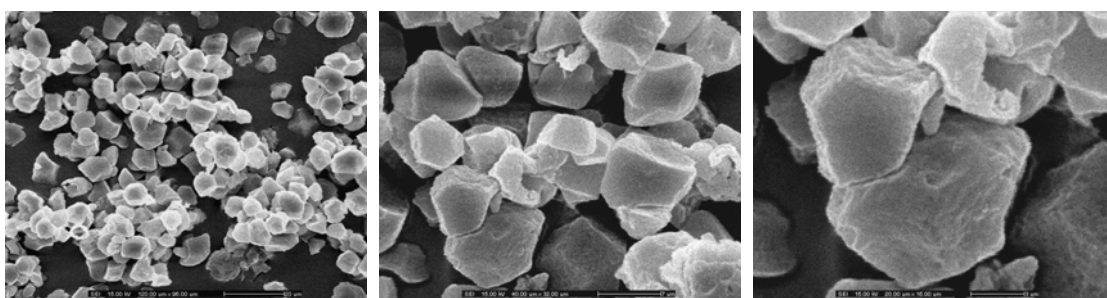
สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

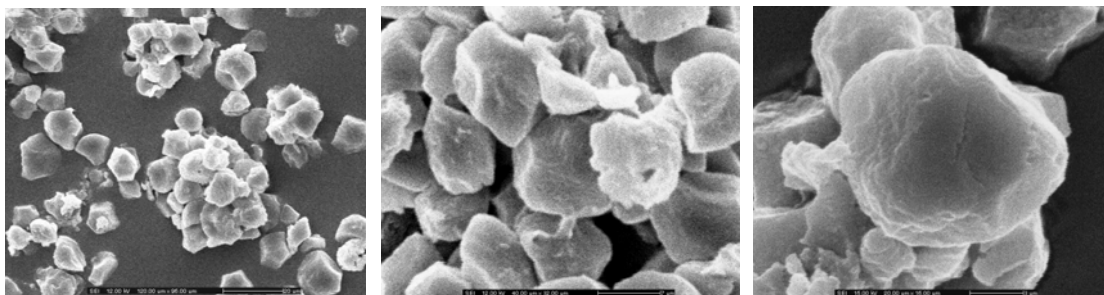


สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง

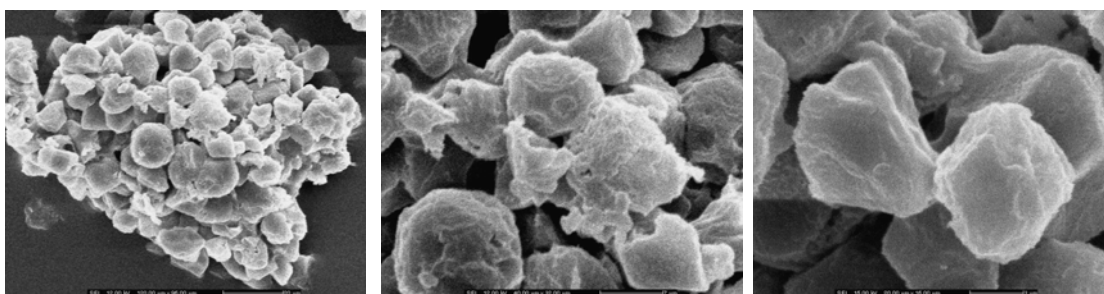


สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

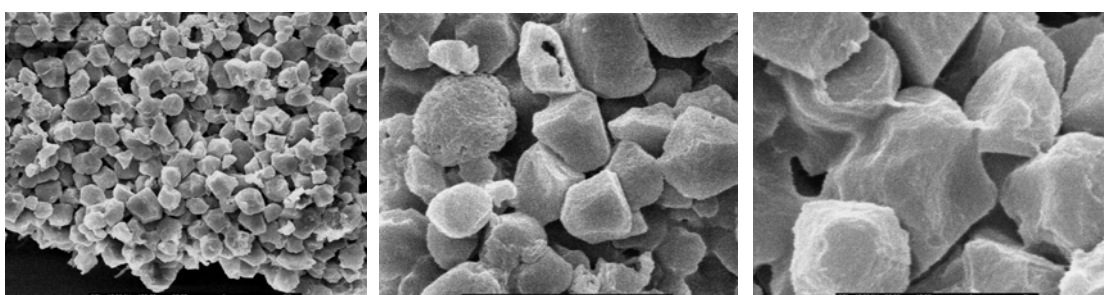
ภาพที่ 41 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 400 1,200 และ 2,300 เท่า ตามลำดับ แสดงลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าหลังดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลาการให้ความร้อนนาน 4 และ 16 ชั่วโมง ภายหลังจากย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส



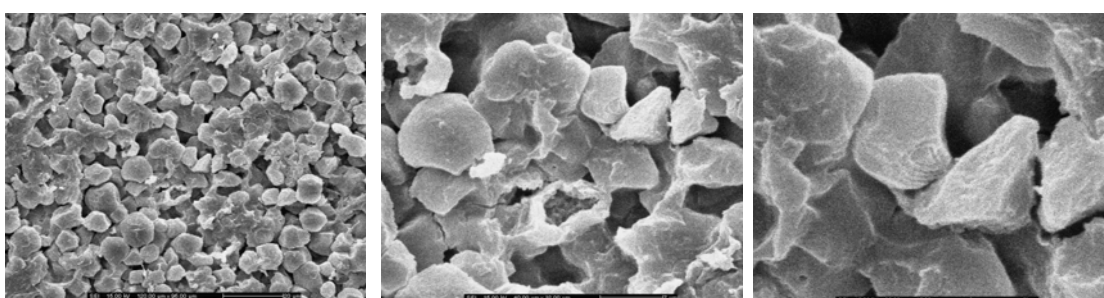
สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง



สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 4 ชั่วโมง



สตาร์ชดัดแปรที่ความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 16 ชั่วโมง

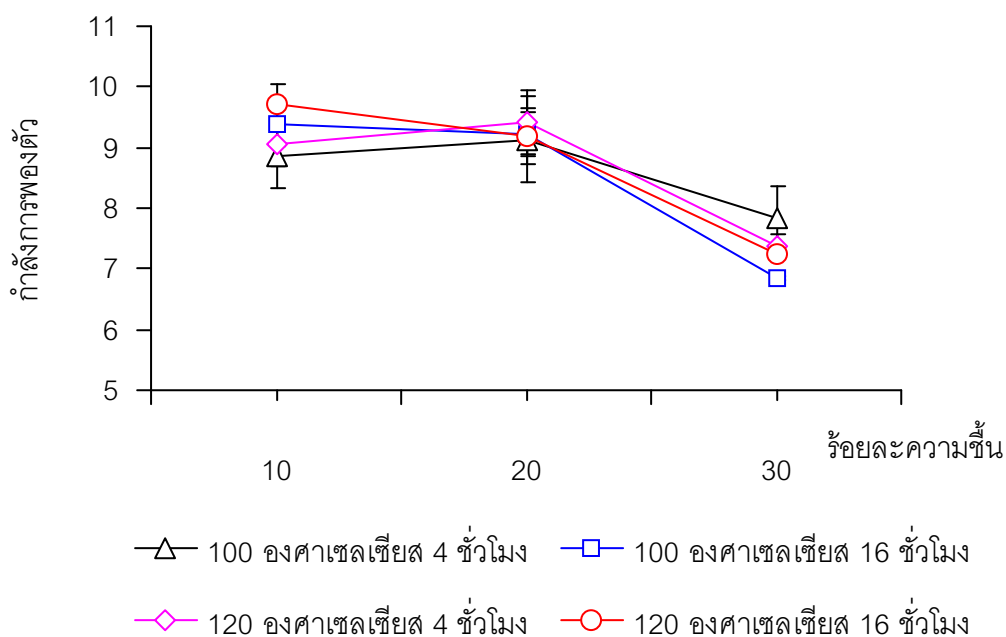
ภาพที่ 42 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 400 1,200 และ 2,300 เท่า ตามลำดับ แสดงลักษณะรูปร่างของเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าหลังดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับความชื้นร้อยละ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และระยะเวลา การให้ความร้อนนาน 4 และ 16 ชั่วโมง ภายหลังจากย้อมด้วยไอโซมัลทาลูโบส

4.8 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นต่อกำลังการพองตัวและการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้า

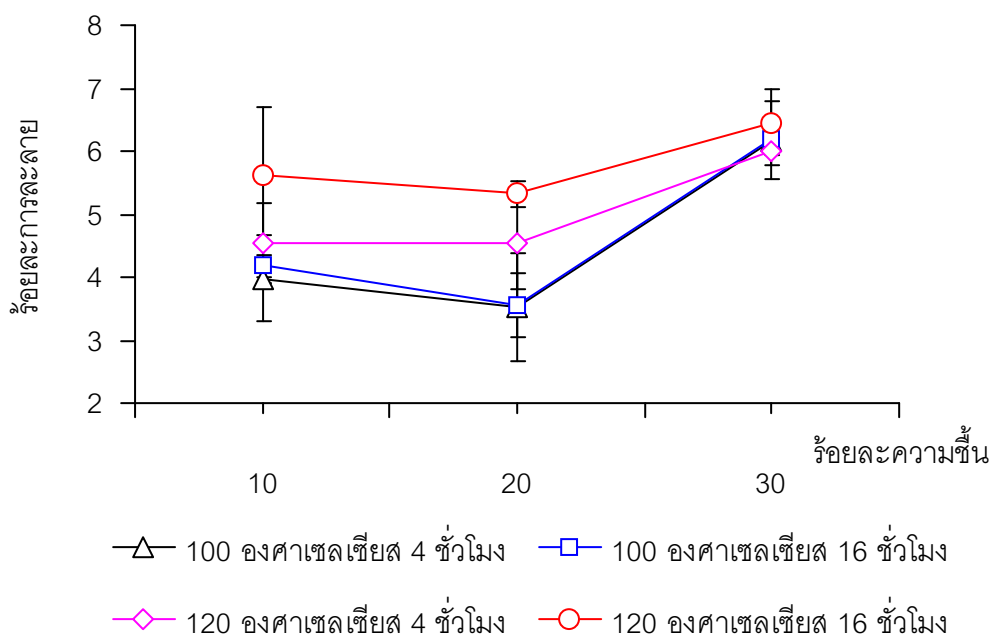
ผลการวัดค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นได้แสดงไว้ในภาพที่ 43 และ 44 ตามลำดับ และตารางผนวกที่ ข-6

จากการพิจารณาถึงผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT ต่อค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ ค-19 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างความขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากภาพที่ 43 และ ตารางผนวกที่ ข-6 จะเห็นได้ว่าค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความขึ้นร้อยละ 10 และ 20 ในทุกระดับอุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปรให้ผลไม่แตกต่างกันและไม่แตกต่างจากสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มระดับความขึ้นเป็นร้อยละ 30 พบว่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชจะมีค่าลดลงในทุกระดับของอุณหภูมิและระยะเวลาการดัดแปร ซึ่งที่ระดับความขึ้นร้อยละ 30 นี้ การเพิ่มช่วงระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้นคือ จาก 4 เป็น 16 ชั่วโมงมีผลทำให้กำลังการพองตัวของสตาร์ชดัดแปรมีค่าลดลง (สภาวะ 30-100-16 และ 30-120-16 มีค่ากำลังการพองตัวต่ำกว่าสภาวะ 30-100-4 และ 30-120-4 ตามลำดับ) จากผลการทดลองดังกล่าวนี้ แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT ในสภาวะที่รุนแรงอาจทำให้เกิดการทำลายพันธะและแรงบางส่วนที่ยึดสายเกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินซึ่งอยู่ในส่วนผลึกของเม็ดสตาร์ชลง (Cooke และ Gidley, 1992) รวมทั้งอาจมีการจัดเรียงตัวใหม่ของของโครงสร้างผลึกเดิมทำให้เกิดการสร้างพันธะใหม่ระหว่างโมเลกุลสตาร์ชเพิ่มขึ้น เช่น การเกิดพันธะระหว่างสายอะไมโลสและ/หรืออะไมโลสกับไขมันในระหว่าง HMT ซึ่งจะไปขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ชและเป็นสาเหตุที่ทำให้สตาร์ชมีการพองตัวลดลง (Gunaratne และ Hoover, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละความเป็นผลึกและลักษณะโครงสร้างผลึกของ สตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (ภาพที่ 21 ถึง 24) ที่พบว่าระดับความเป็นผลึกมีค่าลดลงอย่างชัดเจนเมื่อดัดแปรสตาร์ชที่สภาวะความขึ้นร้อยละ 30 แสดงว่าโครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบภายในเม็ดสตาร์ชถูกทำให้แตกสลายลงด้วยความร้อนในระหว่างการทำ HMT นอกจากนี้ยังพบการเกิดลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ V ขึ้น แสดงว่าสายอะไมโลสบางส่วนมีการจับกับไขมันแล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้หมู่ไฮดรอกซิลที่จะจับกับน้ำแล้วเกิดการพองตัวได้มีจำนวนลดลง

เมื่อพิจารณาถึงผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดัดแปรสสารด้วยวิธี HMT ต่อค่าร้อยละการละลายของสสารข้าวเจ้าดัดแปรจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ ค-20 พบว่าปัจจัยของระดับความชื้นและอุณหภูมิมีผลต่อค่าการละลายของสสารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากภาพที่ 44 แสดงให้เห็นว่า สสาร HMT ที่ผ่านการดัดแปรด้วยความชื้นร้อยละ 30 จะมีค่าร้อยละการละลายสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ สสารที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรที่ระดับความชื้นต่ำกว่า คือที่ร้อยละ 10 และ 20 ซึ่งการเพิ่มระดับของอุณหภูมิในการดัดแปรจาก 100 เป็น 120 องศาเซลเซียสมีแนวโน้มทำให้ค่าร้อยละการละลายมีค่าเพิ่มขึ้นในทุกระดับของความชื้นและระยะเวลาในการดัดแปร การที่สสาร HMT มีค่าร้อยละการละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระดับความชื้นและอุณหภูมิในการดัดแปรพบเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Kulp และ Lorenz (1981a) ในสสารข้าวสาลี และ Adebawale และคณะ (2005b) ใน สสารข้าวฟ่าง ซึ่งได้ให้เหตุผลว่ามีสาเหตุเนื่องมาจากเกิดการแตกสลายของโมเลกุลสสารบางส่วนภายในเม็ดสสารในระหว่างการทำ HMT ทำให้โมเลกุลของสสารมีโอกาสหลุด (leaching) ออกมาภายนอกเม็ดสสารได้มากขึ้น และอีกสาเหตุหนึ่งอาจเกิดจากการที่โครงสร้างบางส่วนมีการเกิดเจลในเซชันโดยเฉพาะบริเวณผิวภายนอกของเม็ดสสาร ทำให้บริเวณดังกล่าวมีพื้นที่ที่จะจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้นและสามารถดูดน้ำกลับ (rehydrate) ได้ง่ายขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของสสารมีโอกาสหลุดออกมามากขึ้นและเกิดการละลายเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 40 ค่าค่าการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าค่าการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 8.84 ± 0.51)



ภาพที่ 41 ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความชื้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 4.14 ± 0.07)

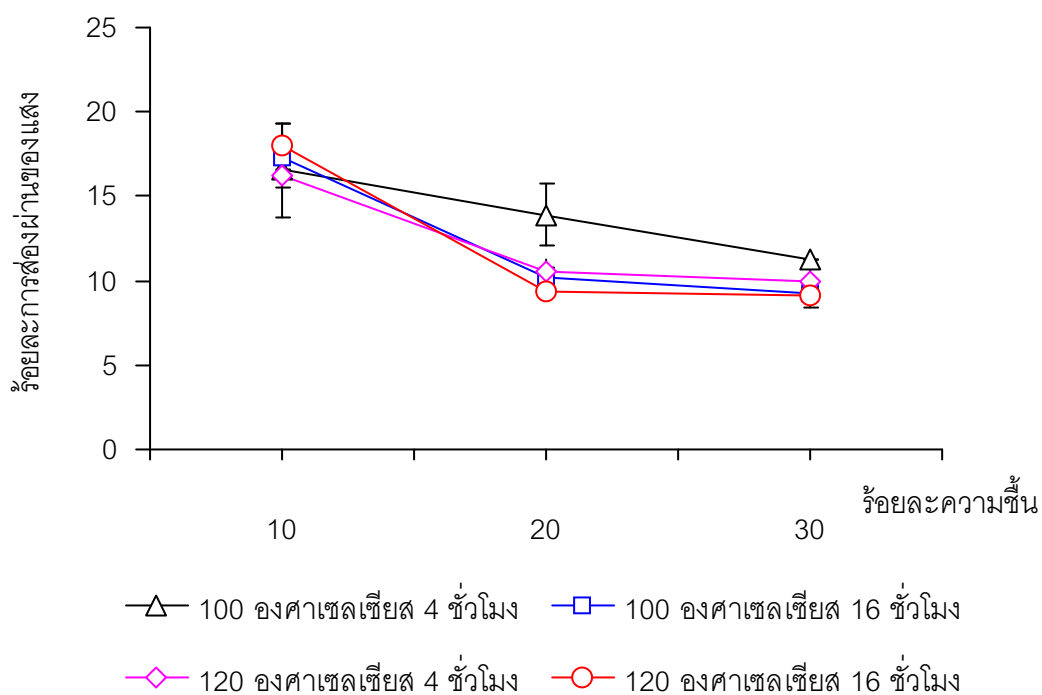
4.9 ผลของการดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นต่อความใสของสตาร์ชสุกข้าวเจ้า

ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (% light transmittance) เป็นค่าที่ถูกนำมาใช้วัดความใส (clarity) ของสตาร์ชสุก ผลการวิเคราะห์ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงในสตาร์ชสุก (paste) ข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้นได้แสดงไว้ในภาพที่ 45 และตารางผนวกที่ ข-7 โดยตัวอย่างสตาร์ชที่มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงสูง แสดงว่าสตาร์ชสุกชนิดนั้นมีความใสมาก และในทางตรงกันข้ามถ้าตัวอย่างสตาร์ชมีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงต่ำ แสดงว่าสตาร์ชสุกชนิดนั้นจะมีความใสน้อยหรือมีความขุ่นเกิดขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT ต่อค่าความใสของสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรสุกจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติในตารางผนวกที่ ค-21 พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างระดับความขึ้นกับเวลา มีผลต่อค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงในสตาร์ชดัดแปรสุกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากภาพที่ 45 และตารางผนวกที่ ข-7 แสดงให้เห็นว่าสตาร์ชสุกข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับความขึ้นต่ำๆ คือร้อยละ 10 ในทุกระดับอุณหภูมิและระยะเวลาของการดัดแปรจะมีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงไม่แตกต่างกันและมีค่าอยู่ในระดับสูงที่สุดหรือมีความใสมากที่สุด ในขณะที่เมื่อเพิ่มระดับความขึ้นในการดัดแปรเป็นร้อยละ 20 (ยกเว้น 20-100-4 ที่มีค่าไม่แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร) และ 30 พบว่าค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชทั้งสองไม่แตกต่างกัน แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรที่ระดับความขึ้นร้อยละ 10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งการดัดแปรที่ระดับความขึ้นร้อยละ 20 และ 30 นี้เมื่อมีการเพิ่มช่วงระยะเวลาในการให้ความร้อนที่นานขึ้น คือจาก 4 เป็น 16 ชั่วโมงจะมีแนวโน้มทำให้ร้อยละการส่องผ่านของแสงในสตาร์ชดัดแปรสุกมีค่าลดลง

สาเหตุที่สตาร์ชสุกข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 20 และ 30 มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงลดลง เนื่องมาจากการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT ที่ระดับความขึ้นร้อยละ 20 และ 30 มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่วนผลึกและมีการเกิดพันธะระหว่างสายอะไมโลสกับอะไมโลสและอะไมโลสกับไขมันภายในเม็ดสตาร์ช (จากผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนด้วยเครื่อง DSC ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 2 ที่พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันสูงขึ้นภายหลังการดัดแปร) ซึ่งจะมีผลทำให้โครงสร้างเม็ดสตาร์ชมีความคงตัวต่อความร้อนและแรงเฉือนในระหว่างการหุงต้มมากขึ้น (จากผลการวิเคราะห์พฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชด้วยเครื่อง RVA ซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 27 และตารางผนวกที่ ข-4

ที่พบว่าเบรกดาวนั้นมีค่าลดลงภายหลังการดัดแปร) และมีการแตกสลายของเม็ดสตาร์ชเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กได้ลดลง หรืออีกนัยหนึ่งคือ ยังสามารถคงชิ้นส่วนของเม็ดสตาร์ชขนาดใหญ่เอาไว้ได้ ทำให้แสงสามารถผ่านทะลุผ่านสตาร์ชเพลทได้น้อยลง เพราะโมเลกุลของสตาร์ชยังคงจับกันด้วยพันธะที่แข็งแรงและมีการกระจายตัวในสารแขวนลอยได้ต่ำ ในขณะที่สตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10 มีการแตกสลายของโครงสร้างเม็ดสตาร์ชเป็นชิ้นส่วนขนาดเล็กได้มากกว่าและมีการกระจายตัวของอนุภาคสตาร์ชในสารแขวนลอยได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 20 และ 30 จึงทำให้มีค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงมากกว่า



ภาพที่ 42 ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงในสตาร์ชข้าวเจ้าสุกที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่สภาวะความเข้มข้นร้อยละ 10 20 และ 30 อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส นาน 4 และ 16 ชั่วโมง (ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงในสตาร์ชข้าวเจ้าสุกที่ไม่ผ่านการดัดแปร = 16.11 ± 0.00)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น (HMT) มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องและมีความสำคัญต่อผลของการดัดแปร ได้แก่ ระดับความชื้นของสตาร์ช อุณหภูมิ และระยะเวลาในการให้ความร้อน ซึ่งผลของการตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลทำให้เม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าเกิดการเข้าเกาะกลุ่มติดกันและเกิดการหลอมเชื่อมติดกันที่บริเวณผิวหน้าของเม็ดสตาร์ช การเพิ่มระดับของสภาวะการดัดแปร (ความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลา) มีแนวโน้มทำให้เม็ดสตาร์ชเข้าเกาะกลุ่มกันอย่างแน่นหนามากขึ้นและหลอมเชื่อมกันเป็นก้อนแข็งขนาดใหญ่ขึ้น รวมถึงพบการเกิดเจลาตินในเซชันในโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชบางส่วน

5.2 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลทำให้สีของสตาร์ชข้าวเจ้ามีการเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ค่าความสว่าง (L^*) ของสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการให้สภาวะการดัดแปรที่รุนแรงขึ้น โดยอิทธิพลของปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้นกับเวลาและอุณหภูมิกับเวลามีผลต่อค่าความสว่าง ปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิกับเวลามีอิทธิพลต่อค่าความเป็นสีแดงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ปัจจัยหลัก คือ ระดับความชื้น อุณหภูมิและระยะเวลาในการดัดแปรมีผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.3 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลในการเพิ่มปริมาณอะไมโลสในสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณอะไมโลส ได้แก่ ระดับของอุณหภูมิและระยะเวลาในการดัดแปร

5.4 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลทำให้รูปแบบของลักษณะโครงสร้างผลึกของสตาร์ชข้าวเจ้ามีการเปลี่ยนแปลงจากแบบ A ซึ่งพบในสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและมีพีคหลักที่สำคัญ 3 พีค คือ ที่ตำแหน่ง 15 (1 พีค) 17 และ 18 (2 พีคเชื่อมกัน) และ 23 (1 พีค) °2 θ

ไปเป็นแบบ A+ V ซึ่งมีพีคใหม่ปรากฏเพิ่มขึ้นอีก 1 พีค ที่ตำแหน่ง $20^{\circ}2\theta$ เมื่อเทียบกับรูปแบบของลักษณะโครงสร้างผลึกในสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปร แสดงให้เห็นว่าการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลทำให้ สตาร์ชข้าวเจ้าเกิดโครงสร้างของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะไมโลสกับไซมันนิน และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้สภาวะการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่รุนแรงขึ้นมีแนวโน้มทำให้ระดับความเป็นผลึกของสตาร์ชดัดแปรมีค่าลดลง

5.5 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลทำให้พฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ อุณหภูมิเริ่มเกิดความหนืด (pasting temperature) เวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) และความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็น (trough) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ผลต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นหรือเบรกดาวน์ (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) และผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็นหรือเซตแบค (setback) มีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สภาวะการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่รุนแรงขึ้น โดยปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้น อุณหภูมิและเวลา มีผลต่อพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.6 การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธี HMT มีผลทำให้เกิดการแยกของพีคในกระบวนการเกิดเจลาคติในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าซึ่งวิเคราะห์ Differential Scanning Calorimeter (DSC) เป็น 2 พีค (biphasic) แสดงให้เห็นว่า อาจมีการสร้างผลึกชนิดใหม่หรือมีการจัดเรียงตัวใหม่ของโครงสร้างผลึกภายในเม็ดสตาร์ชเกิดขึ้นในระหว่างขั้นตอนการดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น ทำให้โครงสร้างดังกล่าวมีการถูกทำลายด้วยความร้อนที่อุณหภูมิแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่า HMT มีผลทำให้อุณหภูมิของการเกิดเจลาคติในเซชันในสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปร ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้น (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนสูงสุด (peak temperature, T_p) ทั้งสองจุด (คือ T_{p1} และ T_{p2}) อุณหภูมิสุดท้าย (conclusion temperature, T_c) และอุณหภูมิแตกต่างระหว่างค่าอุณหภูมิสุดท้ายและอุณหภูมิเริ่มต้น ($T_c - T_o$) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ของการเกิดเจลาคติในเซชันมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการใช้สภาวะของการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่รุนแรงขึ้น ซึ่งปัจจัยร่วมระหว่างระดับความชื้น อุณหภูมิและเวลาในการดัดแปร มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลาคติในเซชันในสตาร์ชดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.7 การดัดแปรสตาซ์ด้วยวิธี HMT มีผลทำให้ความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาซ์ข้าวเจ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น หรืออีกนัยหนึ่งคือสตาซ์ข้าวเจ้ามีความคงตัวต่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสลดลงเมื่อใช้สภาวะการดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่รุนแรงขึ้น โดยปัจจัยร่วมระหว่างระดับความขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรมีผลต่อความสามารถในการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาซ์ข้าวเจ้าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) จากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่า เม็ดสตาซ์ข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรสามารถถูกเข้าย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสทั้งแบบที่มีการผุกร่อนภายนอก (exocorrosion) คือ มีลักษณะของการถูกย่อยจากบริเวณผิวของเม็ดสตาซ์เป็นชั้นๆ เข้าไปภายในใจกลางของโครงสร้างเม็ดสตาซ์ รวมถึงมีการย่อยที่บริเวณเหลี่ยมมุมของเม็ดสตาซ์ทำให้เม็ดสตาซ์ข้าวเจ้าดัดแปรมีลักษณะกลมมนมากขึ้น และแบบที่มีการผุกร่อนภายใน (endocorrosion) คือ มีลักษณะของการถูกย่อยเป็นช่องลึกลงไปภายในเม็ดสตาซ์ เนื่องจากเอนไซม์บางส่วนมีการแทรกตัวผ่านทางรูพรุนบนผิวเม็ดสตาซ์เข้าไปภายใน ทำให้บริเวณรูพรุนและช่องภายในของเม็ดสตาซ์ดัดแปรมีลักษณะกว้างขึ้น

5.8 การดัดแปรสตาซ์ด้วยวิธี HMT มีผลทำให้กำลังการพองตัวของสตาซ์ข้าวเจ้ามีแนวโน้มลดลง ในขณะที่การละลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการดัดแปรสตาซ์ด้วยวิธี HMT ในสภาวะที่รุนแรงขึ้น โดยปัจจัยที่มีผลต่อกำลังการพองตัวของสตาซ์ข้าวเจ้า ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างความขึ้นกับเวลา ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการละลายของสตาซ์ข้าวเจ้า ได้แก่ ระดับความขึ้นและอุณหภูมิที่ใช้ในการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5.9 การดัดแปรสตาซ์ด้วยวิธี HMT มีผลทำให้ความใสของสตาซ์ข้าวเจ้ามีแนวโน้มลดลงเมื่อใช้สภาวะในการดัดแปรที่รุนแรงขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความใสหรือค่าการส่องผ่านของแสงของสตาซ์ข้าวเจ้า ได้แก่ ปัจจัยร่วมระหว่างระดับความขึ้นกับเวลาที่ใช้ในการดัดแปรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนชื้น (HMT) มีผลเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้า โดยการดัดแปรสตาร์ชที่ระดับสภาวะแตกต่างกันก็จะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าแตกต่างกัน ทำให้สามารถผลิตสตาร์ชดัดแปรจากสตาร์ชข้าวเจ้าให้มีคุณสมบัติที่หลากหลาย จึงเลือกนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ได้ตามความต้องการและความเหมาะสมมากขึ้น ดังนั้นการวิจัยในขั้นต่อไปอาจเป็นการทดลองนำสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร ตัวอย่างเช่น เมื่อทำการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธี HMT ที่ระดับการดัดแปรสูงๆ จะทำให้ได้เม็ดสตาร์ชที่มีความแข็งแรงมากขึ้น ทนต่อความร้อนได้ดีขึ้น มีการพองตัวลดลง มีความสามารถในการละลายได้มากขึ้นและให้ความหนืดต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรดังกล่าวนี้ไปใช้ในส่วนผสมโด (dough) ของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการโดที่ขึ้นรูปได้ดีโดยไม่เหนียวติดมือ ติดอุปกรณ์หรือเครื่องจักร เช่น โดขนมโก๋ ขนมโก๋อ่อน ขนมผิง และขนมสัมนี่ เป็นต้น ส่วนสตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรด้วยวิธี HMT ที่ระดับการดัดแปรปานกลางจะให้ความหนืดที่สูงขึ้นและคงตัว เหมาะสำหรับนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารที่ต้องการความข้นหนืดสูง เช่น ชูปัง ซอส และเกรวี่ เป็นต้น นอกจากนี้ในขั้นต่อไปอาจศึกษาถึงผลของการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธี HMT ร่วมกับการดัดแปรด้วยวิธีอื่นๆ เช่น การดัดแปรด้วยวิธีทางเคมี เพื่อพัฒนาสตาร์ชดัดแปรชนิดใหม่ๆ ที่มีคุณสมบัติหลากหลายและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีของแป้ง. ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ. 292 หน้า.
- เฉลิมเกียรติ ดุลสัมพันธ์. 2546. ผลของความร้อน-ความชื้น คลื่นอัลตราโซนิกส์และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสมบัติทางกายภาพของแป้งมันสำปะหลัง. ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 198 หน้า.
- นิธิยา รัตนานนท์. 2545. เคมีอาหาร. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ. 504 หน้า.
- ปาริฉัตร หงส์ประภาส. 2545. เคมีกายภาพของอาหาร คอลลอยด์ อิมัลชัน และเจล. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ. 121 หน้า.
- พิณทิพย์ รัชมกการณ. 2547. การดัดแปรแป้งข้าวโดยใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 131 หน้า.
- รุ่งทิพา วันสุขศรี. 2543. การสกัดโปรตีนในปลายข้าวหอมมะลิเพื่อทำแป้งข้าวเจ้าบริสุทธิ์. ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์การอาหาร ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 166 หน้า.
- อรอนงค์ นัยวิกุล. 2547. ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 366 หน้า.
- วรารณา สงวนพงษ์. 2544. การลดขนาดเม็ดแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งที่ได้. ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 130 หน้า.
- AOAC. 1990. Official Method of Analysis. 15th Ed. Association of Official Analytical Chemists, Inc., Virginia. 1,298 p.
- Abraham, T. E. 1993. Stabilization of paste viscosity of cassava by heat moisture treatment. Starch/Stärke. 45: 131-135.
- Adebowale, K.O., Olu-Owalabi, B.I., Olawumi, E.K. and Lawal, O.S. 2005a. Functional properties of native, physically and chemically modified breadfruit (*Artocarpus artilis*) starch. Industrial Crops and Product. 21: 343-351.

- Adebowale, K.O., Afolabi, T.A. and Olu-Owalabi, B.I. 2005b. Hydrothermal treatments of Finger millet (*Eleusine coracana*) starch. Food Hydrocolloids. 19(6): 974-983.
- Adebowale, K.O. and Lawal, O.S. 2003. Microstructure, physicochemical properties and retrogradation behaviour of mucuna bean (*Mucuna pruriens*) starch on heat moisture treatments. Food Hydrocolloids. 17: 265-272.
- Anderson, A.K. and Guraya, H.S. 2005. Effects of microwave heat-moisture treatment on properties of waxy and non-waxy rice starches. Food Chemistry. 97(2): 318-323.
- Baker, L. A. and Duarte, R. 1998. Retrogradation of amaranth starch at different storage temperature and effect of salt and sugar. Cereal Chemistry. 75(3): 308-314.
- BeMiller, J.N. 1997. Starch modification: challenges and prospects. Starch/Stärke. 49: 127-131.
- Bernfeld, P. 1955. Amylase alpha- and beta- in method. *In*: Colowick, S.P. and Kaplan, M.O. (Eds.). Enzymology. 1: 149-158.
- Blanshard, J.M.V. 1987. Starch granule structure and function: A physicochemical approach. *In*: T. Gailliard (Ed.). Starch Properties and Potential. John Wiley and Sons, New York.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V. and Ball, S. 1998. Starch granules: Structure and biosynthesis. International Journal of Biological Macromolecules. 23: 85-112.
- Cheetham, N.W.H. and Tao, L. 1998. Variation in crystalline type with amylose content in maize starch granules : An X-ray powder diffraction study. Carbohydrate Polymers. 36: 277-284.
- Collado, L.S. and Corke, H. 1999. Heat-moisture treatment effect on sweetpotato starches differing in amylose content. Food Chemistry. 65: 339-346.
- Cooke, D. and Gidley, M.J. 1992. Loss of crystallinity and molecular order during starch gelatinization: Origin of the enthalpic transition. Carbohydrate Research. 227: 103-112.
- Craig, S. A.S., Maningat, C.C., Seib, P.A. and Hosenry, R.C. 1989. Starch paste clarity. Cereal Chemistry. 66: 173-182.

- DeMAN, J.M. 1990. Principle of Food Chemistry. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York. 468 p.
- Donovan, J.H., Lorenz, K. and Kulp, K. 1983. Differential Scanning Calorimetry of heat-moisture treated wheat and potato starches. *Cereal Chemistry*. 60: 381-387.
- Dubois, M.K., Gilles, K. A., Hamilton, J.K., Robers, P. A., and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and substances. *Analytical Chemistry*. 28: 350-356.
- Eliasson, A. and Gudmundsson, M. 1996. Starch: Physicochemical and functional aspects. p. 431-503. *In: Eliasson, A. (Ed.). Carbohydrate in Food*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Fleche, G. 1985. Chemical modification and degradation of starch. p. 73-99. *In: Van Beynum, G.M.A. and Roels, J.A. (Eds.). Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Gunaratne, A. and Hoover, R. 2002. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches. *Carbohydrate Polymer*. 49: 425-437.
- Hibi, Y., Kitamura, S. and Kuge, T. 1990. Effect of lipids on the retrogradation of cooked rice. *Cereal Chemistry*. 67(1): 7-10.
- Hizukuri, S. 1961. Effect of temperature during germination on the crystalline type of starch in soya bean seedling. *Nature*. 192: 239-242.
- Hizukuri, S., Takeda, Y., Yasuda, M., and Suzuki, A. 1981. Multibranched nature of amylose and the action of debranching enzyme. *Carbohydrate Research*. 94: 205-213.
- Hizukuri, S. 1985. Relationship between the distribution of the chain length of amylopectin and the crystalline structure of starch granule. *Carbohydrate Research*. 141: 295-305.
- Hizukuri, S. 1996. Starch: Analysis aspects. p. 342-429. *In: Eliasson, A. (Ed.). Carbohydrate in Food*. Marcel Dekker, Inc., New York.

- Hoover, R. and Manuel, H. 1996a. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legume starches. *Food Research International*. 29(8): 731-750.
- Hoover, R. and Manuel, H. 1996b. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylomaize V starches. *Journal of Cereal Science*. 23: 153-162.
- Hoover, R. and Vasathan, T. 1994. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of cereal tuber and legume starches. *Carbohydrate Research*. 252: 33-53.
- Hoover, R. and Zhou, Y. 2003. In vitro and in vivo hydrolysis of legume starches by alpha-amylase and resistant starch formation in legume: a review. *Carbohydrate Polymer*. 54: 401-417.
- Horton, D. 1965. Pyrolysis of Starch. p.421-437. *In*: Whistler, R.L. and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. Academic Press, Inc., Florida.
- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z. Linlin, Z. and Wu, D. 2004. Starch digestibility and the estimated glycemic score of diggerant types of rice different in amylose contents. *Journal of Cereal Science*. 40: 231-237.
- Jacobs, H. and Delcour, J. A. 1998. Hydrothermal modification of granular starch with retention of the granular structure: a review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 46: 2895-2905.
- Juliano, B.O. 1971. A simplified assay for milled-rice amylose. *Cereal Science today*. 16: 334-338, 340, 360.
- Juliano, B.O. 1984. Rice starch: production, properties and uses. p. 507-528. *In*: Whistler, R.L., BemMiller, J.N. and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. Academic press, Inc., New York.
- Juliano, B.O. 1992. Structure, chemistry and functional of rice grain and its fraction. *Cereal Foods World*. 37: 772-779.

- Kawabata, A., Takase, N., Miyoshi, E., Sawayama, S., Kimura, T. and Kudo, K. 1994. Microscopic observation and X-ray diffractometry of heat/moisture-treated starch granules. *Starch/Stärke*. 46: 463-469.
- Knight, J.W. 1969. *The Starch Industry*. Pergamon Press Ltd., Oxford. 189 p.
- Kulp, K. and Lorenz, K. 1981a. Heat-moisture treatment of starches I: Physicochemical properties. *Cereal Chemistry*. 58: 46-48.
- Kulp, K. and Lorenz, K. 1981b. Heat-moisture treatment of starches II: Physicochemical properties. *Cereal Chemistry*. 58: 49-52.
- Kurakake, M., Tachibana, K., Masaki, K. and Komaki, T. 1996. Adsorption of alpha-amylase on heat-moisture treated starch. *Journal of Cereal Science*. 23: 163-168.
- Lawal, O.S. 2005. Studies on the hydrothermal modifications of new cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium*) starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. 37: 268-277.
- Leach, H.W., McCowen, L.D., and Schoch, T.J. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. *Cereal Chemistry*. 36: 534-544.
- Le Bail, P., Buleon, A. Colona, P. and Bizot, H. 1997. Structure and polymorphic transitions of amylose induced by water and temperature change. p. 51-57. *In: Frazier, P.J., Richmond, P. and Donald, A.M (Eds.). Starch: Structure and Functionality*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge.
- Leung, H.K. 1987. Influence of water activity on chemical reactivity. p. 27-54. *In: Rockland, L.B. and Beuchat, L.R. (Eds.). Water Activity: Theory and Applications to Food*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Li, J.H., Vasathan, T., Hoover, R. and Rossmagel, B.G. 2004. Starch from hull-less barley: V. In- vitro susceptibility of waxy, normal and high-amylose starch towards hydrolysis by alpha-amylases and amyloglucosidase. *Food Chemistry*. 84: 621-632.

- Lineback, D.R. 1984. The starch granule: Organization and properties. *Bakers Digest*. 58(2): 16-21.
- Liu, H., Ramsden, H. and Corke, H. 1999. Physical properties and enzymatic digestibility of hydroxypropylated ae, wx, and normal maize starch. *Carbohydrate Polymers* 40:175-182.
- Lu, S., Chen, C.Y. and Lii, C.Y. 1996. Gel-chromatography fractionation and thermal characterization of rice starch affected by hydrothermal treatment. *Cereal Chemistry*. 73: 5-11.
- Maningat, C.C., and Seib, P. A. 1992. Starch: Occurrence, isolation, and properties of starch granules. *In: AACC Short Course - Starch: Structure, Properties , and Food Uses*. December 3-4, 1992. Chicago.
- Morrison, W.R. 1993. Cereal starch granule development and composition. p. 175-190. *In: Shewry, P.R. and Stobart, K. (Eds.). Seed storage compound: Biosynthesis, interactions and manipulation*. Oxford Science Publications, Oxford.
- Newport Scientific Pty, Ltd. 1995. Operation Manual for the Series 4 Rapid Visco Analyzer. Australia. 93 p.
- Nollet, L.M.L. 1996. Handbook of Food Analysis. Marcel Deaker, Inc., New York. 2041 p.
- Oates, C.G. 1996. Physical modification of starch. *In: Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology*. Jan. 22-26 & Feb. 19-23, 1996. AIT Center, Bangkok.
- Peleg, M. 1983. Physical characteristics of food powders. p. 293-323. *In: Peleg, M. and Bagley, E.B. (Eds.). Physical Properties of Foods*. AVI Publishing Co., Westport.
- Peleg, M. 1993. Glass transitions and the physical stability of food powders. p. 435-451. *In: Blanshard, J.M.V. and Lillford, P.J. (Eds.). The Glassy State in Foods*. Nottingham University Press., Leicestershire.
- Perdon, A.A., Siebenmorgan, T.J., Buescher, R.W., and Gbur, E.E. 1999. Starch retrogradation and texture of cooked rice during storage. *Journal of Food Science*. 64(5): 828-832.

- Radosta, S., Kettlitz, B., Schierbaum, F. and Gernat, C. 1992. Studies on rye starch properties and modification. Part 2: Swelling and solubility behaviour of rye starch granule. *Starch/Stärke*. 44: 8-14.
- Reilly, P.J. 1985. Enzymic degradation of starch. p. 101-141. *In*: Van Beynum, G.M.A. and Roels, J.A. (Eds.). *Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Rickard, J.E., Asaoka, M. And Blanshard, J.M.V. 1991. Review – The physicochemical properties of cassava starch. *Tropical Science*. 31: 189-207.
- Robyt, J.F. 1984. Enzyme in the hydrolysis and synthesis of starch. p. 87-123. *In*: Whistler, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. 2nd Ed. Academic Press, Inc., London.
- Roos, Y.H. 1998. Role of water in phase-transition phenomena in foods. p. 57-86. *In*: Rao, M.A. and Hartel, R.W. (Eds.). *Phase/State Transitions in Foods : Chemical, Structure, and Rheological Changes*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Schoch, T.J. 1967. Properties and uses of rice starch. p. 79-86. *In*: Whistler, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall, E.F. (Eds.). *Starch: Chemistry and Technology*. 2nd Ed. Academic Press, Inc., Florida.
- Shi, Y.C. and Seib, P. 1992. The structure of four waxy starches related to gelatinization and retrogradation. *Carbohydrate Research*. 227: 131-145.
- Swinkles, J.J.M. 1985. Sources of starch, its chemistry and physic. p. 15-46. *In*: Van Beynum, G.M.A. and Roels, J.A. (Eds.). *Starch Conversion Technology*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Takaya, T., Sano, C. and Nishinari, K. 2000. Thermal studies on the gelatinization and retrogradation of heat-moisture treated starch. *Carbohydrate Polymer*. 41: 97-100.
- Tester, R.F., Karkalas, J. and Qi, X. 2004a. Starch-composition, fine structure and architecture. *Journal of Cereal Science*. 39: 151-165.
- Tester, R.F., Karkalas, J. and Qi, X. 2004b. Starch structure and digestibility enzyme-substrate relationship. *World ' s Poultry Science Journal*. 60: 186-195.

- Valetudie, J.C., Colona, P. Bouchet, B. and Gallant, D.J. 1993. Hydrolysis of tropical tuber starches by bacterial and pancreatic alpha-amylase. *Starch*. 45: 270-276.
- Vermeulen, R., Goderis, B. and Delcour, J.A. 2006. An X-ray study of hydrothermally treated potato starch. *Carbohydrate Polymer*. 64(2): 364-375.
- Waliszewski, K., Aparicico, M. A., Bello, L. A. and Monroy, J. A. 2003. Change of banana starch by chemical and physical modification. *Carbohydrate Polymers*. 52: 237-242.
- Walker, D.A. 1976. Preparation of geological samples for scanning electron microscopy. p. 68. *In: Delokkunanund, A. Specimen Preparation for SEM*. Kasetsart University, Bangkok.
- Whistler, R.L. and Deniel, J.R. 1985. Carbohydrate. p. 69-137. *In: Fennema, O.R. (Ed.). Food Chemistry: Second Edition, Revised and Expanded*. Marcel Dekker, Inc., New york.
- Whistler, R.L. and Deniel, J.R. 1984. Molecular structure of starch. p. 153-178. *In: Whistler, R.L., BeMiller, J.N. and Paschall, E.F. (Eds.). Starch: Chemistry and Technology*. Academic Press, Inc., Florida.
- Zobel, H.F. 1988. Starch crystal transformations and their industrial importance. *Starch/Stärke*. 40(1): 1-7.
- Zobel, H.F. 1992. Starch granule structure. p. 1-36. *In: Alexander, R.J. and Zobel, H.F. (Eds.). Developments in Carbohydrate Chemistry*. The American Association of Cereal Chemists, Inc., Minnesota.

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

1. ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990)

ชั่งตัวอย่างสดารซ์ประมาณ 2 กรัม ให้ได้น้ำหนักแน่นอนในภาชนะอะลูมิเนียมมีฝาปิดที่ผ่านการอบจนน้ำหนักคงที่ นำไปอบในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 130 ± 3 องศาเซลเซียส ซ้ำมคิน (ประมาณ 15 -18 ชั่วโมง) โดยเปิดฝาภาชนะทิ้งไว้ เมื่อครบเวลานำตัวอย่างออกจากตู้อบ ปิดฝาภาชนะทันที ทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนัก ทำการอบซ้ำอีก 1 ชั่วโมงหรือจนได้น้ำหนักคงที่ ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง คำนวณปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักเปียก (wet basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100$$

คำนวณปริมาณความชื้นโดยน้ำหนักแห้ง (dry basis) จาก

$$\text{ร้อยละความชื้น} = \frac{\text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก}}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})} \times 100$$

2. การตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของเม็ดสสารด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (Walker, 1976)

2.1 นำสสารตัวอย่างเพียงเล็กน้อยติดกระจายลงบนเทปกาวยสองหน้าที่ติดอยู่บนแท่งอะลูมิเนียม (aluminium stub)

2.2 นำแท่งอะลูมิเนียมที่ติดสสารตัวอย่างแล้วนำเข้าเครื่องเคลือบทองเพื่อเคลือบทองลงที่ผิวของสสารสำหรับช่วยในการนำประจุอิเล็กตรอน

2.3 วางแท่งอะลูมิเนียมที่ผ่านการเคลือบทองแล้วลงในช่องสำหรับใส่แท่งอะลูมิเนียมภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.4 ตรวจสอบลักษณะรูปร่างและเลือกบริเวณที่จะบันทึกภาพของเม็ดสสารโดยควบคุมความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15 กิโลโวลท์ ใช้กำลังขยายที่ 60 100 500 และ 2,000 เท่าตามลำดับ

3. ค่าสี (Nollet, 1996)

นำตัวอย่างไปวัดค่าสี (colorimeter) โดยใช้ D65 10° เป็นแหล่งกำเนิดแสง (illuminant) เพื่อหาค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) โดยใช้อุปกรณ์เทียบมาตรฐาน (black and white reference) เป็นตัวเทียบมาตรฐานค่าสี

4. ปริมาณอะไมโลส (Juliano, 1971)

4.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานอะไมโลส

ชั่งอะไมโลสบริสุทธิ์จากมันฝรั่ง 0.040 กรัม ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ อย่าให้อะไมโลสเกาะผนังขวด เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร ใส่แท่งแม่เหล็กลงไปในขวดวัดปริมาตรกวนของเหลวบนแท่นนาน 10 นาที นำแท่งแม่เหล็กออกและล้างส่วนที่ติดมาให้กลับไปอยู่ในขวดด้วยน้ำกลั่น เติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เขย่าให้สารละลายเข้ากันดี

4.2 การเตรียมตัวอย่าง

เช่นเดียวกับการเตรียมสารละลายมาตรฐานอะไมโลส ยกเว้นแต่ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.1000 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง แทนอะไมโลสบริสุทธิ์

4.3 การวิเคราะห์ตัวอย่าง

ปิเปตสารละลายจากข้อ 4.2 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในขวดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ 1 มิลลิลิตร และสารละลายไอโอดีน (เตรียมโดยละลายไอโอดีน 0.2 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดด์ 2.0 กรัม ในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร) 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าและตั้งทิ้งไว้ 20 นาที และทำเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่สารตัวอย่างเพื่อใช้เป็นแบลนด์ วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายแบลนด์ให้เท่ากับ 0

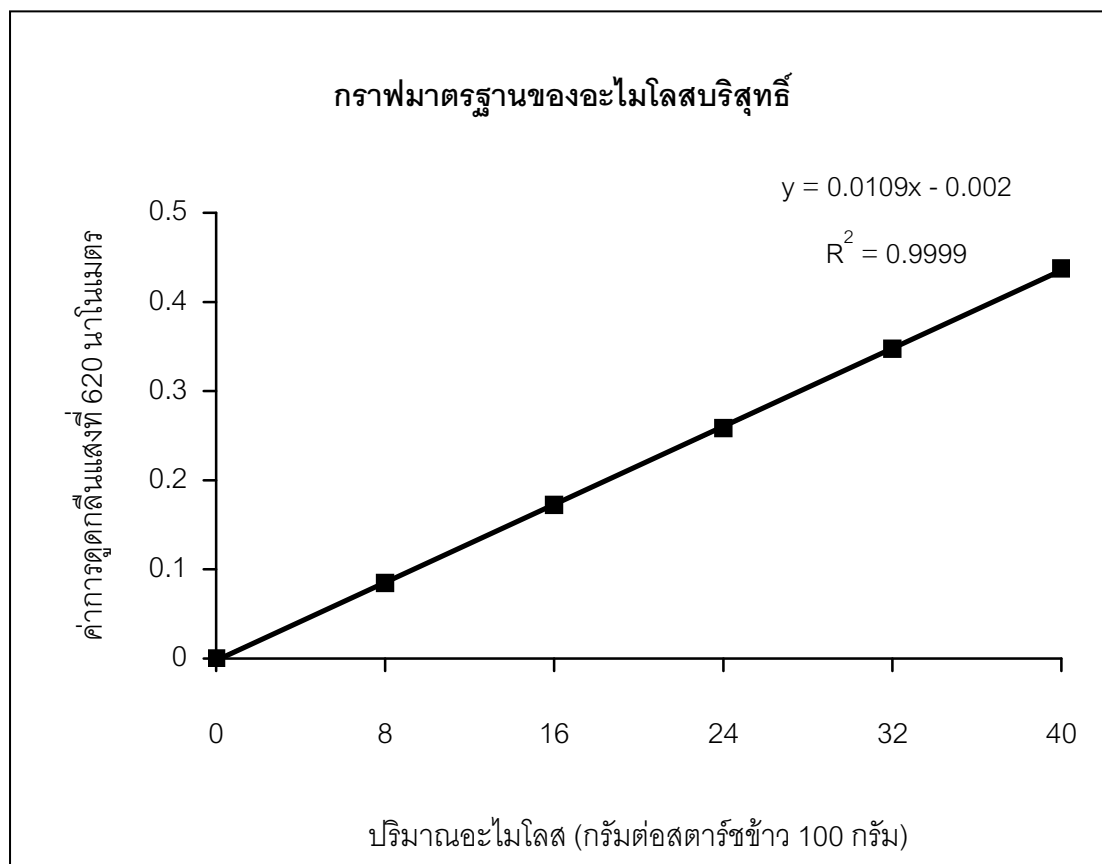
4.4 การเตรียมกราฟมาตรฐาน

ปิเปตสารละลายมาตรฐานจากข้อ 4.1 ปริมาตร 1, 2, 3, 4 และ 5 มิลลิลิตร ใส่ขวด ปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นประมาณ 70 มิลลิลิตร ปิเปตกรดอะซิติกเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปริมาตรที่มีสารละลายมาตรฐาน ตามลำดับ และปิเปตสารละลายไอโอดีนเข้มข้นร้อยละ 0.2 (น้ำหนัก/ปริมาตร) 2 มิลลิลิตร เติมน้ำ กลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากันดี

วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตรและ เขียนกราฟระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัม/แป้งข้าว 100 กรัม หรือคิดเป็นร้อยละ 8, 16 24 32 และ 40) กับค่าการดูดกลืนแสง โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นเบลงค์ (แสดงดังภาพผนวกที่ ก-1)

4.5 การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณอะไมโลส

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ปริมาณตัวอย่าง 0.1000 กรัมของแต่ละตัวอย่างเทียบกับกราฟ มาตรฐานแล้วอ่านค่าเป็นร้อยละของอะไมโลสต่อสตาρχข้าว 100 กรัม



ภาพผนวกที่ ก-1 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชข้าว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร

5. การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างผลึกภายในเมล็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Cheetham และ Tao, 1998)

5.1 การเตรียมสตาร์ชก่อนการวิเคราะห์

ซึ่งสตาร์ชประมาณ 7 กรัมใส่ลงในจานแก้ว (petri dish) และเกลี่ยสตาร์ชให้ทั่ว นำจานแก้ววางเรียงในโถดูดความชื้น (desiccator) เปลา่ที่มีการเติมน้ำกลั่นด้านล่างของภาชนะ นาน 24 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างสตาร์ชที่จะนำไปวิเคราะห์มีปริมาณความชื้นใกล้เคียงกัน (ร้อยละ 13-14)

5.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer

5.2.1 บรรจุแป้งที่ปรับความชื้นแล้วลงในอุปกรณ์สำหรับบรรจุตัวอย่างโดยต้องเกลี่ยผิวหน้าของตัวอย่างให้เรียบ

5.2.2 นำตัวอย่างใส่ลงในเครื่อง โดยกำหนดสภาวะการทดสอบ คือ ใช้เป้าหมาย (target) เป็นทองแดง (Cu) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 กิโลโวลต์ ใช้กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ เริ่มสแกนที่มุมหักเหช่วง 5.00 ถึง 40.00 องศา ด้วยอัตราเร็ว 0.02 องศา 2 ต่อวินาที

5.2.3 บันทึกรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ได้ และคำนวณค่าร้อยละของความเป็นผลึก (Relative crystallinity) จากสมการซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีการของ Cheetam and Tao (1998) ดังนี้คือ

$$\text{ค่าร้อยละความเป็นผลึก} = \frac{\text{พื้นที่ใต้พีค (A)} \times 100}{\text{พื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B)}}$$

ค่าของพื้นที่ใต้พีค (A) และพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B) สามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่อง ดังแสดงในภาพผนวกที่ ก-2 โดยทำการคำนวณ 3 ซ้ำต่อการวิเคราะห์สตาร์ชดัดแปรหนึ่งตัวอย่าง

5.2.4 วิธีการคำนวณค่าร้อยละความเป็นผลึกโดยละเอียดทำได้โดย

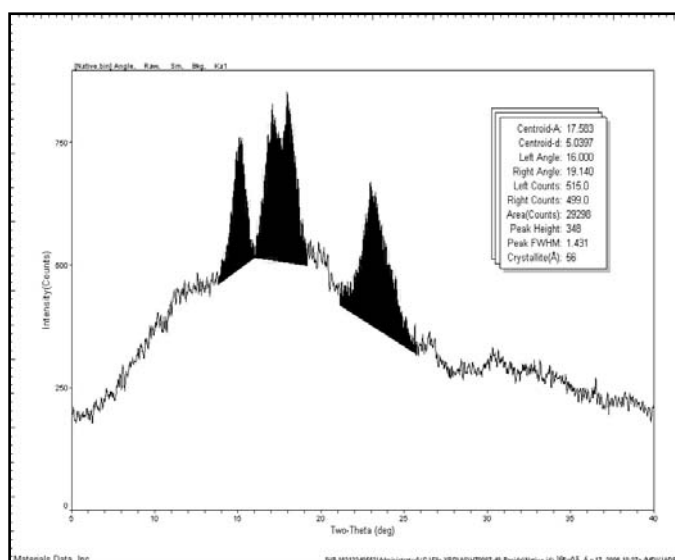
5.2.4.1 ค่าจากพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดของสเปกตรัม (B) ได้จากการนำค่าจากการวัดพื้นที่ 3 ซ้ำมาหารเฉลี่ย

5.2.4.2 ค่าจากพื้นที่ใต้พีค (A) ได้จากการนำค่าจากพื้นที่ใต้พีคหลัก 3 พีค ได้แก่ พีคที่ตำแหน่ง 15 (1 พีค) 17 และ 18 (2 พีคเชื่อมกัน) และ 23 (1 พีค) °2θ และพื้นที่จากพีคที่ปรากฏขึ้นใหม่อีก 1 พีค คือ ที่ตำแหน่ง 20 °2θ มารวมกันในแต่ละซ้ำ ซึ่งจะได้ตัวเลขทั้งหมด 3 ค่าจากการวัดพื้นที่ 3 ซ้ำ

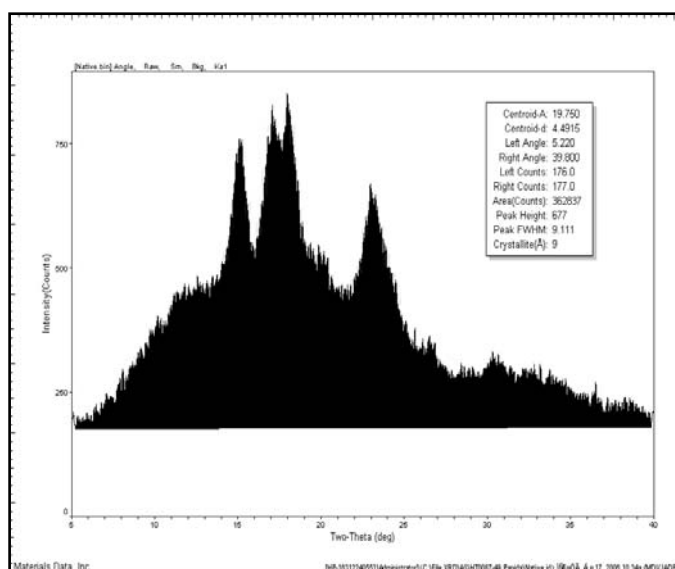
5.2.4.3 นำค่าจากพื้นที่ B และ A จากข้อ 5.2.4.1 และ 5.2.4.2 ไปแทนในสมการซึ่งแสดงไว้ในข้อ 5.2.3 จะได้ค่าร้อยละความเป็นผลึก 3 ค่า (จากการวัดพื้นที่ 3 ซ้ำ) จากนั้นนำค่าทั้ง 3 มาหารเฉลี่ยได้เป็นค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชดัดแปรตัวอย่างนั้นๆ

5.3 สถานทีวิเคราะห์

ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์เฟรกชันและอิเล็กทรอนิกส์ศูนย์เทคโนโลยี
โลหะและวัสดุแห่งชาติ



ก)



ข)

ภาพผนวกที่ ก-2 ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้จากเครื่อง X-ray diffractometer

ก) แสดงพื้นที่ใต้พีค (A) ข) แสดงพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B)

6. การวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์เปลี่ยนแปลงความหนืดด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) (Newport Scientific Pty. Ltd., 1995)

6.1 นำตัวอย่างสตาร์ชไปหาปริมาณความชื้นตามวิธี AOAC (1990) ก่อนการวิเคราะห์

6.2 ชั่งตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 3.5 กรัมโดยน้ำหนักแห้งใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียมเติมน้ำกลั่นปริมาตร 25.0 มิลลิลิตร สามารถคำนวณปริมาณสตาร์ชและน้ำที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามร้อยละความชื้นของตัวอย่าง ตามสมการ

$$\text{ปริมาณแป้ง } S = \frac{3.5 \times 100}{(100 - \text{ร้อยละความชื้นโดยน้ำหนักเปียก})}$$

$$\text{ปริมาณน้ำ } W = 25 + (3.5 - S)$$

6.3 ใส่ใบพัดกวน (paddle) ลงในภาชนะอะลูมิเนียม หมุนใบพัดกวนในลักษณะทวนเข็มนาฬิกาตามเข็มนาฬิกาจนตัวอย่างสตาร์ชและน้ำกลั่นผสมกันดี ไม่มีการเกาะกันเป็นก้อน

6.4 ทำการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืด ตามโปรแกรม STD1 ดังนี้

เวลาเริ่มต้น อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 960 รอบ/นาที

เวลา 10 วินาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที

เวลา 1 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที และเริ่มให้ความร้อน

เวลา 4 วินาที 42 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที จนถึง

เวลา 7 วินาที 12 วินาที อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที และเริ่มให้ความเย็น

เวลา 11 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที จนถึง

เวลา 13 นาที อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 160 รอบ/นาที

ผล ได้ค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ความหนืดต่ำสุดระหว่างการทำความเย็น (trough) ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและต่ำสุด (breakdown) ความหนืดสุดท้าย (final viscosity) การคืนตัว (setback) และอุณหภูมิที่ความหนืดเริ่มเพิ่มขึ้น (pasting temperature)

7. การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (ดัดแปลงจากกล้านรงค์ และเกื้อกุล, 2543 และ Baker และ Duarte, 1998)

7.1 วิธีการทดลอง

ชั่งตัวอย่างสตาร์ชประมาณ 3.5 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง เติมน้ำร้อยละ 70 ของน้ำหนักทั้งหมดโดยใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็ก (microsyring) ใส่ลงในภาชนะอะลูมิเนียม (DSC pan) ปิดฝาแล้วตั้งทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง นำมาวิเคราะห์โดยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 องศาเซลเซียส คงไว้ 5 นาที แล้วจึงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 120 องศาเซลเซียสโดยใช้อัตราเร็ว 10 องศาเซลเซียสต่อนาที คำนวณหาค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_O , T_{P1} , T_{P2} และ T_C ; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$; J/g)

7.2 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันและค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลิตีในเซชัน

การคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน (T_O , T_{P1} , T_{P2} และ T_C ; องศาเซลเซียส) และค่าเอนทาลปีการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($\Delta H_{\text{gelatinization}}$; J/g) กรณีที่มีพีคปรากฏขึ้นเพียงพีคเดียวหรือปรากฏขึ้นมากกว่าหนึ่งพีคแต่มีการแยกของพีคเป็นพีคเดี่ยวๆ ค่าอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันต่างๆ ซึ่งได้แก่ T_O , T_{P1} , T_{P2} และ T_C จะสามารถคำนวณได้จากการใช้โปรแกรมภายในเครื่องทั้งหมด แต่ในกรณีที่ตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ปรากฏพีคขึ้นเป็น 2 พีคที่มีการเชื่อมกันหรือไม่เกิดการแยกเป็นพีคเดี่ยวๆ โปรแกรมภายในเครื่องจะไม่สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิของการเกิดเจลลิตีในเซชันให้ได้ทั้งหมด (ยกเว้นค่า $\Delta H_{\text{gelatinization}}$ โปรแกรมภายในเครื่องจะสามารถคำนวณได้ในทุกตัวอย่าง เนื่องจากเป็นค่าที่ได้จากการเลือกช่วงของการเกิดเจลลิตีในเซชันอยู่แล้ว)

วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชันสามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ

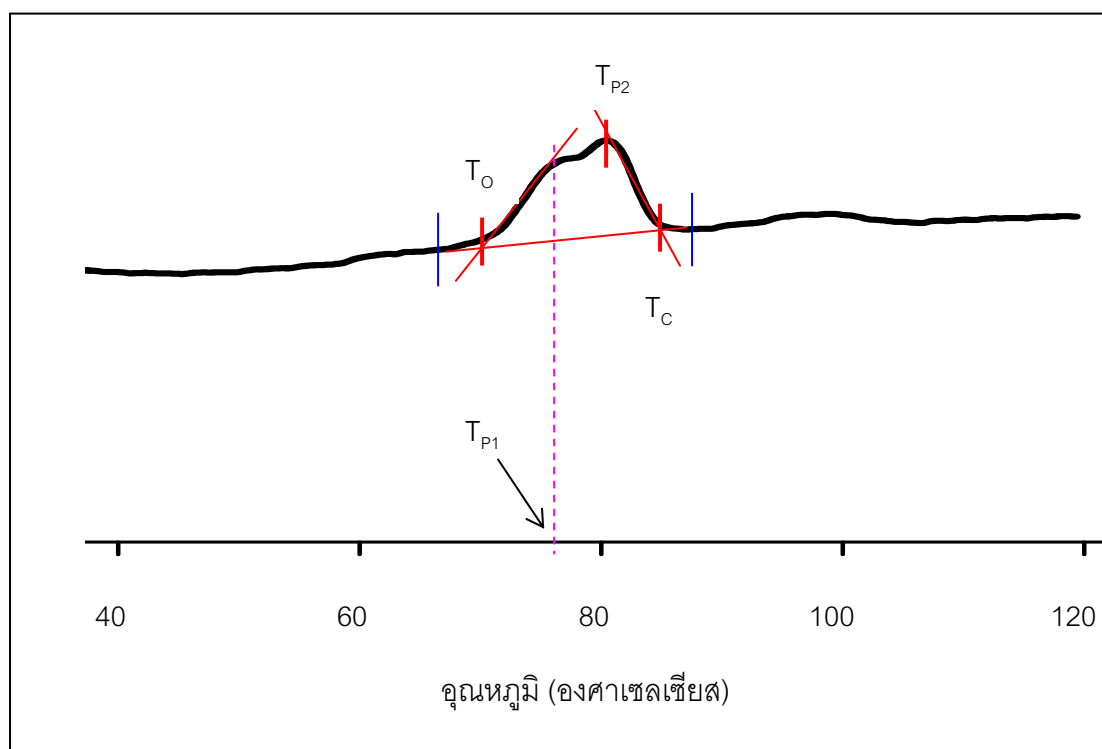
7.2.1 กรณีที่พีคทั้ง 2 มีความสูงใกล้เคียงกันและมีการแบ่งของพีคไม่ชัดเจน โปรแกรมภายในเครื่องจะสามารถคำนวณให้ค่า T_O , T_C , ΔH และ T_{P1} หรือ T_{P2} ค่าใดค่าหนึ่งซึ่งมี

ความสูงของพีคมากกว่า ส่วนค่า T_p อีกหนึ่งค่าที่เหลือได้จากการลากเส้นตรงลงมาตัดที่แกนอุณหภูมิแล้วอ่านค่าอุณหภูมิด้วยสายตา แสดงดังภาพผนวกที่ ก-3

7.2.2 กรณีที่มีพีคใดพีคหนึ่งสูงกว่าระหว่าง 2 พีคและมีการแบ่งพีคอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

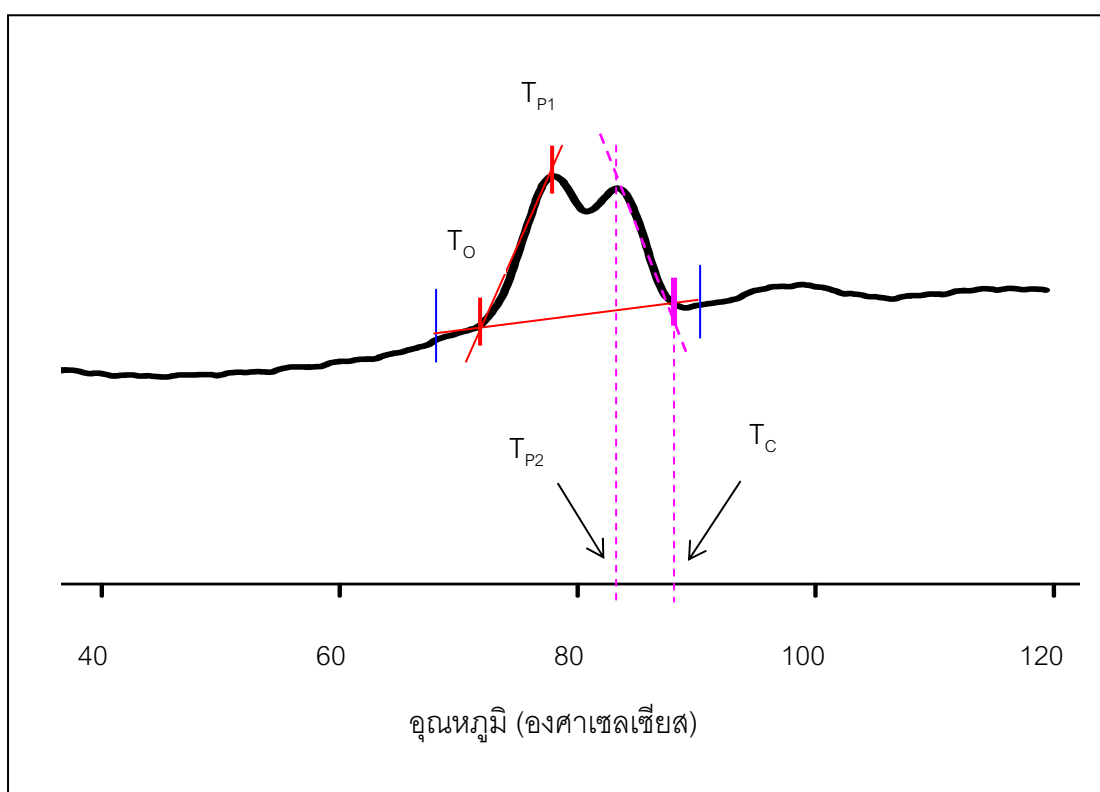
7.2.2.1 แบบที่มีพีคหน้าสูงกว่า โปรแกรมภายในเครื่องจะสามารถคำนวณให้ค่า T_O , T_{P1} และ ΔH ส่วน T_{P2} และ T_C ได้จากการลากเส้นลงมาตัดที่แกนอุณหภูมิแล้วอ่านค่าอุณหภูมิด้วยสายตา แสดงดังภาพผนวกที่ ก-4

7.2.2.2 แบบที่มีพีคหลังสูงกว่า โปรแกรมภายในเครื่องจะสามารถคำนวณให้ค่า T_{P2} , T_C และ ΔH ส่วน T_O และ T_{P1} ได้จากการลากเส้นลงมาตัดที่แกนอุณหภูมิแล้วอ่านค่าอุณหภูมิด้วยสายตา แสดงดังภาพผนวกที่ ก-5

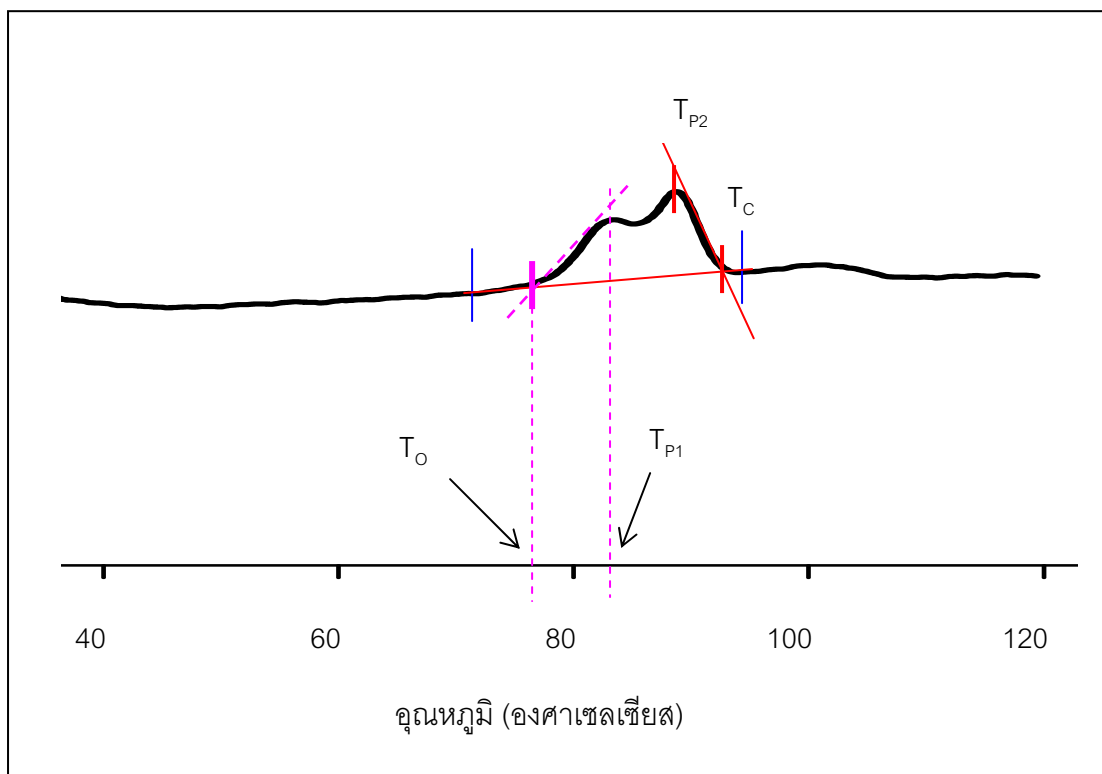


ภาพผนวกที่ ก-3 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันกรณีที่พีคทั้ง 2 มีความสูงใกล้เคียงกันและมีการแบ่งของพีคไม่ชัดเจน

- หมายเหตุ เส้นสีน้ำเงิน = ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันที่กำหนดขึ้นโดยผู้วิจัยเพื่อใช้ในโปรแกรมการคำนวณที่มีภายในเครื่อง
- เส้นสีแดง = เป็นเส้นที่เกิดจากการคำนวณของโปรแกรมอัตโนมัติที่มีภายในเครื่อง
- เส้นประสีชมพู = เป็นเส้นที่ผู้วิจัยต้องทำขึ้น เพื่อทำการอ่านค่าอุณหภูมิที่เหลือที่โปรแกรมไม่สามารถคำนวณออกมาให้ได้ โดยการลากเส้นตรงลงมาตัดที่แกนอุณหภูมิแล้วอ่านค่าอุณหภูมิด้วยสายตา



ภาพผนวกที่ ก-4 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติโนเซชันกรณีที่มีพีคใดพีคหนึ่งสูงกว่าระหว่าง 2 พีคและมีการแบ่งพีคอย่างชัดเจน แบบมีพีคหน้าสูงกว่า



ภาพผนวกที่ ก-5 วิธีการคำนวณค่าอุณหภูมิการเกิดเจลาตินในเซชันกรณีที่มีพีคใดพีคหนึ่งสูงกว่า
ระหว่าง 2 พีคและมีการแบ่งพีคอย่างชัดเจน แบบมีพีคหลังสูงกว่า

8. การวิเคราะห์ความคงตัวต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (susceptibility to enzyme digestion) ของสตาร์ช

8.1 การวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร (Alpha-amylase from porcine pancreatic) (Bernfeld, 1955)

8.1.1 การเตรียมสารเคมี

8.1.1.1 สารละลายโซเดียมฟอสเฟตบัฟเฟอร์เข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ ในโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.0067 โมลาร์ พีเอช (pH) 6.9 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ซังโซเดียมฟอสเฟตโมโนเบสิกแอนไฮไดรต์ 0.138 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 50 มิลลิลิตรในขวดปริมาตรโดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.0067 โมลาร์ จากนั้นปรับพีเอชเป็น 6.9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 1 โมลาร์ ในอ่างน้ำเย็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส (สารละลายโซเดียมคลอไรด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ใช้น้ำดีไอไอไนซ์ (deionized water) เป็นตัวทำละลาย)

8.1.1.2 สารละลายสตาร์ชมันฝรั่งเข้มข้นร้อยละ 1.0

ซังสตาร์ชมันฝรั่งที่ละลายน้ำได้ (soluble potato starch) 0.250 กรัม ใส่ปิกเกอร์ เติมสารละลายข้อ 8.1.1.1 พอท่วม ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน จากนั้นนำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อน (hot plate) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จับเวลาขณะเดือด 15 นาที ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำดีไอไอไนซ์

8.1.1.3 สารละลายโซเดียมโปแทสเซียมทาเทรตเข้มข้น 5.3 โมลาร์

ซังโซเดียมโปแทสเซียมทาเทรต 37.396 กรัม ใส่ปิกเกอร์ เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ พอท่วมเป็นตัวทำละลาย ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน นำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนแต่ห้ามให้สารละลายเดือด เมื่อสารละลายละลายเข้ากันดีทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ที่ทำละลายด้วยน้ำดีไอไอไนซ์ที่เตรียมไว้

8.1.1.4 สารละลายกรดไดโนโตรซาลิกไซคลิกเข้มข้น 96 มิลลิโมลาร์

ชั่งกรดไดโนโตรซาลิกไซคลิก 0.548 กรัมใส่ปิกเกอร์ เติมน้ำดีไอไอไนซ์พอท่วม ใส่แท่งแม่เหล็กสำหรับกวน นำไปกวนให้ความร้อนบนแท่นให้ความร้อนแต่ห้ามให้สารละลายเดือด เมื่อสารละลายละลายเข้ากันดี ทำให้เย็นที่อุณหภูมิห้องและปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตร ด้วยน้ำดีไอไอไนซ์

8.1.1.5 สารละลายสี (Color reagent solution)

ผสมสารละลายข้อ 8.1.1.3 ปริมาตร 8 มิลลิลิตรและสารละลายข้อ 8.1.1.4 ปริมาตร 20 มิลลิลิตรเข้าด้วยกัน จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 40 มิลลิลิตรด้วยน้ำดีไอไอไนซ์ ผสมให้เข้ากันดีและเก็บสารละลายในขวดสีชา โดยสารละลายสีที่เตรียมนี้มีอายุการใช้งานได้ 6 เดือน

8.1.1.6 สารละลายมอลโตสมาตรฐานเข้มข้นร้อยละ 0.2 (น้ำหนัก/ปริมาตร)

นำผงมอลโตสอบในตู้อบลมร้อนที่ 90 องศาเซลเซียส นาน 2-3 ชั่วโมงก่อนการนำมาใช้เพื่อไล่ความชื้น ชั่งมอลโตส 0.050 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 25 มิลลิลิตรในขวดปริมาตร โดยใช้ น้ำดีไอไอไนซ์

8.1.1.7 สารละลายเอนไซม์พอร์ซินแพนครีเอติกแอลฟาอะไมเลส

เตรียมสารละลายเอนไซม์พอร์ซินแพนครีเอติกแอลฟาอะไมเลสให้มีความเข้มข้น 1 หน่วยเอนไซม์พอร์ซินแพนครีเอติกแอลฟาอะไมเลสต่อ 1 มิลลิลิตร ในน้ำดีไอไอไนซ์เย็น (1 unit/ml)

8.1.2 วิธีการวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

การวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์จะเปิดสารละลายเรียงตามลำดับ (ในหน่วยมิลลิลิตร) ดังตารางผนวกที่ ก-1 โดยใช้หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีฝาปิด จำนวน 4 หลอด (หลอดที่ 1- 3 เป็นหลอดทดสอบ และหลอดที่ 4 เป็นหลอดแบลนด์) และทำปฏิกิริยาในอ่างน้ำเย็น ควบคุมอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

กำหนดให้ 1 หน่วยเอนไซม์ (unit enzyme) หมายถึงปริมาณเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสตาร์ชเป็นมอลโตส 1.0 มิลลิกรัม ในเวลา 3 นาที ที่พีเอช 6.9 อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

ตารางผนวกที่ ก-1 วิธีการวิเคราะห์แอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

วิธีการทดลอง	หลอดทดสอบ (มิลลิลิตร)	หลอดแบลนด์ (มิลลิลิตร)
8.1.2.1 ปิเปตสารละลายสตาร์ชมันฝรั่ง (ข้อ 8.1.1.2) และแช่หลอดทดลองในอ่างน้ำเย็นนาน 3 นาที	1.00	1.00
8.1.2.2 ปิเปตสารละลายเอนไซม์ (ข้อ 8.1.1.7) เขย่าสารละลายให้เข้ากัน ทั้งให้ทำปฏิกิริยานาน 3 นาทีโดยมีการเขย่าหลอดทดลองตลอดเวลา	1.00	---
8.1.2.3 ปิเปตสารละลายสี (ข้อ 8.1.1.5)	1.00	1.00
8.1.2.4 ปิเปตสารละลายเอนไซม์ (ข้อ 8.1.1.7) ปิดฝาหลอดทดลองและรีบนำไปต้มในอ่างน้ำเดือดทันที นาน 15 นาทีเมื่อครบเวลา นำหลอดทดลองมาทำให้เย็นในอ่างน้ำแข็ง	---	1.00
8.1.2.5 ปิเปตน้ำดีไอไอในสีหลอดทดลอง เขย่าสารละลายให้เข้ากันและนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยปรับค่าสารละลายแบลนด์เป็น 0	9.00	9.00

8.1.3 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส

การเตรียมกราฟมาตรฐานจะปิเปตสารละลายเรียงตามลำดับ (ในหน่วยมิลลิลิตร) ดังตารางผนวกที่ ก-2 โดยใช้หลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตรที่มีฝาปิด จำนวน 6 หลอด

ตารางผนวกที่ ก-2 การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส

วิธีการทดลอง	หาค่าสารละลายมาตรฐานที่					แปลงค่า
	1	2	3	4	5	
8.1.3.1 สารละลายมอลโตสบริสุทธิ์ (ข้อ 8.1.1.2)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	---
8.1.3.2 น้ำดีไอโอไนซ์	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	2.00
8.1.3.3 สารละลายสี (ข้อ 8.1.1.5)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ปิดฝาหลอดทดลองและ นำไปต้มในน้ำเดือดนาน 15 นาที เมื่อ ครบเวลา นำหลอดทดลองมาทำให้เย็น ในอ่างน้ำแข็ง						
8.1.3.4 บีบอัดน้ำดีไอโอไนซ์ เขย่าสารละลายให้เข้ากัน และนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความ ยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยปรับค่า สารละลายแปลงค่าเป็น 0	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00

เขียนกราฟมาตรฐานของมอลโตส ระหว่างปริมาณมอลโตส หน่วยเป็นมิลลิกรัม (คิดเป็น 0.4, 0.8 1.2, 1.6 และ 2.0 มิลลิกรัมมอลโตส) กับค่าการดูดกลืนแสง (แสดงดังภาพผนวกที่ ก-3)

8.1.4 การเปลี่ยนค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณมิลลิกรัมมอลโตส

นำค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จากการวัดแอดคิตีวี่ของเอนไซม์ (ข้อ 8.1.2) เทียบกับกราฟมาตรฐานมอลโตสแล้วคำนวณค่าเป็นปริมาณมิลลิกรัมของมอลโตส

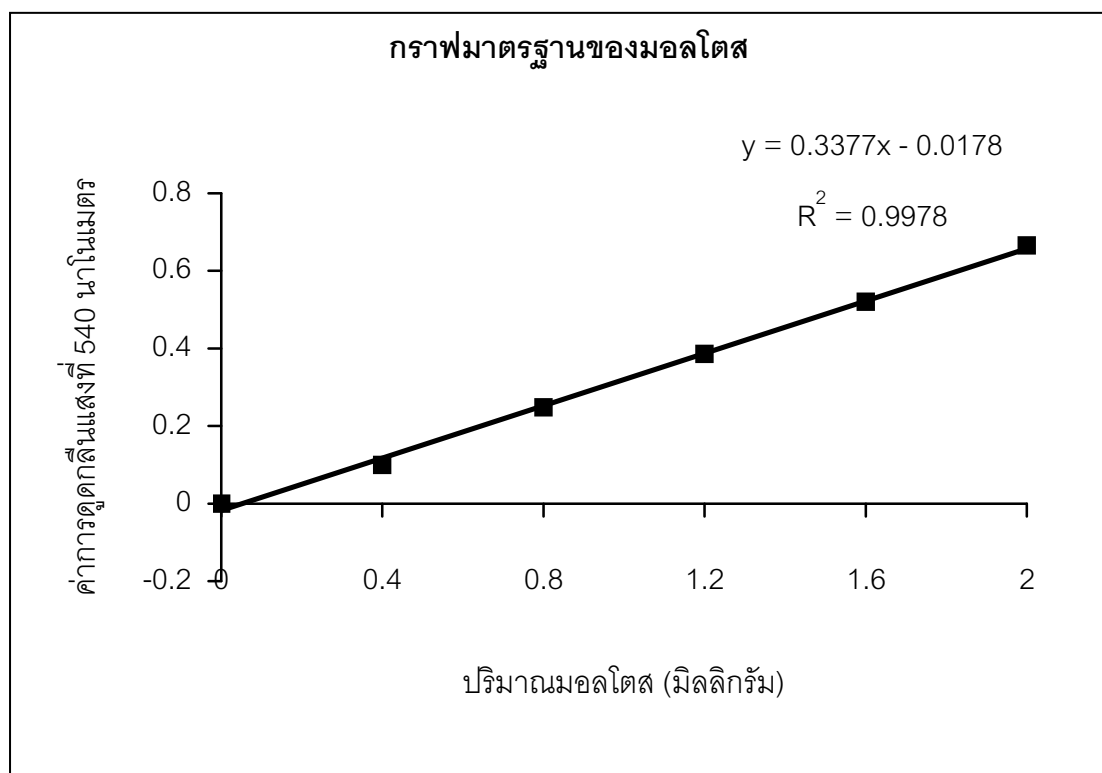
8.1.5 การคำนวณค่าแอดคิตีวี่ของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส คำนวณจาก

$$\text{หน่วย / มิลลิกรัม เอนไซม์} = \frac{A \times (df)}{B}$$

A = มิลลิกรัมมอลโตสจากการย่อยด้วยเอนไซม์

B = ปริมาตรเอนไซม์ที่ใช้ (ในหน่วยมิลลิลิตร)

df = อัตราการเจือจาง (dilution factor)



ภาพผนวกที่ ก-6 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณมอลโตส (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าแอกติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากตับอ่อนของสุกร

8.2 การย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (Li และคณะ, 2003)

8.2.1 ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 100 มิลลิกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่หลอดทดลองที่มีฝาเกลียวปิด(screw cap tube) ปิเปตสารละลายฟอสเฟสบัฟเฟอร์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในโซเดียมคลอไรด์เข้มข้น 0.006 โมลาร์ พีเอช (pH) 6.9 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายให้เข้ากัน

8.2.2 นำหลอดทดลองแช่ในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที

8.2.3 ปิเปตสารละลายเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส 16.56 ไมโครลิตร (ใช้เอนไซม์ 5 หน่วย/ มิลลิกรัมสตาร์ชตัวอย่าง โดยเอนไซม์ที่ใช้มีแอกติวิตีจำเพาะ (specific activity) เท่ากับ 1,122 หน่วย/ มิลลิกรัมโปรตีน และมี 32 มิลลิกรัมโปรตีน/ มิลลิลิตร) นำหลอดทดลองแช่ในอ่างน้ำร้อนอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสที่มีการเขย่าตลอดเวลาด้วยความเร็ว 160 รอบ/ นาที นาน 6 ชั่วโมง

8.2.4 เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำสารละลายไปเหวี่ยงด้วยความเร็ว 7000 รอบ/ นาที นาน 5 นาที แยกส่วนใสด้านบนไปทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่อไป ส่วนสตาร์ชที่เหลือด้านล่าง นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นซ้ำ 3 ครั้งและเอทานอลร้อยละ 95 ซ้ำ 2 ครั้ง นำไปอบให้แห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเพื่อนำไปตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานของเม็ดสตาร์ชด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ต่อไป

8.3 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดโดยวิธีฟีนอล-ซัลฟูริก (Dubois และคณะ, 1956)

8.3.1 การเตรียมกราฟมาตรฐานกลูโคส

8.3.1.1 เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสมาตรฐานความเข้มข้นร้อยละ 0.1 (น้ำหนัก/ ปริมาตร) จากนั้นนำสารละลายกลูโคสมาเจือจางอีกครั้งให้เป็นความเข้มข้นร้อยละ 0.01

8.3.1.2 ปิเปตสารละลายน้ำตาลกลูโคสให้มีความเข้มข้นต่างๆ ดังแสดงในตารางผนวกที่ ก-3

ตารางผนวกที่ ก-3 การเตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

หลอดที่	ปริมาตรสารละลายกลูโคสความเข้มข้นร้อยละ 0.01 ที่ต้องปิเปต (มิลลิลิตร)	ปริมาตรน้ำกลั่นที่ต้องเติม (มิลลิลิตร)	คิดเป็นความเข้มข้นของกลูโคส (ไมโครกรัม/ มิลลิลิตร)
1	0	1.0	0
2	0.1	0.8	20
3	0.4	0.6	40
4	0.6	0.4	60
5	0.8	0.2	80
6	1.0	0	100

8.3.1.3 ปิเปตสารละลายฟีนอลความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว

8.3.1.4 ปิเปตกรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันอย่างรวดเร็ว ตั้งทิ้งไว้ในตู้ดูดควันเป็นเวลา 30 นาที

8.3.1.5 นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐาน ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของน้ำตาลในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (ดังภาพผนวกที่ ก-3)

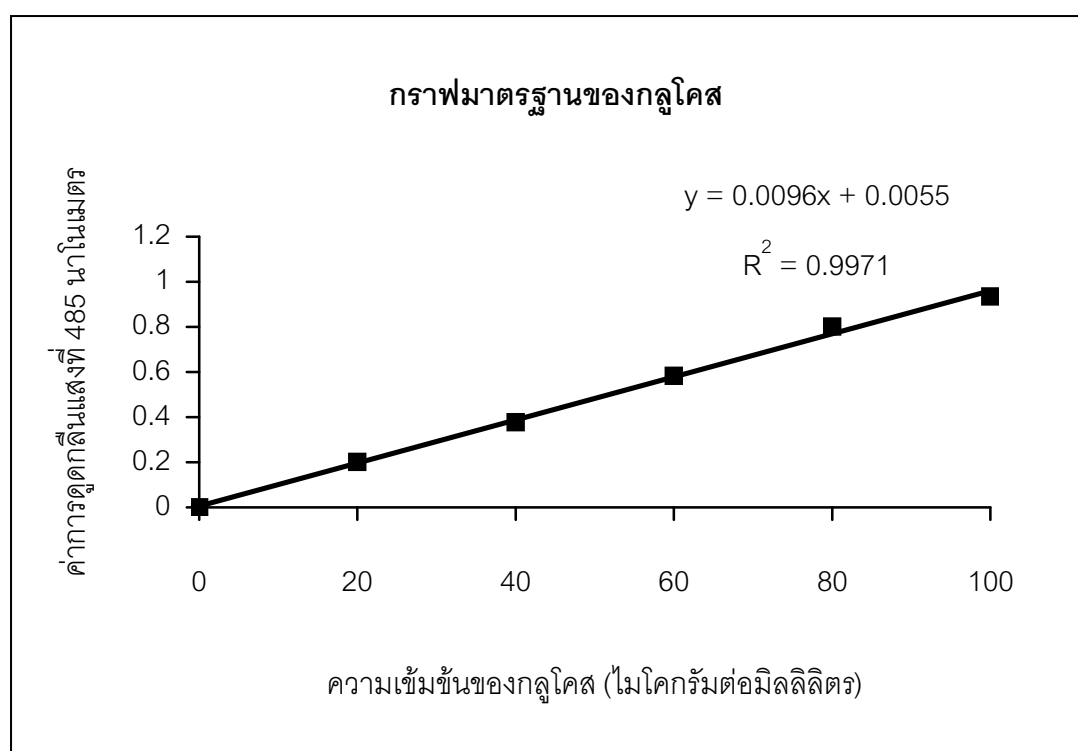
8.3.2 การเตรียมตัวอย่าง

8.3.2.1 ทำการเจือจางให้ตัวอย่างมีความเข้มข้นไม่เกิน 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

8.3.2.2 ปิเปตสารละลายตัวอย่างปริมาตร 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นทำตามขั้นตอนในข้อ 8.3.1.3 ถึง 8.3.1.5

นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้เทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคสและคำนวณความเข้มข้นของกลูโคส (ปริมาณคาร์โบไฮเดรต) ทั้งหมดในหน่วยไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร (1 มิลลิลิตรของสารละลาย) โดยคูณอัตราการเจือจาง (dilution factor) ของตัวอย่างสตาร์ชด้วย จากนั้นคูณด้วย 1,000 เพื่อปรับให้เป็นหน่วยมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และคูณด้วย 10 มิลลิลิตร (ของสารละลาย) (มาจากการใช้

ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ในการทำละลาย 100 มิลลิกรัมสตาร์ชแห้งในช่วงชั้น เริ่มต้นการย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสในข้อ 8.2.1) เพื่อจะคำนวณค่าปริมาณความเข้มข้นของกลูโคสทั้งหมดในหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อการย่อยสตาร์ชแห้ง 100 มิลลิกรัมด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ซึ่งก็คือ ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ (% enzyme hydrolysis) ของสตาร์ช ดัดแปร (Hoover และ Manuel, 1996a)



ภาพผนวกที่ ก-7 กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร สำหรับเทียบค่าปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมด

9. ร้อยละการละลายและกำลังการฟองตัว (ดัดแปลงจาก Leach และคณะ, 1959)

ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.5 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่หลอดเหวี่ยงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นปริมาตร 25 มิลลิลิตร แช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เขย่าตลอดเวลา 30 นาที ด้วยอัตราเร็ว 140 รอบต่อนาที แล้วเหวี่ยงในเครื่องหมุนเหวี่ยง ความเร็ว 8,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที ดูดของเหลวใส ตอนบนทั้งหมดใส่ภาชนะอบแห้งที่ทราบน้ำหนักแน่นอน นำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสข้ามคืนจนน้ำหนักคงที่ ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกค่าน้ำหนักเอาไว้ น้ำหนักที่ได้หลังจากการอบจะเป็นน้ำหนักส่วนที่ละลายน้ำ ส่วนสตาร์ชเปียกซึ่งเหลืออยู่ในหลอดเหวี่ยงนำมาชั่งเป็นน้ำหนักสตาร์ชที่ฟองตัว จากนั้นนำค่าที่ได้มาคำนวณร้อยละการละลายและกำลังการฟองตัว โดยคำนวณจาก

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

$$\text{กำลังการฟองตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสตาร์ชที่ฟองตัวแล้ว} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง} \times (100 - \text{ร้อยละของการละลาย})}$$

10. การวิเคราะห์ความใส หรือค่าร้อยละแสงส่องผ่าน (Craig และคณะ, 1989)

ชั่งตัวอย่างสตาร์ช 0.05 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ใส่หลอดทดลองที่มีฝาปิดขนาด 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน นำหลอดทดลองแช่ในอ่างน้ำเดือดนาน 30 นาที โดยเขย่าหลอดทดลองตลอดเวลา เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนดนำตัวอย่างออกจากอ่างน้ำเดือด และทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง นำไปวัดค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (% light transmittance) ที่ความยาวคลื่น 650 นาโนเมตร ซึ่งก่อนทำการวัดควรเขย่าหลอดทดลองให้เข้ากัน โดยใช้ น้ำกลั่น เป็นแบลนด์

ภาคผนวก ข
ตารางผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข-1 ค่าสีของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ค่าสี		
	L*	a*	b*
native starch	97.96 ± 0.00 ^a	0.02 ± 0.00 ^{de}	0.95 ± 0.04 ^c
10-100-4	97.30 ± 0.40 ^{abc}	-0.02 ± 0.01 ^e	1.06 ± 0.11 ^c
10-100-16	97.36 ± 0.16 ^{ab}	0.03 ± 0.03 ^{de}	1.29 ± 0.18 ^c
10-120-4	97.29 ± 0.11 ^{abc}	0.00 ± 0.06 ^e	1.20 ± 0.21 ^c
10-120-16	96.64 ± 0.42 ^{bc}	0.29 ± 0.15 ^{bc}	2.22 ± 0.23 ^{ab}
20-100-4	97.32 ± 0.34 ^{ab}	0.01 ± 0.05 ^e	1.07 ± 0.16 ^c
20-100-16	97.32 ± 0.21 ^a	0.23 ± 0.09 ^{bcd}	1.82 ± 0.25 ^b
20-120-4	97.42 ± 0.23 ^{ab}	0.04 ± 0.07 ^{de}	1.16 ± 0.28 ^c
20-120-16	96.86 ± 0.01 ^{bc}	0.38 ± 0.05 ^{ab}	2.06 ± 0.01 ^{ab}
30-100-4	97.24 ± 0.11 ^{abc}	0.04 ± 0.05 ^{de}	1.18 ± 0.18 ^c
30-100-16	96.38 ± 0.21 ^{cd}	0.35 ± 0.12 ^{ab}	2.23 ± 0.28 ^{ab}
30-120-4	97.23 ± 0.12 ^{abc}	0.09 ± 0.07 ^{cde}	1.25 ± 0.08 ^c
30-120-16	95.68 ± 1.32 ^d	0.53 ± 0.23 ^a	2.33 ± 0.43 ^a

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัย
 สำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

ตารางผนวกที่ ข-2 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วย
ความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชข้าวเจ้าโดยน้ำหนักแห้ง 100 กรัม)
native starch	28.93 ± 1.99 ^e
10-100-4	30.73 ± 0.21 ^{de}
10-100-16	31.95 ± 0.66 ^{bcd}
10-120-4	33.21 ± 1.64 ^{abc}
10-120-16	34.71 ± 1.49 ^a
20-100-4	31.75 ± 0.07 ^{cd}
20-100-16	33.00 ± 1.01 ^{abcd}
20-120-4	33.41 ± 0.81 ^{abc}
20-120-16	34.44 ± 0.23 ^{ab}
30-100-4	32.81 ± 1.63 ^{abcd}
30-100-16	34.36 ± 1.62 ^{ab}
30-120-4	34.02 ± 0.54 ^{abc}
30-120-16	35.22 ± 1.17 ^a

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัย
สำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

ตารางผนวกที่ ข-3 ค่าร้อยละความเป็นผลึกของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปร
ด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ร้อยละความเป็นผลึก*
native starch	16.49 ± 0.04
10-100-4	16.65 ± 0.06
10-100-16	16.50 ± 0.04
10-120-4	16.68 ± 0.06
10-120-16	16.83 ± 0.05
20-100-4	17.29 ± 0.07
20-100-16	16.21 ± 0.08
20-120-4	16.10 ± 0.04
20-120-16	14.20 ± 0.04
30-100-4	14.46 ± 0.02
30-100-16	13.88 ± 0.06
30-120-4	11.03 ± 0.04
30-120-16	10.62 ± 0.03

หมายเหตุ * เป็นค่าเฉลี่ยจากการคำนวณพื้นที่ใต้กราฟเอ็กเรย์ดิฟเฟรกชัน 3 ซ้ำ ± SD จากการวิเคราะห์ตัวอย่างในเครื่องเอ็กเรย์ดิฟเฟรกโตมิเตอร์ 1 ซ้ำ (สุ่มตัวอย่างจากสตาร์ชดัดแปรทั้ง 2 ซ้ำในแต่ละสภาวะการดัดแปรมาผสมกันตัวอย่างละ 50 เปอร์เซ็นต์)

ตารางผนวกที่ ข-4 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการตัดแปรและตัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	Peak (RVU)	Trough (RVU)	Breakdown (RVU)	Final viscosity (RVU)	Setback (RVU)	Peak Time (min)	Pasting Temp. (° C)
native starch	491.05 ± 0.91 ^{ef}	314.04 ± 9.84 ^e	177.00 ± 5.42 ^{de}	557.17 ± 5.78 ^{bc}	243.13 ± 4.07 ^{ab}	5.12 ± 0.12 ^{gh}	79.15 ± 0.00 ^g
10-100-4	508.40 ± 0.71 ^{cd}	317.44 ± 1.56 ^e	190.96 ± 2.47 ^{bcd}	541.82 ± 7.75 ^{cd}	224.38 ± 9.31 ^{bc}	5.42 ± 0.07 ^{ef}	79.21 ± 0.04 ^g
10-100-16	505.58 ± 12.02 ^{de}	308.59 ± 2.00 ^e	197.00 ± 1.30 ^{bc}	536.00 ± 0.59 ^{de}	227.42 ± 2.60 ^{bc}	5.33 ± 0.00 ^f	79.20 ± 0.00 ^g
10-120-4	522.32 ± 1.00 ^{bc}	317.53 ± 2.68 ^e	204.80 ± 6.07 ^b	558.48 ± 20.53 ^{bc}	240.96 ± 17.86 ^{ab}	5.42 ± 0.07 ^{ef}	78.75 ± 0.57 ^g
10-120-16	511.71 ± 12.23 ^{cd}	270.15 ± 5.45 ^f	241.57 ± 4.45 ^a	526.30 ± 14.02 ^{de}	256.15 ± 19.47 ^a	4.99 ± 0.08 ^h	78.54 ± 0.27 ^g
20-100-4	535.13 ± 7.64 ^b	370.34 ± 1.83 ^c	164.79 ± 13.85 ^{ef}	608.38 ± 9.72 ^a	238.05 ± 11.55 ^{ab}	5.47 ± 0.42 ^e	80.77 ± 0.02 ^f
20-100-16	508.19 ± 8.81 ^{cd}	357.42 ± 0.95 ^d	150.77 ± 6.69 ^f	570.82 ± 2.57 ^b	213.40 ± 1.63 ^c	5.19 ± 0.08 ^g	81.39 ± 0.27 ^{ef}
20-120-4	532.07 ± 2.62 ^b	382.09 ± 2.06 ^b	149.99 ± 14.29 ^f	618.96 ± 8.67 ^a	236.88 ± 10.73 ^{ab}	5.46 ± 0.02 ^{ef}	82.22 ± 0.90 ^d
20-120-16	555.40 ± 7.98 ^a	370.03 ± 4.80 ^c	185.38 ± 7.42 ^{cd}	623.75 ± 1.65 ^a	253.73 ± 3.15 ^a	5.33 ± 0.00 ^f	81.57 ± 0.09 ^{de}
30-100-4	482.27 ± 9.52 ^f	408.67 ± 1.12 ^a	73.61 ± 9.93 ^g	569.99 ± 4.09 ^b	161.32 ± 5.21 ^d	6.34 ± 0.09 ^d	85.00 ± 0.28 ^{bc}
30-100-16	387.73 ± 8.75 ^h	352.88 ± 7.42 ^d	34.86 ± 2.09 ^{hi}	440.44 ± 8.16 ^g	87.57 ± 0.74 ^f	6.84 ± 0.00 ^b	86.28 ± 0.35 ^a
30-120-4	448.44 ± 3.23 ^g	404.57 ± 0.91 ^a	43.88 ± 7.07 ^h	517.75 ± 5.42 ^e	113.19 ± 4.51 ^e	6.65 ± 0.07 ^c	84.62 ± 0.30 ^c
30-120-16	401.29 ± 4.42 ^h	382.59 ± 2.00 ^b	18.71 ± 1.24 ⁱ	475.58 ± 1.77 ^f	93.00 ± 0.24 ^f	7.00 ± 0.00 ^a	85.65 ± 0.07 ^{ab}

a,...,h = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

ตารางผนวกที่ ข-5 ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์
native starch	46.34 ± 3.49 ^d
10-100-4	42.88 ± 2.53 ^d
10-100-16	46.13 ± 4.10 ^d
10-120-4	45.43 ± 0.42 ^d
10-120-16	46.10 ± 3.25 ^d
20-100-4	42.10 ± 2.36 ^d
20-100-16	42.49 ± 0.69 ^d
20-120-4	51.23 ± 0.93 ^c
20-120-16	51.46 ± 0.91 ^c
30-100-4	60.62 ± 1.85 ^b
30-100-16	59.71 ± 0.09 ^b
30-120-4	68.45 ± 2.10 ^a
30-120-16	63.17 ± 1.19 ^b

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

ตารางผนวกที่ ข-6 ค่ากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ค่ากำลังการพองตัว	ค่าร้อยละการละลาย
native starch	8.84 ± 0.51^a	4.14 ± 0.47^{cd}
10-100-4	8.85 ± 0.52^a	3.98 ± 0.69^d
10-100-16	9.38 ± 0.35^a	4.18 ± 0.18^{cd}
10-120-4	9.06 ± 0.36^a	4.55 ± 0.63^{bcd}
10-120-16	9.72 ± 0.33^a	5.61 ± 1.09^{ab}
20-100-4	9.13 ± 0.71^a	3.52 ± 0.86^d
20-100-16	9.23 ± 0.35^a	3.56 ± 0.52^d
20-120-4	9.43 ± 0.53^a	4.55 ± 0.73^{bcd}
20-120-16	9.20 ± 0.46^a	5.33 ± 0.21^{abc}
30-100-4	7.83 ± 0.54^b	6.16 ± 0.02^a
30-100-16	6.83 ± 0.03^c	6.19 ± 0.62^a
30-120-4	7.39 ± 0.17^{bc}	6.00 ± 0.23^a
30-120-16	7.24 ± 0.03^{bc}	6.45 ± 0.53^a

a,...,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย $\pm$ SD (n=2)

ตารางผนวกที่ ข-7 ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสง (% light transmittance) ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและดัดแปรด้วยความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ค่าร้อยละการส่องผ่าน
native starch	16.11 ± 0.00 ^{ab}
10-100-4	16.53 ± 2.73 ^a
10-100-16	17.29 ± 1.20 ^a
10-120-4	16.23 ± 0.71 ^{ab}
10-120-16	17.99 ± 1.36 ^a
20-100-4	13.92 ± 1.82 ^b
20-100-16	10.13 ± 1.16 ^c
20-120-4	10.58 ± 0.22 ^c
20-120-16	9.42 ± 0.33 ^c
30-100-4	11.23 ± 0.01 ^c
30-100-16	9.23 ± 0.18 ^c
30-120-4	10.00 ± 0.95 ^c
30-120-16	9.13 ± 0.69 ^c

a,...,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

ตารางผนวกที่ ข-8 ค่าความชื้นของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการดัดแปรและภายหลังดัดแปรด้วย
ความร้อนขึ้น

ตัวอย่าง	ร้อยละความชื้น
native starch	11.80 ± 0.96 ^{abcd}
10-100-4	10.63 ± 0.78 ^{de}
10-100-16	10.59 ± 0.62 ^{de}
10-120-4	10.99 ± 0.85 ^{bcde}
10-120-16	10.93 ± 1.03 ^{cde}
20-100-4	12.18 ± 0.29 ^{abc}
20-100-16	12.12 ± 0.21 ^{abc}
20-120-4	11.22 ± 0.02 ^{bcde}
20-120-16	10.28 ± 0.94 ^e
30-100-4	12.64 ± 0.82 ^a
30-100-16	12.39 ± 0.25 ^{ab}
30-120-4	12.14 ± 0.38 ^{abc}
30-120-16	11.75 ± 0.10 ^{abcd}

a,...,e = ตัวเลขที่มีตัวอักษรกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันคือไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัย
สำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ค่าในตารางคือ ค่าเฉลี่ย ± SD (n=2)

ภาคผนวก ค
การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

ตารางผนวกที่ ค-1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ
 และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความสว่าง (L*) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on lightness

The GLM Procedure
 Dependent Variable: L

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	8.79476154	0.73289679	3.96	0.0100*
Error	13	2.40755000	0.18519615		
Corrected Total	25	11.20231154			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	L Mean
0.785085	0.443139	0.430344	97.11269

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	8.79476154	0.73289679	3.96	0.0100*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	2.23270833	1.11635417	6.03	0.0141*
temp effect	1	0.87783750	0.87783750	4.74	0.0485*
time effect	1	1.55550417	1.55550417	8.40	0.0125*
moisturextemp interaction	2	0.00682500	0.00341250	0.02	0.9818
moisturextime interaction	2	1.52145833	0.76072917	4.11	0.0414*
timextemp interaction	1	1.00450417	1.00450417	5.42	0.0366*
moisturextempxtime interaction	2	0.04040833	0.02020417	0.11	0.8975
control vs rest	1	1.55551571	1.55551571	8.40	0.0125*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความเป็นสีแดง (a^*) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on redness

The GLM Procedure
Dependent Variable: a

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	0.78863685	0.06571974	7.18	0.0006*
Error	13	0.11893750	0.00914904		

Corrected Total 25 0.90757435

R-Square Coeff Var Root MSE a Mean
0.868950 62.75336 0.095651 0.152423

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	0.78863685	0.06571974	7.18	0.0006*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	0.12834908	0.06417454	7.01	0.0086*
temp effect	1	0.07706667	0.07706667	8.42	0.0124*
time effect	1	0.45871350	0.45871350	50.14	<.0001*
moisturextemp interaction	2	0.00242508	0.00121254	0.13	0.8770
moisturextime interaction	2	0.04152325	0.02076162	2.27	0.1428
timextemp interaction	1	0.04100267	0.04100267	4.48	0.0541
moisturextempxtime interaction	2	0.00410058	0.00205029	0.22	0.8023
control vs rest	1	0.03545601	0.03545601	3.88	0.0707

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on yellowness

The GLM Procedure
Dependent Variable: b

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	6.50448262	0.54204022	11.50	<.0001*
Error	13	0.61280450	0.04713881		
Corrected Total	25	7.11728712			

R-Square Coeff Var Root MSE b Mean
0.913899 14.28639 0.217115 1.519731

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	6.50448262	0.54204022	11.50	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	0.39380833	0.19690417	4.18	0.0397*
temp effect	1	0.41081667	0.41081667	8.72	0.0112*
time effect	1	4.20066667	4.20066667	89.10	<.0001*
moisturextemp interaction	2	0.22240833	0.11120417	2.36	0.1336
moisturextime interaction	2	0.19200833	0.09600417	2.04	0.1700
timextemp interaction	1	0.15360000	0.15360000	3.26	0.0943
moisturextempxtime interaction	2	0.16927500	0.08463750	1.80	0.2049
control vs rest	1	0.76249928	0.76249928	16.18	0.0015*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-4 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อปริมาณอะไมโลสของสตาร์ข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on amylose

The GLM Procedure
Dependent Variable: yield

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	74.69473846	6.22456154	4.72	0.0047*
Error	13	17.15860000	1.31989231		
Corrected Total	25	91.85333846			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	yield Mean
0.813196	3.485473	1.148866	32.96154

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	74.69473846	6.22456154	4.72	0.0047*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	8.71907500	4.35953750	3.30	0.0692
temp effect	1	17.99201667	17.99201667	13.63	0.0027*

time effect	1	9.98460000	9.98460000	7.56	0.0165*
moisturextemp interaction	2	2.59585833	1.29792917	0.98	0.4002
moisturextime interaction	2	0.06557500	0.03278750	0.02	0.9755
timextemp interaction	1	0.01706667	0.01706667	0.01	0.9112
moisturextempxtime interaction	2	0.10505833	0.05252917	0.04	0.9611
control vs rest	1	35.21548846	35.21548846	26.68	0.0002*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของ สตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure
Dependent Variable: peak

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	61197.21778	5099.76815	94.72	<.0001*
Error	13	699.94885	53.84222		
Corrected Total	25	61897.16663			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	peak Mean
0.988692	1.492912	7.337726	491.5042

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	61197.21778	5099.76815	94.72	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	47264.69258	23632.34629	438.92	<.0001*
temp effect	1	321.49440	321.49440	5.97	0.0296*
time effect	1	4198.14402	4198.14402	77.97	<.0001*
moisturextemp interaction	2	1059.43518	529.71759	9.84	0.0025*
moisturextime interaction	2	5935.72181	2967.86090	55.12	<.0001*
timextemp interaction	1	1346.40240	1346.40240	25.01	0.0002*
moisturextempxtime interaction	2	1070.87047	535.43524	9.94	0.0024*
control vs rest	1	0.45693	0.45693	0.01	0.9280

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดต่ำสุดเมื่อเริ่มการทำให้เย็น (trough) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure

Dependent Variable: through1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	41771.60538	3480.96712	194.23	<.0001*
Error	13	232.98145	17.92165		
Corrected Total	25	42004.58683			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	through1 Mean
0.994453	1.207871	4.233397	350.4842

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	41771.60538	3480.96712	194.23	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	31303.18133	15651.59066	873.33	<.0001*
temp effect	1	22.44600	22.44600	1.25	0.2833
time effect	1	4212.17510	4212.17510	235.03	<.0001*
moisturextemp interaction	2	1337.17826	668.58913	37.31	<.0001*
moisturextime interaction	2	704.69311	352.34655	19.66	0.0001*
timextemp interaction	1	2.48970	2.48970	0.14	0.7154
moisturextempxtime interaction	2	1311.71431	655.85715	36.60	<.0001*
control vs rest	1	2877.72757	2877.72757	160.57	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-7 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าเบรกดาว์น (breakdown) ของสตาร์ช ข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure
Dependent Variable: breakdown

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	128040.1130	10670.0094	186.39	<.0001*
Error	13	744.1965	57.2459		
Corrected Total	25	128784.3095			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	breakdown Mean
0.994221	5.365180	7.566101	141.0223

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	128040.1130	10670.0094	186.39	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	117308.7110	58654.3555	1024.60	<.0001*
temp effect	1	174.2048	174.2048	3.04	0.1047
time effect	1	0.0113	0.0113	0.00	0.9890
moisturextemp interaction	2	2779.4520	1389.7260	24.28	<.0001*
moisturextime interaction	2	3187.9849	1593.9925	27.84	<.0001*
timextemp interaction	1	1463.9064	1463.9064	25.57	0.0002*
moisturextempxtime interaction	2	321.3215	160.6607	2.81	0.0970
control vs rest	1	2804.5211	2804.5211	48.99	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-8 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าความหนืดสุดท้าย (final viscosity) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure
Dependent Variable: finalvi

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	67926.22326	5660.51861	73.08	<.0001*
Error	13	1006.88525	77.45271		
Corrected Total	25	68933.10851			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	finalvi Mean
0.985393	1.601158	8.800722	549.6473

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	67926.22326	5660.51861	73.08	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	44552.41161	22276.20580	287.61	<.0001*
temp effect	1	474.90407	474.90407	6.13	0.0278*
time effect	1	9800.23335	9800.23335	126.53	<.0001*
moisturextemp interaction	2	1712.79666	856.39833	11.06	0.0016*
moisturextime interaction	2	6201.91373	3100.95686	40.04	<.0001*
timextemp interaction	1	1780.54827	1780.54827	22.99	0.0004*
moisturextempxtime interaction	2	3280.96491	1640.48245	21.18	<.0001*
control vs rest	1	122.45068	122.45068	1.58	0.2307

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าเซตแบค (setback) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure

Dependent Variable: setback

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	94048.03175	7837.33598	91.19	<.0001*
Error	13	1117.22750	85.94058		
Corrected Total	25	95165.25925			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	setback Mean
0.988260	4.654631	9.270414	199.1654

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	94048.03175	7837.33598	91.19	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	80178.25311	40089.12655	466.47	<.0001*
temp effect	1	290.99770	290.99770	3.39	0.0887
time effect	1	1162.18084	1162.18084	13.52	0.0028*
moisturextemp interaction	2	2413.69776	1206.84888	14.04	0.0006*
moisturextime interaction	2	3446.59833	1723.29916	20.05	0.0001*
timextemp interaction	1	1915.84270	1915.84270	22.29	0.0004*
moisturextempxtime interaction	2	453.49111	226.74555	2.64	0.1092
control vs rest	1	4186.97020	4186.97020	48.72	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อเวลาที่เกิดความหนืดสูงสุด (peak time) ของ สตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure
Dependent Variable: peaktime

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	11.88593846	0.99049487	246.44	<.0001*
Error	13	0.05225000	0.00401923		

Corrected Total	25	11.93818846				
R-Square	Coeff Var	Root MSE	peaktime Mean			
0.995623	1.105744	0.063397	5.733462			
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F	
trt	12	11.88593846	0.99049487	246.44	<.0001*	
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F	
moisture effects	2	10.20472500	5.10236250	1269.49	<.0001*	
temp effect	1	0.01126667	0.01126667	2.80	0.1180	
time effect	1	0.00106667	0.00106667	0.27	0.6151	
moisturextemp interaction	2	0.16950833	0.08475417	21.09	<.0001*	
moisturextime interaction	2	0.58630833	0.29315417	72.94	<.0001*	
timextemp interaction	1	0.01926667	0.01926667	4.79	0.0474*	
moisturextempxtime interaction	2	0.06505833	0.03252917	8.09	0.0052*	
control vs rest	1	0.82873846	0.82873846	206.19	<.0001*	

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่ออุณหภูมิที่เกิดความหนืดสูงสุด (pasting temperature) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on RVA

The GLM Procedure
Dependent Variable: pasting

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	189.7632615	15.8136051	129.83	<.0001*
Error	13	1.5834500	0.1218038		
Corrected Total	25	191.3467115			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	pasting Mean		
0.991725	0.427087	0.349004	81.71731		

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	189.7632615	15.8136051	129.83	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	169.4587000	84.7293500	695.62	<.0001*
temp effect	1	0.0425042	0.0425042	0.35	0.5648
time effect	1	0.7176042	0.7176042	5.89	0.0305*
moisturextemp interaction	2	2.4145333	1.2072667	9.91	0.0024*
moisturextime interaction	2	1.9854333	0.9927167	8.15	0.0051*
timextemp interaction	1	0.4959375	0.4959375	4.07	0.0647
moisturextempxtime interaction	2	0.3679000	0.1839500	1.51	0.2572
control vs rest	1	14.2806490	14.2806490	117.24	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-12 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่ออุณหภูมิเริ่มต้น (T_0) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on DSC

The GLM Procedure

Dependent Variable: T_{onset}

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	109.3577462	9.1131455	279.45	<.0001*
Error	13	0.4239500	0.0326115		
Corrected Total	25	109.7816962			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Tonset Mean
0.996138	0.251305	0.180587	71.85962

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	109.3577462	9.1131455	279.45	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	51.66270833	25.83135417	792.09	<.0001*
temp effect	1	10.44120417	10.44120417	320.17	<.0001*
time effect	1	7.29303750	7.29303750	223.63	<.0001*
moisturextemp interaction	2	12.51395833	6.25697917	191.86	<.0001*
moisturextime interaction	2	9.25697500	4.62848750	141.93	<.0001*

timextemp interaction	1	7.00920417	7.00920417	214.93	<.0001*
moisturextempxtime interaction	2	6.62765833	3.31382917	101.62	<.0001*
control vs rest	1	4.55300032	4.55300032	139.61	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-13 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่ออุณหภูมิที่สสารชุดความร้อนสูงสุดพีคแรก (T_{p1}) ของสสารชีวจำ

Influence of moisture temperature and time on DSC

The GLM Procedure
Dependent Variable: Tpeak1

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	82.80874615	6.90072885	122.10	<.0001*
Error	13	0.73475000	0.05651923		
Corrected Total	25	83.54349615			
R-Square	Coeff Var	Root MSE	Tpeak1 Mean		
0.991205	0.309674	0.237738	76.77038		
Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	82.80874615	6.90072885	122.10	<.0001*
Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	38.00360833	19.00180417	336.20	<.0001*
temp effect	1	5.41500000	5.41500000	95.81	<.0001*
time effect	1	8.40166667	8.40166667	148.65	<.0001*
moisturextemp interaction	2	10.14187500	5.07093750	89.72	<.0001*
moisturextime interaction	2	4.82015833	2.41007917	42.64	<.0001*
timextemp interaction	1	8.14335000	8.14335000	144.08	<.0001*
moisturextempxtime interaction	2	5.69302500	2.84651250	50.36	<.0001*
control vs rest	1	2.19006282	2.19006282	38.75	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการตัดแปรรต่ออุณหภูมิที่สสารชุดความร้อนสูงสุดพีคที่สอง (T_{p2}) ของสสารข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on dsc

The GLM Procedure
Dependent Variable: Tpeak2

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	44642.96458	3720.24705	28828.8	<.0001*
Error	13	1.67760	0.12905		
Corrected Total	25	44644.64218			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Tpeak2 Mean
0.999962	0.686329	0.359230	52.34077

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	44642.96458	3720.24705	28828.8	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	38659.52208	19329.76104	149790	<.0001*
temp effect	1	14.19882	14.19882	110.03	<.0001*
time effect	1	15.61707	15.61707	121.02	<.0001*
moisturextemp interaction	2	7.72351	3.86175	29.93	<.0001*
moisturextime interaction	2	8.09476	4.04738	31.36	<.0001*
timextemp interaction	1	1.34427	1.34427	10.42	0.0066*
moisturextempxtime interaction	2	0.75916	0.37958	2.94	0.0883
control vs rest	1	5935.70493	5935.70493	45996.8	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-15 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่ออุณหภูมิสุดท้าย (T_c) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on DSC

The GLM Procedure
Dependent Variable: Tend

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	470.0758385	39.1729865	362.74	<.0001*
Error	13	1.4039000	0.1079923		
Corrected Total	25	471.4797385			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	Tend Mean
0.997022	0.384225	0.328622	85.52846

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	470.0758385	39.1729865	362.74	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	388.6036583	194.3018292	1799.22	<.0001*
temp effect	1	7.8432667	7.8432667	72.63	<.0001*
time effect	1	14.1680667	14.1680667	131.20	<.0001*
moisturextemp interaction	2	4.6353583	2.3176792	21.46	<.0001*
moisturextime interaction	2	8.8977083	4.4488542	41.20	<.0001*
timextemp interaction	1	0.8140167	0.8140167	7.54	0.0167*
moisturextempxtime interaction	2	0.6820083	0.3410042	3.16	0.0763
control vs rest	1	44.4317551	44.4317551	411.43	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-16 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลิตีในเซชัน ($T_c - T_o$) ของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on DSC

The GLM Procedure

Dependent Variable: Tc-To

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	250.4192462	20.8682705	275.97	<.0001*
Error	13	0.9830500	0.0756192		
Corrected Total	25	251.4022962			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	TcTo Mean
0.996090	2.011684	0.274990	13.66962

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	250.4192462	20.8682705	275.97	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	159.8999250	79.9499625	1057.27	<.0001*
temp effect	1	36.3342042	36.3342042	480.49	<.0001*
time effect	1	1.1310042	1.1310042	14.96	0.0019*
moisturextemp interaction	2	22.3248583	11.1624292	147.61	<.0001*
moisturextime interaction	2	3.1446583	1.5723292	20.79	<.0001*
timextemp interaction	1	3.0175042	3.0175042	39.90	<.0001*
moisturextempxtime interaction	2	4.0183583	2.0091792	26.57	<.0001*
control vs rest	1	20.5487337	20.5487337	271.74	<.0001*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-17 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าพลังงานเอนทาลปี (ΔH) ของสตาร์ช ข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on DSC

The GLM Procedure
Dependent Variable: enthalpy

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	62.51794615	5.20982885	59.95	<.0001*
Error	13	1.12970000	0.08690000		

Corrected Total 25 63.64764615

R-Square Coeff Var Root MSE enthalpy Mean
0.982251 2.827808 0.294788 10.42462

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	62.51794615	5.20982885	59.95	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	44.69702500	22.34851250	257.18	<.0001*
temp effect	1	9.81760417	9.81760417	112.98	<.0001*
time effect	1	0.95600417	0.95600417	11.00	0.0056*
moisturextemp interaction	2	4.39985833	2.19992917	25.32	<.0001*
moisturextime interaction	2	0.56105833	0.28052917	3.23	0.0727
timextemp interaction	1	0.00010417	0.00010417	0.00	0.9729
moisturextempxtime interaction	2	0.17025833	0.08512917	0.98	0.4015
control vs rest	1	1.91603365	1.91603365	22.05	0.0004*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-18 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา อะไมเลสของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on Enzyme hydrolysis

The GLM Procedure
Dependent Variable: yield

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	1876.788162	156.399013	32.21	<.0001*
Error	13	63.122500	4.855577		
Corrected Total	25	1939.910662			

R-Square Coeff Var Root MSE yield Mean
0.967461 4.300618 2.203537 51.23769

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	1876.788162	156.399013	32.21	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	1554.113425	777.056713	160.03	<.0001*
temp effect	1	169.761204	169.761204	34.96	<.0001*
time effect	1	0.456504	0.456504	0.09	0.7640
moisturextemp interaction	2	60.963658	30.481829	6.28	0.0124*
moisturextime interaction	2	26.557358	13.278679	2.73	0.1020
timextemp interaction	1	8.389837	8.389837	1.73	0.2114
moisturextempxtime interaction	2	4.467325	2.233662	0.46	0.6412
control vs rest	1	52.078849	52.078849	10.73	0.0060*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-19 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่ากำลังการพองตัวของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on swelling

The GLM Procedure

Dependent Variable: swelling

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	21.84716154	1.82059679	10.12	0.0001*
Error	13	2.33835000	0.17987308		
Corrected Total	25	24.18551154			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	swelling Mean
0.903316	4.918585	0.424114	8.622692

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	21.84716154	1.82059679	10.12	0.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	19.76355833	9.88177917	54.94	<.0001*
temp effect	1	0.10533750	0.10533750	0.59	0.4578
time effect	1	0.00120417	0.00120417	0.01	0.9360
moisturextemp interaction	2	0.08267500	0.04133750	0.23	0.7978
moisturextime interaction	2	1.37080833	0.68540417	3.81	0.0498*

timextemp interaction	1	0.07150417	0.07150417	0.40	0.5393
moisturextempxtime interaction	2	0.34975833	0.17487917	0.97	0.4041
control vs rest	1	0.10231571	0.10231571	0.57	0.4642

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-20 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการตัดแปรรูปต่อค่าร้อยละการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on solubility

The GLM Procedure
Dependent Variable: solute

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	26.89966154	2.24163846	6.34	0.0011*
Error	13	4.59345000	0.35334231		
Corrected Total	25	31.49311154			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	solute Mean
0.854144	12.03948	0.594426	4.937308

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	26.89966154	2.24163846	6.34	0.0011*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	17.60552500	8.80276250	24.91	<.0001*
temp effect	1	4.02620417	4.02620417	11.39	0.0050*
time effect	1	1.09653750	1.09653750	3.10	0.1016
moisturextemp interaction	2	1.90040833	0.95020417	2.69	0.1054
moisturextime interaction	2	0.15107500	0.07553750	0.21	0.8103
timextemp interaction	1	0.69020417	0.69020417	1.95	0.1856
moisturextempxtime interaction	2	0.05235833	0.02617917	0.07	0.9290
control vs rest	1	1.37734904	1.37734904	3.90	0.0700

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางผนวกที่ ค-21 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากผลของระดับความชื้น อุณหภูมิ และระยะเวลาในการดัดแปรต่อค่าร้อยละการส่งผ่านของแสงของสารสีขาวเจ้า

Influence of moisture temperature and time on turbidity

The GLM Procedure

Dependent Variable: transmit

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	12	289.7466154	24.1455513	17.98	<.0001*
Error	13	17.4616000	1.3432000		
Corrected Total	25	307.2082154			

R-Square	Coeff Var	Root MSE	transmit Mean
0.943160	8.981547	1.158965	12.90385

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trt	12	289.7466154	24.1455513	17.98	<.0001*

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
moisture effects	2	234.2231083	117.1115542	87.19	<.0001*
temp effect	1	4.1500167	4.1500167	3.09	0.1023
time effect	1	4.6816667	4.6816667	3.49	0.0846
moisturextemp interaction	2	5.0426083	2.5213042	1.88	0.1922
moisturextime interaction	2	14.7990083	7.3995042	5.51	0.0185*
timextemp interaction	1	3.7604167	3.7604167	2.80	0.1182
moisturextempxtime interaction	2	0.8177083	0.4088542	0.30	0.7427
control vs rest	1	22.2720821	22.2720821	16.58	0.0013*

หมายเหตุ * คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

บทคัดย่อ

สตาร์ชข้าวเจ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ได้ โดยที่การดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าจะช่วยทำให้สตาร์ชข้าวเจ้ามีการใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวางขึ้น จึงได้ทำการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น (HMT) ร่วมกับวิธีการทางเคมี คือการเชื่อมข้าม (CL) การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน (HP) และการย่อยด้วยกรด (AT) โดยทำการสลับลำดับของการดัดแปร เมื่อทำการตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ช พบว่า HMT ทำให้ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลง แต่ความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย อุณหภูมิในการเกิดการเจลาคีไนซ์ และซินเนอริซีส์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ ค่าการพองตัว การละลาย และความใสลดต่ำลง ส่วน CL ไม่ทำให้สตาร์ชมีขนาด รูปร่าง อุณหภูมิในการเกิดการเจลาคีไนซ์ และความต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์แตกต่างจากสตาร์ชที่ไม่ผ่านการดัดแปร แต่จะมีค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย การพองตัว การละลาย และความใสลดต่ำลง ในกรณีของ HP พบว่าบางส่วนของเม็ดสตาร์ชจะเกิดการหลอมเชื่อมติดกัน เกิดรอยบวม มีลักษณะกลวงบริเวณใจกลางเม็ดสตาร์ช มีค่าความหนืดสุดท้าย อุณหภูมิในการเกิดการเจลาคีไนซ์ ความต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ และซินเนอริซีส์ลดต่ำลง ในขณะที่ค่าความหนืดสูงสุด การพองตัว การละลายและความใสเพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาถึง AT สตาร์ชพบว่าเม็ดสตาร์ชจะมีลักษณะเป็นรูพรุน เกิดการแตกหักเป็นเม็ดสตาร์ชที่มีขนาดเล็กลง ค่าความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย อุณหภูมิในการเกิดการเจลาคีไนซ์ ความต้านทานการย่อยด้วยเอนไซม์ลดต่ำลง แต่จะมีค่าการพองตัว การละลาย ความใสและซินเนอริซีส์เพิ่มสูงขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบถึงการดัดแปรร่วมของวิธีการให้ความร้อนขึ้นและวิธีการทางเคมี พบว่าคุณสมบัติส่วนใหญ่จะอยู่ระหว่างการดัดแปรที่ใช้ร่วมกันนั้น โดยที่ลำดับของการดัดแปรมีผลต่อคุณสมบัติของสตาร์ชเพียงเล็กน้อย

ABSTRACT

Nonwaxy rice starch can be used in various food products. Modifying nonwaxy rice starch would extend its utilization. Therefore, nonwaxy rice starch was modified by heat-moisture treatment (HMT) incorporated with a chemical treatment, i.e., cross-linking (CL), hydroxypropylation (HP) and acid-thinning (AT). The order of HMT and chemical treatment was also investigated. It was found that HMT did not change size and shape of the starch granules but increased peak viscosity, final viscosity, gelatinization temperature and syneresis, and decreased enzyme resistance, swelling power, solubility and clarity. CL did not cause granule size and shape, gelatinization temperature, and enzyme resistance of the modified starch to be different from those of native starch. However, CL decreased peak viscosity, final viscosity, swelling power, solubility and clarity of the starch. Upon HP, it was shown that starch granules partially melted together showing granular collapse, and final viscosity, gelatinization temperature, enzyme resistance and syneresis of the starch decreased. On the other hand, peak viscosity, swelling power, solubility and clarity of the starch increased. After AT, starch granules became broken and more porous. The peak viscosity, final viscosity, gelatinization temperature, enzyme resistance of the starch decreased, while its swelling power, solubility, clarity and syneresis increased. The incorporation of HMT with a chemical treatment gave a modified starch whose properties were mostly in between those of each treatment. The order of the incorporation modification slightly affected properties of the modified starches.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
สารบัญภาพ.....	ณ
สารบัญตาราง	ฐ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
กระบวนการผลิตสตาร์ชข้าวเจ้า	4
คุณลักษณะทั่วไปของสตาร์ช	6
คุณสมบัติของสตาร์ช	11
สตาร์ชดัดแปร	21
การดัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนขึ้น	25
การดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้าม.....	34
การดัดแปรสตาร์ชด้วยการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน	42
การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด.....	50
การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีทางเคมีร่วมกับการให้ความร้อนขึ้น.....	57
3 วัตถุดิบ อุปกรณ์และวิธีการ	59
วัตถุดิบ	59
เครื่องมือและอุปกรณ์.....	59
สารเคมี	60
วิธีการดำเนินงานวิจัย	62

	หน้า
การวางแผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	66
สถานที่ทำการทดลอง	66
4 ผลการทดลองและการวิจารณ์	67
การดัดแปรสตาบิลิตี้ข้าวเจ้าโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับ	
วิธีการเชื่อมข้าม.....	67
การดัดแปรสตาบิลิตี้ข้าวเจ้าโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับ	
วิธีการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน	92
การดัดแปรสตาบิลิตี้ข้าวเจ้าโดยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับ	
วิธีการย่อยด้วยกรด.....	117
5 สรุปผลการทดลอง.....	141
บรรณานุกรม	144
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ	154
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลอง	172
ประวัติผู้วิจัย	186

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า	5
2	โครงสร้างของสายโมเลกุลอะไมโลส	7
3	โครงสร้างของสายโมเลกุลอะไมโลเพกติน	8
4	แผนภาพแสดงโครงสร้างของอะไมโลเพกตินในชั้น Lamella ของเม็ดสตาร์ช.	9
5	ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ช	15
6	การเจลาติไนเซชันของสตาร์ชเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC	16
7	การเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) และกลไกการคืนตัวของสตาร์ช.....	17
8	ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในส่วนผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous).....	19
9	โครงสร้างผลึกแบบ A และ B ของอะไมโลส.....	20
10	ปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับฟอสฟอรัสออกซีคลอไรด์	36
11	ปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟต.....	37
12	การเกิดปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน	43
13	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะปรากฏของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกันที่กำลังขยาย 190 600 และ 1900 เท่าตามลำดับ	68
14	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	69
15	รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	71
16	การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน.....	74
17	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน.....	76
18	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	80

ภาพที่		หน้า
19	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะปรากฏ ของสตาร์ชข้าวเจ้าภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ที่กำลังขยาย 190 600 และ 1900 เท่าตามลำดับ	81
20	ค่ากำลังการพองตัว-การละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร ด้วยวิธีต่างกัน	83
21	ค่าการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน	85
22	ปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน.....	86
23	การขึ้นเอนรีซีสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน.....	88
24	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะปรากฏ ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างหากำลังขยาย 190 600 และ 1900 เท่าตามลำดับ	91
25	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	97
26	รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	98
27	การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน.....	100
28	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	103
29	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปร ด้วยวิธีต่างกัน	106
30	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะปรากฏ ของสตาร์ชข้าวเจ้าภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ที่กำลังขยาย 190 600 และ 1900 เท่าตามลำดับ	107
31	ค่ากำลังการพองตัว-การละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร ด้วยวิธีต่างกัน	110
32	ค่าการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน	111
33	ปริมาณหมู่ไฮดรอกซีโพรพิเลชันในสตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการทำ ปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน	113

ภาพที่		หน้า
34	การเกิดขึ้นเนอริซีส์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	115
35	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะปรากฏ ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างหากที่กำลังขยาย 190 600 และ 1900 เท่าตามลำดับ	118
36	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	122
37	รูปแบบ X-ray diffraction ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	123
38	การเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน	124
39	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	129
40	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปร ด้วยวิธีต่างกัน	131
41	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงลักษณะปรากฏ ของสตาร์ชข้าวเจ้าภายหลังการย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส ที่กำลังขยาย 190 600 และ 1900 เท่าตามลำดับ	132
42	ค่ากำลังการพองตัว-การละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร ด้วยวิธีต่างกัน	135
43	ค่าการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการต่างกัน	136
44	ปริมาณสารละลายกลูโคส (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร) ของสตาร์ชที่ผ่าน การย่อยด้วยกรด	137
45	การขึ้นเนอริซีส์ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	139
46	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณอะไมโลส (กรัมต่อสตาร์ชข้าว 100 กรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร	157
47	กราฟมาตรฐานมอลโตสระหว่างปริมาณมอลโตส (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร	160
48	กราฟมาตรฐานกลูโคสระหว่างปริมาณกลูโคส (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 485 นาโนเมตร	163

ภาพที่		หน้า
49	ลักษณะสเปกตรัมที่วัดได้ ก) แสดงพื้นที่ใต้พีค (A) ข) แสดงพื้นที่ทั้งหมดของสเปกตรัม (B).....	166
50	กราฟมาตรฐานระหว่างปริมาณฟอสฟอรัสเพนออกไซด์ (มิลลิกรัม) กับค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร.....	169
51	ปริมาณโพพิลีนไกลคอล (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) กับค่าการดูดกลืนแสง.....	171

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบภายในข้าวหัก	5
2	คุณลักษณะที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน	7
3	ความแตกต่างและวิธีการเตรียมการตัดแปรสตาร์ชแต่ละชนิด	22
4	คุณสมบัติและประโยชน์ของสตาร์ชดัดแปร	24
5	ค่าสีของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีต่างกัน	70
6	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของ สตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	79
7	การแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน.....	91
8	ค่าสีของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีต่างกัน	96
9	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของ สตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	104
10	การแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	116
11	ค่าสีของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีต่างกัน	120
12	การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อนต่อการเกิดเจลลิตีในเซชันของ สตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	130
13	การแยกตัวของของเหลว (syneresis) ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน.....	140
14	วิธีวิเคราะห์แอสติวิตีของเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส	159
15	การเตรียมกราฟมาตรฐานมอลโตส	160
16	การเตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 0-100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร	163
17	ปริมาณความชื้นของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีต่างกัน	173
18	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	173
19	ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	174
20	ร้อยละความเป็นผลึกข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีต่างกัน.....	175

ตารางที่		หน้า
21	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน.....	175
22	ร้อยละกำลังการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่าน การดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน.....	176
23	ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร โดยวิธีการต่างกัน	176
24	ร้อยละปริมาณฟอสฟอรัสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	177
25	ปริมาณความชื้นของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน	177
26	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	178
27	ร้อยละความเป็นผลึกข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน.....	178
28	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน.....	178
29	ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	179
30	ร้อยละกำลังการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่าน การดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน.....	180
31	ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร โดยวิธีการต่างกัน	180
32	ปริมาณหมู่ไฮดรอกซีโพรพิลของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร โดยวิธีการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิล	181
33	ปริมาณความชื้นของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน	181
34	ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีต่างกัน	182
35	ร้อยละความเป็นผลึกข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน.....	182
36	ค่าร้อยละการถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสของสตาร์ชข้าวเจ้า ที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีต่างกัน.....	182
37	ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน	183

ตารางที่		หน้า
38	ร้อยละกำลังการพองตัวและค่าการละลายของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่าน การดัดแปรโดยวิธีการต่างกัน.....	184
39	ค่าร้อยละการส่องผ่านของแสงของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการดัดแปร โดยวิธีการต่างกัน.....	184
40	ความเข้มข้นกลูโคสในส่วนสารละลายที่ได้จากการกรองสารแขวนลอย สตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการย่อยด้วยกรด.....	185

คำอธิบายสัญลักษณ์

HMT	=	การให้ความร้อนขึ้น
CL	=	การเชื่อมข้าม
HP	=	การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน
AT	=	การย่อยด้วยกรด
HMT+CL	=	การให้ความร้อนขึ้นก่อนการเชื่อมข้าม
HMT+HP	=	การให้ความร้อนขึ้นก่อนการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน
HMT+AT	=	การให้ความร้อนขึ้นก่อนการย่อยด้วยกรด
CL+HMT	=	การเชื่อมข้ามก่อนการให้ความร้อนขึ้น
HP+HMT	=	การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชันก่อนการให้ความร้อนขึ้น
AT+HMT	=	การย่อยด้วยกรดก่อนการให้ความร้อนขึ้น

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ประเทศไทยสามารถปลูกข้าวได้ผลผลิตมากจนพอเพียงกับการบริโภคของประชาชนและยังมีข้าวอีกจำนวนมากเหลือจากการบริโภค โดยเหตุนี้ประเทศไทยจึงได้ส่งข้าวไปขายต่างประเทศและนำรายได้เข้าประเทศปีจำนวนมากในแต่ละปี ปัจจุบันสินค้าข้าวและผลิตภัณฑ์จากข้าวทำรายได้ให้กับประเทศไทยมากกว่าสินค้าเกษตรอื่นๆ หลายชนิด หนึ่งในผลิตภัณฑ์จากข้าวคือสตาร์ชข้าวบริสุทธิ์ หรือสตาร์ชข้าวเจ้า (rice starch) ซึ่งได้จากการนำแป้งข้าว (rice flour) ไปสกัดแยกโปรตีนออกจนเหลือปริมาณอยู่น้อยกว่าร้อยละ 1 และสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสตาร์ชข้าวดัดแปร (modified rice starch) ชนิดต่างๆ สำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่องทั้งชนิดที่เป็นอาหารและไม่ใช่อาหาร สตาร์ชข้าวเจ้ามีขนาดเม็ดสตาร์ชเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับสตาร์ชทางการค้าชนิดอื่นๆ โดยมีขนาดโดยประมาณ 2-8 ไมโครเมตร ทำให้สตาร์ชข้าวเจ้าสามารถดูดซับสารหลายชนิดลงในพื้นผิวได้ เช่น สารให้กลิ่นรสและสารอิมัลซิไฟเออร์ สตาร์ชข้าวเจ้าเป็นสตาร์ชที่มีสีขาวมากและทำให้เกิดความเรียบเนียน มันวาวเมื่อใช้ในการเคลือบผิวยาและขนมประเภทลูกอม นอกจากนี้มีการย่อยและดูดซึมได้ง่าย จึงมีการใช้มากในผลิตภัณฑ์อาหารสำหรับเด็ก

การดัดแปรสตาร์ชสามารถทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพ เช่น การให้ความร้อนชื้น (heat-moisture treatment) การอบผานเนื้อ (annealing) การทำให้ละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble) การลดขนาดเม็ดสตาร์ชโดยวิธีทางกล และวิธีทางเคมี เช่น การเชื่อมข้าม (cross-linking) การแทนที่ด้วยหมู่ทางเคมี (substitution) การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชด้วยกรด (acid-thinning)

การดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีทางเคมี เช่น การเชื่อมข้าม (crosslinking) เป็นการทำให้เกิดพันธะเชื่อมข้ามระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช ทำให้โครงสร้างของสตาร์ชมีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของสตาร์ช เพิ่มความทนทานต่อกรด ความร้อน และแรงเฉือน การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน (hydroxypropylation) เป็นการทำปฏิกิริยากับโพรพิลีนออกไซด์ในสภาวะต่างทำให้สตาร์ชที่ได้มีความคงตัวต่อการแช่แข็งและการละลาย มีความคงตัวต่อการเก็บในที่เย็น (Tuschhoff, 1986) การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชด้วยกรด (acid-thinning) เป็นการตัดโมเลกุลของ

สตาร์ชให้มีขนาดเล็กลง จนได้ความหนืดที่ต้องการ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังคงรูปของเม็ดสตาร์ช ให้ความหนืดขณะร้อนต่ำกว่าสตาร์ชดิบ ทำให้สามารถใช้ได้ในปริมาณมากขึ้น เมื่อเกิดการคั่วจะได้เจลที่แข็ง สามารถยืดเกาะกันได้ดี ใช้ในผลิตภัณฑ์ลูกกวาด และขนมหวาน เนื่องจากมีความหนืดต่ำขณะร้อน สะดวกในการเคลือบพิมพ์ ได้เจลที่แข็งและใสกว่าสตาร์ชดิบ (Imerson, 1992)

การดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น เป็นการให้ความร้อนแก่สตาร์ชที่อุณหภูมิสูงกว่าการเปลี่ยนสถานะกลาส (glass transition temperature, T_g) (Gunaratne และ Hoover, 2002) ที่มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 35 และอุณหภูมิต่ำกว่าการเกิดเจลลาติไนเซชันของสตาร์ช ส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านความร้อน ความหนืด การดูดซึมน้ำ และการพองตัวเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นยังมีอยู่น้อยและไม่ครอบคลุม (Jacobs และ Delcour, 1998) รายงานที่เกี่ยวกับการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการทางเคมีร่วมกับการให้ความร้อนขึ้นยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะกรณีของสตาร์ชข้าว จึงมีแนวความคิดที่จะทำการดัดแปรสตาร์ชข้าวด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี โดยวิธีทางเคมีที่ใช้คือการเชื่อมข้าม การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน และการลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชด้วยกรด ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร หลังจากนั้นนำสตาร์ชดัดแปรที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ทางกายภาพและเคมี เพื่อตรวจสอบคุณลักษณะเชิงโครงสร้างและคุณสมบัติ ผลการศึกษาจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาสตาร์ชข้าวเจ้าให้มีสมบัติเฉพาะ ใช้งานได้หลากหลาย และสามารถนำไปใช้ปรับปรุงผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีสตาร์ชข้าวเป็นองค์ประกอบให้ดียิ่งขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี โดยใช้ปฏิกิริยาเคมี (การเชื่อมข้าม การทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิเลชัน หรือการย่อยด้วยกรด) และลำดับการดัดแปรที่แตกต่างกัน

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 การผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยวิธีการเชื่อมข้าม (cross-linking) โดยการทำปฏิกิริยากับโซเดียมไตรเมตาฟอสเฟตที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 5 ของน้ำหนักสตาร์ชแห้งที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

1.3.2 การผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยวิธีการทำปฏิกิริยาไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน (hydroxypropylation) โดยการทำปฏิกิริยากับโพรพิลีนออกไซด์ร้อยละ 10 ของน้ำหนักสตาร์ชแห้งที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

1.3.3 การผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยวิธีการย่อยด้วยกรด (acid-thinning) ทำการดัดแปรสตาร์ชข้าวเจ้าด้วยกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 (v/v) ที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นระยะเวลา 1 ชั่วโมง

1.3.4 การผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ดัดแปรด้วยการให้ความร้อนขึ้นร่วมกับวิธีการทางเคมี ด้วยการให้ความร้อนขึ้นที่ความชื้นร้อยละ 20 อุณหภูมิ 120 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ร่วมกับวิธีการทางเคมี (ข้อ 4.1, 4.2 และ 4.3) โดยมีการสลับลำดับก่อน-หลังของการดัดแปร

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อให้ได้สตาร์ชข้าวเจ้าดัดแปรชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเฉพาะตัวและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายเพิ่มมากขึ้น

1.4.2 เพื่อให้เกิดทางเลือกใหม่สำหรับการปรับปรุงและพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องกับสตาร์ชข้าวเจ้า และเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับสตาร์ชหรือสตาร์ชข้าวเจ้า

1.4.3 เพื่อให้เป็นความรู้พื้นฐานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาสตาร์ชดัดแปรจากพืชชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากข้าวเจ้า

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตสตาร์ชข้าวเจ้า (rice starch)

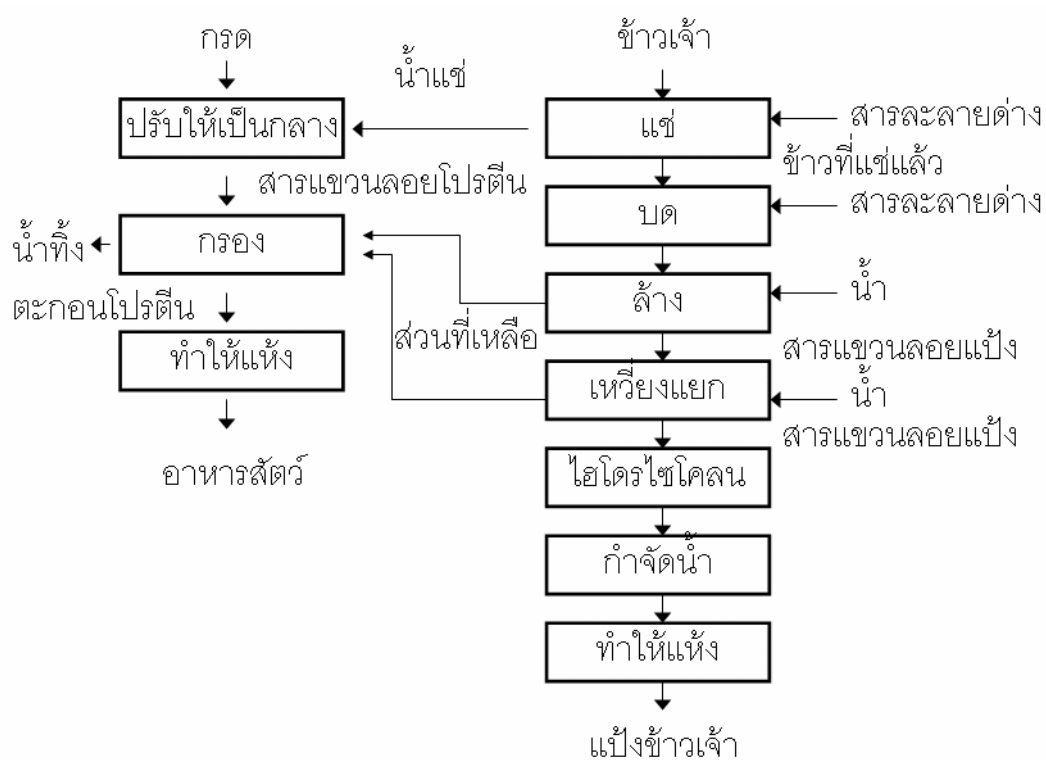
ข้าวที่ใช้ในกระบวนการผลิตสตาร์ชข้าวเจ้าจะเป็นข้าวหักหรือข้าวเกร็ดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง ข้าวหักมีองค์ประกอบต่างๆ ดังตารางที่ 1 การผลิตสตาร์ชข้าวเจ้าเชิงการค้าในประเทศไทยนั้นจะเป็นการไม่เปียก โดยไม่ข้าวหักให้เป็นแป้งข้าว (rice flour) แล้วทำการสกัดเอาโปรตีนและสิ่งแปลกปลอมออกจนเกือบหมดจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เรียกว่าสตาร์ชข้าวเจ้า (rice starch)

กระบวนการผลิตสตาร์ชข้าว เริ่มจากนำข้าวหักมาล้างทำความสะอาด แยกสิ่งแปลกปลอม แคล้งในสารละลายต่างพร้อมกับการกวนข้าว ทำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อแยกโปรตีนที่ติดอยู่กับสตาร์ชในเมล็ดข้าวเจ้าออกปล่อยให้ข้าวตกตะกอน แยกส่วนใสที่มีโปรตีน (steep liquor) ออก ทำซ้ำขั้นตอนนี้จนกระทั่งเมล็ดข้าวนิ่ม แล้วนำเมล็ดข้าวมา บดเปียกด้วยสารละลายต่าง ล้างน้ำ และเหวี่ยงแยกโปรตีนส่วนที่ติดอยู่ในสารแขวนลอยสตาร์ชออก นำมาผ่านไฮโดรไซโคลน กำจัดน้ำแล้วมาทำให้แห้ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสตาร์ชข้าวเจ้า (Knight, 1969) กระบวนการผลิตสตาร์ชข้าวเจ้าแสดงไว้ในภาพที่ 1 สำหรับ steep liquor ที่แยกได้นำมาปรับสภาพให้เป็นกลางด้วยกรด ทำให้โปรตีนตกตะกอนแล้วกรองออก ทำให้แห้ง ใช้เป็นอาหารสัตว์ การผลิตสตาร์ชข้าวเจ้าสามารถเริ่มผลิตจากแป้งข้าวได้ โดยนำแป้งข้าวมาแช่น้ำค้างอ่อน (สารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 0.3) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งสามารถละลายโปรตีนออกมาได้ร้อยละ 86 (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2543) จากนั้นจึงผ่านกระบวนการขั้นตอนต่อไป ดังข้างต้น

ตารางที่ 1 องค์ประกอบภายในข้าวหัก

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	12.0
แป้ง	79.2
โปรตีน	7.0
ไขมัน	0.4
เถ้า	0.5
ส่วนที่เหลือ	0.9

ที่มา: Knight (1969)



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้า

ที่มา: Knight (1969)

2.2 คุณลักษณะทั่วไปของสตาร์ช

2.2.1 ขนาดและรูปร่างของเม็ดสตาร์ช

สตาร์ชข้าวเจ้าจะมีการจัดเรียงตัวกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินเป็นเม็ดสตาร์ช (starch granule) ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 2 จนถึง 8 ไมครอน ไม่ค่อยพบเม็ดสตาร์ชข้าวเจ้าที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน เม็ดสตาร์ชข้าวเจ้ามีลักษณะเป็นทรงหลายเหลี่ยม มักเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ขนาดประมาณ 150 ไมครอน

2.2.2 องค์ประกอบของสตาร์ช

สตาร์ชเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6: 10: 5 มีสูตรทางเคมีโดยทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วยหน่วยของกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) โดยเชื่อมที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่อัลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า reducing end group สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะไมโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะไมโลเพกติน) ซึ่งเรียงตัวในแนวรัศมีกัน สตาร์ชจากแหล่งที่ต่างกันจะมีอัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินแตกต่างกันดังตารางที่ 2 ทำให้คุณสมบัติของสตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน

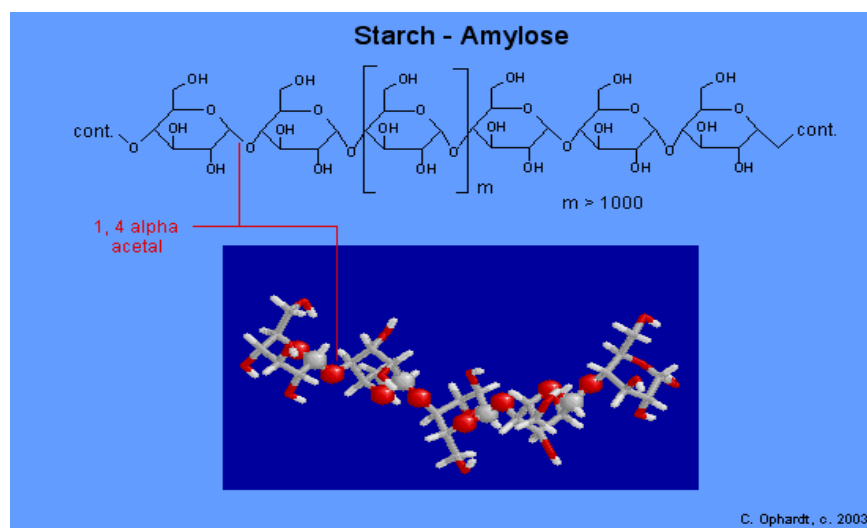
อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมด้วยพันธะ α -(1, 4) glucosidic linkage ดังภาพที่ 2 อะไมโลสสามารถรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน และสารประกอบต่างๆ โดยสารประกอบเหล่านี้จะไม่ละลายในน้ำ และมีอะไมโลสพันเป็นเกลียวล้อมรอบ โครงสร้างของอะไมโลสเมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คลายตัว (interrupted helix) หรือม้วนอิสระ (random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้องอะไมโลสอยู่ในลักษณะเป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คลายตัว สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 ถึง 160,000 มีโมเลกุลเป็นม้วนอิสระและจะไม่ละลายในสารละลาย สำหรับอะไมโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 อาจจะมีบางส่วนละลายได้ โมเลกุลจะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (Whistler และ Daniel, 1984)

ตารางที่ 2 คุณลักษณะที่สำคัญของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน

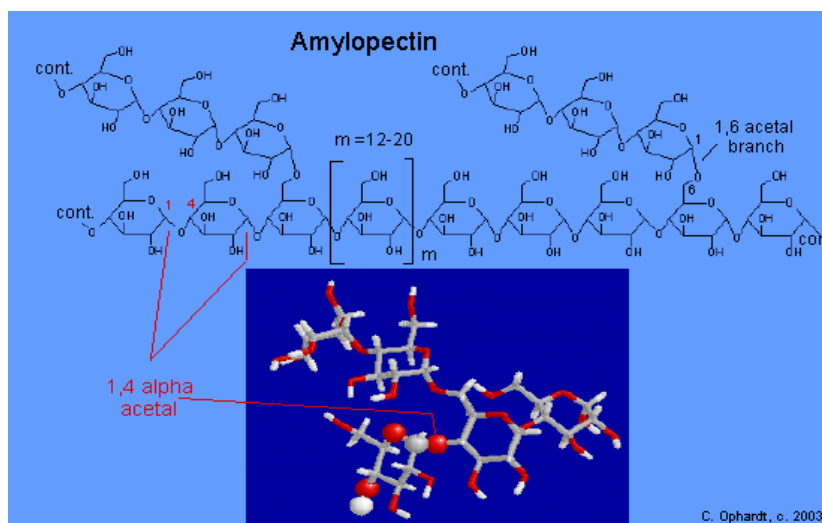
คุณลักษณะ	อะไมโลส	อะไมโลเพกติน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาล กลูโคสเกาะกันเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	α -(1,4)	α -(1,4) และ α -(1,6)
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10,000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีม่วงแดง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับ ตัวเป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

ที่มา: กล้าณรงค์ และเกอกุล (2546)



ภาพที่ 2 โครงสร้างของสายโมเลกุลอะไมโลส

ที่มา: www.elmhurst.edu



ภาพที่ 3 โครงสร้างของสายโมเลกุลอะไมโลเพกติน

ที่มา: www.elmhurst.edu

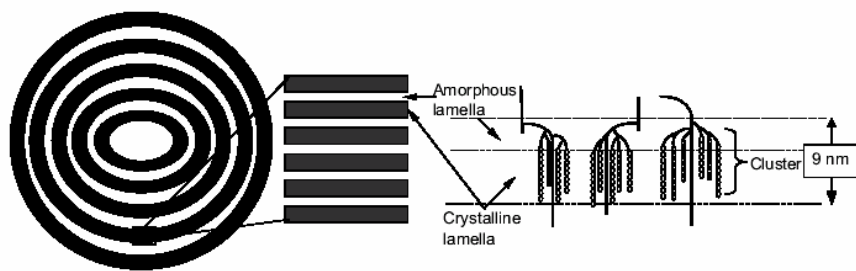
อะไมโลเพกติน

อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1, 4) glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -(1, 6) glucosidic linkage ดังภาพที่ 3

หน่วยกลูโคสที่มีพันธะ α -(1, 6) glucosidic linkage มีอยู่ประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณหน่วยกลูโคสในอะไมโลเพกตินทั้งหมด DP (degree of polymerization) ของอะไมโลเพกตินในสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักประมาณ 10^7 ถึง 10^9 ดาลตัน และมีอัตราในการคินตัวต่ำ เนื่องจากมีโครงสร้างแบบกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะไมโลเพกตินประกอบด้วยสาย (chain) ภายในโมเลกุล 3 ชนิด คือ

1. สาย A (A-chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure)
2. สาย B (B-chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่นๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะไมโลเพกตินประกอบด้วยสาย A และ B ในอัตราส่วน 0.8-0.9: 1
3. สาย C (C-chain) เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะไมโลเพกตินแต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วยสาย C เพียง 1 สายเท่านั้น



ภาพที่ 4 แผนภาพแสดงโครงสร้างของอะไมโลเพกตินในชั้น Lamella ของเม็ดสตาร์ช
ที่มา: ดัดแปลงจาก Tester, Karkalas, และ Qi (2004)

ขนาดโมเลกุลของอะไมโลเพกตินมีตั้งแต่ขนาดเล็ก ซึ่งมี DP ประมาณ 15 หน่วย ประกอบด้วยสาย A และ B ขนาดเล็ก จนถึงโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งมี DP ประมาณ 45 หน่วย ประกอบด้วยสาย B สายยาว สายเหล่านี้รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) Robin, Asaoka และ Guilbot (1974) ได้ศึกษาโครงสร้างอย่างละเอียดของอะไมโลเพกตินโดยใช้วิธีการ debranching และ β -amylase ย่อยอะไมโลเพกตินจากสตาร์ชมันฝรั่ง โครงสร้างอะไมโลเพกตินแสดงไว้ในภาพที่ 4 การเกิดเกลียวคู่ของอะไมโลเพกตินต้องใช้พันธะไฮโดรเจนและแรงวนเดอรัวาลในการเชื่อมต่อกัน กิ่งของอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชสามารถเกิดผลึกได้ ทั้งกิ่งที่อยู่ใกล้กันในกลุ่มเดียวกัน หรือเกิดขึ้นระหว่างกลุ่มที่ใกล้เคียงกัน

การจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชมี 2 ลักษณะคือ ลักษณะแรกมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นเป็นผลึก (crystalline region หรือ trichite) เป็นส่วนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ เป็นส่วนที่ทำให้สตาร์ชสามารถคงรูปอยู่ได้ การเรียงตัวเป็นไปในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดสตาร์ช บริเวณนี้จะตอบสนองต่อแสงโพลาไรซ์ ทำให้เกิดเงาดำคาด เม็ดสตาร์ชเป็นกาบาท (birefringence) โดยเส้นพาดขวางสีดำ (maltese cross) มีส่วนตัดอยู่ที่รอยบุ๋มของเม็ดสตาร์ช (hilum) นอกจากนี้ยังตอบสนองต่อรังสีเอกซ์เรย์ด้วย โดยสตาร์ชข้าวเจ้าจะมีลักษณะแบบ A (A-type) (Zobel, 1998) ส่วนผลึกเป็นบริเวณที่มีการพองตัวอย่างจำกัด ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นได้ อีกส่วนหนึ่งมีการจัดเรียงอย่างหลวมเรียกว่า บริเวณอสัณฐาน (amorphous region) ซึ่งมีการขดตัวในส่วนกิ่งก้านของอะไมโลเพกตินจำนวนมาก (เป็นจุดเชื่อม) ทำให้โครงสร้างไม่เป็นระเบียบ คุณนี้ได้ดีกว่าบริเวณผลึกและไวต่อปฏิกิริยาเคมี เม็ดสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสหรืออะไมโลเพกตินที่ใกล้เคียงกันอาจมีผลึกที่ไม่เท่ากัน หรือมีการจัดเรียงของผลึกแตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อเกิดการสุก (gelatinization) จะมีรูปแบบการพองตัวและความหนืดแตกต่างกัน (Leach และคณะ, 1959)

2.2.3 องค์ประกอบอื่นๆ ที่อยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ช

องค์ประกอบอื่นๆ ที่อยู่ร่วมกับเม็ดสตาร์ช แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่สตาร์ชที่แยกได้จากสตาร์ช (particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลายและผนังเซลล์ซึ่งมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเม็ดสตาร์ช (surface material) ซึ่งสามารถสกัดได้โดยไม่ต้องทำลายเม็ดสตาร์ช เช่น เยื่อหุ้มอะไมโลพลาส
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเม็ดสตาร์ช (internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเม็ดสตาร์ช เช่น ไขมันในสตาร์ชจากธัญพืช หมูฟอสเฟตในสตาร์ชมันสำปะหลัง และสารประกอบไนโตรเจน

องค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อคุณลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดสตาร์ช ได้แก่ ไขมัน โปรตีน เถ้าและฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันในสตาร์ชแต่ละชนิด

(1) ไขมัน

โดยส่วนใหญ่สตาร์ชจะมีองค์ประกอบที่เป็นไขมันอยู่ต่ำกว่าร้อยละ 1 ชนิดของไขมันที่อยู่ในสตาร์ชมีผลต่อคุณสมบัติที่อยู่ในสตาร์ช จะต้องทำการกำจัดไขมันที่อยู่ออกจากสตาร์ชโดยสกัดด้วยตัวทำละลายหรือย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์

ไขมันที่มีในสตาร์ชมีทั้งที่อยู่บริเวณที่พื้นผิวของเม็ดสตาร์ช ซึ่งประกอบไปด้วยไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) กลูโคลิพิด (glycolipids) ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) และไขมันที่กระจายอยู่ทั่วไปในเม็ดสตาร์ช โดยเชื่อมพันธะกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวมๆ สตาร์ชจากพืชหัวและถั่วไม่มีไขมันภายในเม็ดสตาร์ช สำหรับสตาร์ชจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี จะมีไขมันภายในเม็ดสตาร์ช ซึ่งมีสมบัติและปริมาณที่แตกต่างกัน

ไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดสตาร์ชจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะและคุณสมบัติของสตาร์ช โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับกับน้ำของสตาร์ช เมื่อเกิดฟิล์มและสตาร์ชสุกหรือเพสต์ (paste) ไขมันจะรวมตัวกับอะไมโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนเฉื่อย (inert complex) ทำให้เกิดลักษณะทึบแสงหรือขุ่น นอกจากนี้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งอยู่ที่ผิวของสตาร์ชจะทำให้เกิดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน สตาร์ชจากธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี มีกลิ่นที่แรงกว่าสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียว สตาร์ชมันสำปะหลัง และสตาร์ชมันฝรั่ง เนื่องจากมีองค์ประกอบไขมันที่สูงกว่า

(2) โปรตีน

ภายในสสารจะมีส่วนประกอบของโปรตีนต่ำกว่าร้อยละ 1 โดยโปรตีนจะเกาะอยู่ที่บริเวณผิวของเม็ดสสาร ทำให้เกิดผลกระทบต่อสสารคือ ทำให้เกิดประจุบนพื้นผิวของเม็ดสสาร มีผลต่อการกระจายตัวของเม็ดสสาร ทำให้สสารมีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัว และอัตราการเกิดเจลลิตไนซ์เปลี่ยนแปลงไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างการทำปฏิกิริยาของกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป โดยส่วนใหญ่ปฏิกิริยาเช่นนี้จะเกิดกับสสารจากธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง

(3) เถ้า

สสารโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม สามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ ปริมาณเถ้าในสสารมันฝรั่งจะสัมพันธ์กับหมู่ฟอสฟอรัสในสสาร สำหรับเถ้าจากสสารจากธัญพืชจะสัมพันธ์กับปริมาณฟอสฟอริฟิเคชัน

(4) ฟอสฟอรัส

สสารโดยส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสน้อยกว่าร้อยละ 0.1 โดยสสารจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสฟอริฟิเคชันประมาณร้อยละ 0.02-0.06 และสำหรับสสารจากพืชหัวและราก เช่น สสารจากมันฝรั่งจะมีปริมาณฟอสฟอรัสประมาณร้อยละ 0.3-0.4 ฟอสฟอรัสในสสารอยู่ในรูปฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 ของหน่วยกลูโคส

2.3 คุณสมบัติของสสาร

2.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในสสารและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เม็ดสสารจะดูดซึมน้ำจนเกิดความสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดสสารกับความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมจะ

ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สสารส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลง่ายใต้นบรรยากาศปกติจะมีความชื้นร้อยละ 10 ถึง 17

น้ำที่อยู่ในเม็ดสตาร์ชมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ น้ำในผลึก น้ำที่ถูกยึดเกาะ (bound water) และน้ำในรูปอิสระ (free water) โดยมีการจับกับสตาร์ชได้แน่นตามลำดับ สตาร์ชที่มีความชื้นร้อยละ 8 ถึง 10 สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าสตาร์ชที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของสตาร์ช จะได้สตาร์ชโมโนไฮเดรต $[n(C_6H_{10}O_6 \cdot H_2O)]$

น้ำหรือของเหลวชนิดอื่นสามารถแพร่และผ่านเข้าไปในร่างแหของไมเซลล์ (micelles) ในเม็ดสตาร์ชได้อย่างอิสระ ทดสอบได้จากการแขวนลอยของเม็ดสตาร์ชในสารละลายไอโอดีนแห้ง ในกระบวนการผลิตสตาร์ช หรืออาจจะมียู้อยู่แล้วในสตาร์ชธรรมชาติแต่มีขนาดขยายใหญ่ขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการทำแห้งในกระบวนการผลิตสตาร์ช

สตาร์ชดิบจะไม่ละลายน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาติไนซ์เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชที่อยู่ใกล้ๆ กันหรือ water bridges แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดสตาร์ชเกิดการพองตัวทำให้การละลาย ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการเกิด birefringence จะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายคือ ชนิดของสตาร์ช ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช สิ่งเจือปนภายในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลาย สตาร์ชและการตัดแปรทางเคมี รูปแบบในการพองตัวและการละลายของเม็ดสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป

ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวและความสามารถในการละลายของเม็ดสตาร์ชมีหลายประการ เช่น (1) ชนิดของสตาร์ช (2) ความแข็งแรงและลักษณะของร่างแหภายในเม็ดสตาร์ช (3) สิ่งเจือปนในเม็ดสตาร์ชที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (4) คุณสมบัติหลังการตัดแปรทางเคมี (5) ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในสภาวะที่เกิดการพองตัว

2.3.2 ความใสของสตาร์ชสุก

ในช่วงแรกสารแขวนลอยสตาร์ชจะมีลักษณะทึบแสง แต่เมื่อมีการให้ความร้อนและเกิดการเจลาติไนซ์ สตาร์ชจะละลายและกระจายตัวในน้ำได้ดีขึ้นและเปลี่ยนมาอยู่ในลักษณะสตาร์ช

สุก (paste) ทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้มากขึ้น ความใสสุดท้ายของสตาร์ชสุกจะขึ้นกับชนิดของสตาร์ช โดยสตาร์ชสุกของพืชหัวและกลุ่มแวกซีสตาร์ช (waxy starch) จะโปร่งใสมากกว่า ในขณะที่กลุ่มสตาร์ชจากธัญพืชจะทึบแสงมากกว่า โดยทั่วไปความใสจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะการกระจายตัวและลักษณะการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ช

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดความขุ่นของสตาร์ชสุกในระหว่างกระบวนการเก็บรักษา ได้แก่ 1) ความสามารถในการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เมื่อเม็ดสตาร์ชมีการพองตัวได้มากขึ้นจะทำให้แสงสามารถส่องผ่านได้เพิ่มมากขึ้น และในทางตรงข้ามถ้าเม็ดสตาร์ชมีความสามารถในการพองตัวได้น้อยก็ทำให้แสงส่องผ่านเม็ดสตาร์ชได้ลดลง 2) การหลุดออกมาภายนอกเม็ดสตาร์ช (leaching) ของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน 3) ความยาวของสายอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดรีโทรกราเดชัน โดยสายของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินต้องมีความยาวที่เหมาะสมจึงเกิดการรีโทรกราเดชันได้ดีที่สุด ซึ่งถ้าสตาร์ชมีความสามารถในการเกิดรีโทรกราเดชันได้มาก ก็จะส่งผลทำให้เกิดการส่องผ่านของแสงลดลง 4) พันธะที่เกิดขึ้นทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลของสตาร์ช 5) ไขมัน โดยการมีองค์ประกอบของไขมันรวมอยู่ในเม็ดสตาร์ชจะส่งผลกระทบต่อลักษณะและคุณสมบัติของสตาร์ช โดยจะลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกันของสตาร์ช เมื่อเกิดฟิล์มและสตาร์ชสุก ไขมันจะรวมตัวกับอะไมโลส เกิดเป็น inert complex ทำให้เกิดลักษณะทึบแสงหรือขุ่น 6) การเกิดพันธะเชื่อมข้าม (cross-linking) และการเกิดหมู่แทนที่ (substitution) การเกิดพันธะเชื่อมข้ามในระดับที่ต่ำจะมีผลทำให้สตาร์ชสุกมีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเม็ดสตาร์ชมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถจับกับน้ำและเกิดการพองตัวได้มากขึ้นโดยที่ยังคงสภาพความเป็นเม็ดสตาร์ชไว้ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับสตาร์ชที่ยังไม่ผ่านการดัดแปร และในทางตรงกันข้ามถ้าหากสตาร์ชเกิดการเชื่อมข้ามในระดับที่สูงจะมีผลทำให้สตาร์ชสุกมีความขุ่นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการขัดขวางการพองตัวของเม็ดสตาร์ช (Fleche, 1985) ส่วนการเกิดการแทนที่ที่มีผลทำให้สตาร์ชสุกมีความใสเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากหมู่แทนที่ที่เกิดการขัดขวางการเกิดพันธะของเม็ดสตาร์ช จึงมีผลทำให้น้ำสามารถแทรกซึมเข้าไปในเม็ดสตาร์ชและเกิดการจับกันระหว่างโมเลกุลของน้ำกับสตาร์ชได้มาก

2.3.3 การเกิดเจลาตินในเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของสตาร์ชประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดสตาร์ชอยู่ในรูปของร่างแหไมเซลล์ (micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดสตาร์ชละลายในน้ำเย็นได้

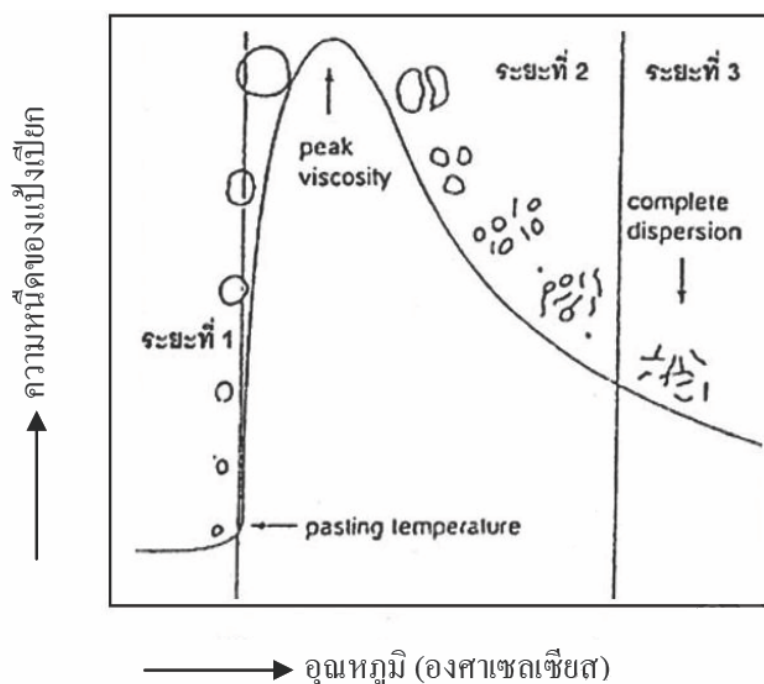
ยาก ดังนั้นขณะที่สตาร์ชอยู่ในน้ำเย็นเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach และคณะ, 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายสตาร์ช พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดสตาร์ชจะดูดน้ำแล้วพองตัว ส่วนผสมของน้ำกับสตาร์ชจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลือน้อยรอบๆ เม็ดสตาร์ชเหลือน้อยลง เม็ดสตาร์ชเคลื่อนไหวได้ยากขึ้นทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ เมื่อตรวจวัดโดยเครื่องมือวัดความหนืดมักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในสตาร์ชแต่ละชนิด

การเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดสตาร์ชแบ่งได้ 3 ระยะดังแสดงในภาพที่ 5 คือระยะแรกเม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้เนื่องจากร่างแหระหว่างไมเซลลียึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดสตาร์ชยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบ birefringence ได้ เมื่อมีการใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิกับสารละลายน้ำสตาร์ชจนถึงประมาณ 65 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของสตาร์ช) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดสตาร์ชจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างไมเซลลียลายในเม็ดสตาร์ชจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดสตาร์ชจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดสตาร์ชมีการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้าง birefringence ความหนืดของสารละลายน้ำสตาร์ชจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว สตาร์ชที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมาซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดสตาร์ชจะไม่แน่นอน การละลายของสตาร์ชจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ชจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ต่างๆ ได้ดีกว่า

ความหนืดสูงสุดของสารละลายสตาร์ชในระหว่างการเกิดเจลาติไนซ์จะแปรเปลี่ยนไปตามชนิดของสตาร์ชซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะไมโลสและอะไมโน นอกจากระดับของอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิดและองค์ประกอบของสตาร์ช เช่น ปริมาณอะไมโน สัดส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดสตาร์ช เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดสตาร์ชมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้เม็ดสตาร์ชมีขนาดต่างกัน สตาร์ชชนิดต่างๆ จะมีลักษณะการเกิดเจลที่ต่างกัน (กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2543)

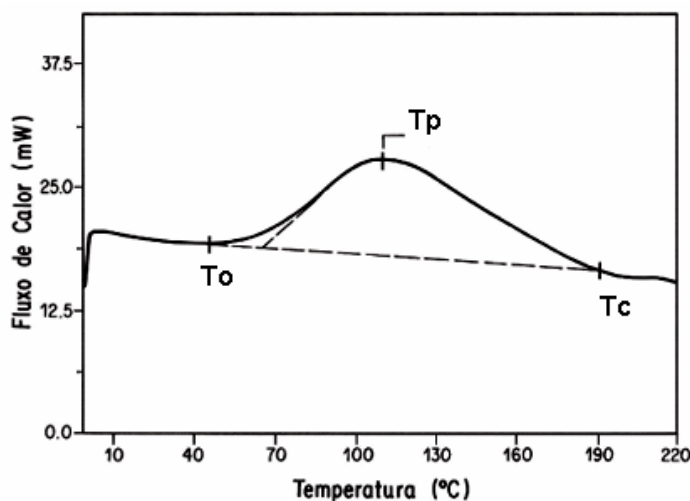
ความแตกต่างของระดับอุณหภูมิในการเกิดเจลลิตีในเซชันระหว่างสตาร์ชแต่ละชนิดเกี่ยวข้องกับ 3 ปัจจัยดังนี้คือ 1) โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพกติน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความยาวของสายอะไมโลเพกติน และปริมาณกิ่งก้าน 2) องค์ประกอบของสตาร์ช ได้แก่ อัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน จำนวนของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมัน ปริมาณอะไมโลส และฟอสฟอรัส และ 3) การจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในเม็ดสตาร์ช (อัตราส่วนของโครงสร้างส่วนผลึกต่ออสัณฐาน) (Gunaratne และ Hoover, 2002)

การวัดอุณหภูมิการเกิดการเจลลิตีในเซชันสามารถทำการวัดด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทำให้สตาร์ชเกิดการเจลลิตีในเซชัน ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC จะได้ค่าอุณหภูมิ (หน่วยองศาเซลเซียส) ที่สำคัญคือ อุณหภูมิเริ่มเกิดการเจลลิตีในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิที่สตาร์ชดูดความร้อนขณะเจลลิตีในเซชันสูงสุด (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายที่สตาร์ชเกิดการเจลลิตีในเซชัน (conclusion temperature, T_c) และค่าพลังงานเอนทาลปีของการเจลลิตีในเซชัน (ΔH_{gel}) ดังแสดงในภาพที่ 6



ภาพที่ 5 ระยะในการเกิดการเจลลิตีในเซชันของเม็ดสตาร์ช

ที่มา: ดัดแปลงจาก สุพิศา (2548)

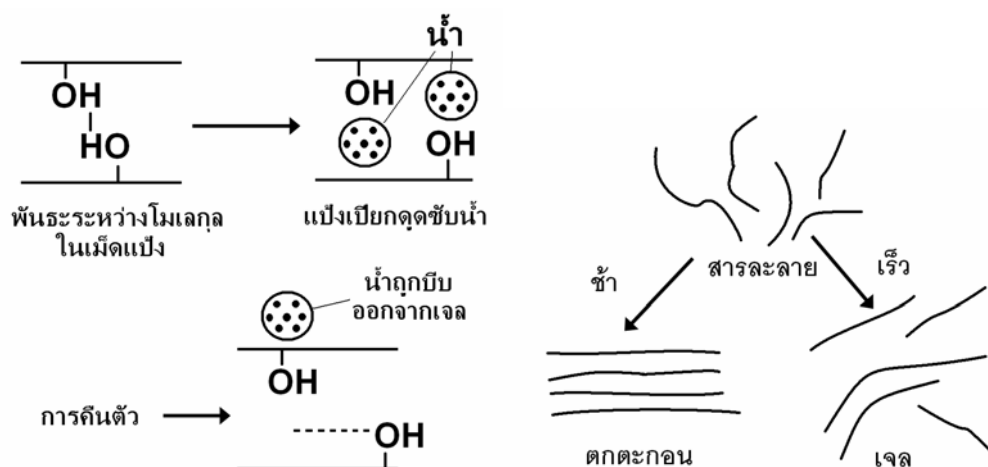


ภาพที่ 6 การเกิดเจลในเซชันของสตาร์ชเมื่อวิเคราะห์ด้วยเครื่อง DSC
ที่มา: ดัดแปลงจาก www.scielo.br/scielo.php?

2.3.4 การเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation)

เมื่อสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กลงจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามามากขึ้น มีความหนืดมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ setback (Smith, 1979) เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาจนเกิดเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขาวขุ่นและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 7

การคืนตัวของสตาร์ชสุกและสารละลายสตาร์ชทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายน้ำในสตาร์ชสุกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคสตาร์ชที่ไม่ละลายทำให้เกิดเจล และเมื่อน้ำถูกบีบออกมาจนเกิดเจลในการคืนตัวของสตาร์ช



ภาพที่ 7 การเกิดรีโทรกราเดชัน (retrogradation) และกลไกการคืนตัวของสตาร์ช
ที่มา: ดัดแปลงจากกัลลัณรงค์ และเกื้อกุล (2543)

ถ้าเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน ถ้าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขึ้นดังภาพแสดง
กลไกการคืนตัวของสตาร์ช (ภาพที่ 7)

การคืนตัวของสตาร์ชขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้น
ของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็น
กรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบทาง
เคมีอื่นๆ ในสตาร์ช ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของสตาร์ชสูง สตาร์ชสามารถคืนตัว
ได้ดีในช่วง pH 5-7 ซึ่งสตาร์ชสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้สตาร์ช
จะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของสตาร์ชจะใช้เกลือของ monovalent anion และ
cation calcium nitrate และ urea (Swinkels, 1985)

ปริมาณและขนาดของอะไมโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของสตาร์ช สตาร์ชที่มีปริมาณ
อะไมโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูง อัตราในการ
คืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) ที่ DP (degree of polymerization) ของอะไมโลสเท่ากับ 100
ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะไมโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะไมโลส
ที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส
อะไมโลเพกตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่
แตกต่างกัน

การตรวจสอบความสามารถในการเกิดรีโทรกราเดชันของสตาร์ชแต่ละชนิดอาจประมาณได้จากค่า setback ของสตาร์ช ซึ่งเป็นค่าผลต่างระหว่างความหนืดสุดท้ายกับความหนืดสูงสุด (setback from peak) หรือความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด (setback from trough) โดยเครื่อง Brabender หรือ Rapid Visco Analyzer นอกจากนี้การเกิด retrogradation ของสตาร์ชสามารถวัดได้โดยการใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) โดยนำสตาร์ชดิบไปหาค่าพลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลาตินในเซชัน (เอนทาลปี, $\Delta H_{\text{gelatinization}}$) แล้วนำสตาร์ชที่ผ่านเจลาตินในเซชันนี้ไปต้มไว้ในสภาวะที่กำหนดเพื่อให้เกิดรีโทรกราเดชันโดยใช้อุณหภูมิต่างๆ กัน เช่น -20, 4, 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลาต่างกันตั้งแต่ 1 ถึง 21 วัน (Shi และ Seib, 1992; Yamin และคณะ, 1997) แล้วนำสตาร์ชที่เกิดรีโทรกราเดชันแล้วไปตรวจสอบด้วยเครื่อง DSC อีกครั้ง บันทึกค่าพลังงานที่ใช้ ($\Delta H_{\text{retrogradation}}$) ร้อยละของการเกิดรีโทรกราเดชันสามารถหาได้จากอัตราส่วนของเอนทาลปีของรีโทรกราเดชันต่อเอนทาลปีของเจลาตินในเซชัน (Yamin และคณะ, 1997)

2.3.5 โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ช

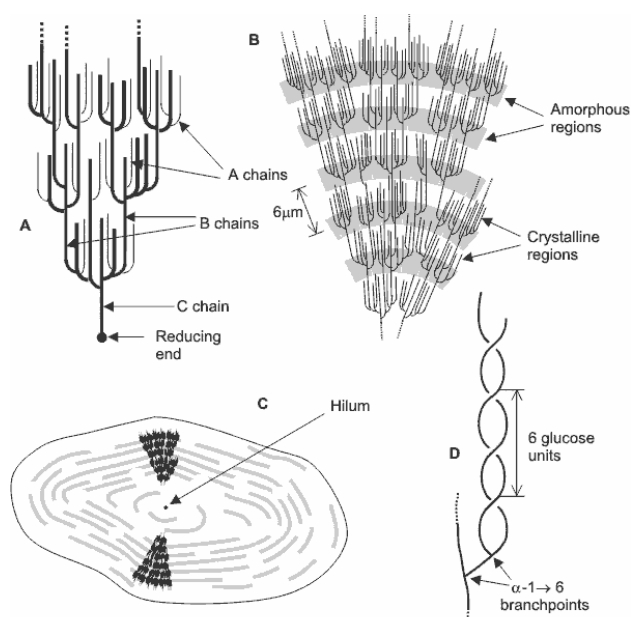
เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างผลึกแบบกึ่งผลึก (semi-crystallinity) โดยสายสั้นของอะไมโลเพกตินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดเป็นโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) สตาร์ชในธรรมชาติจะมีความเป็นผลึกประมาณร้อยละ 15-45 (Zobel, 1988) โครงสร้างที่เป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous) ของเม็ดสตาร์ชจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของสายอะไมโลส และสายยาวของอะไมโลเพกติน แสดงดังภาพที่ 8

เม็ดสตาร์ชมีโครงสร้างผลึก 4 แบบ คือแบบ A B C และ V จากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างเม็ดสตาร์ชด้วยเครื่อง x-ray diffractometer โครงสร้างผลึกแบบ A จะให้พีคที่ตำแหน่งที่ 17 และ $17.9^\circ 2\theta$ พบในสตาร์ชจากธัญพืชเป็นส่วนใหญ่ แบบ B จะให้พีคที่ตำแหน่ง 5.6 และ $17^\circ 2\theta$ พบในสตาร์ชจากพืชหัวหรือจากพืชที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าร้อยละ 49 (Zobel, 1988) แบบ C เป็นลักษณะที่รวมกันของแบบ A และ B จะให้พีคที่ตำแหน่ง 5.6 และ $17.9^\circ 2\theta$ พบในสตาร์ชตระกูลถั่ว (Rickard และคณะ, 1991) แบบ V จะให้พีคที่ตำแหน่งในช่วง 7-8, 13, 19-20 และ $22-23^\circ 2\theta$ อันเป็นรูปแบบที่เกิดจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของสตาร์ชกับสารอื่น เช่น ไอโอดีน แอลกอฮอล์ และไขมัน (fatty acid และ monoglyceride) เป็นต้น (Le Bail และคณะ, 1997) หรือขณะเกิดเจลาตินในเซชัน นอกจากนี้ยังพบในสตาร์ชที่ถูกดัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น และในสตาร์ชที่มีปริมาณอะไมโลสสูง โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการแสดงลักษณะโครงสร้างผลึก

ชนิดนั้นๆ ได้แก่ ความยาวของสายอะไมโลเพกติน อุณหภูมิที่พืชเจริญเติบโต และกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบ (Hizukiri และคณะ, 1981) Gunaratne และ Hoover (2002) กล่าวว่าการศึกษาแต่ละชนิดมีความเป็นผลึก (relative crystallinity) แตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างของ 1) ขนาดของผลึก 2) การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ 3) ความยาวเฉลี่ยของสายอะไมโลเพกติน 4) อัตราส่วนโดยโมลของอะไมโลเพกตินสายสั้น (DP 10-13)

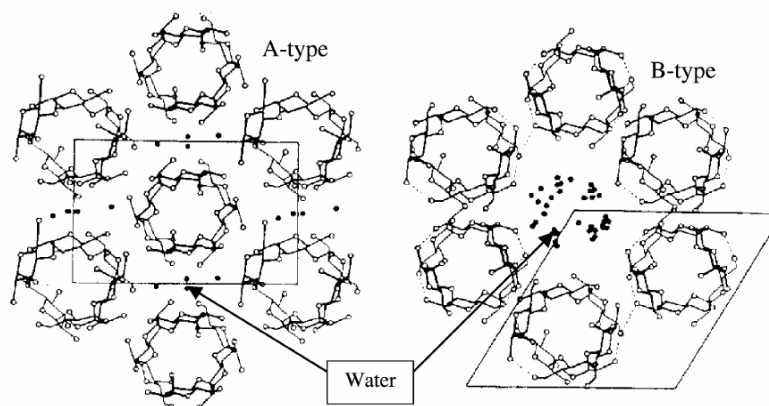
ลักษณะผลึกแบบ A และ B มีความแตกต่างกันที่การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ (double helices) และปริมาณในโครงสร้าง โดยผลึกแบบ B การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นลักษณะแบบเฮกซะโกนอลยูนิทเซลล์ (hexagonal unit cell) โดยมีช่องว่างขนาดใหญ่ตรงกลางซึ่งสามารถจับกับโมเลกุลของน้ำได้ 36 โมเลกุลต่อยูนิทเซลล์ ในขณะที่ผลึกแบบ A การจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่เป็นลักษณะแบบโมโนคลินิกยูนิทเซลล์ (monoclinic unit cell) ซึ่งมีสายเกลียวคู่ตรงกลางของโครงสร้างโมเลกุลสามารถจับน้ำได้น้อยกว่า (Gunaratne และ Hoover, 2002) แสดงดังภาพที่

9



ภาพที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชในส่วนผลึก (crystalline) และส่วนอสัณฐาน (amorphous)

ที่มา: www.lsbu.ac.uk/water/hysta.html



ภาพที่ 9 โครงสร้างผลึกแบบ A และ B ของอะไมโลส

ที่มา: ดัดแปลงจาก Tester, Karkalas, และ Qi (2004)

2.3.6 ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง-การละลาย

ความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง-ละลายของอาหารหมายถึง การที่อาหารยังคงมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) เมื่อทำการแช่เยือกแข็งโดยไม่มีลักษณะเป็นก้อน (lumpy) เป็นเม็ด (grainy) หรือมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy) และปราศจากของเหลวแยกตัวออกมา (syneresis) ในอาหารแช่เยือกแข็งส่วนใหญ่จะเกิดการแช่เยือกแข็งและการละลายสลับกันหลายครั้ง อาจเกิดเป็นรอบสั้นๆ ในระหว่างการเก็บรักษาหรือขนส่ง การละลายอาจไม่ได้เกิดอย่างสมบูรณ์ทั้งหมดโดยอาจเกิดเป็นจุดๆ เมื่อมีการเปลี่ยนอุณหภูมิ ในระหว่างการแช่เยือกแข็ง น้ำในระบบที่มีสตาร์ชกับน้ำผสมกันอยู่จะกลายเป็นน้ำแข็ง ทำให้สตาร์ชเข้มข้นขึ้นซึ่งช่วยเร่งการเกาะกันของสายของสายโมเลกุลสตาร์ช การเกาะกันอาจเกิดอย่างถาวรหรือผันกลับได้ ถ้าสายโมเลกุลส่วนมากที่เกาะกันอยู่แสดงคุณสมบัติที่ผันกลับได้ แสดงว่าสตาร์ชมีความคงทนต่อการแช่เยือกแข็ง-ละลาย โมเลกุลของสตาร์ชจะละลายได้อีกครั้งในระหว่างการละลายน้ำแข็ง การเกาะกันของสายสตาร์ชขึ้นกับพีเอช ปริมาณน้ำหรือวอเตอร์แอคทิวิตี (water activity) ความแรงของไอออน (ionic strength) โครงรูป (conformational) หรือโครงสร้างของสายโมเลกุล รวมถึงการมีองค์ประกอบอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง การแช่เยือกแข็ง-ละลายหลายๆ รอบ เป็นการทำลายเนื้อสัมผัสเนื่องจากการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็ง สตาร์ชที่ประกอบไปด้วยอะไมโลเพกตินเกือบทั้งหมดจะมีความคงตัวต่อการแช่เยือกแข็ง-ละลายมากกว่า แต่อย่างไรก็ตามจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงของเนื้อสัมผัสหลังการแช่เยือกแข็งและละลาย (กมลทิพย์, 2542)