

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ผู้ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมอาหารในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นผู้ผลิต นักวิจัย ผู้บริโภค ล้วนต้องการนวัตกรรมใหม่ๆเกี่ยวข้องกับอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กระแสของอาหารสุขภาพ อาหารธรรมชาติที่ไม่เติมแต่งสารเคมี นอกเหนือจากสารอาหารพื้นฐานที่ได้จากอาหารแล้ว อาหารยังต้องมีองค์ประกอบอื่นเพิ่มเติมที่ให้คุณประโยชน์ในเชิงเป็นสารเภสัชโภชนศาสตร์ (nutraceutical ingredients) เพื่อเป็นอาหารสุขภาพ (functional food) ได้ อาหารคาร์โบไฮเดรตที่จัดอยู่ในกลุ่มอาหารสุขภาพได้เช่น อาหารไฟเบอร์สูง หรือ อาหารคาร์โบไฮเดรตต่ำ สตาร์ชเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เมื่อเกิดการย่อยในร่างกายจะทำให้ให้พลังงาน แต่สตาร์ชมีองค์ประกอบที่จะทำให้เกิดการย่อยและดูดซึมพลังงานในลำไส้เล็กเร็วช้าต่างกัน ซึ่งทำให้อาหารที่มีองค์ประกอบของสตาร์ชมีค่า glycemic index ที่แตกต่างกัน ทำให้อาหารเกิดคุณค่าทางโภชนาการขึ้น คุณค่าทางโภชนาการของสตาร์ชสามารถแบ่งตามอัตราเร็วและความสมบูรณ์ของการย่อย ซึ่งจำลองจากสภาวะจริงของระบบการย่อยในกระเพาะและลำไส้ของมนุษย์ ทำการวัดปริมาณกลูโคสที่ปล่อยออกมาในแต่ละช่วงเวลา (*in vitro* digestion, Englyst และคณะ, 1992) โดยสามารถแบ่งส่วนต่างๆของแป้งได้เป็น (Singh และคณะ, 2010)

- Rapidly digestible starch (RDS) หมายถึง ปริมาณของกลูโคสที่ได้หลังจากการย่อย 20 นาที
- Slowly digestible starch (SDS) หมายถึง ปริมาณของกลูโคสที่ได้หลังจากการย่อยในช่วง 20 ถึง 120 นาที
- Indigestible starch หรือ resistant starch หมายถึง ปริมาณของกลูโคสที่ได้หลังจากการย่อย 120 นาที

$$RS = TS - (RDS + SDS)$$

โดยที่ TS = Total starch

สำหรับ สตาร์ชแต่ละชนิด มีปัจจัยมากมายที่ทำให้สตาร์ชถูกย่อยได้เร็วช้าต่างกัน เช่น ใยอาหาร โครงสร้างผลึกและการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสตาร์ช เช่น โครงสร้างผลึกแบบ A-type จะเป็นโครงสร้างของกลุ่มธัญพืชจะเป็นสตาร์ชส่วนที่ RDS อะมิโลส การจัดเรียงตัวทางกายภาพที่ทำให้การย่อยยากหรือง่าย กระบวนการปรุงหรือประกอบอาหาร การแปรรูป ระยะเวลาที่เก็บอาหารที่มีองค์ประกอบสตาร์ชนั้นหลังปรุงสุกแล้ว เป็นต้น (Rosin และคณะ, 2002)

Resistant Starch (RS) หรือสตาร์ชทนย่อย ซึ่งเป็นสตาร์ชที่ไม่สามารถย่อยโดยเอนไซม์ที่มีอยู่ในกระเพาะและลำไส้เล็กของมนุษย์ แต่จะผ่านไปในส่วนลำไส้ใหญ่และถูกหมักโดยจุลินทรีย์ได้กรดไขมันสายสั้นได้แก่ อะซิเตท บิวทีเรท และโพรปิโอเนต ซึ่งทำให้ค่า pH ในลำไส้ใหญ่ลดลงเป็นผลดีต่อใน

ลำไส้ใหญ่และช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค และยังมีคุณสมบัติช่วยส่งเสริมสุขภาพทางด้านการป้องกันโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ เนื่องจาก สารขัณฑช่อยจะทำให้เกิดสัดส่วนของของ บิวทิเรทที่สูงกว่าใยอาหาร (dietary fiber) ชนิดอื่น ทำให้ระบบการขับถ่ายดีขึ้น ลดน้ำตาลกลูโคสในเลือด ลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด ลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคไขมันอุดตันในเส้นเลือด โรคหัวใจ และโรคเบาหวาน และมีประโยชน์ต่อการควบคุมน้ำหนัก ช่วยในการดูดซึมแคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี ทองแดงและธาตุเหล็กได้ดียิ่งขึ้น (Sajilata และคณะ, 2006; Lei และคณะ, 2008; Fuentes-Zaragoza และคณะ, 2010) ในปัจจุบันสารขัณฑช่อยยังจัดอยู่ในกลุ่มสารอาหารประเภทพรีไบโอติก (prebiotic) และเป็นส่วนประกอบอาหารประเภทลดพลังงาน (low-calorie food ingredient) สารขัณฑช่อย สามารถพบได้ในธรรมชาติในอาหารประเภท ธัญพืช มันฝรั่ง ผัก ผลไม้ อาหารจำพวกฝักหรือถั่ว (legumes) ถั่วเขียว และอาหารที่ผ่านการแปรรูปบางชนิด เป็นต้น (Lunn and Buttriss, 2007) Yadav และคณะ (2010) พบว่า พืชตระกูลถั่วมีปริมาณสารขัณฑช่อยที่สูงกว่าธัญพืชประเภทข้าวสาลี ข้าว และข้าวบาร์เลย์

สารขัณฑช่อยสามารถจัดแบ่งได้ 4 ประเภท (Fuentes-Zaragoza และคณะ, 2010)

RS1 เป็นสารขัณฑช่อยที่มีโครงสร้างทางกายภาพของเม็ดแป้งถูกห้อมล้อมในโครงร่างเซลล์ทำให้ยากต่อการถูกย่อย

RS2 เป็นลักษณะสารขัณฑช่อยเม็ดแป้งดั้งเดิมของแป้งบางชนิดที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้สุก มีลักษณะรูปแบบผลึกของโมเลกุลสารขัณฑช่อยแบบ B-type เป็นรูปแบบผลึกที่ทนย่อย เช่น สารขัณฑช่อยมันฝรั่งดิบ สารขัณฑช่อยถั่วเขียว และแป้งที่มีอะมิโลสสูง (high amylose starch)

RS3 เป็นสารขัณฑช่อยที่เกิดจากการรีโทรเกรด (retrograded) หลังจากผ่านการทำให้สุกแล้วทำให้เย็น

RS4 เป็นสารขัณฑช่อยที่ผ่านการตัดแปรทางเคมี

ปริมาณของสารขัณฑช่อยขึ้นอยู่กับชนิดและธรรมชาติของพืช ลักษณะทางกายภาพของพืชนั้น เช่น ถูบด หรืออยู่เป็นเมล็ด สัดส่วนของปริมาณอะมิโลสและอะมิโลเพคติน ปริมาณความชื้น ค่า pH อุณหภูมิและเวลาในการให้ความร้อน จำนวนครั้งที่ผ่านความร้อนและการทำให้เย็น เป็นต้น ดังนั้นถ้าจะทำการเพิ่มปริมาณสารขัณฑช่อย มีกระบวนการที่สามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนสภาวะของการแปรรูปอาหารนั้นๆ ไม่ว่าจะเป็นสภาวะการให้ความร้อนหรือการทำให้เย็น Tas และ EI (2000) รายงานว่า การให้ความร้อนจะทำให้ค่า RS1 และ RS2 ลดลง แต่ค่า RS3 จะเพิ่มขึ้น RS3 เกิดจากโครงสร้างเม็ดแป้งแตกในขณะที่เกิดกระบวนการสุกของแป้ง (gelatinization) โดยการให้ความร้อนในปริมาณน้ำที่มากเพียงพอ โครงสร้างแป้งจะถูกทำลาย หลังจากทีระบบเย็นตัวลง การจับกันใหม่ของสายโมเลกุลอะมิโลสและอะมิโลเพคตินจะเกิดขึ้นอย่างซ้ำๆ (retrogradation) ดังนั้น กระบวนการแปรรูปอาหาร และการประกอบอาหาร จะก่อให้เกิดสภาวะที่ RS1 และ RS2 ถูกทำลาย แต่ RS3 สามารถเพิ่มปริมาณได้มากขึ้น ด้วยการใช้นวัตกรรมกระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การใช้หม้อนึ่งความดันซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบร้อนชื้น การอบ extrusion และการใช้รังสีไมโครเวฟ ที่จะส่งผลต่อการเกิด gelatinization หรือการทำให้

สูงแล้วตามด้วยการทำให้เย็นหลายรอบ ล้วนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย ประเภท RS3 (Bello-Pérez และคณะ, 2006, Aparicio-Saguilán และคณะ, 2007; Eyaru และคณะ, 2009)

ดังนั้น นวัตกรรมของอาหารสุขภาพประเภทที่มีสตาร์ชเป็นส่วนประกอบของอาหาร คือ การสร้างสารที่มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง (resistant starch-rich powder, RSRP) (Aparicio-Saguilán และคณะ, 2007) หรือ สารที่มีค่า SDS สูง และใช้สารนั้นเสริมในอาหาร เพื่อที่จะให้ได้อาหารที่มีค่า glycemic index ต่ำ โดยในงานวิจัยนี้มีความสนใจที่จะศึกษาเทคนิคกระบวนการแปรรูปต่างๆเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยในถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวง และสตาร์ชหัวจิ้น เนื่องจาก Suksawat และ Luangsakul (2012) ได้ศึกษาปริมาณสตาร์ชทนย่อยและสมบัติทางเคมีกายภาพของถั่ว 5 ชนิดในไทย พบว่า ฟลาวร์ถั่วมะแฮะ และฟลาวร์ถั่วแดงหลวง มีค่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูงสุด คือ 6.2 และ 5.4 % ของน้ำหนักฟลาวร์แห้ง ตามลำดับ นอกจากนี้อุณหภูมิของแป้งสุกอยู่ที่ 79.5 และ 82.5°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ และ ค่าทนต่ออุณหภูมิและแรงกวน (breakdown) ต่ำกว่าของถั่วชนิดอื่น ซึ่งแสดงถึง โมเลกุลแป้งมีโครงสร้างที่ทนต่อแรงเฉือน ดังนั้น แป้งทั้ง 2 ชนิดนี้ จึงมีศักยภาพที่จะนำไปตัดแปรเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย นอกจากนี้ ที่ผู้วิจัยยังมีความสนใจในศักยภาพความเป็นสตาร์ชทนย่อยของสตาร์ชหัวจิ้น เนื่องจาก จากการทดลองเบื้องต้นของผู้วิจัยเองได้ทดลองนำสตาร์ชหัวผสมแทนที่แป้งสาลีในการทำขนมปัง พบว่า เมื่อปริมาณสตาร์ชหัวมากขึ้น ขนมปังบริเวณที่เป็นเปลือก ยังมีความขาวมากขึ้น ผู้วิจัยจึงได้นำไปวิเคราะห์หาปริมาณสตาร์ชทนย่อยพบว่า มีปริมาณอยู่ประมาณ 7 % ของน้ำหนักสตาร์ชแห้ง นอกจากนี้ในงานวิจัยจะนำสตาร์ชทนย่อยที่มีคัดแปรปริมาณให้สูงขึ้นแล้วทดลองใส่ในขนมปัง แล้วศึกษารูปแบบของการย่อยของสตาร์ช และคุณภาพของขนมปังที่ได้ (in viitro starch digestibility) นั้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาเทคนิควิธีการที่ใช้ในการคัดแปร โดยเปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนแบบต่างๆ และระยะเวลาเวลาที่ทำให้เย็น โดยเปรียบเทียบกับที่ยังไม่ได้คัดแปรเพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย ในถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวง และสตาร์ชหัว

1.2.2 เพื่อผลิตขนมปังที่มีสตาร์ชทนย่อยสูง หรือ มีค่า glycemic index ต่ำ

1.2.3 ศึกษาการแทนที่แป้งสาลีถั่วแดงหลวง หัว และถั่วมะแฮะในการทำขนมปัง

1.2.4 เป็นการศึกษาเบื้องต้นเพื่อคัดเลือกชนิดของฟลาวร์ข้าวและฟลาวร์ถั่วที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ผลิตเป็นขนมปังปราศจากกลูเตนต่อไปในอนาคต

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเทคนิคการตัดแปรโดยใช้ความร้อนวิธีต่างกันวิธีการให้ความร้อนแบบการอบ (baking) การต้ม และการใช้หม้อนึ่งความดันไอ (autoclave) แล้วทำให้เย็นที่ 4°C ระยะเวลาต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย โดยเปรียบเทียบกับที่ยังไม่ได้ตัดแปร ในถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวง และสตาร์ชแห้ว โดยติดตามรูปแบบการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลอง (in vitro starch digestibility) ค่า Hydrolysis index (HI) และค่า Expected glycemic index (eGI) และ นำตัวอย่างที่มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูงที่สุด ใสในขนมปังในปริมาณต่างๆแล้วติดตามรูปแบบการย่อยของสตาร์ชในหลอดทดลอง (in vitro starch digestibility) ค่า Hydrolysis index (HI) และค่า Expected glycemic index (eGI) ปริมาณสตาร์ชทั้งหมด (Total starch) และคุณภาพทางกายภาพและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมปัง

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. การเตรียมสตาร์ชจากถั่วและแห้วจิน	←→											
2. การศึกษาเทคนิควิธีการที่ใช้ในการตัดแปรสตาร์ชที่ศึกษาโดยเปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนแบบการอบ (baking) และการใช้หม้อนึ่งความดันไอ (autoclave) แล้วทำให้เย็นที่ 4°C ระยะเวลาต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อย		←→										
3. นำตัวอย่างที่มีปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูงที่สุดในของถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวง และสตาร์ชแห้วทดแทนแป้งสาลีในการทำขนมปังในปริมาณต่างๆ						←→						
๓. สรุปผลการทดลองและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์										←→		

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวง และสตาร์ชเหั่วที่มีปริมาณสตาร์ช
ทนย่อยที่สูงขึ้นเทียบกับตัวอย่างเดียวกันที่ยังไม่ได้ดัดแปร

1.5.2 ขนบแป้งสุกภาพที่มีค่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยสูง หรือค่า glyceimic index ต่ำ

1.5.3 สร้างนักวิจัยรุ่นใหม่จำนวน 1 คนทางด้านสตาร์ชทนย่อย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ถั่วแดงหลวง ถั่วมะแฮะ และ แห้ว

2.1.1 ถั่วมะแฮะ (Pigeonpea)

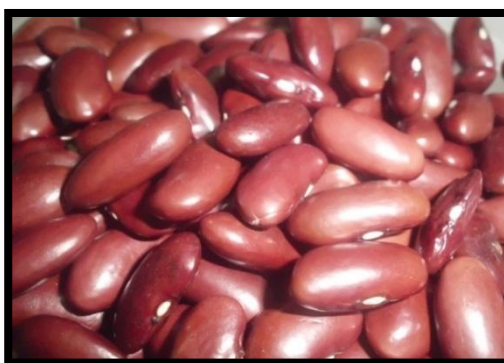
ถั่วมะแฮะ (Pigeonpea) เป็นพืชตระกูลถั่ว (legume) ชนิดหนึ่ง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Cajanus cajan* (L.) เป็นพืชเมืองร้อนหรือกึ่งร้อนที่ปลูกทั่วไป และแพร่หลายมากที่สุดในประเทศอินเดีย (สมชาย และคณะ, 2522) การปลูกถั่วมะแฮะในประเทศไทยพบว่ามีปลูกอยู่ทั่วไปในทุกภูมิภาคของประเทศ ส่วนใหญ่จะบริโภคฝักสดเป็นผัก ต่อมากรมวิชาการเกษตรได้ร่วมมือกับสถาบันวิจัยพืชนานาชาติเขตร้อนกึ่งแห้งแล้ง (ICRISAT) ประเทศอินเดีย และมหาวิทยาลัย ควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย ในการนำเมล็ดพันธุ์ถั่วมะแฮะเข้ามาปลูกร่วมกับพันธุ์ที่มีอยู่ในประเทศไทย โดยศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการปลูกถั่วมะแฮะในสภาพแวดล้อมต่างๆ ของประเทศไทย เพื่อหาแนวทางพัฒนาเป็นพืชเศรษฐกิจต่อไป (กรมวิชา การเกษตร, 2548)ลักษณะเด่นของถั่วมะแฮะคือ ให้ผลผลิตที่เป็นน้ำหนักแห้งสูง เฉลี่ย 461 กิโลกรัมต่อไร่ มีการเจริญเติบโตแบบทอดยอด ทรงพุ่มกว้าง เมื่อกออกดอกร้อยละ 50 มีความสูง 248 เซนติเมตร ออกดอกปลายเดือนตุลาคม ก้านดอกสีเขียวอมม่วง ลำต้นสีเขียว ดอกสีเหลืองจัดแดง ติดฝักกระจายตามข้อของปลายยอด เปลือกฝักสีเขียวอมม่วงเล็กน้อย เนื้อหุ้มเมล็ดสีน้ำตาล อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 208 วัน จำนวนเมล็ดต่อฝัก 3-4 เมล็ด น้ำหนัก 100 เมล็ด 11.7 กรัม ผลผลิตต้นแห้งเมื่ออายุ 210 วัน คือ 2.01 ตันต่อไร่ ปลูกได้ทั่วไปในดินทุกชนิดที่น้ำไม่ขัง ดินทรายหรือร่วนทรายที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ถั่วมะแฮะจะสามารถเจริญเติบโตได้ดี ข้อควรระวังสำหรับการปลูกคือ เป็นพืชไวแสง ระยะเวลาการปลูกมีผลต่อผลผลิตมวลชีวภาพมาก การปลูกไม่ดี เพราะจะทำให้การเจริญเติบโตของผลผลิตลดลง (กรมวิชาการเกษตร, 2548)



ภาพที่ 2.1 ถั่วมะแฮะ (Pigeonpea)

2.1.2 ถั่วแดงหลวง (Red kidney bean)

ถั่วแดงหลวง มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Phaseolus vulgaris* มีถิ่นกำเนิดในแถบทวีปอเมริกา ถูกนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยครั้งแรกโดยโครงการหลวงในปี พ.ศ. 2516 เพื่อจุดประสงค์ให้ชาวเขาปลูกเป็นพืชทดแทนฝิ่น และช่วยรักษาความอุดมสมบูรณ์ของดินบนที่สูง เป็นพืชผสมตัวเอง มีเมล็ดสีแดง รูปร่างคล้ายไต เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเล 500-1500 เมตร น้ำหนักเมล็ด 100-1000 มิลลิกรัม ถั่วแดงหลวงเป็นพืชที่ออกดอก และตอบสนองต่อช่วงแสงสั้น การเจริญเติบโตมีทั้งแบบทอดยอดและไม่ทอดยอด (ศูนย์วิทยบริการเพื่อส่งเสริมการเกษตร, ม.ป.ป.)



ภาพที่ 2.2 ถั่วแดงหลวง (Red kidney bean)

2.1.3 แห้วจีน (Chinese water chestnut)

แห้วจีน หรือ แห้วทรงกระเทียม มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Eleocharis dulcis* เป็นพืชวงศ์กก และเป็นพืชหลายฤดู เป็นพืชกึ่งพืชน้ำ มีเหง้าใต้ดิน เหง้าสั้นมีไหลยาว หัวกลมแบนเกิดในส่วนปลายไหล สีน้ำตาลหรือสีดำ ขึ้นเป็นกอ ลำต้นแข็งแรง ลำต้นตรง กลม ใบย่อยส่วนเหลือเพียงโคนกาบหุ้มไม่มีแผ่นใบ สีน้ำตาลแดงหรือสีม่วง ยาว 15-20 เซนติเมตร ช่อดอกเดี่ยวเป็นช่อเชิงลด ดอกช่อยาว 1.5 -3.0 เซนติเมตร ดอกย่อยเป็นแบบ spike ยาว 2-5 เซนติเมตร มีริ้วประดับเป็นเยื่อบางๆ กลีบดอกคล้ายเส้นด้ายสีขาวหรือสีน้ำตาล ผลเป็นผลแห้งเมล็ดล่อน สีเหลืองมันจนถึงสีน้ำตาล ขยายพันธุ์ด้วยไหล หน่อ และเมล็ด ชอบที่ชื้นและ พบในพื้นที่ลุ่มที่กร้าง หนองน้ำและนาข้าว กระจายพันธุ์ทั่ว ประเทศไทย กระจายพันธุ์ในเขตร้อนของโลกเก่า ตั้งแต่ แอฟริกา ตะวันตก มาดากัสการ์ อินเดีย จีน ญี่ปุ่น เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ออสเตรเลีย และ หมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก มีทั้งพันธุ์ป่าและพันธุ์ปลูก โดยพันธุ์ป่าหัวขนาดเล็ก ก่อนข้างดำ พันธุ์ปลูกหัวใหญ่สีออกม่วงหรือน้ำตาล แห้วใช้ปรุงอาหารได้หลายอย่าง ทั้งในจีน อินเดีย ไทย และประเทศอื่นๆ ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ นำมารับประทานเป็นของหวาน หัวขนาดใหญ่นิยมรับประทานสด หัวขนาดเล็กใช้ผลิตแป้ง ในฟิลิปปินส์ใช้ทำข้าวเกรียบ ลำต้นใช้สาน เสื่อหรือเป็นอาหารสัตว์ (พิรศักดิ์ และคณะ, 2544)

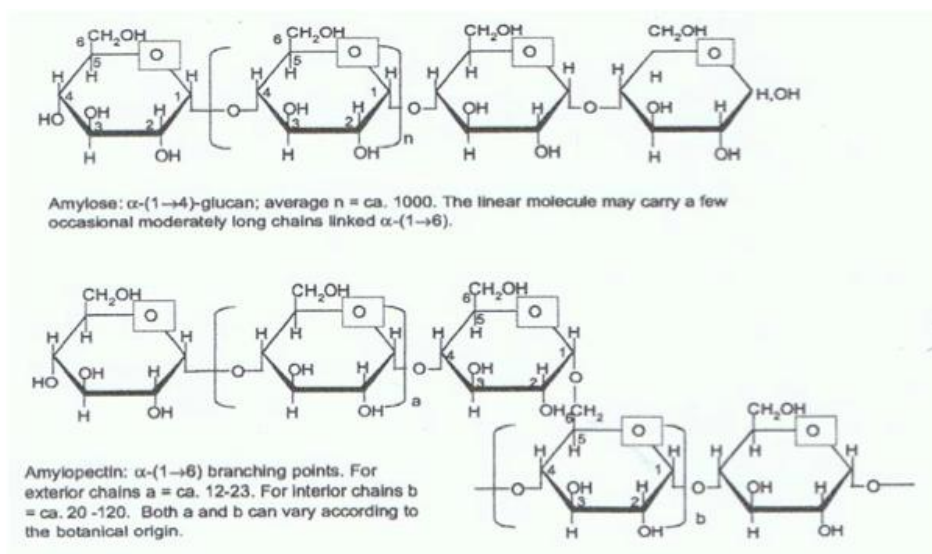


ภาพที่ 2.3 เห้าจีน (Chinese water chestnut)

2.2 แป้งและคุณสมบัติทั่วไปของแป้ง

2.2.1 โครงสร้างและองค์ประกอบภายในของแป้งสตร้า

โครงสร้างทางเคมีของแป้งสตร้าจะประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) โดยส่วนใหญ่แป้งสตร้าจะประกอบด้วยโมเลกุลของกลูโคส 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกทิน (amylopectin) แสดงดังภาพที่ 2.4



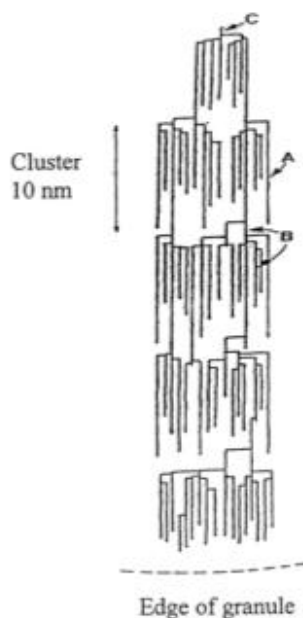
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน

ที่มา Tester และคณะ, (2004)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 1,000-6,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และอาจพบกิ่งก้านสาขาในโมเลกุลของอะมิโลสได้บ้างในปริมาณเล็กน้อย (Hizukuri, 1985) อะมิโลสในแป้งสตร้าแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกัน และมีค่าระดับขั้นของพอลิเมอไรเซชัน (degree of polymerization, DP) แตกต่างกันด้วยตำแหน่งของอะ

มิโอสภายในเม็ดสตาโรซซึ่งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้งสตาโรซอะมิโอสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโอสเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (amorphous region) และส่วนผลึก (crystalline region) โครงสร้างของอะมิโอสมีทั้งแบบสายเดี่ยวและสายคู่ เมื่ออยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (helix) เกลียวที่คล้ายตัวหรือม้วนบางช่วง (interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (random coil) นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโอสยังขึ้นอยู่กับขนาด โมเลกุลด้วยซึ่งถ้ามีน้ำหนักโมเลกุล อยู่ในช่วง 6,500-160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็งแรง (double helix) ส่วนอะมิโอสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุล เป็นลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจงและอาจมีบางส่วนละลายได้ (Whistler และDaniel, 1984)

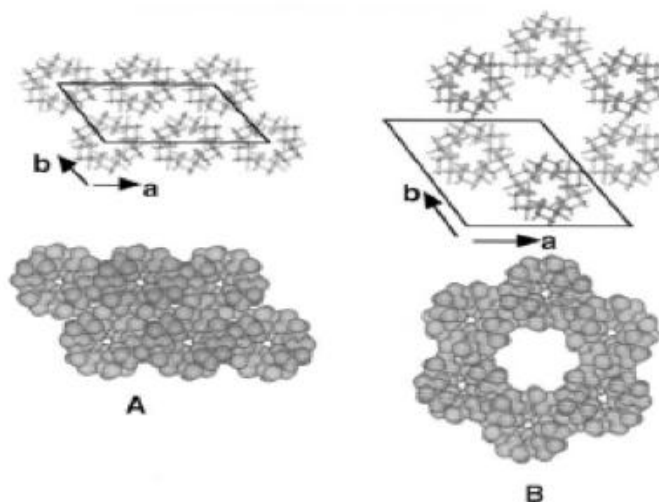
อะมิโอสเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส โครงสร้างจะประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4-glycosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาซึ่ง เป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสสายสั้นที่มีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10-60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6-glycosidic linkage (กลีโคซิลิค สิริรอด และเกอกูล ปิยะจอมขวัญ, 2550) โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโอสเพกทินจะประกอบด้วยสายโซ่ 3 ชนิด คือ สาย A (A chain) เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียวไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (unbranched structure) สาย B (B chain) มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า และสาย C (C chain) ซึ่งเป็นสายแกนที่ประกอบด้วยหมู่รีดิคัล 1 หมู่ แสดงดังภาพที่ 2.5 ในอะมิโอสเพกทิน แต่ละโมเลกุลจะประกอบด้วย สาย C หนึ่งสายเท่านั้น



ภาพที่ 2.5 ลักษณะ โครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโอสเพกทิน:

ที่มา: Martin และSmith, (1995)

แป้งสาลีที่พบในธรรมชาติจะอยู่ในรูปของเม็ดสตาร์ขนาดเล็ก มีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของแป้งสาลีชนิดนั้นๆ เม็ดสตาร์มีลักษณะโครงสร้างผลึกทั้งหมด 4 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของสายเกลียวคู่ ถ้ามีการจัดเรียงตัวหนาแน่นมาก และมีปริมาณน้ำต่ำจะเกิดเป็นผลึกแบบ A (แป้ง จากธัญพืชต่าง ๆ เช่น แป้งข้าวเจ้า , แป้งข้าวโพด เป็นต้น) ถ้ามีการจัดเรียงตัวกันหลวม ๆ และมี ปริมาณน้ำสูงจะเกิดผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันฝรั่ง) แสดงดังภาพที่ 2.6 แต่ถ้าเกิดการ เรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C (แป้งจากพืชตระกูลถั่ว) นอกจากนี้ยังมี โครงสร้างผลึกแบบ V อีก 1 ชนิด ซึ่งจะเป็นลักษณะผลึกที่เกิดจากสารประกอบเชิงซ้อนของ อะมิโลสกับ โมเลกุลของสารอินทรีย์ที่มีขั้ว แต่โดยทั่วไปเป็นแป้งสาลีที่เกิดเจลาตินไนซ์แล้วจับตัว กับไขมัน (Zobel และคณะ, 1998)



ภาพที่ 2.6 ลักษณะ โครงสร้างผลึกชนิด A และ B

ที่มา Buleon และคณะ, (1998)

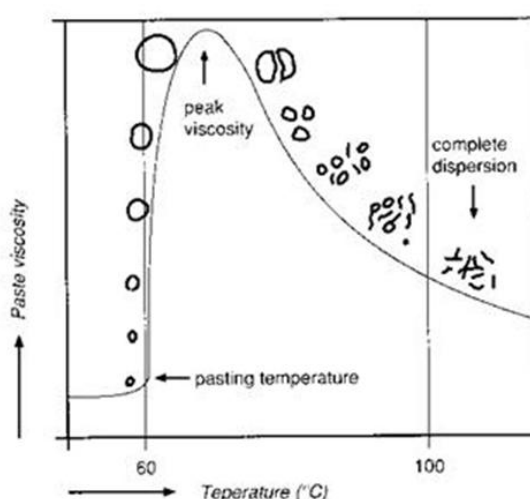
2.2.2 การเกิดเจลาตินไนเซชัน (gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxy group) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห micelles ดังนั้น การจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach และคณะ, 1959) แต่เมื่อให้ความร้อนเข้าไป พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ของผสมจะมีความหนืดมากขึ้น และใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลาตินไนเซชัน แสดงดังภาพที่ 2.7

การเกิดเจลาติโนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ คือ ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้อย่างรวดเร็ว โดยจะดูดซึมน้ำเข้ามามากเรียกว่า การเกิดเจลาติโนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้าง เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจลาของแป้ง ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ต่างๆ ได้ดีกว่า อุณหภูมิในการเกิดเจลาติโนเซชันจะแตกต่างกันไปตามชนิด และองค์ประกอบของแป้ง เช่น สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน การจัดเรียงตัวและขนาดของเม็ดแป้ง เนื่องจากการจัดเรียงตัวของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินภายในเม็ดแป้งมีความหนาแน่นไม่สม่ำเสมอ ทำให้เม็ดแป้งมีขนาดต่างกัน แป้งชนิดต่างๆ มีลักษณะการเกิดเจลาที่แตกต่างกันไป

2.2.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation)

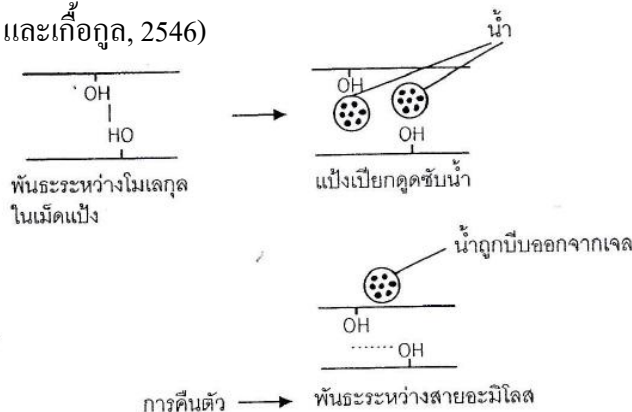
เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลาติโนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นลงโมเลกุลที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติโครงสร้างใหม่ที่สามารถอุ้มน้ำ และไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเป็นเจลเรียก ปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) หรือการคืนตัว หรือ setback เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระ และมีความหนืดมากขึ้น



ภาพที่ 2.7 การเจลาติโนเซชันของแป้ง

ที่มา: Sanders (1996)

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของสตาร์ช ความเข้มข้นของสตาร์ช กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-เบสของสารละลาย ปริมาณและขนาดของอะมิโลส อะมิโลเพคติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในสตาร์ช ในสถานะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของสตาร์ชสูง สตาร์ชสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วงพีเอช 5-7 สตาร์ชที่มีอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มาก และเร็วกว่าสตาร์ชที่มีอะมิโลเพคตินสูง ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 องศาเซลเซียส อะมิโลเพคตินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546)



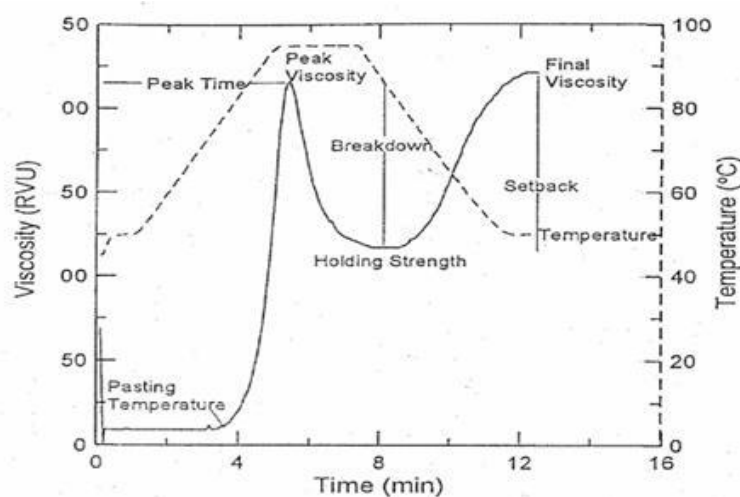
ภาพที่ 2.8 การเกิดรีโทรเกรเดชันของแป้ง
ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2546)

2.2.4 สมบัติทางความหนืดของแป้ง

ความหนืดเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของแป้ง เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเม็ดแป้ง เมื่อให้ความร้อนกับของผสมระหว่างน้ำกับแป้ง ความหนืดที่เกิดขึ้นของของผสม เมื่อให้ความร้อนและการกวนหรือคนอย่างสม่ำเสมอ จากอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ไปถึง 95 องศาเซลเซียส และคงที่ที่ 95 องศาเซลเซียส ระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงเป็น 50 องศาเซลเซียส อีกครั้ง แป้งแต่ละชนิดจะให้ลักษณะของความหนืดแตกต่างกัน (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546) โดยความหนืดของแป้งสามารถวัดได้ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับประเมินคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในด้านความหนืด ขณะที่ให้ความร้อน เครื่องนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความสามารถในการเปลี่ยนระดับอุณหภูมิ โดยสามารถทำให้ร้อนและเย็นได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว สามารถรักษาอุณหภูมิให้คงที่ได้ จึงทำให้สามารถหากราฟการเปลี่ยนแปลงความหนืดได้ภายในระยะเวลาอันรวดเร็ว (ภาพที่ 2.9) ซึ่งค่าที่เครื่องแสดงผลอ่านได้บนจอคอมพิวเตอร์ โดยความหนืดมีหน่วยเป็น RVU ดังนี้

- peak time คือ เวลาที่เกิดจุดสูงสุด (Peak) ของความหนืด มีหน่วยเป็นนาที
- pasting temperature คือ อุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนค่าความหนืด หรือมีค่าความหนืดเพิ่มขึ้น 2 RVU ใน 20 วินาที มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส

- peak temperature คือ อุณหภูมิที่เกิดจุดสูงสุด (Peak) มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส
- peak viscosity คือ ความหนืดที่จุดสูงสุด (Peak) มีหน่วยเป็น RVU
- holding strength คือ ความหนืดที่ต่ำที่สุดระหว่างการทำให้เย็น มีหน่วยเป็น RVU
- breakdown คือ ความแตกต่างของความหนืดสูงสุดและความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU
- final viscosity คือ ความหนืดสุดท้ายของการทดลอง มีหน่วยเป็น RVU
- setback form peak คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดที่จุดสูงสุด มีหน่วยเป็น RVU
- setback form trough คือ ผลต่างของความหนืดสุดท้ายกับความหนืดต่ำสุด มีหน่วยเป็น RVU



ภาพที่ 2.9 กราฟจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RVA

ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกุล (2546)

2.2.5 สมบัติทางความร้อนของแป้ง

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของแป้งโดยใช้เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของสารที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงพลังงาน และศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ หรือทางเคมีของวัสดุ ในรูปฟังก์ชันของปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ (กล้าณรงค์ และเกื้อกุล, 2546) โดยอาศัยหลักการที่ว่า ทั้งตัวอย่างและสารอ้างอิงจะต้องคงอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันในกระบวนการให้ความร้อน หรือทำให้เย็นลงที่อัตราที่กำหนดไว้ คือ มีการให้ความร้อนเริ่มต้นที่ 20 องศาเซลเซียส จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลขช่วงในการเกิดเจลาตินในเซชัน คือ 100 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที โดยมีการเตรียมตัวอย่างสารผสมระหว่างแป้งกับน้ำ และบ่มสารละลายไว้ประมาณ 1 ชั่วโมง ปริมาณความร้อนจะไหลเข้าสู่ระบบทั้งในส่วน of ตัวอย่างและ

สารอ้างอิง เพื่อที่จะพยายามรักษาความแตกต่างของอุณหภูมิของตัวอย่างและสารอ้างอิงให้เป็นศูนย์ สัญญาณที่เป็นสัดส่วนกับความแตกต่างของกำลัง (power) ซึ่งป้อนให้กับตัวให้ความร้อน (heater) ทั้งสองจะบันทึกเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิเพื่อที่อุณหภูมิและปริมาณความร้อนที่เกี่ยวข้องสามารถทำการวัดได้ ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิด เกลาติในเซชัน ได้แก่ อุณหภูมิเริ่มต้นการเกิดเกลาติในเซชัน (onset temperature; T_o), อุณหภูมิที่เกิดเกลาติในเซชันสูงสุด (peak temperature; T_p), อุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดเกลาติในเซชัน (conclusion temperature; T_c) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดเกลาติในเซชัน หรือพลังงานในการสลายโครงสร้างผลึก (enthalpy; ΔH) ในการวิเคราะห์หาพลังงานที่ใช้ในกระบวนการจำเป็นต้องหาพื้นที่ใต้กราฟ DSC และการหาเส้น baseline ที่ถูกต้องแม่นยำสำหรับการหาพื้นที่ใต้กราฟมีความสำคัญมาก เนื่องจากเส้น baseline มักมีความแตกต่างกันทั้งก่อนและหลังการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการที่ศึกษา ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะนำไปใช้หาอุณหภูมิและพลังงานความร้อนของการเปลี่ยนแปลง (enthalpy) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแห้งตัวอย่าง

2.3 ประเภทของแป้งสตาร์ช

ในเชิงคุณค่าทางอาหารของแป้งสตาร์ช (nutritional starch, dietary starch) โดยทั่วไปแบ่งแป้งสตาร์ชออกเป็น 3 ประเภท ตามอัตราและระยะเวลาในการย่อย (Englyst และHudson, 1992) ได้แก่ แป้งสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS) แป้งสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้า ๆ (slowly digestible starch, SDS) และ แป้งสตาร์ชทนย่อยต่อเอนไซม์ (resistant starch, RS)

2.3.1 แป้งสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (rapidly digestible starch, RDS)

โครงสร้างหลักของ RDS โดยทั่วไปจะเป็นส่วนอสัณฐาน (amorphous) และ dispersed starch (Sajirata และคณะ, 2006) ซึ่งจะถูกละลายโดยเอนไซม์ได้อย่างรวดเร็วไป เป็นน้ำตาลกลูโคสภายใน 20 นาที และพบได้ทั่วไปในอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งที่ผ่านการหุงสุกใหม่ ๆ

2.3.2 แป้งสตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้อย่างช้า ๆ (slowly digestible starch, SDS)

SDS จะมีลักษณะคล้ายกับ RDS แต่จะถูกละลายโดยเอนไซม์ได้ช้ากว่า และคาดว่าจะถูกย่อยสลายได้สมบูรณ์ในลำไส้เล็ก โดยสามารถตรวจวัดปริมาณได้โดยใช้วิธีทางเคมี ซึ่งจะ有一部分ที่ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ไปเป็นน้ำตาลกลูโคสหลังจากการย่อย 100 นาที พบได้ในแป้งสตาร์ชธรรมชาติดิบ (raw native starch) ที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ A และ C เช่น แป้งสตาร์ชจากพืช ธัญชาติ และผลิตภัณฑ์เส้นที่ทำสุกแล้ว เป็นต้น (Sajirata และคณะ, 2006) และเนื่องจาก SDS ถูกละลายโดยเอนไซม์อย่างช้า ๆ ดังนั้นจึงส่งผลให้มีระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งจะ เป็นผลดีสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารที่มีปริมาณ SDS สูงจะมีค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index, GI) ปานกลาง (Lehmann และRobin, 2007) ซึ่งมีข้อมูลทางการแพทย์ที่แสดงว่าอาหารที่มีค่า GI ต่ำ จะลดโอกาสเสี่ยงต่อการเป็นโรคเบาหวานและโรคหลอดเลือดหัวใจ ตีบ (Jenkins และคณะ,

2002) ในปัจจุบันยังไม่มีการผลิต SDS ทางการค้า แต่มีคาร์โบไฮเดรตทางการค้า ชนิดหนึ่ง ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ช้า (slowly digestible carbohydrate, SDC) ที่มีชื่อทางการค้าว่า “Isomaltulose/Palatinose” ซึ่งอ้างว่าจะให้ระดับน้ำตาลกลูโคสในเลือดอย่างช้า ๆ หลังจากบริโภค (Lehmann และ Robin, 2007)

2.3.3 สตาร์ชทนย่อย (resistant starch)

2.3.3.1 ความหมายและประเภทของสตาร์ชทนย่อย

- สตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) ตามคำนิยามของ European FLAIR-Concerted Action on Resistant Starch หมายถึง สตาร์ชและผลิตภัณฑ์ของสตาร์ชที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์และจุลินทรีย์ในลำไส้เล็กของมนุษย์ได้ สามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติแต่เป็นส่วนน้อย โดยเม็ดสตาร์ชจะถูกห่อหุ้มอยู่ในร่างแหของโปรตีน หรือถูกตรึงอยู่ในเซลล์หุ้มเมล็ดพืช ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาในเม็ดสตาร์ชได้ (เกื้อกุล และกล้าณรงค์, 2544) สามารถแบ่งได้ 4 ชนิด (Englyst และ Hudson, 1992; Brown และคณะ, 1995) ดังนี้

- สตาร์ชที่มีลักษณะทางกายภาพขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ (physically inaccessible starch หรือ RS1) พบในเมล็ดพืชที่ถูกทำลายไปบางส่วนจากการบด ในพืชตระกูลถั่ว (legumes) จะพบมาก เนื่องจากมีผนังเซลล์หนา กระบวนการเตรียมและการกระบวนการหุงต้ม มีอิทธิพลมากต่อปริมาณ RS ในอาหาร เพราะจะทำให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย (Champ และคณะ, 2003)

- เม็ดสตาร์ชดิบที่ทนต่อการทำงานของเอนไซม์ (ungelatinized starch หรือ RS2) เช่น เม็ดสตาร์ช มันฝรั่งดิบ เม็ดสตาร์ชกล้วยดิบ เม็ดสตาร์ชถั่วดิบ และในสตาร์ชข้าวโพดที่มี อะไมโลสสูง (Nugent, 2005) โดยคงทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ การเกิดเจลลิตินในเซชันของสตาร์ชจะช่วยให้เอนไซม์เข้าไปทำปฏิกิริยากับเม็ดสตาร์ชได้มากขึ้น (Champ และคณะ, 2003)

- สตาร์ชที่ผ่านการรีโทรเกรเดชัน (retrograded starch หรือ RS3) อาหารที่ผ่านการให้ความร้อนจนสตาร์ชเกิดการเจลลิตินในเซชัน แล้วถูกทำให้เย็นตัวลง ทำให้ส่วนของ อะไมโลสที่กระจายออกมาจากเม็ดสตาร์ชเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ได้เป็นผลึกที่แข็งแรง และทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ (Lunn และButriss, 2007)

- สตาร์ชที่ดัดแปรทางเคมี (chemically modified starch หรือ RS4) เป็นการดัดแปรโครงสร้างด้วยสารเคมีหรืออนุหนุมิ เพื่อให้สตาร์ชทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ เช่น สตาร์ชอีเทอร์ (starch ethers) และสตาร์ชเอสเทอร์ (starch esters) รวมถึงสตาร์ชที่ผ่านการเชื่อมข้าม (cross-bonded starch) (Baghurst และคณะ, 1996; Brown และคณะ, 1998)

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของสตาร์ชทนย่อย (resistant starch; RS)

ชนิดของ RS	คำอธิบาย	แหล่งของอาหารที่พบ	ปัจจัยที่ทำให้ได้ปริมาณ RS ลดลง
RS1	สตาร์ชที่มีลักษณะทางกายภาพชัดเจน การทำงานของเอนไซม์	ธัญพืชที่ไม่ขัดสี หรือขัดสี บางส่วน พีชตระกูลถั่ว พาสต้า	การบด การเคี้ยว
RS2	สตาร์ชดิบที่ทนต่อการทำงานของ เอนไซม์	สตาร์ชมันฝรั่งดิบ สตาร์ชกล้วย ดิบ สตาร์ชถั่วดิบ และในสตาร์ช ข้าวโพดที่มีอะไมโลสสูง	กระบวนการแปรรูป อาหาร และกระบวนการ หุงต้ม
RS3	สตาร์ชที่ผ่านการรีโทรเกรเดชัน	มันฝรั่งที่ผ่านความร้อนและทำให้ เย็น ขนมปัง และ Corn flake	สภาวะที่ใช้ในการแปรรูป
RS4	สตาร์ชที่ตัดแปรทางเคมี	เป็น RS ที่ไม่พบในอาหาร และ สหภาพยุโรป (EU) ยังไม่อนุญาต ให้ใช้	การย่อยในหลอดทดลอง ให้ใช้

ที่มา: คัดแปลงจาก Nugent (2005)

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า สตาร์ชทนย่อยสามารถพบได้ในอาหารธรรมชาติทั้งแบบดิบ และที่ผ่านการแปรรูปแล้ว ในจำนวนทั้งหมด 4 ประเภทนั้น RS3 จะเป็นที่น่าสนใจศึกษามากที่สุด เนื่องจาก RS3 สามารถทำให้เกิดขึ้นมากน้อยได้ด้วยปัจจัยที่แตกต่างกัน RS3 เกิดจากโครงสร้างเม็ดแป้งแตก ในขณะที่เกิดกระบวนการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) ของแป้ง โดยการให้ความร้อนในปริมาณน้ำที่มากเพียงพอ หลังจากทีระบบเย็นตัวลง การจับกันใหม่ของสายโมเลกุลอะไมโลส และอะไมโลเพคตินจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ (retrogradation) เทคนิคกระบวนการแปรรูปต่างๆ เช่น การใช้หม้อนึ่งความดันซึ่งเป็นการให้ความร้อนแบบร้อนชื้น การอบ extrusion และการใช้รังสีไมโครเวฟ จะส่งผลต่อการเกิดเจลาติไนเซชัน ในขณะที่เทคนิคการทำให้เย็น การทำให้สุกแล้วตามด้วยการทำให้เย็นหลายๆ รอบ ล้วนเป็นเทคนิคที่นำมาใช้ในการเพิ่มปริมาณสตาร์ช ทนย่อยประเภท RS3

2.3.3.2 ประโยชน์ทางสรีระวิทยาของสตาร์ชทนย่อย (Sajilata และคณะ, 2006)

- สตาร์ชทนย่อยเป็นใยอาหาร (dietary fiber)

สตาร์ชทนย่อย เป็นสตาร์ชที่ทนทานต่อการย่อยจากเอนไซม์ของมนุษย์ จึงจัดเป็นองค์ประกอบของใยอาหารชนิดหนึ่ง สามารถใช้วิธีการวิเคราะห์แบบใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) ได้ และมีประโยชน์ทางสรีระวิทยาเหมือนใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) คือทำให้ระบบการย่อย และการเผาผลาญกลูโคสได้ช้าลง จึงส่งผลดีต่อลำไส้ใหญ่ ช่วยป้องกันการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่ ลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ในเลือด

- อัตราการย่อยอาหารต่ำ (hypoglycaemic effects)

อาหารที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำ ทำให้อัตราการย่อยต่ำ โดยทั่วไป อาหารประเภทแป้งจะเกิดการย่อยเกือบจะทันทีหลังการบริโภคอาหาร แต่อาหารที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำจะเกิดการย่อยได้ช้า ซึ่งจะเกิดขึ้นหลังจากรับประทานอาหารแล้ว 5-7 ชั่วโมง ดังนั้น ดัชนีน้ำตาลต่ำจึงลดค่า GI (glycaemic index) ได้

- โพรไบโอติก (probiotic)

เนื่องจากดัชนีน้ำตาลต่ำไม่ถูกย่อยและดูดซึมในลำไส้เล็ก จึงผ่านมายังลำไส้ใหญ่และถูกหมักด้วยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ ทำให้เกิดกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) ได้แก่ อะซีเตต บิวทีเรต และ โพรปิโอเนต สารเหล่านี้เป็นสารตั้งต้นที่ให้พลังงานแก่แบคทีเรียโพรไบโอติก (probiotic) เช่น *Bifidobacterium* ทำให้เจริญเติบโตได้ดี

- ยับยั้งการสะสมไขมัน และลดการสะสมคอเลสเตอรอล

หลังจากรับประทานอาหารที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำ พบว่า มีการเกิดออกซิเดชันของไขมันเพิ่มมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่าดัชนีน้ำตาลต่ำช่วยลดการสะสมของไขมันในระยะยาวได้ และเมื่อศึกษาในหนูทดลองที่ให้อาหารที่มีดัชนีน้ำตาลต่ำ (มันฝรั่งดิบร้อยละ 25) พบว่าระดับคอเลสเตอรอล และ ไตรกลีเซอไรด์ในเลือดลดลง

2.3.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดดัชนีน้ำตาลต่ำ (Sajilata และคณะ, 2006)

- คุณสมบัติของแป้ง

โครงสร้างของเม็ดแป้ง มีผลต่อประสิทธิภาพการเข้าถึงของเอนไซม์ แป้งที่มีโครงสร้างแบบปิด หรือโครงสร้างที่เป็นผลึกเรียงตัวกันแน่น จะทำให้ทนทานต่อการย่อยของเอนไซม์ นอกจากนี้ แป้งที่ปริมาณอะไมโลสสูงจะทำให้เกิดดัชนีน้ำตาลต่ำได้มาก เนื่องจากระหว่างการเก็บแป้งหลังผ่านการเจลาติไนเซชัน อะไมโลสจะเกิดการคืนตัวในรูปของโครงสร้างผลึกที่ทนทานต่อการย่อยโดยเอนไซม์อะไมเลส (Sievert และ Pomeranz, 1989) และอัตราการคืนตัวของแป้งจะสูง เมื่อขนาดโมเลกุลของอะไมโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 ซึ่งถ้าสายอะไมโลสสั้นหรือยาวกว่านี้ อัตราการคืนตัวจะลดลง (กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546)

- ความร้อนและความชื้น

ปริมาณน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดดัชนีน้ำตาลต่ำ โดยการให้ความร้อนกับแป้งหลายๆ รอบ จะลดการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส ทำให้ปริมาณดัชนีน้ำตาลต่ำเกิดมากขึ้น

- การเกิดอันตรกิริยา (interaction) ของแป้งกับองค์ประกอบอื่น

ไขมันมีผลต่อการเกิดสตาร์ชทนย่อย เนื่องจากไขมันมีความสามารถในการจับตัวกับอะไมโลสเป็น amylose-lipid complex ที่อาจมีผลทำให้ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ นอกจากนี้ ไอออน (ประจุบวก) เช่น แคลเซียม โพแทสเซียม เป็นต้น รวมไปถึงน้ำตาล ก็มีผลต่อการเกิดสตาร์ชทนย่อยได้

- สภาวะในกระบวนการผลิต

การให้ความร้อนมีผลต่อการเกิดเจลาทีนเซชันของแป้ง สามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้ไอน้ำ ใช้หม้อนึ่งความดันไอ (autoclave) และการอัดพอง (extrusion) นอกจากนี้ สภาวะในการเก็บก็มีผลต่อการคืนตัวของแป้ง ปริมาณสตาร์ชทนย่อยสามารถเพิ่มขึ้น

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

มีงานวิจัยที่รายงานการศึกษาปริมาณของ Rapid digestible starch (RDS) Slowly digestible starch (SDS) และปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ในพืชโดยไม่ได้ดัดแปรดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณของ RDS, SDS และ RS ของพืชชนิดต่างๆ

ตัวอย่าง	RDS	SDS	RS	เอกสารอ้างอิง
White rice	28.3	34.9	2.6	Rosin และคณะ (2002) (วิเคราะห์อาหารที่ปรุงสุกแล้ว) (หน่วยของทุกค่าเป็น % น้ำหนัก แห้งของอาหาร)
Polished rice	34.1	41.5	2.4	
corn	31.5	40.3	3.9	
potato	36.7	51.0	3.4	
pea	16.9	22.9	4.6	
bean	11.4	16.6	4.8	
lentil	17.3	22.8	5.0	
chickpea	17.9	24.0	5.9	Hughes และคณะ (2009) (หน่วยของทุกค่าเป็น % น้ำหนักแห้งของสตาร์ช)
ถั่วลูกไก่พันธุ์ใหม่ใน แคนาดา	10.9-15.7	48.5-60.2	24.1-40.6	
สตาร์ชถั่วเขียว	-	-	11.2	Li และคณะ (2011) (หน่วยของ ทุกค่าเป็น % น้ำหนักแห้งของ สตาร์ช)

สำหรับงานวิจัยที่ใช้การตัดแปรสตาarchที่ได้จากพืชชนิดต่างๆโดยใช้เทคนิควิธีการที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มปริมาณสตาarchทนย่อยและการศึกษาถึงสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาarchตัดแปรมีดังนี้

Rosin และคณะ (2002) ศึกษา การย่อยของสตาarch (in vitro digestion) ของอาหารที่มีองค์ประกอบของสตาarch 11 ชนิด ทั้งตัวอย่างที่ปรุงให้สุกแล้ว และ ตัวอย่างที่เก็บอาหารนั้นไว้ที่ -20°C 30 วัน พบว่าการเก็บจะทำให้อาหารนั้นมีปริมาณสตาarchทนย่อยสูงขึ้น และค่า hydrolysis index (HI) ลดลง และ พบความสัมพันธ์ของ ค่า HI และ ค่า rapid digestible starch (RDS) ดังนี้คือ $y=0.573x-16.67$

González-Soto และคณะ (2004) ศึกษาการตัดแปรสตาarchจากสตาarchกล้วยดิบ โดยการนำสตาarchกล้วยดิบผ่านการอบการให้ความร้อนขึ้นโดยผ่าน autoclave ($121^{\circ}\text{C}/30$ นาที) แล้วจึงนำมาผ่านเอนไซม์ pullulanase ในปริมาณความเข้มข้นที่แตกต่างกัน พบว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผ่านเอนไซม์มีค่า available starch (80.5%) ในปริมาณสูงที่สุดและมีปริมาณสตาarchทนย่อยที่ต่ำที่สุด (9.1%) ตัวอย่างที่ผ่านเอนไซม์ 5 ชั่วโมงหรือนานกว่านั้นจะมีค่า available starch (ประมาณ 72%) และค่าปริมาณสตาarchถูกย่อย (ประมาณ 18%) ซึ่งมากกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 2 เท่า คณะผู้วิจัยยังรายงานเพิ่มเติมว่า สตาarchกล้วยดิบเป็นแหล่งของสตาarchทนย่อยที่ดีแหล่งหนึ่งซึ่งสามารถใช้เป็นสารเภสัชโภชนศาสตร์ (nutraceutic ingredients) ในการทำอาหารเพื่อสุขภาพ (functional food)

Vargas-Torres และคณะ (2004) ได้ศึกษาปริมาณของสตาarchทนย่อย (resistant starch) และปริมาณ RS3 (retrograded resistant starch) ของถั่ว 5 ชนิดที่นำไปหุงต้มแล้วเก็บที่ 4°C เป็นเวลา 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง โดยเลียนแบบพฤติกรรมกรหุงต้มของครอบครัวชาวเม็กซิกัน พบว่าเมื่อยิ่งเก็บถั่วที่หุงต้มไว้นานขึ้น พบปริมาณสตาarchทนย่อย และปริมาณ R3 เพิ่มขึ้น ค่าอัตรา in-vitro α -amylolysis ลดลง เมื่อเก็บนานขึ้น ตัวอย่างที่มีค่า RS สูงที่สุด จะมีค่าการย่อยที่ต่ำที่สุด และพันธุ์ถั่วบางพันธุ์สามารถนำมาทำเป็นอาหารพิเศษสำหรับคนที่ เป็นโรคเบาหวานได้ เนื่องจาก มีค่า RS ปริมาณสูง

Aparicio-Saguilán และคณะ (2005) ศึกษาการเพิ่มปริมาณสตาarchทนย่อยในสตาarchกล้วยดิบทั้งแบบที่ไม่ได้ตัดแปรและที่ตัดแปรโดยใช้กรด (lintnerized) โดยนำไปผ่าน autoclave (121°C , 1 h) และทำให้เย็น (4°C , 24 ชม.) จำนวน 3 รอบ พบว่า สตาarchกล้วยที่ผ่านการให้ความร้อนและการทำให้เย็นจำนวน 3 รอบ ให้ค่าปริมาณสตาarchทนย่อยที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่าน โดยเฉพาะในตัวอย่างสตาarchกล้วยที่ผ่านการตัดแปรโดยใช้กรด (lintnerized) จะให้ค่าที่สูงกว่าไม่ได้ตัดแปรประมาณ 19% น้ำหนักแห้ง ตัวอย่างที่มีค่าปริมาณสตาarchที่สูงขึ้นนี้จะมีค่าการละลายและค่าการพองตัวที่ต่ำลง สำหรับค่า T_p และค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีของตัวอย่างที่ผ่านการการให้ความร้อนและการทำให้เย็นมีค่าที่สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ผ่านอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Agustiniano-Osornio และคณะ (2005) ศึกษาการตัดแปรสตาarchมะม่วงดิบโดยใช้การ extrusion เพื่อเพิ่มปริมาณสตาarchทนย่อย โดยใช้ตัวแปรในการศึกษา คือ อุณหภูมิ ความเร็วสกรู และปริมาณ

ความชื้น พบว่า ปริมาณสตาร์ชทนย่อยจะมีค่าสูงที่สุด (97 กรัม กิโลกรัม⁻¹) เมื่ออยู่ในสภาวะที่สควูมี ความเร็วต่ำและอุณหภูมิที่สูง ซึ่งในสภาวะนี้เป็นสภาวะที่สายโมเลกุลอะมิโลสจะจับตัวกัน

Chung และคณะ (2009) พบว่าการคัดแปรแป้งโดยใช้ heat-moisture treatment (ปริมาณความชื้น 30 %, ที่ 100, 120°C, 2 h) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า RDS SDS และ TS มากกว่า การคัดแปรด้วย วิธี annealing (ปริมาณความชื้น 70 %, ที่ 10, 15°C, 24 h)

Eyaru และคณะ (2009) พบว่าการหุงต้มที่สภาวะความดันปกติทั่วทั้งที่แช่ตัวและไม่แช่ตัว โดยเฉพาะในหม้ออัดความดันทำให้ค่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยลดลงและค่า RDS SDS และ TS เพิ่มขึ้น

Yadav และคณะ (2010) ศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บ (12 and 24 ชม) และอุณหภูมิการเก็บ (4 °C and 25 °C) ต่อปริมาณสตาร์ชทนย่อยของเมล็ดธัญพืชและพืชตระกูลถั่วทั้งในรูปแบบทั้งเมล็ดและ แป้ง (flour) ที่ผ่านการให้ความร้อนโดยหม้อนึ่งความดัน พบว่า ปริมาณสตาร์ชทนย่อยเพิ่มขึ้นสำหรับใน ทุกตัวอย่างที่ผ่านหม้อนึ่งความดันและเก็บที่สภาวะต่างๆกัน โดยพบค่าปริมาณสตาร์ชทนย่อยที่สูงขึ้นใน สภาวะการเก็บที่ 4 °C 24 ชม. (41.4% สำหรับแป้งสาลี และ 85.4% สำหรับแป้งถั่ว) นอกจากนี้ระดับของ สตาร์ชที่ถูกย่อย (in vitro starch digestibility) จะมีค่าลดลงเมื่อตัวอย่างถูกเก็บในสภาวะ 4 °C 24 ชม. แสดงถึงใน โมเลกุลแป้งมีความแข็งแรงมากขึ้น

Li และคณะ (2011) ศึกษาผลของกระบวนการการให้ความร้อนชื้น (heat-moisture treatment) ต่อ ปริมาณสตาร์ชทนย่อย ลักษณะทางเคมีกายภาพ และสมบัติเชิงหน้าที่ของสตาร์ชทนย่อย โดยแปรปริมาณ ความชื้นในสตาร์ชถั่วเขียวเป็น 15, 20, 25, 25, 30 และ 35% และให้ความร้อนที่ 120 °C 12 ชั่วโมง พบว่า ปริมาณสตาร์ชทนย่อยและปริมาณของกลุ่มสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนชื้นสูงขึ้นอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติว่าตัวอย่างควบคุมที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการการให้ความร้อนชื้น โดยสตาร์ชถั่วเขียวที่ มีความชื้น 20 % มีค่าสตาร์ชทนย่อยสูงที่สุด กลุ่มสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนชื้นมีส่วนของ น้ำหนักโมเลกุลของสตาร์ชที่มีน้ำหนักมากในปริมาณที่สูงกว่าตัวอย่างควบคุม กลุ่มสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่าน การให้ความร้อนและสตาร์ชถั่วเขียวที่ไม่ได้ผ่านการให้ความร้อน (native starch) มีรูปแบบของ x-ray diffraction เป็น A-type กลุ่มสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนมีความเป็นผลึกมากกว่า และค่าการ ละลายน้ำเพิ่มขึ้นแต่ค่าการพองตัวลดลง สำหรับอุณหภูมิการเกิดเจลและค่าการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปี ของกลุ่มสตาร์ชถั่วเขียวที่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน ดังนั้น การคัดแปร ทางกายภาพโดยการให้ความร้อนชื้นกับสตาร์ชถั่วเขียวสามารถเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยได้ โดยวัดได้ จากลักษณะทางเคมีกายภาพต่างๆที่แสดงถึงสมบัติการทนความร้อน และมีความแข็งแรงของพันธะใน โมเลกุลสตาร์ชที่มากขึ้น

Shi และ Gao (2011) ได้ศึกษาการเพิ่มสตาร์ชทนย่อยโดยใช้เอนไซม์ pullanase ตัดพันธะโมเลกุลอะมิโลเพคตินของสตาร์ชข้าวเหนียว พบว่า สตาร์ชทนย่อยที่ได้มีรูปแบบผลึกเป็นแบบผสมระหว่าง B และ V สตาร์ชตัดแปรมีสตาร์ชทนย่อย ปริมาณอะมิโลสสูงกว่าและค่าเอนทาลปีสูงกว่าสตาร์ชดั้งเดิม

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มสตาร์ชทนย่อยในขนมอบมีดังนี้ และ ตารางที่ 2 แสดงสตาร์ชส่วนต่างๆ RDS, SDS และ SD ในขนมอบประเภทต่างๆ

Baixauli และคณะ (2008) ได้ศึกษาการเพิ่มสตาร์ชทนย่อย (HI-maize) ในการทำมัฟฟิน พบว่า ปริมาณที่ใส่ที่ 10% ไม่ทำให้คุณภาพของมัฟฟินด้อยลง แต่ปริมาณที่ใส่ไม่เกินกว่า 15% จะทำให้คุณภาพมัฟฟินเริ่มด้อยลง นอกจากนี้สตาร์ชทนย่อยที่ใส่ไม่มีผลต่อค่า specific gravity ของ batter

Korus และคณะ (2009) ได้ศึกษาการเพิ่มสตาร์ชทนย่อยที่ทำจากข้าวโพดและแป้งมันสำปะหลังในสูตรการทำขนมปังปราศจากกลูเตน พบว่า ขนมปังมีความแข็งของเนื้อขนมปังลดลง แต่ถ้าเพิ่มปริมาณสตาร์ชทนย่อยมากขึ้น ขนมปังจะมีคุณภาพที่ลดลง

ตารางที่ 2.3 สตวรรษส่วนต่างๆ RDS, SDS และ SD ในขนมอบประเภทต่างๆ

ประเภทขนมอบ	RDS (% น้ำหนัก แห้ง)	SDS (% น้ำหนัก แห้ง)	RS (% น้ำหนัก แห้ง)	เอกสารอ้างอิง
Rye bread	73.4	1.9	2.7	Tas และ El (2000)
Wheat bran bread	68.0	2.0	6.6	
Corn flour bread	65.9	2.4	2.2	
White bread	40.39	43.48	0.78	Rosin และคณะ (2002)
Yeast leavened wheat bread	-	-	1.25	El-Sayed และ Rabalski (2008)
Sourdough wheat bread	-	-	1.21	
Yeast/sourdough wheat bread	-	-	1.16	
Wheat biscuit	-	-	0.69	
Wheat cookie	-	-	0.28	
Wheat muffin	-	-	0.79	
Wheat bread	38.4	33.6	30.1	Yousif และคณะ (2012) % น้ำหนักสตวรรษแห้ง
40% sorghum flatbread	27.7	33.4	38.9	

หมายเหตุ ค่าตัวเลขที่ได้ผู้วิจัยแต่ละกลุ่มใช้วิธีวิเคราะห์ที่แตกต่างกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัตถุดิบ

3.1.1 ถั่วมะแฮะ (pigeon pea; *Cajanus cajan*) พันธุ์ขอนแก่น ได้รับอนุเคราะห์จากศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น เมล็ดสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ เช่น แมลงเจาะ เมล็ดแตกหัก

3.1.2 ถั่วแดงหลวง (red kidney bean; *Phaseolus vulgaris*) จากบริษัทตั้งยิ่งวัฒนา จำกัด เมล็ดสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ เช่น แมลงเจาะ เมล็ดแตกหัก

3.1.3 หัวจิ้น (Chinese water chestnut; *Eleocharis dulcis*) จากตลาดหัวตะเข้ ตลาดกระบี่ ผลสมบูรณ์ไม่มีตำหนิ เช่น แมลงเจาะ หัก

3.2 เครื่องมือ

3.2.1 เครื่องกะเทาะเปลือกถั่ว

3.2.2 ตู้อบแบบถาด (tray dryer) ผลิตโดยบริษัทโปรเกรส อีเล็คโทรนิค ประเทศไทย

3.2.3 เครื่องบดแบบหยาบ (hammer mill) ผลิตโดยบริษัท Philip-Cucina ประเทศอินโดนีเซีย

3.2.4 เครื่องบดแบบเข็ม (pin mill) รุ่น ZM 1000 ผลิตโดยบริษัท Retsch ประเทศเยอรมัน

3.2.5 ตู้อบลมร้อน (hot air oven) รุ่น FED 53 ผลิตโดยบริษัท Binder ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.6 เครื่องชั่งละเอียด 2 ตำแหน่ง รุ่น PB3002-L ผลิตโดยบริษัท Mettler toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.7 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น ML204 ผลิตโดยบริษัท Mettler toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.8 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) รุ่น Legend Mach 1.6 R ผลิตโดยบริษัท ThermoFisher ประเทศเยอรมัน

3.2.9 UV-VIS Spectrophotometer รุ่น UV-1601 ผลิตโดยบริษัท Shimadzu ประเทศญี่ปุ่น

3.2.10 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) รุ่น WNB 7-45 ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมัน

3.2.11 เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น SevenEasy ผลิตโดยบริษัท Mettler toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.12 micro-pipettors และ Tips ผลิตโดยบริษัท Mettler toledo ประเทศสวิตเซอร์แลนด์

3.2.13 โถสำหรับดูดความชื้น (desiccator)

3.2.14 magnetic stirrers และ stirring bars รุ่น C-MAG MS 7 ผลิตโดยบริษัท IKA-Werke GmbH ประเทศเยอรมัน

3.2.15 เครื่อง vortex mixer รุ่น G560E ผลิตโดยบริษัท Scientific Industries ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.2.16 อุปกรณ์เครื่องแก้ว

3.2.17 Thermometer

3.2.18 เครื่องวัดสี Minolta CR400

3.2.19 เครื่อง Texture analyzer รุ่น TA-XT Plus

3.2.20 เครื่อง Scanner รุ่น 9000F Mark II ผลิตโดยบริษัท Canon

3.2.21 เครื่องบ่มขนมปัง รุ่น NFF-16PS ผลิตโดยบริษัท Huangpu China

3.2.22 เครื่องอบขนมปัง รุ่น YXD-10A ผลิตโดยบริษัท Huangpu China

3.2.23 เครื่องตีผสมขนมปัง ผลิตโดยบริษัท กิตติวัฒนา

3.3 สารเคมี

3.3.1 acetic acid บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

3.3.2 acetone บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

3.3.3 calcium chloride (CaCl_2) บริษัท Ajax Finechem ประเทศนิวซีแลนด์

3.3.4 dimethyl sulphoxide (DMSO) บริษัท Riedel de Haen ประเทศเยอรมัน

3.3.5 ethyl alcohol บริษัท อีตัลมาร์ ประเทศไทย

3.3.6 hydrochloric acid (HCl) บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

3.3.7 maleic acid บริษัท Ajax Finechem ประเทศนิวซีแลนด์

3.3.8 potassium hydroxide (KOH) บริษัท Ajax Finechem ประเทศนิวซีแลนด์

3.3.9 sodium azide บริษัท Merck ประเทศเยอรมัน

3.3.10 sodium hydroxide (NaOH) บริษัท Carlo Erba Reagenti ประเทศอิตาลี

3.3.11 ชุดตรวจสอบปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch assay procedure K-RSTAR 05/2008, 100 assays per kit) บริษัท Megazyme ประเทศไอร์แลนด์

3.3.12 แป้งสาลี ตรา หงส์ขาว

3.3.13 เกลือ ตรา ปรงทิพย์

3.3.14 ยีสต์ ตรา fermipan

3.3.15 เนยขาว ตรา ใบไม้ทอง

3.3.16 น้ำตาลทรายขาวละเอียด ตรา ลิน

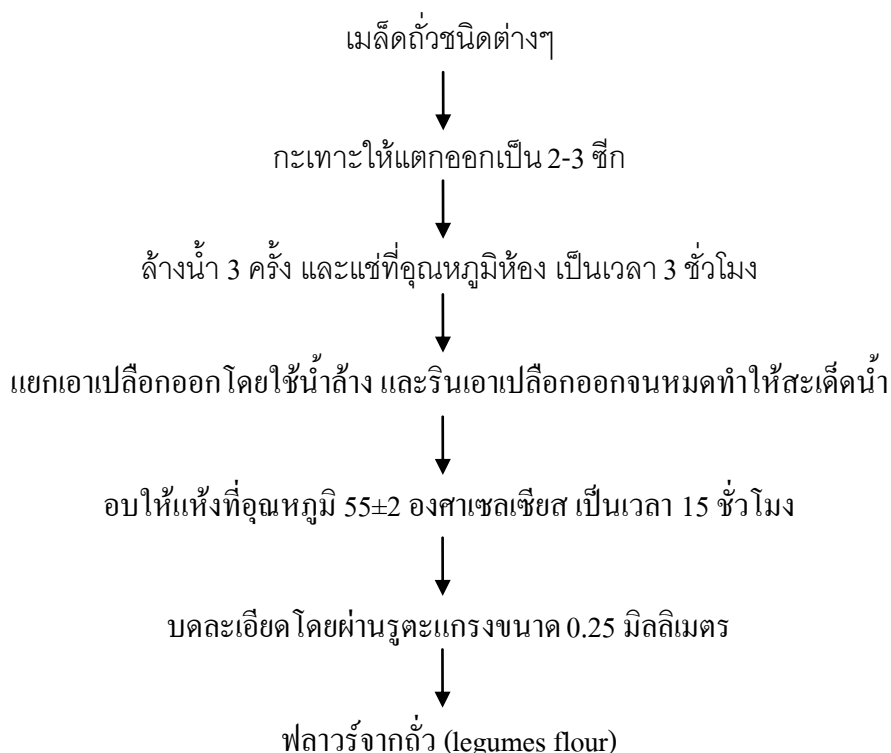
3.3.17 น้ำ

3.4 การเตรียมฟลาวัวร์ (flour) และสตาร์ช (starch) จากถั่วมะแฮะ ถั่วแดง และ สตาร์ชแห้วจีน

3.4.1 การเตรียมฟลาวัวร์จากถั่วมะแฮะ ถั่วแดง และ แห้วจีน

เตรียมฟลาวัวร์จากถั่วชนิดต่างๆ โดยดัดแปลงจากวิธีของ สมชาย ประภาวัต และคณะ (2541) นำเมล็ดถั่วชนิดต่างๆ มาแยกกะเทาะให้แตกออกเป็น 2-3 ซีก โดยใช้เครื่องกะเทาะเปลือกถั่ว และนำมาล้างน้ำ 3 ครั้งจนสะอาด ก่อนนำไปแช่น้ำที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แยกเอาเปลือกออกโดยใช้น้ำล้าง และรินเอาเปลือกออกจนหมดทำให้สะเด็ดน้ำ แล้วนำถั่วที่ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 55 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 ชั่วโมง นำมาบดละเอียดโดยผ่านรูดะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร ได้เป็น ฟลาวัวร์จากถั่ว (ภาพที่ 3.1) สังเกตลักษณะของฟลาวัวร์ที่ผลิตได้ และคำนวณปริมาณร้อยละของฟลาวัวร์ที่ได้ (% yield) เป็นน้ำหนักแห้ง (dry basis)

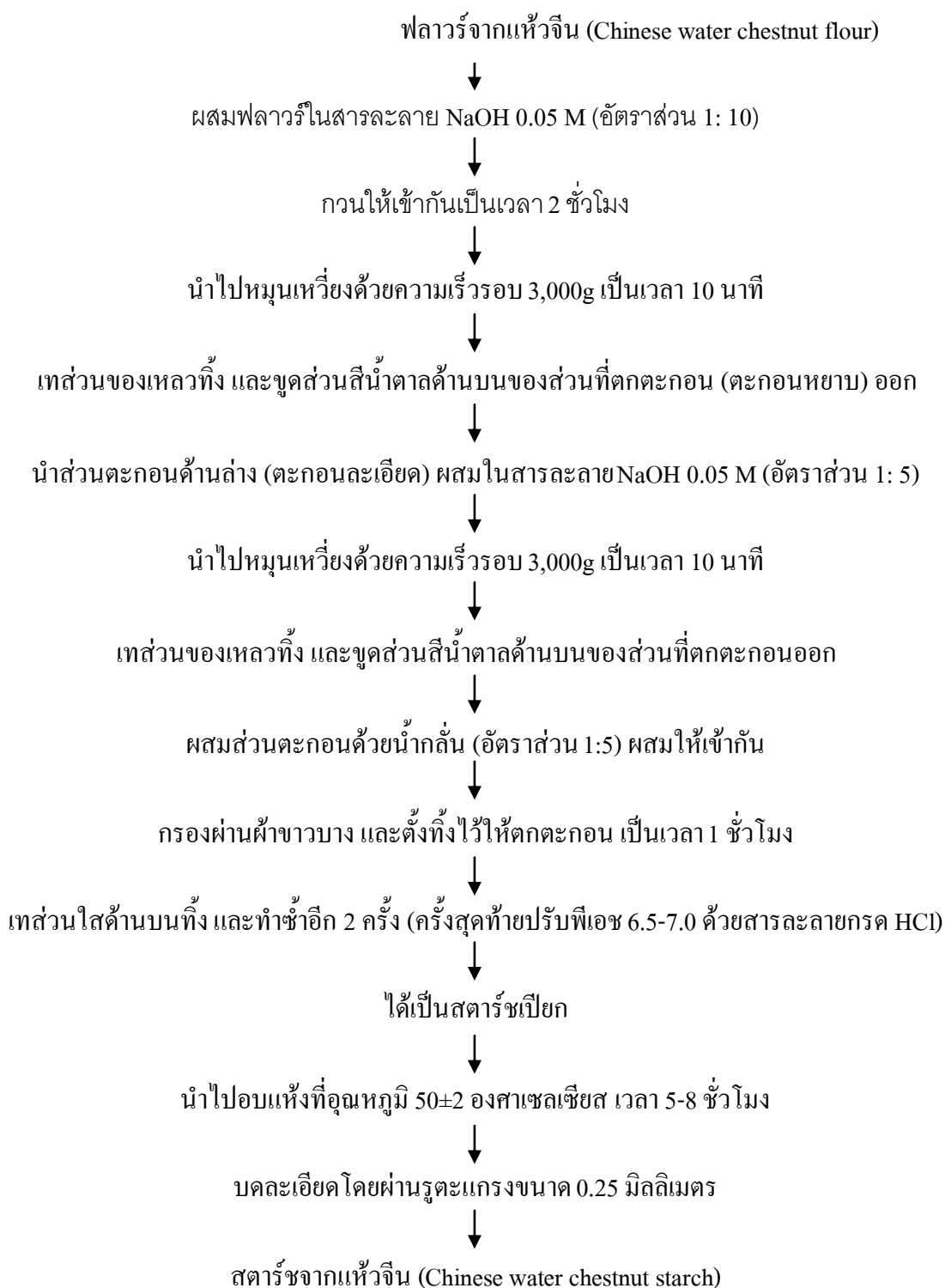
$$\text{ปริมาณของฟลาวัวร์ที่ได้ (\% Yield)} = \frac{(\text{น้ำหนักของฟลาวัวร์จากถั่วที่ได้}) \times 100}{\text{น้ำหนักถั่วเริ่มต้น}}$$



ภาพที่ 3.1 การเตรียมฟลาวัวร์จากถั่วมะแฮะ ถั่วแดง และ แห้วจีน

3.4.2 การเตรียมสสารจากแก้ว

เตรียมสสารจากแก้ว โดยคัดแปลงจากวิธีของ Nimsung และคณะ , (2007) นำเป้งแก้วที่เตรียมได้ผสมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide) ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ โดยใช้อัตราส่วน 1:10 (เป้ง 1 กรัม: สารละลาย 10 มิลลิลิตร) กวนให้เข้ากันตลอดเวลา เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000g เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง และขูดส่วนสีน้ำตาลด้านบนของส่วนที่ตกตะกอน (ตะกอนหยาบ) ออก นำส่วนตะกอนด้านล่าง (ตะกอนละเอียด) ผสมในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้อัตราส่วน 1: 5 (เป้ง 1 กรัม: สารละลาย 5 มิลลิลิตร) กวนตลอดเวลา เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และนำไปหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วรอบ 3,000g เป็นเวลา 10 นาที เทส่วนของเหลวทิ้ง และขูดส่วนสีน้ำตาลด้านบนของส่วนที่ตกตะกอนออก ทำละลายส่วนที่ตกตะกอนด้วยน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 1: 5 (เป้ง 1 กรัม: น้ำ 5 มิลลิลิตร) ผสมให้เข้ากัน และกรองผ่านผ้าขาวบาง โดยใช้น้ำกลั่นล้างส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ออกให้ได้มากที่สุด ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เทส่วนใสด้านบนทิ้ง ทำละลายส่วนที่ตกตะกอนด้วยน้ำกลั่นด้วยอัตราส่วน 1: 5 (เป้ง 1 กรัม: น้ำ 5 มิลลิลิตร) ผสมให้เข้ากัน และกรองผ่านผ้าขาวบาง โดยใช้น้ำกลั่นล้างส่วนที่ไม่สามารถละลายได้ออกให้ได้มากที่สุด ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำอีก 2 ครั้ง โดยในครั้งสุดท้ายปรับพีเอชของน้ำเป้ง ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) เป็น 6.5-7.0 ได้เป็นสสารขี้เปียก และนำไปอบแห้งด้วยเครื่องอบแบบลมร้อนอุณหภูมิ 50 ± 2 องศาเซลเซียส เวลา 5-8 ชั่วโมง นำมาบดละเอียดโดยผ่านรูดะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร ได้เป็นสสารขี้แก้ว เก็บในถุงสุญญากาศและเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 3.2) สังเกตลักษณะของสสารขี้ที่ผลิตได้ และคำนวณปริมาณของสสารขี้ที่ได้ (% yield) เป็นน้ำหนักแห้ง (dry basis)



ภาพที่ 3.2 การเตรียมสตาร์ชจากแห้ว

3.5 ศึกษาปริมาณสตาร์ชทนย่อย (RS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (SDS) อัตราการย่อย (HI) และปริมาณอะมิโลส ของสตาร์ช ถั่วมะแฮะ สตาร์ช ถั่วแดง และ สตาร์ชแห้วจีน ที่ยังไม่ผ่านการตัดแปรร

3.5.1 ศึกษาปริมาณสตาร์ชทนย่อย (resistant starch content) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้อย่างรวดเร็ว (RDS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้อย่างช้าๆ (SDS) ของสตาร์ช ถั่วมะแฮะ สตาร์ช ถั่วแดง และ สตาร์ชแห้วจีน ตามวิธีของ AOAC Method 2002.02 โดยใช้ชุดตรวจสอบ Resistant Starch Assay Kit (Megazyme ประเทศไอร์แลนด์)

3.5.2 ศึกษาอัตราการย่อย (*In vitro* starch digestibility) และ ค่าดัชนีน้ำตาล (GI)

อัตราการย่อยแป้ง (*In vitro* starch digestibility) ศึกษาที่เวลา 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 นาที โดยพล็อตกราฟระหว่าง Total starch hydrolysis กับ เวลา (นาที) คำนวณค่า Hydrolysis index (HI) ตามวิธีของ Goni และคณะ, (1997) ดังสมการ

A first order equation ดังนี้

$$C = C_{\infty} (1 - e^{-kt})$$

C = ความค่าความเข้มข้นของการย่อยที่เวลา t

C_{∞} = สมดุลของความเข้มข้นของการย่อย

k = the kinetic constant

t = เวลา (นาที)

หลังจากนั้นคำนวณพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) ดังสมการ

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - (C_{\infty}/k) [1 - \text{Exp}[-k(t_f - t_0)]]$$

คำนวณค่าดัชนีการย่อย (Hydrolysis index, HI) ดังสมการ

$$HI = (AUC \text{ of test food} / AUC \text{ of reference sample}) \times 100$$

หมายเหตุ ตัวอย่างอ้างอิง คือ ขนมปังขาว

- ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic Index, GI) ตามวิธีของ Goni และคณะ, (1997) ตามสมการดังนี้

$$GI = 39.71 + (0.549 \times HI)$$

3.5.3 วิเคราะห์ปริมาณอะมิโลส (Juliano, 1971), รายละเอียดในภาคผนวก ก.1

3.6 การตัดแปรรสตาซ์โดยเปรียบเทียบวิธีการให้ความร้อนแบบการอบ (baking) และการใช้หม้อนึ่ง ความดันไอ (autoclave) และการใช้ไมโครเวฟ (microwave) แล้วทำให้เย็นที่ 4°C ระยะเวลาต่างๆ เพื่อเพิ่มปริมาณสตาซ์ ทยอย

วิธีการให้ความร้อนแบบการอบ (baking) ดัดแปลงจากวิธีของ Chung และคณะ, 2009) นำตัวอย่างสตาซ์จากถั่วมะแฮะ สตาซ์ถั่วแดงหลวงและสตาซ์เห้วจินที่เตรียมได้ไปอบ โดยใช้ตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง วิธีการให้ความร้อนแบบการใช้หม้อนึ่งความดันไอ (autoclave) ดัดแปลงจากวิธีของ Gonzalez-Soto และคณะ, 2004) นำตัวอย่างสตาซ์ที่เตรียมได้เข้าหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ใไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 และ 48 ชั่วโมง วิธีการให้ความร้อนแบบการใช้ไมโครเวฟ (microwave) นำตัวอย่างสตาซ์ที่เตรียมได้ ให้ความร้อน โดยใช้ไมโครเวฟที่ 450 วัตต์ ความถี่ 2,450 MHz เป็นเวลา 5 นาที จากนั้น ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ไปทำแห้งที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปวิเคราะห์ค่าต่างๆ ดังในข้อ 3.5

3.7 ขั้นตอนการทำขนมปัง ดัดแปลงจาก (Keeratipibul และคณะ, 2010)

- 3.7.1 ซั่งส่วนผสมต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 และ 3.2
- 3.7.2 ร่อนแป้งสาลี สตาซ์ถั่วมะแฮะ , ถั่วแดงหลวง และเห้ว ด้วยตะแกรงลงในโบริ้วผสมก่อน จากนั้นเติมน้ำตาลทรายยีสต์ และเกลือลงไป
- 3.7.3 ทำส่วนผสมที่ได้มาตีผสมด้วยความเร็วต่ำสุดเป็นเวลา 1 นาทีเพื่อให้ส่วนผสมทั้งหมดเข้ากัน จากนั้นค่อยๆเติมน้ำลงไป ตีผสมนาน 3 นาที
- 3.7.4 เมื่อโดเริ่มจับตัวกันเป็นก้อนให้เปลี่ยนความเร็วในการตีผสมเป็นความเร็วปานกลาง ตีผสมนาน 3 นาที จากนั้นเติมเนยขาวลงไป ตีผสมนาน 12
- 3.7.5 จากนั้นเพิ่มระดับความเร็วในการตีผสมเป็นความเร็วสูงสุด ตีนาน 1 นาที
- 3.7.6 นำโดขนมปังที่ได้มาใส่ภาชนะและบ่มในตู้บ่มที่มีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระดับความชื้น 85% เป็นเวลา 90 นาที ในระหว่างการบ่ม 90 นาทีนี้จะนำโดขนมปังมาวัดไต่อากาศออกเมื่อบ่มครบ 1 ชั่วโมง
- 3.7.7 เมื่อบ่มครบ 90 นาทีนำโดขนมปังออกมาตัดแบ่งเป็นก้อน โดยมีน้ำหนักแต่ละก้อน 185 กรัม จากนั้นก็นวดให้เป็นก้อนกลมพักไว้ที่อุณหภูมิห้อง
- 3.7.8 นำโดขนมปังที่ตัดแบ่งแล้วมีนวดขึ้นรูปและใส่ลงในพิมพ์ นำไปบ่มในตู้บ่มที่มีอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระดับความชื้น 85% เป็นเวลา 90 นาที
- 3.7.9 นำไปอบด้วยเตาไฟฟ้าที่มีอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที

3.7.10 ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ชั่งน้ำหนัก และเก็บขนมปังใส่ถุงพลาสติกพอลิเอทิลีน เพื่อวิเคราะห์สมบัติต่างๆของขนมปัง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวง แห้วจิ้นที่ใช้ผลิตขนมปัง

ส่วนผสม	อัตราส่วนสตาร์ช	อัตราส่วนแป้งสาลี
สูตรควบคุม	-	100%
สตาร์ชมะแฮะ	10%	90%
	20%	80%
	30%	70%
สตาร์ชถั่วแดงหลวง	10%	90%
	20%	80%
	30%	70%
สตาร์ชแห้ว	10%	90%
	20%	80%
	30%	70%

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของส่วนผสมต่างๆที่ใช้ผลิตขนมปัง

ส่วนผสม	ปริมาณ (กรัม)/100 กรัม
ยีสต์	1.4
เกลือ	1.5
น้ำตาลทรายขาว	6
น้ำเปล่า	65
เนยขาว	5

3.7.1 วิเคราะห์สมบัติต่างๆของขนมปัง

3.7.1.1 ศึกษาปริมาตรจำเพาะของขนมปัง

หลังจากอบขนมปังเสร็จให้นำขนมปังมาชั่งน้ำหนักหลังอบทันที จากนั้นทิ้งให้ขนมปังเย็นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 45 นาที จึงนำมาวัดปริมาตรจำเพาะของขนมปังด้วยวิธีแทนที่ด้วยเมล็ดงาคำในภาชนะที่แน่นอน (AACC, 2000) คำนวณจากสูตรดังนี้

$$\text{ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง(ซม.}^3\text{/กรัม)} = \frac{\text{ปริมาตรของขนมปัง}}{\text{น้ำหนักของขนมปัง}}$$

3.7.1.2 น้ำหนักที่หายไปหลังอบ

น้ำหนักที่หายไปหลังอบนั้นศึกษาโดยหลังจากขนมปังอบเสร็จให้นำขนมปังมาชั่งน้ำหนักทันที จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาเข้าสู่สูตรคำนวณดังนี้ (Mariotti และคณะ,2013)

$$\% \text{ น้ำหนักที่หายไปหลังอบ} = \frac{(\text{น้ำหนักโด} - \text{น้ำหนักขนมปังหลังอบ}) * 100}{\text{น้ำหนักของโด}}$$

3.7.1.3 วิเคราะห์ปริมาณความชื้นของ crumb ของขนมปัง

ศึกษาค่า water activity ด้วยเครื่อง Water Activity Meter (Aqualab, CX3TE, USA) โดยบรรจุตัวอย่างใส่ตลับพลาสติกสำหรับวิเคราะห์โดยให้ปริมาณไม่เกินครึ่งหนึ่งของตลับพลาสติก (Sabanis และคณะ, 2013)

3.7.1.4 วิเคราะห์เนื้อสัมผัสของขนมปัง

เมื่อขนมปังเย็นลงให้ตัดแบ่งชิ้นขนมปังจากตรงกลางออกเป็น 3 ชิ้นแต่ละชิ้นจะมีขนาด 20 มิลลิเมตร วัดเนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปังแบบ Texture Profile Analysis ด้วยเครื่อง Texture analyzer รุ่น TA-XT Plus โดยใช้หัววัด P/25 ความเร็วในการกด 5 มิลลิเมตร/วินาที กดตัวอย่างลึก 40% ของความสูงของตัวอย่าง อ่านค่า Hardness(N) คือ แรงสูงสุดที่เกิดขึ้นระหว่างการกดหรือเทียบได้กับการเคี้ยวครั้งแรก และค่า Cohesiveness คือ เป็นพลังงานยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร หาได้จาก อัตราส่วนของพื้นที่ใต้กราฟของการกดหรือการเคี้ยวครั้งที่ 2 (Area 2) และครั้งที่ 1 (Area 1) คัดแปลงจากวิธี AACC 74-09 method (AACC International, 2000)

3.7.1.5 ลักษณะปรากฏของขนมปัง

เมื่อขนมปังเย็นลงให้ตัดแบ่งชิ้นขนมปังจากตรงกลางออกเป็น 3 ชิ้นแต่ละชิ้นจะมีขนาด 20 มิลลิเมตร นำไปถ่ายภาพด้วยเครื่อง Scanner รุ่น 9000F Mark II

3.7.1.6 ศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์

ศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ขนมปังด้วยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ทำการประเมินระดับความชอบด้วยวิธีฮีโดนิค (Hedonic test) แบบสเกลตัวเลข 5 จุด (5-point hedonic) ทดสอบกลุ่มผู้บริโภคทั่วไปที่เป็นนักศึกษา บุคลากรภายในคณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังจำนวน 30 คน จากนั้นรวบรวมแบบสอบถาม ประเมินผล และทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

3.7.1.7 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Factorial in RCBD โดยทำการศึกษาอัตราส่วนของถั่วแดงหลวง ถั่วมะแฮะ และสตาร์ชแห้ว ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Analysis of variance (ANOVA) และวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์วิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS Version 11.5

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 การย่อยในหลอดทดลองของสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดงหลวงและสตาร์ชแห้วจินทั้งก่อนการตัดแปรและที่ผ่านการตัดแปรแล้ว และปริมาณอะไมโลส

จากการศึกษาการย่อยของสตาร์ชถั่วมะแฮะ ถั่วแดงหลวงและสตาร์ชแห้วจินทั้งก่อนการตัดแปรและที่ผ่านการตัดแปรแล้วในหลอดทดลอง พบว่า ปริมาณ SDS ในสตาร์ชจากถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วแดงหลวงก่อนการตัดแปรมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 77.38 % (ตารางที่ 4.1) และ 72.61 % (ตารางที่ 4.2) ขณะที่สตาร์ชแห้วจินก่อนการตัดแปรพบในปริมาณที่ต่ำกว่าเท่ากับ 57.86 % (ตารางที่ 4.1.3) แต่ปริมาณสตาร์ชทนย่อยในสตาร์ชก่อนการตัดแปรทั้งสามชนิด พบอยู่ในช่วง 6-8 % หลังจากการตัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนพบว่า การใช้ความร้อนจากไมโครเวฟในสตาร์ชถั่วมะแฮะ (ตารางที่ 4.1) และสตาร์ชถั่วแดง (ตารางที่ 4.2) พบว่าทำให้ปริมาณ RDS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ปริมาณ RS ในถั่วแดงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติด้วยการใช้ไมโครเวฟและบ่มเย็นนาน 24 ชั่วโมง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Liu และคณะ (2012) พบว่าการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟในสตาร์ชมันฝรั่งทำให้ปริมาณ RDS ลดลง แต่ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจากไมโครเวฟไปมีผลต่อ โครงสร้างผลึกและการย่อยของสตาร์ช สำหรับปริมาณ SDS พบว่ายังไม่มียุทธวิธีใดที่ทำให้สตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วแดงมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ปริมาณ SDS ของสตาร์ชแห้วจินทำให้เพิ่มขึ้นด้วยการใช้หม้อนึ่งความดันไอ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Eyaru และคณะ (2009) พบว่าสามารถทำให้ปริมาณ SDS ในสตาร์ชถั่วเหลือง เพิ่มขึ้นได้โดยใช้วิธีแช่ถั่วเหลืองในน้ำและนำไปเข้าหม้อนึ่งความดันโดยปริมาณ SDS เพิ่มขึ้นจาก 13.2% เป็น 36.5% สำหรับปริมาณอะไมโลสของทั้งสตาร์ชถั่วมะแฮะสตาร์ชถั่วแดง และสตาร์ชแห้วจินเพิ่มขึ้นด้วยการตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการใช้หม้อนึ่งความดันไอและ ไมโครเวฟ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ จริยาและนภัสรพี (2555) ที่พบว่าฟลาวัวร์ถั่วเขียวผิวมันมีปริมาณอะไมโลสเพิ่มขึ้นด้วยการใช้หม้อนึ่งความดันไอและไมโครเวฟซึ่งตัวอย่างที่ศึกษามีความแตกต่างของวิธีการที่ทำให้ค่าที่ศึกษาเพิ่มขึ้นหรือลดลงมาจากโครงสร้างของสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดง และสตาร์ชแห้วจินที่แตกต่างกัน สตาร์ชแห้วจินมีโครงสร้างผลึกแบบ A (ปาจารย์และนภัสรพี , 2555) ส่วนสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วแดงพบมีโครงสร้างผลึกแบบ C

ตารางที่ 4.1 . ร้อยละของน้ำหนักแห้ง ของความชื้น ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว (RDS) สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้ช้า (SDS) สตาร์ชทั้งหมด (TS) สตาร์ชทนย่อย (RS) และ อะไมโลส ของสตาร์ช ถั่วมะแฮะ

วิธีการตัดแปร	เวลา บ่ม เย็น (ชม.)	ความชื้น (%)	RDS (%)	SDS (%)	TS (%)	RS (%)	อะไมโลส (%db)
ไม่ผ่านการตัดแปร	0	5.61±0.26 ^b	18.67±0.79 ^c	77.38±2.61 ^a	96.36±4.21 ^a	7.87±0.49 ^b	40.87±0.39 ^c
ตู้อบลมร้อน	24	6.66±0.29 ^a	24.38±0.41 ^b	68.27±0.08 ^b	98.81±0.13 ^a	6.17±0.22 ^b	40.24±0.40 ^c
ตู้อบลมร้อน	48	5.33±0.11 ^c	18.84±0.55 ^c	32.84±0.16 ^d	97.56±0.06 ^a	8.35±0.15 ^b	40.78±0.78 ^c
หม้อนึ่งไอน้ำ	24	5.14±0.03 ^c	18.63±0.54 ^c	72.21±0.54 ^b	88.32±0.60 ^b	5.33±0.35 ^c	53.29±0.35 ^b
หม้อนึ่งไอน้ำ	48	5.77±0.10 ^b	33.21±0.28 ^a	79.00±0.78 ^a	86.24±0.08 ^b	3.13±0.07 ^d	53.67±0.11 ^b
ไมโครเวฟ	24	5.95±0.14 ^b	8.64±0.59 ^d	50.66±0.52 ^c	76.54±0.35 ^c	17.26±0.06 ^a	55.71±0.32 ^a
ไมโครเวฟ	48	6.49±0.05 ^a	8.68±0.78 ^d	75.10±0.16 ^b	77.71±0.81 ^c	2.47±0.14 ^d	55.57±0.53 ^a

หมายเหตุ ^{a,b,c,...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.2 ร้อยละของน้ำหนักแห้ง ของความชื้น ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว (RDS) สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้ช้า (SDS) สตาร์ชทั้งหมด (TS) สตาร์ชทนย่อย (RS) และ อะไมโลส ของสตาร์ชถั่วแดง

วิธีการตัดแปร	เวลา บ่ม เย็น (ชม.)	ความชื้น (%)	RDS (%)	SDS (%)	TS (%)	RS (%)	อะไมโลส (%db)
ไม่ผ่านการตัดแปร	0	5.90±0.07 ^b	17.67±0.57 ^d	72.61±3.17 ^a	96.48±4.21 ^a	6.21±0.47 ^b	40.84±0.47 ^c
ตู้อบลมร้อน	24	6.74±0.06 ^a	21.57±0.32 ^a	69.54±0.73 ^{ab}	89.33±0.13 ^b	4.19±0.22 ^c	40.16±0.31 ^c
ตู้อบลมร้อน	48	5.38±0.04 ^c	13.30±0.05 ^c	69.54±0.73 ^a	93.79±0.06 ^a	6.61±0.52 ^b	40.78±0.78 ^c
หม้อนึ่งไอน้ำ	24	5.15±0.04 ^d	19.09±0.22 ^c	28.93±0.73 ^c	88.26±0.60 ^b	3.35±0.09 ^d	53.22±0.34 ^b
หม้อนึ่งไอน้ำ	48	5.48±0.16 ^c	19.82±0.35 ^b	27.19±0.20 ^c	48.60±0.08 ^c	1.59±0.08 ^c	53.55±0.18 ^b
ไมโครเวฟ	24	5.95±0.12 ^b	9.34±0.06 ^f	63.58±0.23 ^c	70.33±0.35 ^d	15.16±0.20 ^a	55.36±0.35 ^a
ไมโครเวฟ	48	6.47±0.09 ^a	7.70±0.10 ^g	73.89±0.53 ^a	77.71±0.81 ^c	0.47±0.01 ^f	55.58±0.52 ^a

หมายเหตุ ^{a,b,c,...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4.3 ร้อยละของน้ำหนักแห้ง ของความชื้น ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว (RDS) สตาร์ชที่สามารถถูกย่อยได้ช้า (SDS) สตาร์ชทั้งหมด (TS) สตาร์ชทนย่อย (RS) และ อะไมโลส ของสตาร์ชหัว

วิธีการตัดแปร	เวลาบ่มเย็น (ชม.)	ความชื้น (%db)	RDS (%)	SDS (%)	TS (%)	RS (%)	อะไมโลส (%db)
ไม่ผ่านการตัดแปร	0	6.39±0.04 ^b	24.55±0.63 ^c	57.86±1.62 ^a	83.99±1.07 ^b	7.59±0.08 ^a	42.89±0.44 ^c
ตู้อบลมร้อน	24	5.45±0.09 ^c	31.22±0.46 ^d	39.71±0.27 ^c	72.41±0.35 ^c	1.48±0.16 ^c	42.39±0.22 ^c
ตู้อบลมร้อน	48	6.06±0.06 ^c	43.14±0.02 ^b	39.88±2.58 ^c	96.38±0.40 ^a	14.06±0.10 ^a	40.16±0.31 ^d
หม้อนึ่งไอน้ำ	24	5.50±0.03 ^c	50.85±0.71 ^a	60.84±0.28 ^a	79.18±0.49 ^c	0.88±0.08 ^d	40.78±0.78 ^d
หม้อนึ่งไอน้ำ	48	6.68±0.08 ^a	32.88±0.25 ^c	60.49±0.21 ^a	75.96±0.51 ^d	0.58±0.10 ^c	53.60±0.35 ^b
ไมโครเวฟ	24	6.37±0.02 ^b	23.14±0.23 ^f	40.45±0.28 ^b	85.90±0.02 ^b	1.92±0.08 ^b	55.39±0.39 ^a
ไมโครเวฟ	48	5.71±0.03 ^d	21.83±0.29 ^e	42.50±0.66 ^b	85.15±2.63 ^b	2.14±0.03 ^b	42.15±0.26 ^c

หมายเหตุ ^{a,b,c,...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

4.2 ปริมาณสตาร์ชทนย่อย(RS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว(RDS) และ ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า(SDS) ของขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดง และ สตาร์ชหัวเงิน ที่สัดส่วนต่างๆ

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงสัดส่วนร้อยละ 30 มีปริมาณสตาร์ชทนย่อย มากที่สุดถึงร้อยละ 9.20 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะอยู่ในช่วงร้อยละ 3.58 – 5.22 ของน้ำหนักแห้ง และ ขนมปังจากสตาร์ชหัวเงินอยู่ในช่วงร้อยละ 2.17 – 3.37 ของน้ำหนักแห้ง สำหรับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว และยังพบว่าขนมปังจากสตาร์ชหัวเงินสัดส่วนร้อยละ 10 มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็วมากที่สุด คือ ร้อยละ 67.80 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะอยู่ในช่วงร้อยละ 43.98 – 55.32 ของน้ำหนักแห้ง และ ขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงอยู่ในช่วงร้อยละ 48.19 – 56.79 ของน้ำหนักแห้ง สำหรับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า ส่วนขนมปังจากสตาร์ชหัวเงินสัดส่วนร้อยละ 20 มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้ามากที่สุด คือ ร้อยละ 38.71 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะอยู่ในช่วงร้อยละ 9.96 – 17.84 ของน้ำหนักแห้ง และ ขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงอยู่ในช่วงร้อยละ 1.24 – 17.22 ของน้ำหนักแห้ง

ตารางที่ 4.4 ปริมาณสตาร์ชทนย่อย(RS) ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว(RDS) และ ปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า(SDS) ของขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดง และ สตาร์ชแห้วจิน ที่สัดส่วนต่างๆ

วิธีการวิเคราะห์	ปริมาณการทดแทน	สตาร์ชถั่วมะแฮะ	สตาร์ชถั่วแดงหลวง	สตาร์ชแห้วจิน
RS	10%	5.22±0.58 ^{aA}	2.78±0.07 ^{bB}	2.17±0.08 ^{bC}
	20%	3.58±0.64 ^{cA}	2.87±0.07 ^{bC}	3.37±0.08 ^{aB}
	30%	3.86±0.58 ^{bB}	9.20±0.11 ^{aA}	2.32±0.08 ^{bC}
RDS	10%	55.32±0.08 ^{aB}	52.61±0.06 ^{bC}	67.80±0.04 ^{aA}
	20%	43.98±0.06 ^{cC}	56.79±0.75 ^{aA}	50.21±0.06 ^{cB}
	30%	46.22±0.06 ^{bC}	48.19±0.00 ^{cB}	61.53±0.08 ^{bA}
SDS	10%	9.96±0.24 ^{aB}	17.22±0.02 ^{aA}	9.32±0.10 ^{cB}
	20%	16.03±0.24 ^{bB}	1.24±0.02 ^{cC}	38.71±0.10 ^{aA}
	30%	17.84±0.24 ^{aB}	16.52±0.02 ^{bB}	18.0±0.10 ^{bA}

หมายเหตุ ^{A,B,C...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวนอนเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

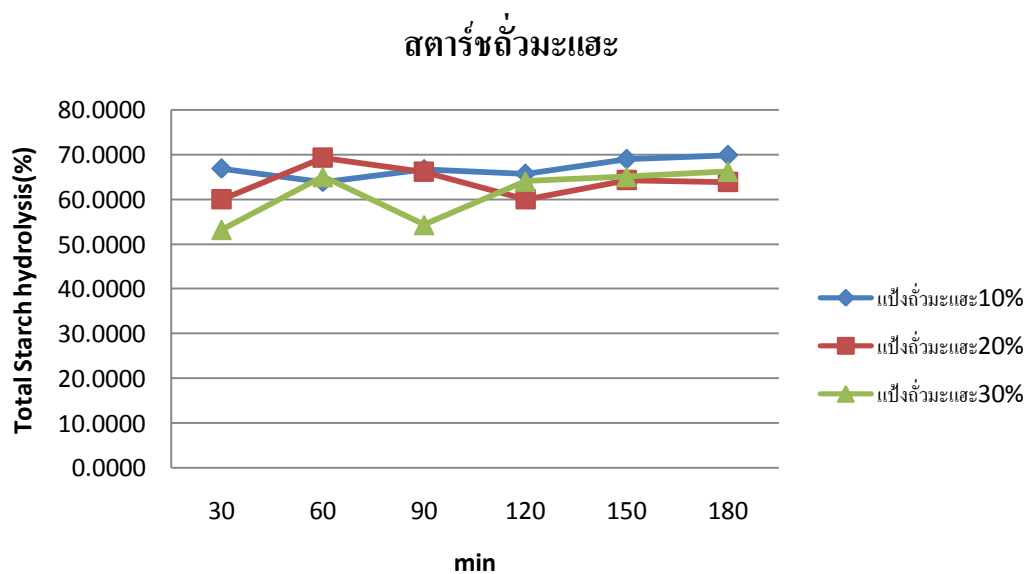
หมายเหตุ ^{a,b,c...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ ฟลาวร์ถั่วมะแฮะ และ ฟลาวร์ถั่วแดงหลวง : คัดแปรด้วยการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟประมาณ 24 ชั่วโมง

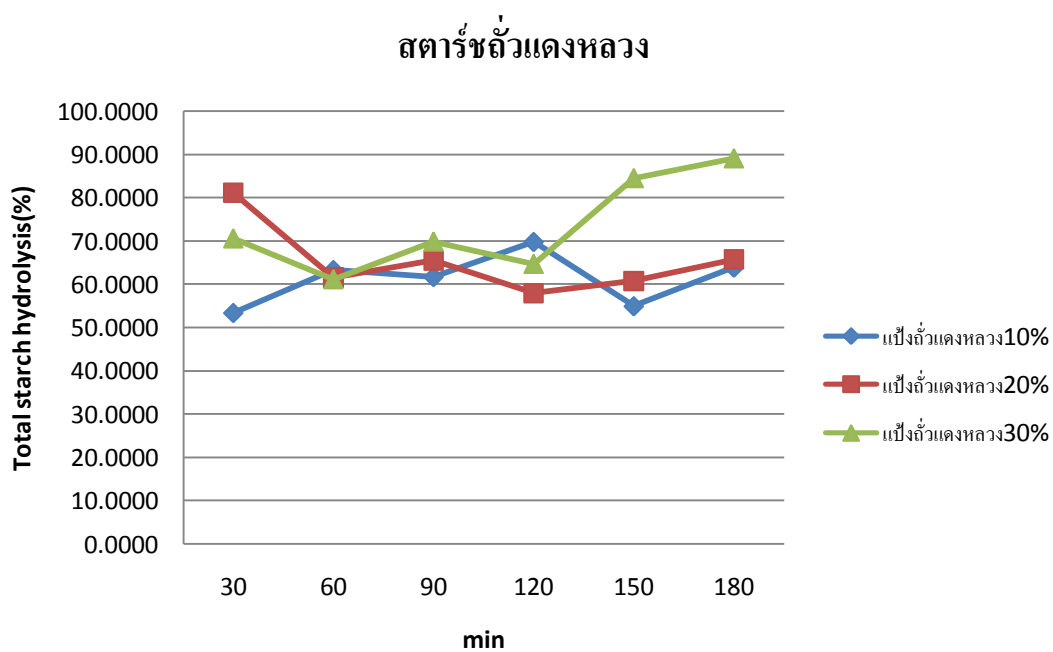
สตาร์ชแห้วจิน : คัดแปรด้วยการใช้ตู้อบลมร้อนประมาณ 48 ชั่วโมง

4.3 ผลการศึกษาอัตราการย่อย (*In vitro* starch hydrolysis rate)

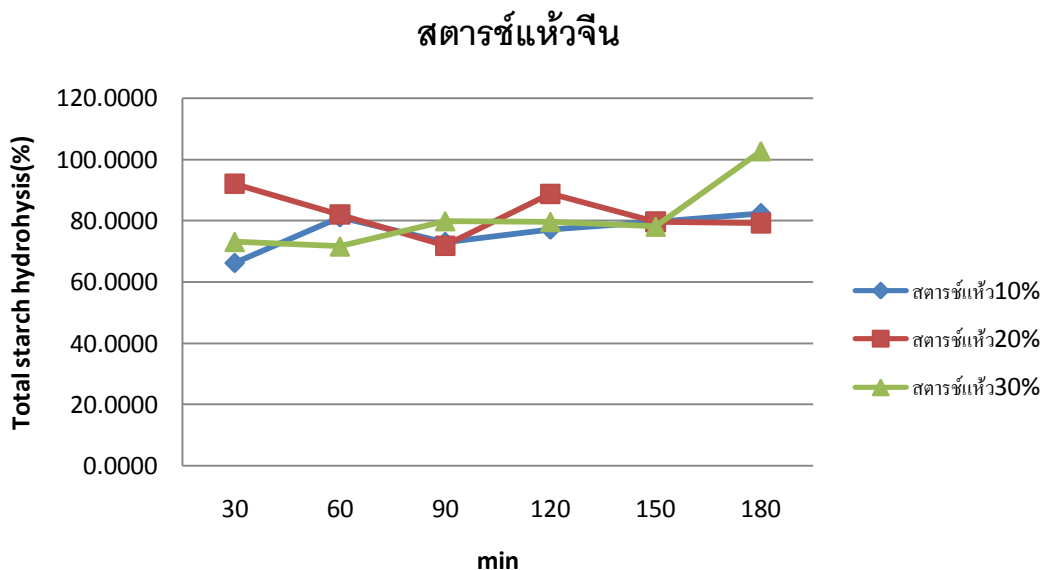
ภาพที่ 4.1 แสดงอัตราการย่อยของขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะพบว่าอัตราการย่อยที่ใกล้เคียงกัน ส่วนภาพที่ 4.2 แสดงอัตราการย่อยของขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงหลวง พบว่าขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงหลวงร้อยละ 30 มีอัตราการย่อยที่สูงที่สุด เมื่อเทียบกับขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงหลวงร้อยละ 10 และ 20 ภาพที่ 4.3.3 แสดงอัตราการย่อยของขนมปังจากสตาร์ชแห้วจินพบว่าในกลุ่มที่มีอัตราการย่อยสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ และ ถั่วแดงหลวง โดยที่ขนมปังจากสตาร์ชแห้วจินร้อยละ 30 มีอัตราการย่อยสูงที่สุด



ภาพที่ 4.1 แสดงอัตราการย่อยของขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ



ภาพที่ 4.2 แสดงอัตราการย่อยของขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงหลวง



ภาพที่ 4.3 แสดงอัตราการย่อยของขนมปังจากสตาร์ชแห้วจีน

4.4 ผลการศึกษาค่า Hydrolysis index (HI) และ ค่าดัชนีน้ำตาล (GI)

การตอบสนองต่อระดับน้ำตาลในเลือดของร่างกายเป็นการประมาณ โดยใช้ ค่าดัชนีน้ำตาล (glycemic index (GI)) ซึ่ง Mulholland และคณะ (2009) รายงานว่า ค่า GI สามารถจำแนกได้ 3 ระดับ คือ GI ระดับสูง (>70) GI ระดับกลาง (56-69) และ GI ระดับต่ำ (≤ 55) จากตารางที่ 4.5 จากการศึกษาพบว่า ขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดงหลวง และ สตาร์ชแห้วจีน จัดอยู่ใน GI ระดับสูงทั้งหมด หากเปรียบเทียบกันระหว่างขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดงหลวง และ สตาร์ชแห้วจีน จะพบว่ากลุ่มขนมปังจากสตาร์ชแห้วจีนจะมี GI ในระดับสูงที่สุด คือ 112 – 130 และ ขนมปังจากสตาร์ชแห้วจีนร้อยละ 30 มีระดับ GI สูงที่สุด ขนมปังจากฟลาวัวร์ถั่วมะแฮะมี GI ในระดับ 96.14 – 108.72 และ ขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะร้อยละ 30 มีระดับ GI ต่ำที่สุด คือ 96.14 และ ขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงหลวงมี GI ในระดับ 106.30 – 118.44

ตารางที่ 4.5 แสดงผลค่าดัชนีการย่อย (HI) และ ค่าดัชนีน้ำตาล (GI)

ตัวอย่าง	HI	GI	ระดับ
ถั่วมะแฮะ 10%	125.71	108.72	สูง
ถั่วมะแฮะ 20%	137.03	114.94	สูง
ถั่วมะแฮะ 30%	102.78	96.14	สูง
ถั่วแดง 10%	121.29	106.30	สูง
ถั่วแดง 20%	131.65	111.98	สูง
ถั่วแดง 30%	143.40	118.44	สูง
แห้วจีน 10%	132.62	112.52	สูง
แห้วจีน 20%	142.47	117.93	สูง
แห้วจีน 30%	165.26	130.44	สูง

4.5 ปริมาตรจำเพาะของขนมปัง

จากตารางที่ 4.6 พบว่าสูตรขนมปังที่ผสมสตาร์ชถั่วมะแฮะ, ถั่วแดงหลวง และแห้ว ในอัตราส่วนต่อแป้งสาลีที่ 10% นั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และให้ค่าปริมาตรจำเพาะของขนมปังสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ส่วนสูตรขนมปังที่ทำให้ปริมาตรจำเพาะของขนมปังน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญคือ สูตรที่ผสมถั่วมะแฮะในอัตราส่วน 30%

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปหลังอบมีผลมาจากโครงสร้างของขนมปังที่เกี่ยวข้องกับการระเหยของน้ำซึ่งขนมปังที่มีโครงสร้างที่ค่อนข้างแน่นจะทำให้น้ำนั้นระเหยออกไปได้ยาก จากตารางที่ 4.6 พบว่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปหลังอบของถั่วแดง , แห้ว และถั่วมะแฮะ นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยถั่วมะแฮะนั้นมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปหลังอบน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ปริมาณความชื้นในผลิตภัณฑ์ขนมปังนั้นมีผลกระทบต่ออายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ไม่ว่าจะเป็นด้านการเสื่อมเสียจากจุลินทรีย์ จากปฏิกิริยาทางเคมี เป็นต้นซึ่งทำให้ถ้ามีปริมาณความชื้นที่มีจะทำให้อายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์นั้นสั้นลง ซึ่งจากตารางที่ 4.7.1 พบว่าปริมาณความชื้น crumb ของขนมปังในสูตรที่ถูกแทนที่แป้งสาลีที่ 10% จะให้ค่าความชื้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ส่วนในสูตรที่แทนที่แป้งสาลีด้วยแห้วที่อัตราส่วน 10% ให้ค่าความชื้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติของขนมปังสูตรต่างๆ

ปริมาณจำเพาะของขนมปัง	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัวจิ้น
	10%	3.24±0.05 ^{aA}	2.86±0.04 ^{aA}	3.01±0.10 ^{aA}
	20%	1.22±0.01 ^{bC}	2.65±0.03 ^{aB}	2.76±0.02 ^{bA}
	30%	0.60±0.03 ^{cC}	1.21±0.02 ^{bB}	2.38±0.02 ^{cA}
เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป หลังอบ	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัวจิ้น
	10%	6.49±0.05 ^{aC}	7.93±0.01 ^{aB}	9.55±0.10 ^{aA}
	20%	7.21±0.04 ^{abC}	7.75±0.03 ^{aB}	8.65±0.03 ^{bA}
	30%	8.65±0.03 ^{bA}	6.85±0.02 ^{bB}	9.73±0.02 ^{aA}
ปริมาณความชื้นของ crumb ของขนมปัง	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	0.896±0.05 ^{aB}	0.900±0.04 ^{aB}	0.916±0.03 ^{aA}
	20%	0.890±0.01 ^{aA}	0.886±0.03 ^{bA}	0.900±0.02 ^{bA}
	30%	0.896±0.02 ^{aA}	0.896±0.02 ^{aA}	0.896±0.02 ^{bA}

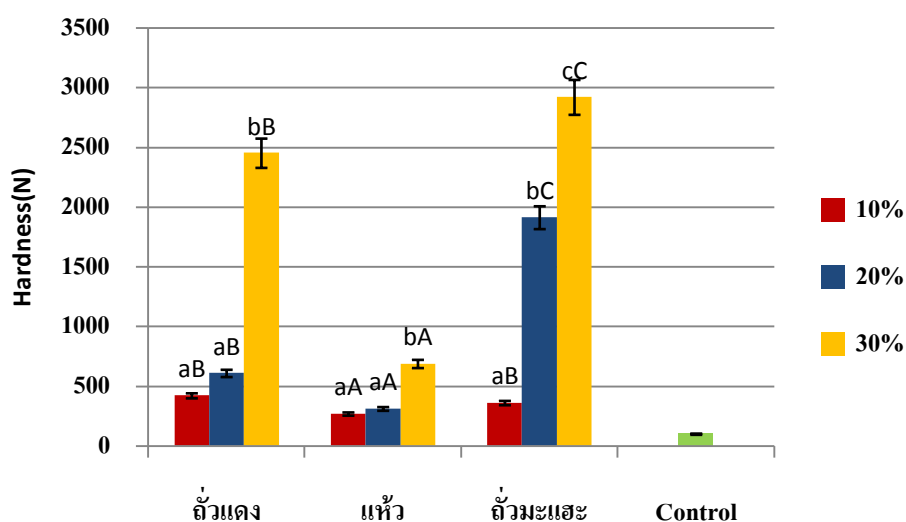
หมายเหตุ ^{a,b,c...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถวแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ ^{A,B,C...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในแต่ละคอลัมน์แสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.6 ลักษณะเนื้อสัมผัสของเนื้อขนมปัง

4.6.1 ค่า Hardness (N)

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าสูตรขนมปังที่ถูกแทนที่ในระดับ 10% จะให้ค่า hardness (N) ที่ต่ำที่สุดหรือนุ่มที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมาก็จะเป็นสูตรขนมปังที่แทนที่ในระดับ 20% และ 30% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วพบว่าสูตรขนมปังที่ผสมแห้วให้ค่า hardness (N) ที่ต่ำที่สุดหรือนุ่มที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็นแทนที่ด้วยอัตราส่วนเท่าใดก็ตาม ส่วนสูตรขนมปังที่ผสมถั่วมะแฮะในอัตราส่วน 30% ให้ค่า hardness (N) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ



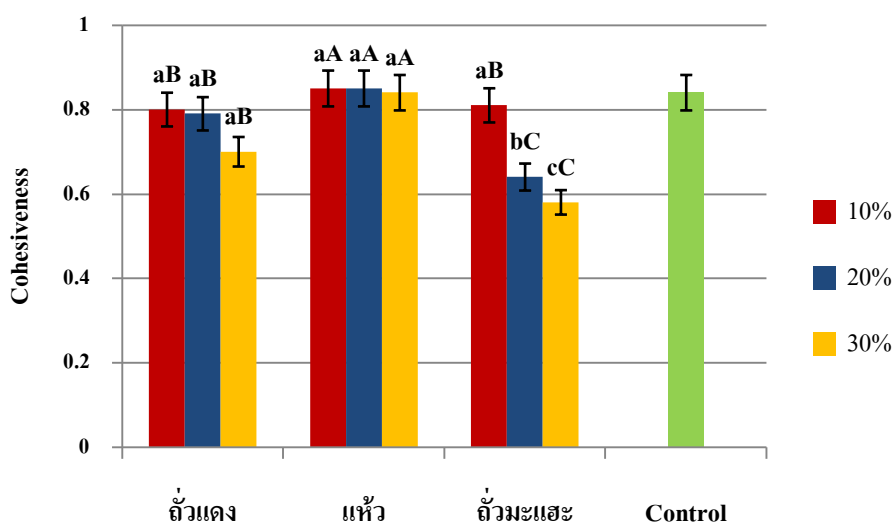
หมายเหตุ ^{a,b,c...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในอัตราส่วนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ ^{A,B,C...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในชนิดถั่วแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ภาพที่ 4.4 ค่า Hardness (N) ของเนื้อขนมปัง

4.6.2 ค่า Cohesiveness

ค่า cohesiveness เป็นค่าความสามารถเกาะตัวรวมกัน ซึ่งเกี่ยวข้องกับ ความแข็งแรงของพันธะภายในที่เกิดขึ้นมาในอาหารแล้วทำให้อาหารทนต่อการเปลี่ยนแปลงได้ถึงระยะทางหนึ่งก่อนที่มันจะขาดแตกออกจากกันไปเป็นชิ้นส่วนย่อยเมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งค่า cohesiveness หาได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่ 1 และ 2 จากภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าสูตรขนมปังที่ผสมด้วยหัวมีค่า cohesiveness มีค่ามากที่สุดอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ



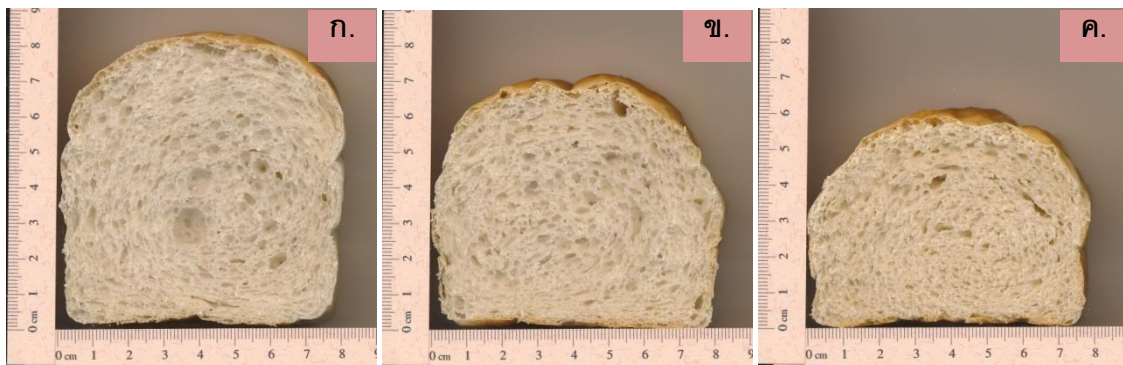
หมายเหตุ ^{a,b,c,...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในอัตราส่วนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ ^{A,B,C,...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในชนิดถั่วแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

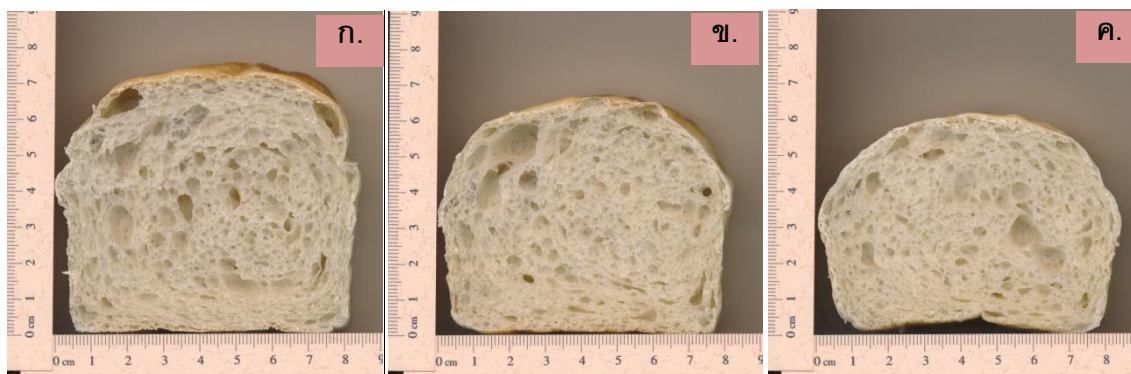
ภาพที่ 4.5 ค่า Cohesiveness ของเนื้อขนมปัง

4.7 ลักษณะปรากฏของเนื้อขนมปัง

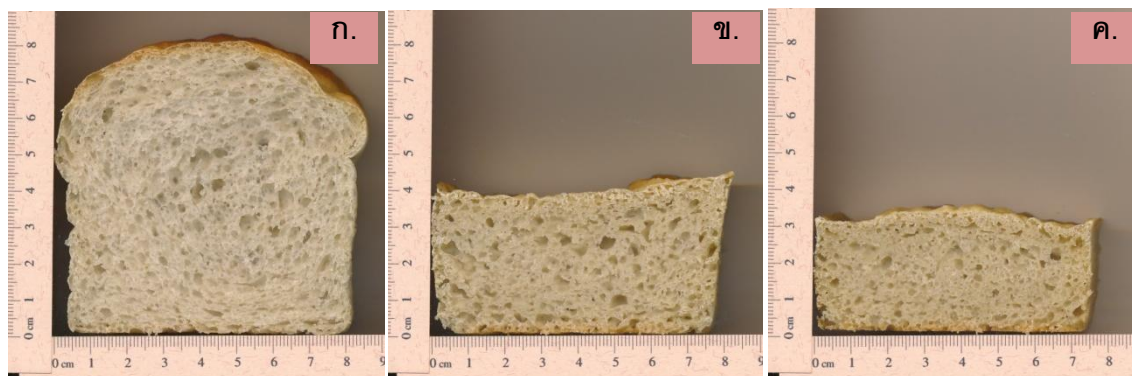
ภาพที่แสดงทั้งหมดเป็นภาพตัดขวางของขนมปังแสดงให้เห็นเนื้อด้านในแล้วรูปร่างของขนมปังสูตรต่างๆ ได้อย่างชัดเจนซึ่งจากภาพจะเห็นว่าในการแทนที่แป้งสาลีที่ 10% ของขนมปังสูตรต่างๆ จะแสดงให้เห็นว่ามีลักษณะของก้อนขนมปังมีความสมมาตร และให้ปริมาณขนมปังที่สูง มีรูพรุนที่ค่อนข้างดี ในขณะที่การที่แทนแป้งสาลีในระดับ 30% ก็จะให้ขนมปังที่รูปร่างไม่ดี มีปริมาณต่ำ และมีรูพรุนที่อันแน่น



ภาพที่ 4.6 ภาพขนมปังสูตรที่แป้งสาลีถูกแทนที่ด้วยถั่วแดงหลวง 10%(ก), ถั่วแดงหลวง 20% (ข) และถั่วแดงหลวง 30%(ค)



ภาพที่ 4.7 ภาพขนมปังสูตรที่แป้งสาลีถูกแทนที่ด้วยแห้ว 10%(ก), แห้ว 20% (ข) และแห้ว 30%(ค)



ภาพที่ 4.8 ภาพขนมปังสูตรที่แป้งสาลีถูกแทนที่ด้วยถั่วมะแฮะ 10%(ก),
มะแฮะ 20% (ข) และมะแฮะ 30%(ค)

4. การยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์

ลักษณะทางประสาทสัมผัสมีผลต่อการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ ในการประเมินความชอบในครั้งนี้เราจะประเมินในเรื่องของรูปร่าง สี กลิ่น เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบ โดยรวมซึ่งจากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าในระดับการแทนที่แป้งสาลีที่ 10% และ 20% มีการยอมรับเรื่องรูปร่างที่ไม่มีความแตกต่างทางนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อระดับการแทนที่เพิ่มขึ้นเป็น 30% จะเห็นได้ว่าการยอมรับที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนตารางที่ 4.7 พบว่าการแทนที่แป้งสาลีด้วยถั่วมะแฮะมีการยอมรับเรื่องสีที่น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ และจากตารางที่ 4.7 พบว่าการที่แป้งสาลีด้วยถั่วมะแฮะมีการยอมรับเรื่องกลิ่นน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ตารางที่ 4.7 เป็นการทดสอบเกี่ยวกับการยอมรับทางด้านประสาทสัมผัส ซึ่งพบว่าที่ระดับการที่แป้งสาลีที่ 10% ในทุกๆสูตรมีการยอมรับที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อเพิ่มระดับการแทนที่จะเริ่มเห็นการยอมรับที่น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และตารางที่ 4.7 เป็นการประเมินประสาทสัมผัสทางด้านรสชาติพบว่าที่ระดับการที่แป้งสาลีที่ 10% ในทุกๆสูตรมีการยอมรับที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อเพิ่มระดับการแทนที่จะเริ่มเห็นการยอมรับที่น้อยลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สุดท้ายตารางที่ 4.7 เป็นตารางประเมินทางด้านความชอบโดยรวม พบว่าที่ระดับการที่แป้งสาลีที่ 10% ในทุกๆสูตรมีการยอมรับที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนในระดับการแทนที่ที่ 20% สูตรที่ผสมถั่วแดงหลวง และแก้วมีการยอมรับที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสูตรที่ได้รับการยอมรับน้อยที่สุดคือ สูตรที่ผสมถั่วมะแฮะที่มีการแทนที่แป้งสาลีที่ระดับ 30%

ตารางที่ 4.7 ประเมินลักษณะทางประสาทสัมผัส

รูปร่าง	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	3.75±0.05 ^{aA}	3.87±0.03 ^{aA}	3.62±0.03 ^{aA}
20%	2.37±0.03 ^{bB}	3.75±0.03 ^{aA}	3.62±0.01 ^{aA}	
30%	1.75±0.02 ^{bB}	2.5±0.04 ^{bB}	3.62±0.02 ^{aA}	
สี	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	4.00±0.05 ^{aA}	3.87±0.04 ^{aA}	3.87±0.03 ^{aA}
20%	2.87±0.03 ^{bB}	3.75±0.01 ^{aA}	3.25±0.02 ^{aAB}	
30%	1.75±0.02 ^{cB}	2.87±0.04 ^{bA}	3.62±0.04 ^{aA}	
กลิ่น	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	2.37±0.05 ^{aB}	3.75±0.06 ^{aA}	3.25±0.05 ^{aA}
20%	2.12±0.01 ^{aB}	3.87±0.05 ^{aA}	3.12±0.02 ^{aA}	
30%	1.62±0.02 ^{aB}	2.62±0.02 ^{bA}	3.25±0.02 ^{aA}	
เนื้อสัมผัส	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	3.62±0.05 ^{aA}	4.00±0.04 ^{aA}	3.37±0.03 ^{aA}
20%	2.5±0.03 ^{bB}	3.37±0.01 ^{aA}	4.12±0.05 ^{aA}	
30%	1.87±0.02 ^{bB}	2.00±0.04 ^B	4.00±0.05 ^{aA}	
รสชาติ	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	3.00±0.05 ^{aA}	3.5±0.03 ^{aA}	3.37±0.03 ^{aA}
20%	2.25±0.03 ^{abB}	2.87±0.03 ^{aAB}	3.37±0.03 ^{aA}	
30%	1.50±0.02 ^{bB}	2.50±0.04 ^{aAB}	3.62±0.02 ^{aA}	
ความชอบโดยรวม	ส่วนผสม	ถั่วมะแฮะ	ถั่วแดงหลวง	หัว
	10%	3.85±0.05 ^{aA}	3.79±0.04 ^{aA}	3.85±0.02 ^{aA}
20%	2.85±0.03 ^{bB}	3.52±0.02 ^{aA}	3.31±0.03 ^{aA}	
30%	1.74±0.02 ^{cB}	2.65±0.02 ^{bA}	3.62±0.04 ^{aA}	

หมายเหตุ ^{a,b,c...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในอัตราส่วนแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หมายเหตุ ^{A,B,C...} หมายถึง ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันในชนิดถั่วแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการย่อยของสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดงหลวง และ สตาร์ชแห้วจินทั้งก่อนการคัดแปรและที่ผ่านการคัดแปรแล้ว ในหลอดทดลอง พบว่า ปริมาณ SDS ในสตาร์ชจากถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วแดงหลวงก่อนการคัดแปรมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ร้อยละ 77.38 และ 72.61 ของน้ำหนักแห้ง ขณะที่สตาร์ชแห้วจินก่อนการคัดแปรพบในปริมาณที่ต่ำกว่า คือ ร้อยละ 57.86 ของน้ำหนักแห้ง แต่ปริมาณสตาร์ชทนย่อยในสตาร์ชก่อนการคัดแปรทั้งสามชนิด พบอยู่ในช่วงร้อยละ 6-8 ของน้ำหนักแห้ง หลังจากการคัดแปรสตาร์ชด้วยความร้อนโดยการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟในสตาร์ชถั่วมะแฮะ และสตาร์ชถั่วแดง พบว่าทำให้ปริมาณ RDS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ปริมาณ RS ในสตาร์ชถั่วมะแฮะและสตาร์ชถั่วแดง เพิ่มขึ้นมากที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยการใช้ไมโครเวฟและบ่มเย็นนาน 24 ชั่วโมง คือ ร้อยละ 17.26 และ 15.16 ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Liu และคณะ (2012) พบว่าการใช้ความร้อนจากไมโครเวฟในสตาร์ชมันฝรั่งทำให้ปริมาณ RDS ลดลง แต่ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น เนื่องจากความร้อนจากไมโครเวฟไปมีผลต่อโครงสร้างผลึกและการย่อยของสตาร์ช สตาร์ชแห้วจินมีปริมาณ RS เพิ่มขึ้นมากที่สุดด้วยการคัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีการใช้หม้อนึ่งความดันไอและบ่มเย็นนาน 48 ชั่วโมง คือ ร้อยละ 14.06 ของน้ำหนักแห้ง หลังจากนั้นนำสตาร์ชมาคัดแปรตามวิธีที่สามารถเพิ่ม RS ได้มากที่สุดดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อคัดแปรเสร็จแล้วนำสตาร์ชที่ได้มาทำขนมปังในสัดส่วนร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ เมื่อนำมาศึกษาการย่อยพบว่า ขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงสัดส่วนร้อยละ 30 มีปริมาณสตาร์ชทนย่อย มากที่สุดถึงร้อยละ 9.20 ของน้ำหนักแห้ง สำหรับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว พบว่าขนมปังจากสตาร์ชแห้วจินสัดส่วนร้อยละ 10 มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็วมากที่สุด คือ ร้อยละ 67.80 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนขนมปังจากฟลาวร์ถั่วมะแฮะอยู่ในช่วงร้อยละ 43.98 – 55.32 ของน้ำหนักแห้ง และ ขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงอยู่ในช่วงร้อยละ 48.19 – 56.79 ของน้ำหนักแห้ง สำหรับปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า พบว่าขนมปังจากสตาร์ชแห้วจินสัดส่วนร้อยละ 20 มีปริมาณสตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้ามากที่สุด คือ ร้อยละ 38.71 ของน้ำหนักแห้ง ส่วนขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะอยู่ในช่วงร้อยละ 9.96 – 17.84 ของน้ำหนักแห้ง และ ขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงอยู่ในช่วงร้อยละ 1.24 – 17.22 ของน้ำหนักแห้ง จากผลการศึกษาค่าดัชนีน้ำตาล (GI) พบว่า ขนมปังที่มีส่วนผสมของสตาร์ชในสัดส่วนร้อยละ 10-30 จัดอยู่ใน GI ระดับสูงทั้งหมด หากเปรียบเทียบกันระหว่างขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะ สตาร์ชถั่วแดงหลวง และ สตาร์ชแห้วจิน จะพบว่ากลุ่มขนมปังจากสตาร์ชแห้วจินจะมี GI ในระดับสูงที่สุด คือ 112 – 130 ซึ่งขนมปังจากสตาร์ชแห้วจินร้อยละ 30 มีระดับ GI สูงที่สุด ขนมปังจากสตาร์ชถั่วมะแฮะมี GI ในระดับ 96.14 – 108.72 และขนมปังจาก สตาร์ชถั่วมะแฮะร้อย

ละ 30 มีระดับ GI ต่ำที่สุด คือ 96.14 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดง และ หัวจิ้น ส่วนขนมปังจากสตาร์ชถั่วแดงหลวงมี GI ในระดับ 106.30 – 118.44 เมื่อนำ starch ชนิดต่างๆมาผลิตเป็นขนมปังพบว่า การแทนที่แป้งสาลีในระดับ 10% ของสูตรต่างๆให้ค่าปริมาณจำเพาะที่สูงกว่าการแทนที่ในระดับอื่นๆ และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบแต่ละสูตร ส่วนสูตรขนมปังที่ทำให้ปริมาณจำเพาะของขนมปังน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญคือ สูตรที่ผสมถั่วมะแฮะในอัตราส่วน 30% และเปอร์เซ็นต์น้ำหนัที่หายไปหลังอบของถั่วแดง, หัว และถั่วมะแฮะ นั้นมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยถั่วมะแฮะนั้นมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนัที่หายไปหลังอบน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปริมาณความชื้น crumb ของขนมปังในสูตรที่ถูกแทนที่แป้งสาลีที่ 10% จะให้ค่าความชื้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่นๆ ส่วนในสูตรที่แทนที่แป้งสาลีด้วยหัวที่อัตราส่วน 10% ให้ค่าความชื้นสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะของเนื้อสัมผัสพบว่า แสดงให้เห็นว่าสูตรขนมปังที่ถูกแทนที่ในระดับ 10% จะให้ค่า hardness (N) ที่ต่ำที่สุดหรือนุ่มที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนสูตรขนมปังที่ผสมถั่วมะแฮะในอัตราส่วน 30% ให้ค่า hardness (N) สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ และสูตรขนมปังที่ผสมด้วยหัวมีค่า cohesiveness มีค่ามากที่สุดอย่าง มีนัยสำคัญทางสถิติ และภาพตัดขวางของขนมปังแสดงให้เห็นเนื้อด้านในพบว่าในการแทนที่แป้งสาลีที่ 10% ของขนมปังสูตรต่างๆจะแสดงให้เห็นว่ามีลักษณะของก้อนขนมปังมีความสมมาตร และให้ปริมาณขนมปังที่สูง มีรูพรุนที่ค่อนข้างดี สุดท้ายเป็นการประเมินทางด้านประสาทสัมผัสของขนมปังพบว่า ผู้คนที่ทดสอบชอบสูตรที่แทนที่แป้งสาลีที่ 10% มากที่สุด และชอบสูตรที่แทนที่ด้วยถั่วมะแฮะที่ระดับ 30% น้อยที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรศึกษาถึงวิธีการที่ใช้ในการคัดแปร และสภาวะที่ใช้ในการคัดแปรมากกว่านี้ เพราะในถั่วบางชนิดปริมาณสตาร์ชทนย่อยอาจเพิ่มขึ้นได้ ถ้าใช้วิธีการคัดแปรอื่น หรือสภาวะอื่น

5.2.2 ควรศึกษาถึงการนำฟลาวัวร์และสตาร์ชจากถั่วชนิดต่างๆ ทั้งที่ผ่านและไม่ผ่านการคัดแปรที่ได้ไปใช้ประโยชน์ โดยนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆ ซึ่งอาจทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ขึ้นได้