



รายงานการวิจัย

ผลของโปรตีน ใยอาหาร และไขมันต่อดัชนีน้ำตาลของระบบอาหารข้าว
(Effect of Protein Fiber and Lipid on Glycemic Index of
Rice Food System)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

ผลของโปรตีน ใยอาหาร และไขมันต่อดัชนีน้ำตาลของระบบอาหารข้าว (Effect of Protein Fiber and Lipid on Glycemic Index of Rice Food System)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุนันทา ทองทา

สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร
สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2559-2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

ตุลาคม 2563

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ใช้งบประมาณทุนอุดหนุนวิจัยประจำปีงบประมาณ 2559-2560 ทำให้ผลงานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือ สำหรับอาคาร สถานที่ เครื่องมือ และการอำนวยความสะดวกในการวิจัย และงานวิจัยนี้คงไม่สำเร็จได้หากขาดผู้ช่วยวิจัย คือ นางสาวคีนจันทร์ ณ นคร จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้วิจัย

31 ตุลาคม 2563



บทคัดย่อ

การศึกษาผลของโปรตีนจากถั่วเหลือง (SPI) และใยอาหารต่อความสามารถในการย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุก พบว่า ข้าวขึ้นรูปที่ถูกผลิตด้วยเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์แบบสกรูคู่ที่อุณหภูมิ 90°C มีค่า onset temperature (T_o) และค่า peak temperature (T_p) ของข้าวขึ้นรูปซึ่งถูกเสริมด้วย SPI ระดับ 20% (20SPI-ER) สูงกว่าข้าวขึ้นรูปที่ถูกเสริมด้วย resistant maltodextrin (RMD) ระดับ 20% (20RMD-ER) และข้าวขึ้นรูปที่ถูกเสริมด้วยรำข้าวโพดระดับ 20% (20CB-ER) นอกจากนี้ยังพบว่า peak viscosity ของ 20SPI-ER มีค่าต่ำกว่า 20CB-ER และ 20RMD-ER เมื่อตรวจด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ SPI สามารถจับกับน้ำได้ดีและชะลอการเกิดเจลลาติไนเซชัน คุณสมบัติทางรีโอโลยีของข้าวหุงสุก 20SPI-ER พบว่า มีค่า hardness, ค่า stickiness and solid-like (G') สูงกว่าตัวอย่างข้าวขึ้นรูปหุงสุกอื่นๆจึงทำให้สามารถชะลอการทำงานของ แอลฟา อะมิเลส (α -amylase) ในระหว่างการย่อยในหลอดทดลอง (in-vitro digestion) ซึ่งมีผลทำให้ค่า end-point concentration (C_∞) ลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าค่าอัตราการย่อยเฟสแรก (first-phase digestion rate, k_1) ของข้าวหุงสุก 20SPI-ER มีค่าสูงกว่าค่าอัตราการย่อยเฟสที่สอง (second-phase digestion rate, k_2) โดยข้าวหุงสุก 20SPI-ER มีค่า end-point ของอัตราการย่อยเฟสที่สอง ($C_{\infty 2}$) และค่าดัชนีน้ำตาลต่ำสุด ในขณะที่ข้าวหุงสุก 20CB-ER มีค่า k_1 ของการย่อยต่ำกว่า อาจเนื่องมาจาก เจลแป้งที่มีอนุภาคของรำข้าวโพดมีความสมบูรณ์ (integrity) ของเจลสูงสามารถขัดขวางการย่อยของเอนไซม์ในกลุ่มอะมิเลส (amylolytic enzymes) หลังจากนั้นในระหว่างการย่อยความสมบูรณ์ของเจลลดลงซึ่งมีผลทำให้ค่า k_2 and $C_{\infty 2}$ ข้าวหุงสุก 20CB-ER สูงขึ้น ในขณะที่ค่า k ของข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย RMD หุงสุกไม่แตกต่างจากค่า k ของข้าวขึ้นรูปหุงสุกตัวอย่างควบคุม ซึ่งเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างเมทริกซ์ที่เป็นเนื้อเดียวกันของตัวอย่างที่มีความเหมือนกัน ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย SPI และ ใยอาหารมีผลทำให้ค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ในกลุ่มปานกลางในขณะที่ข้าวขึ้นรูปหุงสุกตัวอย่างควบคุมมีค่าดัชนีน้ำตาลอยู่ในกลุ่มสูง เมื่อศึกษาผลของกรดไขมันต่อความสามารถในการย่อยของข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน พบว่า ค่า estimated glycemic index (EGi) ของข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าว 20% มีค่าต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันปาล์ม (palmitic acid, C16), น้ำมันมะกอก (oleic acid, C18:1), และน้ำมันถั่วเหลือง (linoleic acid, C18:2) เนื่องจากน้ำมันมะพร้าวมีกรดไขมันสายสั้น (lauric acid, C12) ซึ่งสามารถเกิด amylose-lipid complex (ALC) ได้ดีกว่ากรดไขมันชนิดอื่นที่มี โดย ALC สามารถเพิ่มความสามารถในการทนต่อการย่อยของเอนไซม์ และพบว่าการแช่แข็งมีผลทำให้ค่า eGI ของข้าวหุงสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า eGI ของข้าวหุงสุกผสมน้ำมันปาล์มลดลงเพียง

ก

เล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าค่า eGI ของตัวอย่างหลังจากการละลายด้วยไมโครเวฟและอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 37°C ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การย่อยของสตาร์ช, ข้าวขึ้นรูป, โปรตีน, โยอาหาร, กรดไขมัน



Abstract

The effect of soy protein isolate (SPI) and dietary fibers on digestibility of cooked extruded rice was investigated. The extruded reformed rice was produced by a twin screw extruder with the barrel temperature of 90°C. The onset temperature (T_o) and peak temperature (T_p) of extruded rice supplemented with 20% soy protein isolate (20SPI-ER) as determined by Differential Scanning Calorimeter was higher than that of extruded rice supplemented with 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER) and 20% corn bran (20CB-ER). When using Rapid Visco Analyser, the peak viscosity of 20SPI-ER was lower than that of 20CB-ER and 20RMD-ER. These results also indicate that SPI has been attributed to the competition for moisture and the delay of gelatinization. The 20SPI-ER cooked rice showed higher values of hardness, stickiness and solid-like (G') as analyzed by rheometer compared to other samples which may retard the α -amylase activity during the *in-vitro* digestion, resulting in the lower end-point (C_∞) of starch amylolysis. The first-phase digestion rate (k_1) of cooked 20SPI-ER was higher than its second-phase digestion rate (k_2). The end-point in the second-phase digestion ($C_{\infty 2}$) and the glycemic index (GI) of cooked 20SPI-ER showed the lowest value. The low value of k_1 was observed in the first-phase of 20CB-ER digestion. It may be due to the amylolytic enzymes that were impeded, associated with the high integrity of starch gel dispersed by corn bran particles. Then, the integrity of this starch gel was reduced during the amylolysis, which resulted in the higher k_2 and $C_{\infty 2}$. The cooked extruded rice with substituted resistant maltodextrin (RMD) and the control sample exhibited a similar k value due to their similar homogeneous matrix. The cooked extruded rice supplemented with SPI and dietary fibers was found to be the medium GI food, while the control was the high GI food. In addition, the effect of fatty acid types adding to high amylose rice (Tahang rice) on cooked rice digestibility was investigated. The results showed that eGI of cooked rice with 20% coconut oil (lauric acid, C12) was the lowest value (42.4) when compared with cooked rice with 20% palm oil (palmitic acid, C16), olive oil (oleic acid, C18:1) and soybean oil (linoleic acid, C18:2). It was explained that a short carbon-chains fatty acid (C12) of lauric acid has the highest possibility of amylose lipid complex formation, resulting in resistance to amylase hydrolysis. Furthermore, freeze-thaw process decreased the eGI of cooked rice significantly but the eGI of cooked rice with palm oil was slightly decreased due to the retrogradation efficiency during freeze-thaw process. In addition, the eGI of samples after thawing in microwave and in 37°C water bath were not significantly different.

Keywords: starch digestion, reformed rice, protein, fiber, fatty acid

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
บทที่ 2 วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature).....	3
2.1 ข้าว.....	3
2.2 ดัชนีน้ำตาล (Glycemic index : GI).....	3
2.3 ปัจจัยที่ผลต่อค่า GI.....	4
2.3.1 Amylose.....	4
2.3.2 ไขมัน.....	5
2.2.3 โปรตีน.....	6
2.3.4 โยอาหาร.....	6
2.3.5 Processing condition.....	7
บทที่ 3 วัสดุและวิธีการวิจัย.....	9
3.1 วัสดุ.....	9
3.2 ข้าวขึ้นรูปจากกระบวนการเอ็กทราซัน.....	9
3.2.1 การผลิตข้าวขึ้นรูปจากกระบวนการเอ็กทราซัน.....	9
3.2.2 ข้าวขึ้นรูปหุงสุก.....	10
3.2.3 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปหุงสุก.....	10

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.4	ความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลาย (Water absorption (WAI) and solubility (WSI) indices) ของวัตถุดิบ	10
3.2.5	สมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป	10
3.2.5.2	สมบัติการเกิดเพสต์ (Pasting properties)	11
3.2.6	ศึกษาโครงสร้างของข้าวขึ้นรูปโปรตีนสูง	11
3.2.7	ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	11
3.3	การผลิตข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน	12
3.3.1	การแช่แข็งและทำละลายข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน	12
3.4	ศึกษาการย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกและข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน	12
3.4.1	วิเคราะห์หาปริมาณ total starch	12
3.4.2	Kinetic digestion	13
3.4.3	ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index: GI)	14
บทที่ 4	ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	15
4.1	ผลของโปรตีนและใยอาหารต่อสมบัติของข้าวขึ้นรูป	15
4.1.1	ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	15
4.1.2	ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index: WAI) และการละลาย (water solubility index: WSI) ของวัตถุดิบ	17
4.1.3	สมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป	19
4.1.4	ลักษณะโครงสร้างของข้าวขึ้นรูปโปรตีนสูง	21
4.1.5	สมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	22
4.2	การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกและข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน	25
4.2.1	ผลของโปรตีนและใยอาหารต่อการย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	25
4.2.2	ผลของกรดไขมันต่อการย่อยของข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน	30
4.2.3	ผลของการแช่แข็งและทำละลายต่อการย่อยของข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ.....	33
บรรณานุกรม.....	34
ประวัติผู้วิจัย.....	41



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของของแป้งข้าวเจ้า, ข้าวขึ้นรูป (control), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% โพรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และ ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER).....	20
ตารางที่ 4.2 สมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โพรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุก ที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER).....	24
ตารางที่ 4.3 <i>In-vitro</i> digestion parameters และค่า eGI ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% (10SPI-ER) และ 20% โพรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% (10CB-ER) และ 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% (10RMD-ER) และ 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)	26
ตารางที่ 4.4 ปริมาณ starch fraction และค่า eGI ของข้าวขาวตาแห้งหุงสุก (control), ข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันมะกอก และน้ำมันถั่วเหลือง	31
ตารางที่ 4.5 ค่า eGI ของข้าวขาวตาแห้งหุงสุก (control) และข้าวขาวตาแห้งหุงสุก ผสมน้ำมันปาล์มที่ผ่านการแช่แข็งและทำละลายด้วยวิธีไมโครเวฟ และวิธีอุ่นในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 37°C.....	32

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 4.1 ข้าวขึ้นรูปหุงสุก (a), ข้าวขึ้นรูปที่ถูกละเลิมด้วย 20% soy protein isolate (b), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% corn bran (c), และข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% resistant maltodextrin (d).....	15
ภาพที่ 4.2 ลักษณะผิวของเมล็ดข้าวขึ้นรูปหุงสุก (a), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% soy protein isolate (b), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% corn bran (c), และข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% resistant maltodextrin (d) (magnification 8x).....	16
ภาพที่ 4.3 ลักษณะภายในของเมล็ดข้าวขึ้นรูปหุงสุก (a), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% soy protein isolate (b), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% corn bran (c), และข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% resistant maltodextrin (d) (magnification 20x).....	16
ภาพที่ 4.4 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index: WAI) และการละลาย (water solubility index: WSI) ที่อุณหภูมิ 90°C ของแป้งข้าวเจ้า (RF), โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (SPI), รำข้าวโพด (CB) และมอลโตสเดกซ์ตรินทยอย (RMD).....	18
ภาพที่ 4.5 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index: WAI) และการละลาย (water solubility index: WSI) ที่อุณหภูมิ 90°C ของแป้งข้าวเจ้า (RF), และแป้งข้าวเจ้าถูกทดแทนด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI), 20% รำข้าวโพด (20CB), และ 20% resistant maltodextrin (20RMD).....	18
ภาพที่ 4.6 DSC thermogram ของแป้งข้าวเจ้า, ข้าวขึ้นรูป (control), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER).....	19
ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวขึ้นรูป (Control), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER).....	21
ภาพที่ 4.8 Fourier transform infrared (FTIR) spectra ของแป้งข้าวเจ้า (RF), โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (SPI) และข้าวขึ้นรูปที่ละเลิมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER).....	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.9 Storage modulus ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER).....	25
ภาพที่ 4.10 LOS plot การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุก	26
ภาพที่ 4.11 LOS plot การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% โปรตีนถั่วเหลือง ไอโซเลท (10SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% รำข้าวโพด (10CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% resistant maltodextrin (10RMD-ER).....	27
ภาพที่ 4.12 LOS plot การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลือง ไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และ ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER).....	29
ภาพที่ 4.13 Digestion profiles ของขนมปังขาว (reference food) ข้าวขาวตาแห้งหุงสุก (control), และข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันมะกอก และน้ำมันถั่วเหลือง.....	31

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

โรคเบาหวานเป็นการเจ็บป่วยเรื้อรังที่ร่างกายไม่สามารถผลิตอินซูลินได้เพียงพอ หรือนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย โดยทั่วไปแล้ว แป้ง น้ำตาล และสารอาหารอื่นๆที่แตกตัวเป็นกลูโคส ให้เซลล์เม็ดเลือดดูดซึมไปใช้ เซลล์จะใช้อินซูลินซึ่งเป็นฮอร์โมนที่สร้างจากตับอ่อนในการช่วยเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นพลังงาน เมื่อร่างกายไม่มีอินซูลินเพียงพอที่จะเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นพลังงาน (Diabetic type 1) หรือร่างกายไม่สามารถนำอินซูลินไปใช้ได้ (Diabetic type 2) ร่างกายก็จะมีปริมาณกลูโคสในเลือดสูงจนเกิดอันตราย ขณะนี้โรคเบาหวานกำลังเป็นภัยเงียบของคนไทยและทั่วโลก สหพันธ์เบาหวานนานาชาติ รายงานว่าพบผู้ป่วยเบาหวานทั่วโลกมีมากกว่า 382 ล้านคน จำนวนยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยคาดว่าในปี พ.ศ.2578 จะมีถึง 592 ล้านคน (The International Diabetes Federation, 2013) ในส่วนของประเทศไทย พบว่าในปี พ.ศ.2556 มีผู้เสียชีวิตจากโรคเบาหวานในอัตรา 14.93 คนต่อประชากร 100,000 คน หรือประมาณ 8,958 คน โดยมีผู้ป่วยโรคเบาหวานที่สามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดให้อยู่ในเกณฑ์ปกติเพียง 142,058 คน คิดเป็นร้อยละ 29 อีกประมาณร้อยละ 70 ไม่สามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดได้ และเกิดโรคแทรกซ้อน เช่น โรคหัวใจ ความดันโลหิตสูง ไขมันสูง ไตวาย โดยแต่ละปีมีงบประมาณที่ใช้ในการดูแลรักษาผู้ป่วยเบาหวานสูงถึง 47,596 ล้านบาท จึงต้องเร่งควบคุมป้องกันและลดจำนวนคนป่วย นอกจากนี้ยังพบแนวโน้มผู้ป่วยเบาหวานในเด็กมากขึ้น เนื่องจากขณะนี้เด็กไทยเผชิญความอ้วน และกินหวานมากขึ้น หากไม่มีการป้องกันควบคุมโรคที่ดีพอ คาดในอีก 8 ปีข้างหน้าไทยจะพบผู้ป่วยถึง 4.7 ล้านราย (สำนักนโยบายและยุทธศาสตร์ สำนักงานปลัดกระทรวงสาธารณสุข, 2556) ดังนั้นการทราบคุณภาพของคาร์โบไฮเดรตในอาหารแต่ละชนิดจะช่วยให้ผู้ป่วยเบาหวานสามารถตัดสินใจเลือกชนิดของอาหาร เนื่องจากอาหารแต่ละชนิดจะเพิ่มน้ำตาลในกระแสเลือดได้มากน้อยไม่เท่ากัน ดัชนีที่ชี้วัดว่าอาหารชนิดไหนเพิ่มน้ำตาลในเลือดได้มากน้อยเท่าใดคือ ดัชนีน้ำตาล (Glycemic index : GI) ซึ่งเป็นตัวเลขที่บ่งชี้ปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เพิ่มขึ้นหลังการรับประทานอาหารแต่ละชนิดเทียบกับการรับประทานน้ำตาลกลูโคสในจำนวนคาร์โบไฮเดรตที่เท่ากันของอาหารมาตรฐาน โดย ข้าวขาว ซึ่งเป็นอาหารหลักของคนไทย จัดอยู่ในกลุ่มอาหารที่มีค่า GI สูง ดังนั้น หากสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ข้าวที่มีค่า GI ลดลง ก็จะสามารถเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตอีกทางเลือกหนึ่งให้กับผู้ป่วยโรคเบาหวาน นอกจากนี้ข้าวยังเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศที่สำคัญ ในอดีตไทยเคยเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวเป็นอันดับ 1 ของโลก แต่ปัจจุบันประเทศอินเดียซึ่งเป็นประเทศผู้ส่งออกข้าวอันดับ 2 ได้ขึ้นมาเป็นผู้ส่งออกข้าวอันดับ 1 ของโลก แทนประเทศไทยไทยตั้งแต่ปี 2555 โดยเมื่อปี 2556 ประเทศไทยส่งออกข้าวได้ 6.72 ล้านตัน เป็นอันดับสองรองจากประเทศอินเดียซึ่งส่งออกได้ 10.48 ล้านตัน (สมาคมผู้ส่งออกข้าวไทย, 2557) จึงมี

ความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการแปรรูปผลิตภัณฑ์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์จากข้าวของไทยและเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันในตลาดโลก



บทที่ 2

วรรณกรรมและทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้อง (Reviewed literature)

2.1 ข้าว

ข้าวเป็นพืชในตระกูล Gramineae ซึ่งเป็นพืชล้มลุกกึ่งน้ำ (Semi-aquatic annual plant) ข้าวที่ปลูกโดยทั่วไปมี 2 species คือ *Oryza glaberrima* และ *Oryza sativa* L. โดย *Oryza glaberrima* มีการปลูกกันอย่างจำกัดเฉพาะในทวีปแอฟริกา สำหรับ *Oryza sativa* L. สามารถแบ่งได้เป็น 3 sub-species ได้แก่ Japonica type, Indica type และ Javanica type ส่วนข้าว Japonica type ปลูกมากทางเหนือของประเทศจีน ประเทศเกาหลีและประเทศญี่ปุ่น ข้าว Javanica type ปลูกมากในอินโดนีเซียแต่ไม่มีความสำคัญทางการค้า และข้าว Indica type จะปลูกกันมากในทางตอนใต้ของจีน ประเทศอินเดีย ประเทศในอินโดจีน เอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมทั้งประเทศไทย และประเทศสหรัฐอเมริกา ข้าวไทยจึงจัดอยู่ใน sub-species Indica

ข้าวเจ้าพันธุ์ แจกเขย 1 เป็นพันธุ์ข้าวที่คัดเลือกมาจากข้าวพันธุ์แจกเขยพื้นเมือง ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีชื่อเสียงของ อำเภอสายบุรี จังหวัดสระบุรี ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี เก็บรวบรวมพันธุ์ข้าว เริ่มต้นปรับปรุงพันธุ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 นำไปคัดเลือกและปลูกเพื่อเปรียบเทียบพันธุ์ คณะกรรมการพิจารณาพันธุ์ กรมการข้าว มีมติรับรองพันธุ์ ชื่อ แจกเขย 1 เพื่อแนะนำให้เกษตรกรปลูก เมื่อวันที่ 26 กันยายน 2551 ในทางการค้าใช้ชื่อเรียกว่า ข้าวเสาไห้ เหมาะกับการบริโภค หุงขึ้นหม้อ ร่วนเป็นตัวไม่เกาะกัน ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีในการผลิตข้าวผัด ข้าวแจกเขย 1 มีปริมาณ อะมิโลสสูง (27.1%) (กรมวิชาการเกษตร, 2547) ปัจจุบันข้าวเสาไห้ได้รับความนิยมและมีจำหน่ายในทางการค้าเป็นข้าวถุงจำหน่ายอยู่ทั่วไป

ข้าวเจ้าพันธุ์ ชัยนาท 1 เป็นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง คือ 30.50% (รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต, 2546) เมื่อหุงสุกจะมีลักษณะร่วนและแข็ง จึงนิยมนำมาแปรรูปเป็นแปรรูปเป็นแป้งข้าวเจ้า ดังนั้นการนำข้าวชัยนาท 1 มาพัฒนาผลิตภัณฑ์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวชัยนาท 1 (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

2.2 ดัชนีน้ำตาล (Glycemic index : GI)

ค่า GI เป็นค่าที่ถูกใช้ในการจัดลำดับอาหารตามอัตราในการดูดซึบคาร์โบไฮเดรต โดยเปรียบเทียบจากปริมาณน้ำตาลในเลือดที่เพิ่มขึ้นหลังจากรับประทานอาหารเปรียบเทียบกับอาหารมาตรฐาน (Foster-Powell and Miller, 1995) โดยถ้าอาหารที่มีอัตราการดูดซึบคาร์โบไฮเดรตอย่างช้าๆจะส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ดังนั้นจึงมีค่า GI ต่ำ (Jenkins *et al.*, 1981) ค่า GI ถูกกำหนดตามพื้นที่ใต้เส้นโค้งของผลตอบสนองกลูโคสในเลือด (area under curve: AUC) ตามปริมาณคาร์โบไฮเดรต AUC ของอาหารที่นำมาทดสอบจะถูกหารโดย AUC ของอาหารมาตรฐาน (ใช้กลูโคสหรือขนมปังขาวซึ่งผลที่ได้จะค่าที่ต่างกัน) และคูณด้วย 100 ค่า GI จะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 ถึง 100 ขึ้นอยู่กับว่าอาหารนั้นๆ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลในเลือดมากหรือน้อย โดยถ้าอาหารใดมีอัตราเพิ่มน้ำตาลในเลือดได้มากและเร็วเท่ากับอาหารมาตรฐาน

อาหารนั้นจะค่า GI เท่ากับ 100 โดยทั่วไปสามารถแบ่งกลุ่มอาหาร ซึ่งเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตตามค่า GI ออกเป็น 3 กลุ่มคือ Low GI คือ มีค่า GI น้อยกว่าหรือเท่ากับ 55, Medium GI คือ มีค่า GI ในช่วง 56-69 และ High GI คือ มีค่า GI มากกว่าหรือเท่ากับ 70 (Nayak *et al.*, 2014) การวิเคราะห์ค่า GI ด้วยวิธี *In-vitro* เป็นการจำลองระบบการย่อยตั้งแต่การเคี้ยวในปากไปจนถึงการย่อยในลำไส้เล็ก โดย AUC จะถูกคำนวณมาจากการอินทิเกรตพื้นที่ใต้กราฟของของ Hydrolysis curves ที่เป็นไปตาม first order equation ซึ่งค่า Hydrolysis index (HI) คำนวณได้จาก AUC ของตัวอย่างอาหารหารด้วย AUC ของอาหารมาตรฐาน โดยค่า HI ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ *In-vitro* จะให้ค่าใกล้เคียงกับการวิเคราะห์แบบ *In-vivo* โดยมีความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีกันตามสมการต่อไปนี้ $GI = 39.71 + 0.549HI$ (Goni *et al.*, 1997)

การรับประทานอาหารที่มีค่า GI ต่ำจะมีผลทำให้อัตราการย่อยของคาร์โบไฮเดรตลดลงซึ่งส่งผลให้สามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดได้ดีโดยเฉพาะในผู้ป่วยโรคเบาหวาน (Miller, 1994). Amano และคณะ (2007) ได้พัฒนาอาหาร Low GI สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน type 2 ในอาหารญี่ปุ่นที่มีข้าวขาว (high GI food) เป็นวัตถุดิบหลัก โดยการเพิ่มปริมาณไฟเบอร์จะมีผลทำให้ค่า GI ของอาหารลดลง และจากการศึกษาทางโภชนาการพบว่าค่า GI มีผลในการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวาน type 2 (Amano *et al.*, 2007).

2.3 ปัจจัยที่ผลต่อค่า GI

ปัจจัยที่ผลต่อการถูกย่อยของคาร์โบไฮเดรตและภาวะท้องว่าง ได้แก่ macronutrient composition, ปริมาณใยอาหาร, ความหนืด และปริมาณและโครงสร้างของอาหาร (Riccardi *et al.*, 2008) ซึ่งทำให้ปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อค่า GI

2.3.1 Amylose

โครงสร้างทางเคมีของสตาร์ชประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวขนาดใหญ่ โดยส่วนใหญ่สตาร์ชจะประกอบด้วยโมเลกุล 2 ชนิด ได้แก่ อะมิโลส และอะมิโลเพกติน ซึ่งจะมีผลต่อสมบัติและการใช้ประโยชน์ของสตาร์ชด้วย ในกรณีของข้าวพบว่าอัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินที่ต่างกันของข้าว จะส่งผลต่อเนื้อสัมผัสทำให้จุดประสงค์ในการนำไปใช้ประโยชน์ต่างกัน (Juliano, 1984 อ้างโดย รุ่งนภา พงศ์สวัสดิ์มานิต และคณะ, 2546) โดยอะมิโลสซึ่งมีลักษณะเป็นโซ่ตรงจะช่วยเสริมความแข็งแรงของเม็ดแป้ง ดังนั้นข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจึงสามารถทนต่อการย่อยได้มากกว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำ ส่งผลให้ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะให้ค่า GI ต่ำ Akerberg และคณะ (1998) ศึกษาผลของสัดส่วนของปริมาณอะมิโลสต่อปริมาณอะมิโลเพกตินในข้าวบาร์เลย์ ต่อปริมาณ resistance starch (RS) และค่า GI โดยนำแป้งข้าวบาร์เลย์ 70% ผสมกับแป้งสาลี 30% มาผลิตเป็นขนมปังปอนด์ พบว่าปริมาณอะมิโลสที่เพิ่มขึ้นในช่วง 3 – 44% ส่งผลให้ RS เพิ่มขึ้นและทำให้ ค่า GI มีลดลง เมื่อศึกษาการถูกย่อยของสตาร์ชโดยวิธี *in vitro* digestion ในข้าวหุงสุก 6 สายพันธุ์ของประเทศฟิลิปปินส์ที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน พบว่าข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (26.9%) มีค่า GI ต่ำที่สุด (68) และเมื่อปริมาณอะมิโลสลดลงส่งผลให้ GI มีค่าเพิ่มขึ้น (Frei, Siddhuraju and Becker, 2003) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hu และคณะ (2004) โดย

ศึกษาค่า GI ในข้าว 4 ชนิด ที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่างกัน ในช่วง 26.8-0 % พบว่าเมื่อปริมาณอะมิโลสเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ RS เพิ่มขึ้นและทำให้ estimate GI มีแนวโน้มลดลง Syahariza (2013) ศึกษาผลของโครงสร้างของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินต่อการถูกย่อยของข้าวหุงสุกด้วยวิธี in-vitro digestion พบว่า อัตราการถูกย่อยที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจาก longer Amylose chain length และ อัตราส่วนของ long amylopectin branches และ long amylose branches ต่อ short amylopectin branches ที่ลดลง แต่ปริมาณอะมิโลสไม่ใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลต่อ glycemic response

2.3.2 ไขมัน

การเติมไขมันมีผลกับสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสตาร์ช เนื่องจากสายอะมิโลสสามารถเกิด single-helical complex กับ lipid ซึ่งส่วน hydrocarbon ของไขมันจะเคลื่อนเข้าไปภายใน helical cavity ของ amylose โดย Fatty acid สามารถเกิด amylose-helical complex ซึ่งมีกลูโคส 6 unit ต่อ 1 รอบ (Godet, Buléon, Tran and Colonna, 1993) ความยาวของ Hydrocarbon chains ของไขมันที่เพิ่มขึ้นจะมีผลให้ amylose-lipid complex (ALC) เกิดได้เพิ่มขึ้น โดย saturated fatty acid สามารถเกิด ALC ได้ดีกว่า unsaturated fatty acid (Tufvesson, Wahlgren and Eliasson, 2003) จากการศึกษาการเกิด ALC ของ free fatty acid 3 ชนิด ได้แก่ myristic acid (C14), palmitic acid (C16) และ stearic acid (C18) ใน cooking rice paste โดยเติม fatty acid ที่ระดับ 1.5, 3.0, และ 4.5% ลงใน rice paste ความเข้มข้นประมาณ 81% ซึ่งถูกให้ความร้อนด้วย Visco-amylograph ที่อุณหภูมิ 90°C ระยะเวลาในการให้ความร้อนนาน 30, 60 และ 90 นาที พบว่า myristic acid สามารถเกิด ALC formation ได้ดีที่สุด รองลงมาเป็น palmitic acid และ stearic acid นอกจากนี้ปริมาณ fatty acid และระยะเวลาให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น ยังส่งผลให้ ALC เพิ่มขึ้น (Kaur and Singh, 2000) เมื่อศึกษาผลของ lipid ได้แก่ corn oil (triglycerides) , palmitic acid (C16:0), stearic acid (C18:0), oleic acid (C18:1) และ linoleic acid (C18:2) ต่อ enzymatic hydrolysis ของ normal corn starch (34.3 % Amylose) , tapioca starch (29.0 % Amylose), waxy corn starch (1.9 % Amylose) และ high amylose corn starch (68.4 % Amylose) โดยเติม lipid 10% ของสตาร์ช เตรียม starch paste โดยเติมน้ำ 3 เท่าของสตาร์ชและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95°C นาน 8 นาทีพร้อมทั้งคนอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้เจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์ พบว่า โครงสร้างที่แตกต่างกันของ lipid ที่มีผลต่อ enzymatic hydrolysis ของสตาร์ช โดย stearic acid ซึ่งเป็น saturated fatty acid ที่มี hydrocarbon chain ยาวที่สุด คือ C18 สามารถเกิด strong interaction กับ hydrophobic cavity ของ amylose helix ได้แข็งแรงมากที่สุด ส่วน palmitic acid ซึ่งเป็น saturated fatty acid เช่นเดียวกันแต่มี hydrocarbon chain สั้นกว่า คือ C16 จึงเกิด strong interaction ที่แข็งแรงน้อยกว่า ในขณะที่ oleic acid และ linoleic acid ซึ่งเป็น unsaturated fatty acid ที่มีพันธะคู่ 1 ตำแหน่ง และ 2 ตำแหน่ง ตามลำดับ จึงเกิด weak interaction กับ amylose helix สำหรับ corn oil ซึ่งเป็น triglycerides ไม่พบ ALC peak ใน DSC thermograms แต่พบการเปลี่ยนแปลงของ ^{13}C ใน NMR spectra ใน C1 และ C4 ของ amylopectin (short-chain amylose) เช่นเดียวกับ stearic acid (C18:0) และ oleic acid (C18:1)

แสดงว่า fatty acid บางส่วนใน corn oil สามารถเกิด complex กับ amylose โดยให้ weak interaction ซึ่งสตาร์ชที่เกิด ALC จัดเป็น Resistant starch type V (Ai, Hasjim and Jane, 2013)

2.2.3 โปรตีน

โปรตีนหรือ protein complexes ที่ไม่ถูกย่อยและเหลืออยู่ในลำไส้จะทำหน้าที่คล้ายใยอาหารจึงสามารถช่วยชะลออัตราการถูกย่อยลง (Kato and Iwami, 2002) Gannon, Nuttall, Neil and Westphal (1988) ศึกษาผลของโปรตีนต่อระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวาน type 2 (non-insulin-dependent) ที่ได้รับอาหารเช้าซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 50 กรัมหรือน้ำตาล 50 กรัมบวกกับโปรตีน 25 กรัม ในรูปแบบของเนื้อวัว (lean beef), โกงวง, เจลาติน, ไข่ขาว, cottage cheese, ปลา หรือถั่วเหลืองพบว่า อาหารที่มีโปรตีนสูงสามารถลดระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวาน type 2 ลงได้ โปรตีนในอาหารที่อัตราส่วนมีโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตต่อไขมันเป็น 30:40:30 สามารถลดและควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยโรคเบาหวานประเภทที่สองได้ดีขึ้น (Gannon, Nuttall, Saeed, Jordan and Hoover, 2003) นอกจากนี้ยังพบว่าอาหารที่มีโปรตีนสูงและมีค่า glycemic ต่ำสามารถช่วยลดความต้านทานต่ออินซูลินและอาจป้องกันหรือชะลอการเริ่มมีอาการของโรคหัวใจและโรค metabolic syndrome ในผู้ป่วยโรคเบาหวาน type 2 ที่มีภาวะโรคอ้วน (von Bibra et al., 2014) Yang, Liu, Ashton, Gorczyca and Kasapis (2013) ศึกษาการใช้ whey protein เป็น bioactive barrier ในย่อยสตาร์ชด้วยเอนไซม์แบบ *in-vitro* โดยพบว่า whey protein สามารถชะลอการถูกย่อยของสตาร์ชด้วยเอนไซม์ α -amylase ได้ ในทางกลับกันเมื่อผสม whey protein ที่ระดับ 20 และ 50% ลงใน wheat starch เพื่อผลิตเป็นอาหารที่มีโปรตีนสูงแต่คาร์โบไฮเดรตต่ำด้วยเครื่อง twin-screw extruder พบว่า whey protein มีผลทำให้อัตราการย่อยแบ่งและดัชนีน้ำตาลในเลือดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่อัตราการย่อยอาหารและปริมาณน้ำตาลในเลือดลดลง (GL) ลดลง This will reduce resistant starch and limits the health benefits of high-protein-low-carbohydrate foods, even though whey bioactives in such foods can be substantial (Yong, Chan, Garcia and Sopade, 2011). ดังนั้นการเติมโปรตีนในข้าวขึ้นรูปจึงมีความเป็นไปได้ที่จะชะลอการถูกย่อยของสตาร์ช และทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลในเลือดลดลง ซึ่งเป็นผลดีกับผู้ป่วยโรคที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด

2.3.4 ใยอาหาร

ใยอาหารแบ่งเป็น 2 ประเภท 1) ใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ (insoluble dietary fiber) หมายถึงใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ แต่จะพองตัวในน้ำเหมือนฟองน้ำไม่ให้ความหนืด ทำให้เพิ่มปริมาณน้ำในกระเพาะอาหาร จึงรู้สึกอิ่ม ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน 2) ใยอาหารที่ละลายได้ในน้ำ (soluble dietary fiber) หมายถึงใยอาหารที่เมื่อละลายในน้ำแล้วดูดซับน้ำไว้สามารถแบ่งเป็นกลุ่มที่ให้ความหนืดและไม่ให้ความหนืด ใยอาหารในกลุ่มที่ไม่ให้ความหนืดจะช่วย

ขัดขวางการจับกันของเอนไซม์กับ active site จึงช่วยชะลออัตราการถูกย่อยลง ส่วนความหนืดที่เกิดจากใยอาหารในกลุ่มที่ให้ความหนืดจะช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของเอนไซม์ในการไปจับกับ active site ส่งผลให้อัตราการย่อยและค่า GI ลดลง Brennan และ Tudorica (2008) ศึกษาผลของ dietary fiber ต่อค่า GI ของเส้นพาสต้าสดที่ไม่ผ่านการทำสุก โดยเติม dietary fiber ในช่วง 2.5-10 % พบว่า ปริมาณ dietary fiber ที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ค่า GI ลดลง โดย soluble dietary fiber สามารถเคลือบสตาร์ชไว้ทำให้ขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งและทำให้การเกิดเจลตีโนซ์ไม่สมบูรณ์ส่งผลให้ชะลอการถูกย่อยของสตาร์ช นอกจากนี้ความหนืดที่เกิดขึ้นจาก dietary fiber ยังช่วยลดอัตราการถูกย่อยของสตาร์ช สำหรับ insoluble dietary fiber ช่วยในการขัดขวางการเคลื่อนที่ของเอนไซม์ amylase ในการไปจับกับสตาร์ช ให้ชะลอการถูกย่อยของสตาร์ช ส่งผลให้ค่า GI ลดลง จากการศึกษาผลของ alginate ต่อ *in-vitro* digestion ของเส้นหมี่จากแป้งข้าว พบว่า alginate อาศัย Ca^{2+} ในการสร้างโครงข่ายเจล โดยเจลที่เกิดขึ้นจะช่วยในการยึดเกาะและเคลือบเม็ดแป้งที่อยู่ในเจลส่งผลทำให้ rice dough มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงสามารถช่วยชะลอการถูกย่อยของ rice noodles และผลทำให้ค่า GI ลดลง (Koh *et al.*, 2009) นอกจากนี้มีการศึกษาผลของ green banana flour และ oat β -glucan ซึ่งอยู่ในกลุ่ม insoluble fiber ต่อการถูกย่อยของ wheat flour noodles พบว่า สามารถลดค่า GI ลงไปอยู่ในกลุ่ม low GI (<55) ได้ โดยเส้นหมี่ที่แบ่งสาส์ถูกทดแทนด้วย 30% green banana flour ให้ค่า GI ต่ำที่สุด (Choo & Aziz, 2010) จากการศึกษาลักษณะทางเคมีกายภาพของแป้งข้าวที่ถูกทดแทนด้วย dietary fiber ที่สกัดจากแป้งข้าว พบว่า การเติม 5 % dietary fiber ลงใน 10 % rice starch dispersion มีผลทำให้ swelling power และ pasting viscosity เพิ่มขึ้น เนื่องจากส่วนที่ไม่ละลายน้ำของ dietary fiber จะทำลายโครงสร้างของอะมิโลเพคตินส่งผลให้สามารถดูดซับน้ำได้เพิ่มขึ้น ทำให้ free water ลดลงและ pasting viscosity สูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีผลต่อพารามิเตอร์ทางรีโอโลยี (G' , G'') ของเจลข้าวเพิ่มขึ้น เนื่องจาก dietary fiber ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ water mobility ของ rice starch gel ลดลง (Lai *et al.*, 2011) ดังนั้น dietary fiber จึงสามารถช่วยชะลอการถูกย่อยได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาเปรียบเทียบผลของชนิดของใยอาหาร ระหว่าง soluble fiber และ insoluble fiber ต่อการถูกย่อยของสตาร์ชและอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำตาลในเลือด

2.3.5 Processing condition

สภาวะการผลิตมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นหลังจากการถูกย่อยของสตาร์ชโดยการทำลายผนังเซลล์และโครงสร้างของเม็ด โดยข้าวที่ผ่านการต้มและการนึ่งมีผลทำให้การถูกย่อยของสตาร์ชเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ผ่านกระบวนการให้ความร้อน (Sagum and Arcot, 2000) เนื่องจากการให้ความร้อนในสภาวะที่มีปริมาณความชื้นเพียงพอจะสามารถทำให้ส่วนผลึกของเม็ดแป้งเกิดการหลอมละลาย เม็ดแป้งจึงเกิดการดูดซับน้ำและพองตัว สตาร์ชเกิดเจลาตีโนเซชันทำให้เม็ดแป้งแตกออก สายอะมิโลสหลุดออกจากเม็ดสตาร์ชทำให้ α -amylase สามารถย่อยสตาร์ชได้ง่ายกว่าในแป้งดิบ ส่งผลให้ค่า GI เพิ่มขึ้น (Cooke and Gidley, 1992) โจ๊กกึ่งสำเร็จรูปจากข้าวหอมมะลิมีค่า GI อยู่ในกลุ่ม high GI (68-97) เนื่องจากโจ๊กข้าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดเจลาตีโนเซชันอย่างสมบูรณ์โดยไม่มีกรกัสมมาจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลและไม่มีกรเกิดรีโทรการเดชันอย่างเด่นชัด (Srikaeo and Sopade, 2010) Han และคณะ (2008) ศึกษา

เปรียบเทียบ hydrolysis index (HI) ในข้าวและถั่วเหลืองที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อนและที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยวิธีต่างๆ โดยพบว่า ข้าวและถั่วเหลืองที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อน (36.2 และ 40.3%) ให้ค่า HI ที่ต่ำกว่า ข้าวและถั่วที่ผ่านการให้ความร้อน (89.5 และ 45.0%) และวิธีการให้ความร้อนด้วยวิธีต่างๆ ให้ค่า kinetic constant ในการ hydrolysis ของข้าวและถั่วเหลืองเรียงลำดับดังนี้ autoclaving (0.284 และ 0.199), electric cooker (0.282 และ 0.170), microwave oven (0.256 และ 0.155) และ stone pot (0.238 และ 0.167) และปริมาณ resistance starch ของข้าวและถั่วเหลืองเรียงลำดับดังนี้ autoclaving (0.2 และ 2.3%), electric cooker (0.3 และ 2.5%), microwave oven (0.4 และ 3.4%) และ stone pot (1.2 และ 3.8%) Reed และคณะ (2013) ศึกษาผลของกระบวนการปรุงข้าวที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ ข้าวหนึ่ง ข้าวพิราฟ (pilaf) และข้าวผัด ต่อการถูกย่อย โดยศึกษาในข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสแตกต่าง 3 ระดับ ได้แก่ 18.0%, 13.5% และ 0.9% พบว่า ข้าวที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะมีปริมาณ resistance starch สูงสุด ข้าวผัดถูกย่อยได้น้อยที่สุด และมีปริมาณ resistance starch สูงสุด รองลงมาเป็นข้าวพิราฟ และข้าวหนึ่งถูกย่อยได้มากที่สุด ข้าวผัดจึงเป็นวิธีการปรุงที่ทำให้การเปลี่ยนแปลงปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นหลังจากการถูกย่อยของสตาร์ชเกิดขึ้นน้อยจึงมีผลให้ค่า GI ลดลง

นอกจากนี้กระบวนการแปรรูปที่ได้รับความนิยมในระดับอุตสาหกรรม คือ กระบวนการเอกซ์ทรูชัน ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวมขั้นตอนการแปรรูปต่างๆไว้ในเครื่องเดียว เช่น การผสม การนวด การเขี่ย การขึ้นรูป ทำให้เพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ และลดต้นทุนให้กับผู้ผลิต กระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลต่อค่า GI โดยกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ผสมผสานการให้ความร้อนและการเขี่ย ซึ่งมีผลทำให้เม็ดแป้งแตกออกและส่วนเปลือกของเม็ดแป้งถูกทำลายส่งผลให้เม็ดแป้งถูกเปลี่ยนแปลงของไหลที่มีความชื้นหนืดเพื่อขึ้นรูปใหม่ (Barron, Buleon, Colonna and Della Valle, 2000) สภาวะในการผลิตของกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ได้แก่ อุณหภูมิ สัดส่วนของสตาร์ชกับน้ำ ความเร็วรอบสกรู และอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ช ซึ่งส่งผลต่อค่า GI ของผลิตภัณฑ์ (Nayak, De J. Berrios and Tang, 2014)

การเกิดรีโทรเกรดชันซึ่งเกิดขึ้นเมื่อสตาร์ชที่เกิดเจลาติไนซ์ถูกลดอุณหภูมิซึ่งส่งผลให้สายอะมิโลสและสายอะมิโลเพคตินกลับมาเรียงตัวกันใหม่ จึงเปลี่ยนจาก amorphous state เป็น crystalline state โดยการเกิด รีโทรเกรดชันจะส่งผลให้สตาร์ชทนต่อการถูกย่อยเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่า GI ลดลง (Eerlingen *et al.*, 1994) Zhang และคณะ (2011) ศึกษาผลของจำนวนรอบในการเกิดรีโทรเกรดชันต่อการถูกย่อยแบบ in-vitro ของสตาร์ชข้าว โดยศึกษาในอุณหภูมิในการแช่เย็นและละลายที่อุณหภูมิ 4°C และ 25°C เป็นเวลา 7 วัน รอบละ 24 ชั่วโมง พบว่าเมื่อจำนวนรอบในการแช่เย็นและละลายที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า GI ลดลงและสามารถให้ slowly digestible starch (SDS) เพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 51.62% Tian และคณะ (2013) ศึกษา dual-retrogradation treatment (gelatinization-retrogradation-gelatinization-retrogradation) ที่อุณหภูมิ 4°C ในสตาร์ชข้าว พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณ SDS จาก 39.3% เป็น 56.7% ภายใน 36 ชั่วโมง

บทที่ 3

วัสดุและวิธีการวิจัย

3.1 วัสดุ

- 3.1.1 แป้งข้าวอะมิโลสสูงได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท เยอเนอร์ลฟู๊ดโปรดัก จำกัด จังหวัดนครราชสีมา
- 3.1.2 ข้าวขาวตาแห้ง
- 3.1.3 โพรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (Profam 974) จาก บริษัทเอดีเอ็ม (ซิกาโก, สหรัฐอเมริกา)
- 3.1.4 มอลโตสเดกซ์ทรินทนน้อย (Fibersol-2™) จาก บริษัทเอดีเอ็ม (ซิกาโก, สหรัฐอเมริกา)
- 3.1.5 รำข้าวโพด (NF10085) ได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท Bunge Milling Company (เซนต์หลุยส์, สหรัฐอเมริกา)
- 3.1.6 น้ำมันพืช: น้ำมันถั่วเหลือง, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันมะกอก, น้ำมันมะพร้าว
- 3.1.7 เอนไซม์
 - 3.1.7.1 เอนไซม์พอนซินแพนكريเอติกแอลฟาอะมิเลส (porcine pancreatic α -amylase, A-3176, type VI-B from porcine pancreas) จากบริษัท Sigma Chemical ประเทศเดนมาร์ค
 - 3.1.7.2 เอนไซม์เปปซิน (pepsin, P7012, from porcine gastric mucosa) จากบริษัท Sigma Chemical ประเทศเดนมาร์ค
 - 3.1.7.3 เอนไซม์แพนكريเอติน (pancreatin, P1750, 4xUSP specifications) จากบริษัท Sigma Chemical ประเทศเดนมาร์ค
 - 3.1.7.4 เอนไซม์อะมิโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase, A7420, from *Aspergillus niger*) จากบริษัท Sigma Chemical ประเทศเดนมาร์ค
- 3.1.8 เครื่องตรวจน้ำตาลในเลือดและแผ่นตรวจน้ำตาลในเลือด (Accu-Chek @Performa) จากบริษัท Roche Diagnostics Ltd ประเทศออสเตรเลีย

3.2 ข้าวขึ้นรูปจากกระบวนการเอ็กทรูชัน

3.2.1 การผลิตข้าวขึ้นรูปจากกระบวนการเอ็กทรูชัน

ข้าวขึ้นรูปจากแป้งข้าวอะมิโลสสูงและข้าวขึ้นรูปที่แป้งข้าวถูกทดแทนด้วย โพรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท รำข้าวโพด และมอลโตสเดกซ์ทรินทนน้อย ที่ระดับ 10% และ 20% โดยใช้เครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูคู่ (co-rotating intermeshing twin screw extruder: APV MPF19:25,

APV Baker, Inc., Grand Rapid, MI, USA) รูปแบบการจัดเรียงสกรูเป็นแบบผลิตภัณฑ์ไม่พองตัว (non-expanded product) ที่ระดับความชื้น 28% mc ควบคุมอุณหภูมิของบาริลทั้ง 4 ช่วงเป็น 70, 90, 90, 70°C ตามลำดับ อัตราการป้อนวัตถุดิบ 0.5 kg/h ความเร็วรอบสกรู 30 rpm ข้าวขึ้นรูปที่ผลิตได้จะถูกทำแห้งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมงและเก็บในถุงโพลีเอทิลีนปิดสนิท

3.2.2 ข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ข้าวขึ้นรูปถูกหุงด้วยหม้อแรงดันโดยไม่ต้องชวบน้ำด้วยอัตราส่วนของข้าวขึ้นรูปต่อน้ำเป็น 1:1.8 และอุ่นทิ้งไว้หลังจากที่ข้าวสุกแล้วเป็นเวลา 10 นาที

3.2.3 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ศึกษาลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปหุงสุกด้วยกล้องจุลทรรศน์สเตอริโอไมโครสโคป (SZX9, Optical Co LTD, Japan) ภาพพื้นผิวของข้าวขึ้นรูปหุงสุกถ่ายที่กำลังขยาย 8x และภาพตัดขวางของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่กำลังขยาย 20x

ความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลาย (Water absorption (WAI) and solubility (WSI) indices) ของวัตถุดิบ

การศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายดัดแปลงจากวิธีของ Anderson, Conway and Peplinski (1970) โดยชั่งตัวอย่างประมาณ 1 g ใส่ในหลอดสำหรับหมุนเหวี่ยง เติมน้ำกลั่น 10 ml ผสมให้เข้ากันและบ่มใน shaking water bath (SW22, JULABO GmbH, Germany) ที่อุณหภูมิ 95°C ความเร็วรอบ 174 rpm เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำมาหมุนเหวี่ยงที่ 2000 g เป็นเวลา 15 นาที แยกส่วนใสลงในถ้วยออลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแล้วและนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105°C เพื่อหาคำนวณหาส่วนที่ละลายได้ (WSI) ดังสมการที่ 1 นำตะกอนส่วนที่เหลือมาชั่งน้ำหนักเพื่อหาคำนวณหาความสามารถในการดูดซับน้ำ (WAI) ดังสมการที่ 2

$$\text{WSI (\%)} = \left(\frac{\text{น้ำหนักส่วนใสหลังอบแห้ง/น้ำหนักแห้งของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักรวมของตัวอย่าง}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{WAI (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนหลังหมุนเหวี่ยง/น้ำหนักรวมของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักรวมของตัวอย่าง}} \quad (2)$$

3.2.4 สมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป

3.2.4.1 สมบัติการเกิดเจลาตินในเซชัน (Gelatinization properties)

วิเคราะห์การเกิดเจลาตินในเซชันด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) (DSC1, Mettler Toledo, Switzerland) ดัดแปลงมาจากวิธีของ Leball, Buleon, Shiftan and Marchessault (2000) โดยชั่งตัวอย่าง 7 มิลลิกรัม ลงใน stainless steel DSC pan ที่มีปริมาตร 60 ไมโครลิตร และเติมน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:3 (w/w) จากนั้นนำไปให้ความร้อนด้วยเครื่อง DSC1 instrument (Mettler Toledo, Switzerland) โดยตั้งโปรแกรมในการวิเคราะห์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25-140°C ที่อัตรา 3°C/min ใช้ stainless steel pan เปล่าเป็นตัวอ้างอิง (reference) และใช้ Indium เป็นสารมาตรฐาน (standard) ในการสอบเทียบอุณหภูมิ ค่าสมบัติการ

เกิดเจลลาติโนเซชันที่ทำการศึกษามีดังนี้ อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (onset gelatinization temperature, T_o) อุณหภูมิที่จุดสูงสุดในการเกิดเจลลาติโนเซชัน (peak gelatinization temperature, T_p) อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (conclusion gelatinization temperature, T_c) และ ค่าพลังงานเอนทาลปีของการเกิดเจลลาติโนเซชัน (ΔH) โดยใช้โปรแกรม STARe software version 10.0 (Mettler Toledo, Switzerland)

3.2.4.2 สมบัติการเกิดเพสต์ (Pasting properties)

วิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสต์ (pasting properties) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ความหนืดแบบรวดเร็ว Rapid Visco Analyzer (RVA, Newport Scientific, Warriewood, Australia) ตามวิธีการของ Reed, Ai, Leutcher and Jane (2013) โดยชั่งตัวอย่าง 3 กรัม (น้ำหนักแห้ง) ลงใน RVA can และเติมน้ำกลั่นลงใน RVA can ให้น้ำหนักรวมทั้งหมดเป็น 28 กรัม และใช้โปรแกรมการทำงานด้วย standard profile 2 ดังต่อไปนี้ โดยเริ่มต้นวิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 50°C ตั้งแต่เวลา 0-1 นาทีด้วยความเร็ว 960 rpm สำหรับ 10 วินาทีแรกแล้วลดลงเป็น 160 rpm ตลอดการวิเคราะห์ จากนั้น เพิ่มอุณหภูมิเป็น 95°C ในช่วงเวลาระหว่าง นาทีที่ 1-8.5 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95°C เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นลดอุณหภูมิลงมาที่ 50°C ในช่วงเวลาระหว่างนาทีที่ 13.50-21 และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 95°C เป็นเวลา 2 นาที รวมระยะเวลาการทดสอบ 23 นาที

3.2.5 ศึกษาโครงสร้างของข้าวขึ้นรูปโปรตีนสูง

ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของแป้งข้าว, โปรตีนไอโซเลท และข้าวขึ้นรูปโปรตีนสูง โดยนำตัวอย่างที่เป็นผงมาวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง FTIR Spectrometer (Tensor 27, Bruker, UK) และเซลล์วัดตัวอย่างชนิด attenuated total reflectance (ATR) ที่ความยาวคลื่น 400 ถึง 4000 cm^{-1} โดยมีค่า resolution เท่ากับ 4 cm^{-1} และ 64 scans ในการวัดแต่ละครั้ง และใช้ค่า resolution enhancement factor เท่ากับ 1.5 วิเคราะห์สเปกตรัมด้วยโปรแกรม OPUS

3.2.6 ศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

การศึกษาไดนามิกรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุกดัดแปลงมาจากวิธีของ Li, Prakash, Nicholson, Fitzgerald and Gilbert (2016) ด้วยเครื่องรีโอมิเตอร์ AR G2 (TA instruments, USA) ซึ่งต่อกับหัววัดแบบ four-bladed vane ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 28 mm ความยาว 42 mm และ cup ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm โดยควบคุม stress และอุณหภูมิที่ 37°C นำข้าวที่เพิ่งหุงสุก 25 กรัมใส่ลงใน cup โดยให้มีอากาศในช่องว่างน้อยที่สุด จากนั้นให้หัววัดเคลื่อนที่ลงใน cup จนมีระยะห่างจากก้น cup ขึ้นมา 4 mm พักไว้ 5 นาทีเพื่อให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิ 37°C

ศึกษา oscillatory stress sweep test ในช่วง 0.1-1000 Pa ที่ความถี่คงที่ 10 rad/s และอุณหภูมิ 37°C เพื่อหา linear viscoelastic region (LVR) จากนั้นศึกษา frequency sweep ในช่วงความถี่ 0.1-100 rad/s ที่อุณหภูมิ 37°C และมีค่า stress เท่ากับ 2 Pa ซึ่งอยู่ในช่วง LVR ของทุกตัวอย่าง

3.3 การผลิตข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน

นำน้ำมันพืช 2 g มาให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 130°C จากนั้นนำมาผสมกับข้าวขาวตาแห้ง 10 g ที่ผ่านการชวบน้ำแล้วมาผัดเป็นเวลา 2 นาที เติมน้ำ 13 ml และนำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 95°C เป็นเวลา 35 นาที โดยน้ำมันพืชที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ น้ำมันมะพร้าว (lauric acid, C12), น้ำมันปาล์ม (palmetic acid, C16), น้ำมันมะกอก (oleic acid, C18:1) และน้ำมันถั่วเหลือง (linoleic acid, C18:2)

3.3.1 การแช่แข็งและทำละลายข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน

นำตัวอย่างข้าวหุงสุกและข้าวหุงสุกผสมน้ำมันมาแช่แข็งที่อุณหภูมิ -40°C เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นนำมาศึกษาวิธีการทำละลาย 2 วิธี คือ การทำละลายด้วยไมโครเวฟและการทำละลายด้วย water bath ที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 40 นาที นำตัวอย่างที่ได้ไปศึกษาการย่อย

3.4 ศึกษาการย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกและข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน

3.4.1 วิเคราะห์หาปริมาณ total starch

นำตัวอย่างอาหารมาสับให้ละเอียด วิเคราะห์หาปริมาณ total starch ตามวิธี AOAC method 996.11 ดังนี้ ชั่งตัวอย่างประมาณ 100 mg ลงในหลอดทดลอง เติมน้ำละลาย 80% เอทานอล 0.2 mL เพื่อช่วยในการกระจายตัว เขย่าให้เข้ากัน เติมนิโคตริลซัลโฟนิกไซด์ปริมาตร 2 mL ทันทันที่เขย่าให้เข้ากัน นำไปวางในอ่างน้ำเดือดนาน 5 นาที เติมน้ำละลายเอนไซม์ thermostable α -amylase (300 U/mL) ปริมาตร 3 mL เขย่าให้เข้ากัน และนำไปวางในอ่างน้ำเดือดนาน 6 นาที โดยนำออกมาเขย่าหลังจากการบ่ม 2 นาทีและ 4 นาทีตามลำดับ เมื่อครบเวลาการบ่ม นำออกมาวางในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 50 °C ประมาณ 20 นาที เติมน้ำละลายโซเดียมอะซิเตรท บัฟเฟอร์ความเข้มข้น 200 มิลลิโมลาร์ pH 4.5 ปริมาตร 4 mL ตามด้วยเอนไซม์ Amyloglucosidase (20 U/mL) ปริมาตร 0.1 mL เขย่าให้เข้ากัน และนำไปบ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาการบ่ม ปรับปริมาตรเป็น 100 mL ด้วยน้ำกลั่น และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์ปริมาณกลูโคส ดูดส่วนใสมา 0.1 mL ใส่ในหลอดทดลองขนาด (16 x 100 mm) จากนั้นเติมน้ำละลาย GOPOD 3 mL ในแต่ละหลอดทดลองของตัวอย่าง หลอดทดลองของน้ำตาล D-glucose standard solution (1 mg/mL) และหลอดทดลองของ reagent blanks นำหลอดทดลองไปบ่มที่อุณหภูมิ 50°C นาน 20 นาที นำมาวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร และคำนวณปริมาณ total starch จากสูตร

$$\text{ปริมาณ total starch (กรัม/ 100 กรัมสตาร์ช)} = F/W \times 162/180 \times 100$$

เมื่อ F = ปริมาณกลูโคสที่วิเคราะห์ได้

W = น้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง (กรัม)

162/180 = แฟคเตอร์สำหรับเปลี่ยน free glucose เป็น anhydro-glucose

3.4.2 Kinetic digestion

ชั่งตัวอย่างอาหารที่สับให้ละเอียด 0.25 กรัม ใส่ในหลอดย่อยขนาด 50 mL เติมสารละลายเอนไซม์ porcine pancreatic α -amylase ลงไป 0.5 mL จากนั้นใส่ลูกแก้วลงในหลอดย่อย 4 อัน และผสมให้เข้ากันด้วย vortex mixture นาน 20 วินาที จากนั้นเติมสารละลายเอนไซม์ pepsin ลงไป 2.5 mL บ่มใน shaking water bath เพื่อเขย่าที่ความเร็วรอบ 170 rpm ที่อุณหภูมิ 37°C นาน 30 นาที เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.02 โมลาร์ ลงไป 2.5 mL เพื่อปรับ pH ให้เป็นกลาง เติมสารละลายอะซิเตตบัฟเฟอร์ เพื่อปรับ pH เป็น 6 เติมสารละลายเอนไซม์ผสมของ pancreatin และ amyloglucosidase ลงไป 2.5 mL จากนั้นสุ่มตัวอย่างปริมาณ 100 ไมโครลิตร มาตรวจหาปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง glucose meter ตามระยะเวลา ดังต่อไปนี้ 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240 นาที โดยเวลาที่ 0 นาที คือการสุ่มตัวอย่างมาก่อนเติมสารละลายเอนไซม์ผสม

เตรียมสารละลายมาตรฐานกลูโคสที่ ความเข้มข้น 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1 mg/mL และตรวจวัดปริมาณน้ำตาลกลูโคสด้วยเครื่อง glucose meter ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อนำมาหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานกลูโคสกับค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่วัดได้จากเครื่อง glucose meter นำค่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสที่ได้จากเครื่อง glucose meter ตามระยะเวลาต่างๆ มาคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสด้วยสมการที่ได้จากสารละลายมาตรฐานกลูโคส

นำค่าความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสในแต่ละระยะเวลาที่ได้มาคำนวณหา digested starch (%) ในแต่ละเวลา โดยเทียบกับปริมาณ total starch ที่ได้ ดังนี้

$$\text{ปริมาณ starch (mg)} = \text{น้ำหนักตัวอย่าง (mg db)} \times \text{total starch (\%)} / 100$$

$$\text{Digested starch (\%)} = \frac{\text{ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคส} \times 20.5 \text{ mL}}{\text{ปริมาณ starch (mg)}} \times 100$$

นำค่า digested starch (%) มา plot กราฟ digestion curve เทียบกับเวลา คำนวณหาอัตราการถูกย่อย (k) และความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่เวลา ∞ (C_{∞}) จากสมการต่อไปนี้

$$\ln(dc_t/dt) = \ln(C_{\infty}k) - kt$$

เมื่อ C_t = ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่เวลา t
 C_{∞} = ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสที่เวลา ∞
 k = อัตราการถูกย่อย (g/100 g dry starch per min)

โดย plot กราฟระหว่าง $\ln((C_{i+1} - C_i)/(t_{i+1} - t_i))$ และ $(t_{i+1} + t_i)/2$ ดังนั้นค่า k มีค่าเท่ากับความชันของกราฟนี้ และค่า C_{∞} คำนวณได้จากจุดตัดแกน y ($\ln(C_{\infty}k)$)

3.4.3 ค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic index: GI)

นำค่า k และค่า C_{∞} ที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) จากสมการต่อไปนี้

$$D_t = D_0 + D_{\infty-0}(1 - \exp(-kt))$$

$$D_{\infty} = D_0 + D_{\infty-0}$$

$$AUC = \left[D_{\infty}t + \frac{D_{\infty-0}}{k} \exp(-kt) \right]_{t_1}^{t_2}$$

นำค่า AUC มาคำนวณหาค่า Hydrolysis index (HI) โดยนำค่า AUC ของตัวอย่างเทียบกับค่า AUC ของ reference food ที่ใช้เป็นขนมปังขาว ตามสมการต่อไปนี้

$$HI = \frac{AUC_{sample}}{AUC_{white\ bread}} \times 100$$

นำค่า HI ที่ได้มาคำนวณหาค่า Glycemic index (GI) ตามสมการต่อไปนี้

$$GI = 39.51 + 0.570HI$$

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

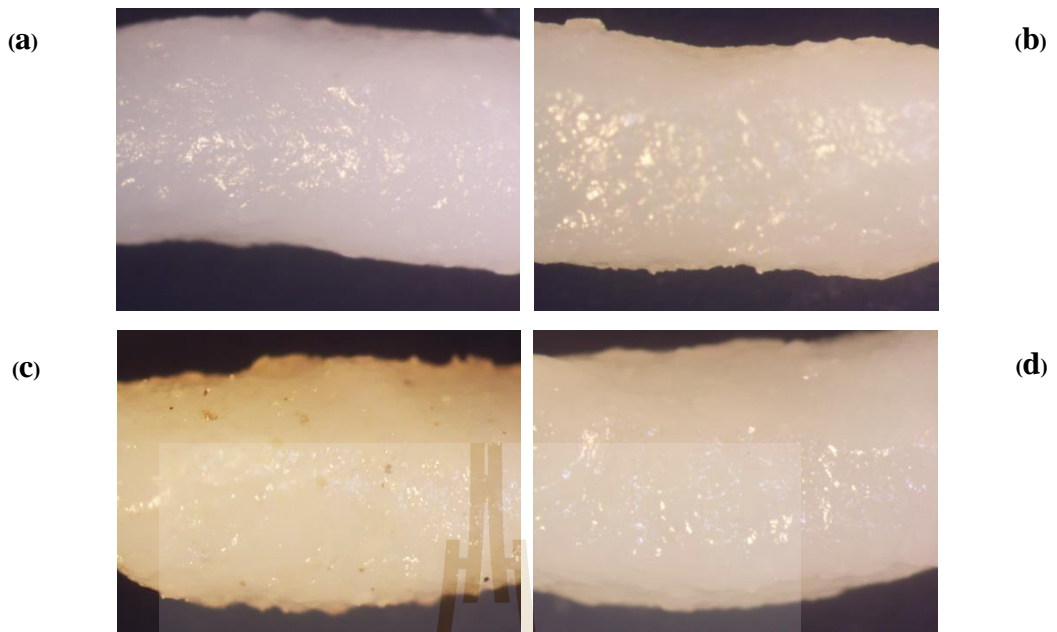
4.1 ผลของโปรตีนและใยอาหารต่อสมบัติของข้าวขึ้นรูป

4.1.1 ลักษณะปรากฏของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ข้าวขึ้นรูปหุงสุกมีลักษณะปรากฏไม่แตกต่างจากข้าวหุงสุกทั่วไปดังแสดงในภาพที่ 4.1 นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20%SPI (20SPI-ER) หุงสุก (ภาพที่ 4.2b) และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20%RMD (20RMD-ER) หุงสุก (ภาพที่ 4.2d) มีลักษณะผิวของเมล็ดข้าวที่เรียบเนียนเหมือนข้าวขึ้นรูปหุงสุก (ภาพที่ 4.2a) ในขณะที่ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20%CB (20CB-ER) หุงสุก (ภาพที่ 4.2c) มีลักษณะผิวของเมล็ดข้าวไม่เรียบเนียน เนื่องจากมีอนุภาครำข้าวโพดขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่บริเวณผิวของเมล็ดข้าว (ภาพที่ 4.2c) และภายในเมล็ดข้าวขึ้นรูปหุงสุก (ภาพที่ 4.3c) ในขณะที่ลักษณะเจลาภายในของเมล็ดข้าวขึ้นรูป 20SPI-ER และ 20RMD-ER หุงสุก(ภาพที่ 4.3b และ 4.3c) เรียบเนียนไม่แตกต่างจากข้าวขึ้นรูปหุงสุก (ภาพที่ 4.3a)



ภาพที่ 4.1 ข้าวขึ้นรูปหุงสุก (a), ข้าวขึ้นรูปที่ถูกเสริมด้วย 20% soy protein isolate (b), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% corn bran (c), และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (d)



ภาพที่ 4.2 ลักษณะผิวของเม็ดข้าวชั้นรูปหุงสุก (a), ข้าวชั้นรูปที่เสริมด้วย 20% soy protein isolate (b), ข้าวชั้นรูปที่เสริมด้วย 20% corn bran (c), และข้าวชั้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (d) (magnification 8x)

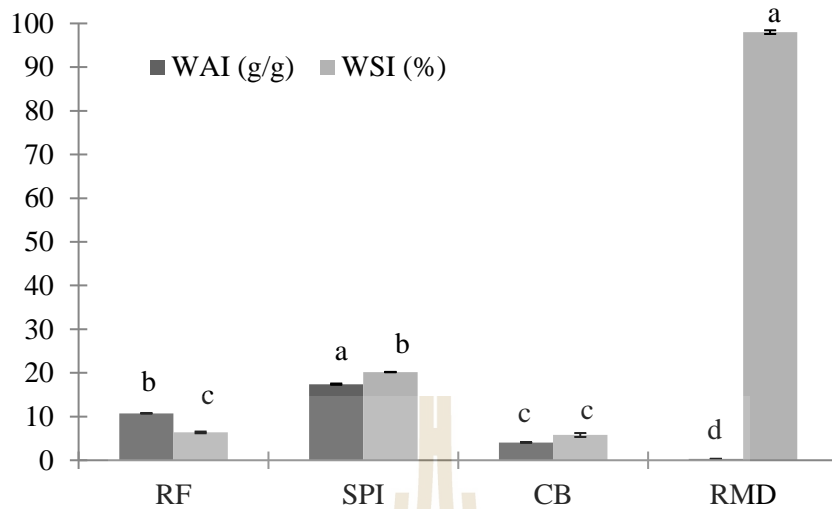


ภาพที่ 4.3 ลักษณะภายในของเม็ดข้าวชั้นรูปหุงสุก (a), ข้าวชั้นรูปที่เสริมด้วย 20% soy protein isolate (b), ข้าวชั้นรูปที่เสริมด้วย 20% corn bran (c), และข้าวชั้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (d) (magnification 20x)

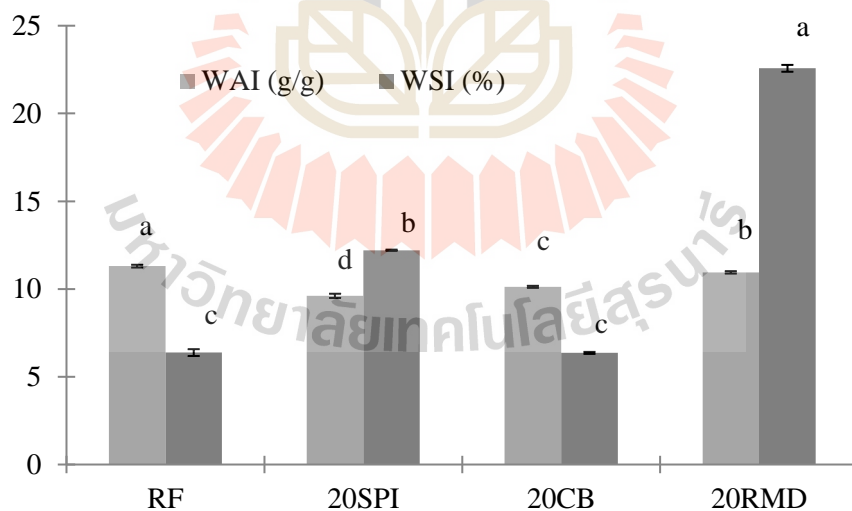
4.1.2 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index: WAI) และการละลาย (water solubility index: WSI) ของวัตถุดิบ

ศึกษาค่าความสามารถในการดูดซับน้ำและการละลายของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตข้าวขึ้นรูป (ภาพที่ 4.1) ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า (RF), โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (SPI), รำข้าวโพด (CB) และมอลโตสเดกซ์ทรินทนย่อย (RMD) ที่อุณหภูมิ 90°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิภายในบารเรล เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจับกับน้ำของวัตถุดิบกับแป้งข้าวเจ้า พบว่าค่า WAI และค่า WSI ของ SPI มีค่าสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 80°C มีผลทำให้โปรตีน 11S และ 7S เกิดการเสียสภาพ (denature) โดยโครงสร้าง quaternary จะเปลี่ยนแปลงไปและสายโพลีเปปไทด์ของโปรตีนถั่วเหลืองจะคลายตัวออก (unfolding) นอกจากนี้ SPI ยังมีค่าความสามารถในการจับกับน้ำที่ pH 7 สูง เนื่องจากเป็นจุดที่มีค่า pH สูงกว่า isoelectric point (pH5) ของ SPI (Remondetto, Añon and González, 2001) ค่า WSI ของ RMD มีค่าสูงสุดและค่า WAI ของ RMD มีค่าต่ำสุด (ภาพที่ 3.1) ซึ่งอาจเป็นเพราะ RMD เป็นไฟเบอร์ที่ละลายน้ำได้ดีแต่ไม่ให้ความหนืดและทนความร้อน (Ohkuma and Wakabayashi, 2008) ในขณะที่ค่า WAI ของ CB มีค่าต่ำกว่าค่า WAI ของ SPI และ RF อย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า WAI ของ CB มีค่าสูงกว่าค่า WAI ของ RMD เนื่องจากความสามารถในการจับกับน้ำ (water binding) ของ CB ขึ้นอยู่กับปริมาณ arabinose ในสาย arabinoxylan (Doner and Hicks, 1997; Kiszonas, Fuerst and Morris, 2013) ดังนั้นความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ (water accessibility) ใน SPI สูงกว่า RF ในขณะที่ความสามารถในการซึมผ่านของน้ำ ในโยอาหารสูงกว่า RF

เมื่อแป้งข้าวเจ้าถูกทดแทนด้วย 20%SPI มีผลทำให้ค่า WAI ที่อุณหภูมิ 90°C ของส่วนผสมมีค่าต่ำที่สุด (ภาพที่ 4.2) เนื่องจากการลดลงของปริมาณสตาร์ชที่อาจมีผลทำให้ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพในการซึมผ่านของน้ำของ SPI สูงกว่า RF (Zhu et al., 2010) ดังนั้นเมื่อผสมโปรตีนเพิ่มเข้าไปจึงเป็นการขัดขวางการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการให้ความร้อน (Lu, Donner, Yada and Liu, 2016).



ภาพที่ 4.4 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index: WAI) และการละลาย (water solubility index: WSI) ที่อุณหภูมิ 90°C ของแป้งข้าวเจ้า (RF), โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (SPI), รำข้าวโพด (CB) และมอลโตสเดกซ์ตรินทนย่อย (RMD) อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

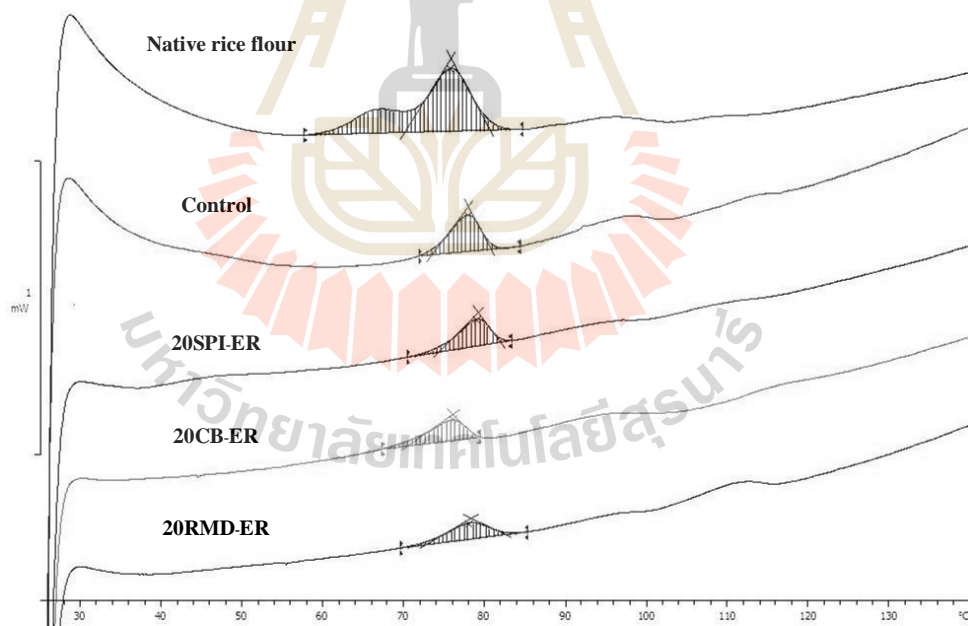


ภาพที่ 4.5 ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำ (water absorption index: WAI) และการละลาย (water solubility index: WSI) ที่อุณหภูมิ 90°C ของแป้งข้าวเจ้า (RF), และแป้งข้าวเจ้า ถูกทดแทนด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI), 20% รำข้าวโพด (20CB), และ 20% resistant maltodextrin (20RMD) อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.1.3 สมบัติทางกายภาพของข้าวขึ้นรูป

4.1.3.1 สมบัติการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชัน (Gelatinization properties)

สมบัติการเกิดเจลลาตินไนซ์เซชันของแป้งข้าวเจ้า, ข้าวขึ้นรูป (control), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% soy protein isolate (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% corn bran (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER) ถูกแสดงในภาพที่ 4.6 และตาราง 4.4 จากการศึกษพบว่า thermogram ของแป้งข้าวเจ้ามีลักษณะ biphasic endotherm (ภาพที่ 4.6) โดยมี first onset temperature (T_{o1}) และ second onset temperature (T_{o2}) ที่อุณหภูมิ 60.5 และ 70.4 (ตาราง 4.4) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่แป้งข้าวเจ้าทางการค้าถูกผลิตจากข้าวขาวหลากหลายสายพันธุ์ เมื่อนำมาผลิตเป็นข้าวขึ้นรูปด้วยกระบวนการเอ็กทรูชันพบว่า ส่วน weak crystalline region เนื่องจากไม่พบ T_{o1} ในข้าวขึ้นรูป (control) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเอนทัลปี (enthalpy) ของข้าวขึ้นรูปทุกตัวอย่างมีค่าต่ำกว่าค่าเอนทัลปีของแป้งข้าวเจ้า โดยการลดลงของค่าเอนทัลปีเป็นผลมาจากการถูกทำลายของโครงสร้างเกลียวคู่ (double-helical order) (Cooke et al., 1992) ซึ่งบ่งชี้ได้ว่ากระบวนการเอ็กทรูชันสามารถทำลาย molecular order ของแป้งข้าวเจ้า



ภาพที่ 4.6 DSC thermogram ของแป้งข้าวเจ้า, ข้าวขึ้นรูป (control), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

การเปลี่ยนแปลงของ onset temperature (T_o) เป็นผลมาจากหลายปัจจัยร่วมกัน โดยเฉพาะความสามารถในการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญ (Mira, Persson and Villwock, 2007) โดยจากการศึกษาพบว่าค่า T_o , peak temperature (T_p) และ conclusion temperature (T_c) ของข้าวขึ้นรูป 20SPI-ER มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของงานวิจัยอื่นๆก่อนหน้านี้ (Li, Yeh and Fan, 2007; Ribotta, Colombo, León and Añón, 2007; Yu, Jiang and Kopparapu, 2015) การที่โปรตีนมีความสามารถในการจับกับน้ำได้ดีรวมถึงการเกิด interaction กันระหว่างโปรตีนกับสตาร์ชส่งผลต่อการเกิดเจลลิตในเซชันของเม็ดแป้ง (Ribotta et al., 2007) โดยการที่โปรตีนสามารถจับกับน้ำได้ดีกว่าจึงมีผลทำปริมาณน้ำสำหรับการเกิดเจลลิตในเซชันของสตาร์ชลดลง ดังนั้นค่า T_o และค่า T_p ของข้าวขึ้นรูป 20SPI-ER จึงมีค่าสูงที่สุดในขณะที่ค่า T_o , T_p และค่า T_c ของข้าวขึ้นรูป 20CB-ER มีค่าต่ำที่สุด โดยการลดลงของอุณหภูมิเหล่านี้เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำสำหรับการเกิดเจลลิตในเซชันของเม็ดแป้ง (Acquistucci, Bucci, Magri and Magri, 1997) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากที่อุณหภูมิของรำข้าวโพดที่แทรกอยู่เมล็ดข้าวขึ้นรูปช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำเข้าไปภายในจึงเพิ่มการดูดซับน้ำของเม็ดแป้ง แต่ค่า T_o และค่า T_p ของข้าวขึ้นรูป 20RMD-ER ไม่แตกต่างจาก control โดย RMD มีค่า WAI ต่ำที่สุดจึงไม่ส่งผลกับปริมาณน้ำอิสระสำหรับการเกิดเจลลิตในเซชันของเม็ดแป้งในข้าวขึ้นรูป 20RMD-ER

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางความร้อนของของแป้งข้าวเจ้า, ข้าวขึ้นรูป (control), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไฮโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

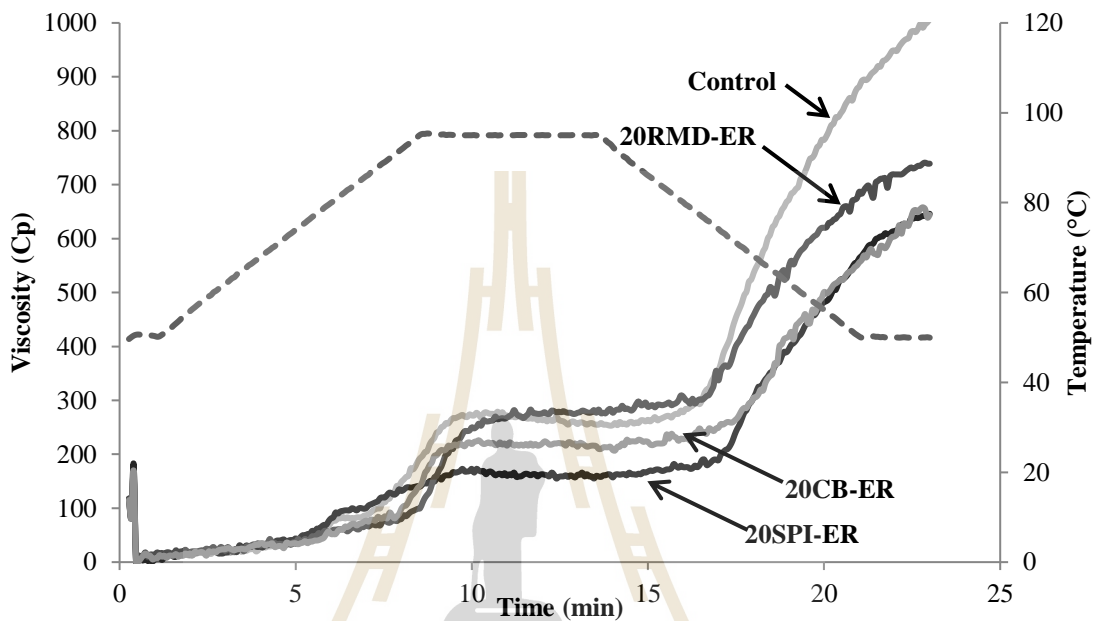
Sample	T_o (°C)	T_p (°C)	T_c (°C)	Enthalpy (J/g)	
Native RF	60.5±0.05	70.4±0.04 a	75.9±0.10 a	80.7±0.23 b	5.9±0.23 a
Control	n.d.	73.2±0.04 b	77.9±0.11 c	80.4±0.40 b	2.0±0.05 b
20SPI	n.d.	74.7±0.20 c	79.1±0.03 d	81.9±0.02 c	1.3±0.11 c
20CB	n.d.	70.2±0.01 a	76.1±0.05 b	79.3±0.09 a	1.5±0.16 c
20RMD	n.d.	73.0±0.08 b	78.0±0.03 c	82.3±0.10 c	1.1±0.07 c

อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.1.3.2 สมบัติการเกิดเพสต์ (Pasting properties)

กระบวนการเอในการผลิตข้าวขึ้นรูปส่งผลให้เม็ดแป้งบางส่วนเกิด เจลลิตในซ์ข้าวขึ้นรูป (control) มีค่าความหนืดสูงสุด (peak viscosity) สูงกว่าข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% SPI, CB และ RMD ดังแสดงในภาพที่ 3.6 เนื่องจากเม็ดแป้งที่เหลืออยู่ของใน control

สามารถดูดซับน้ำและพองได้ดีโดยไม่มีโปรตีนหรือใยอาหารมาขัดขวาง เมื่อข้าวขึ้นรูปถูกเสริมด้วยโปรตีนและใยอาหารพบว่าปริมาณน้ำอิสระ (available water) สำหรับการพองตัวและการเกิดเจลาคติไนซ์เซชันของเม็ดแป้งลดลงและส่งผลให้



ภาพที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของข้าวขึ้นรูป (Control), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

4.1.4 ลักษณะโครงสร้างของข้าวขึ้นรูปโปรตีนสูง

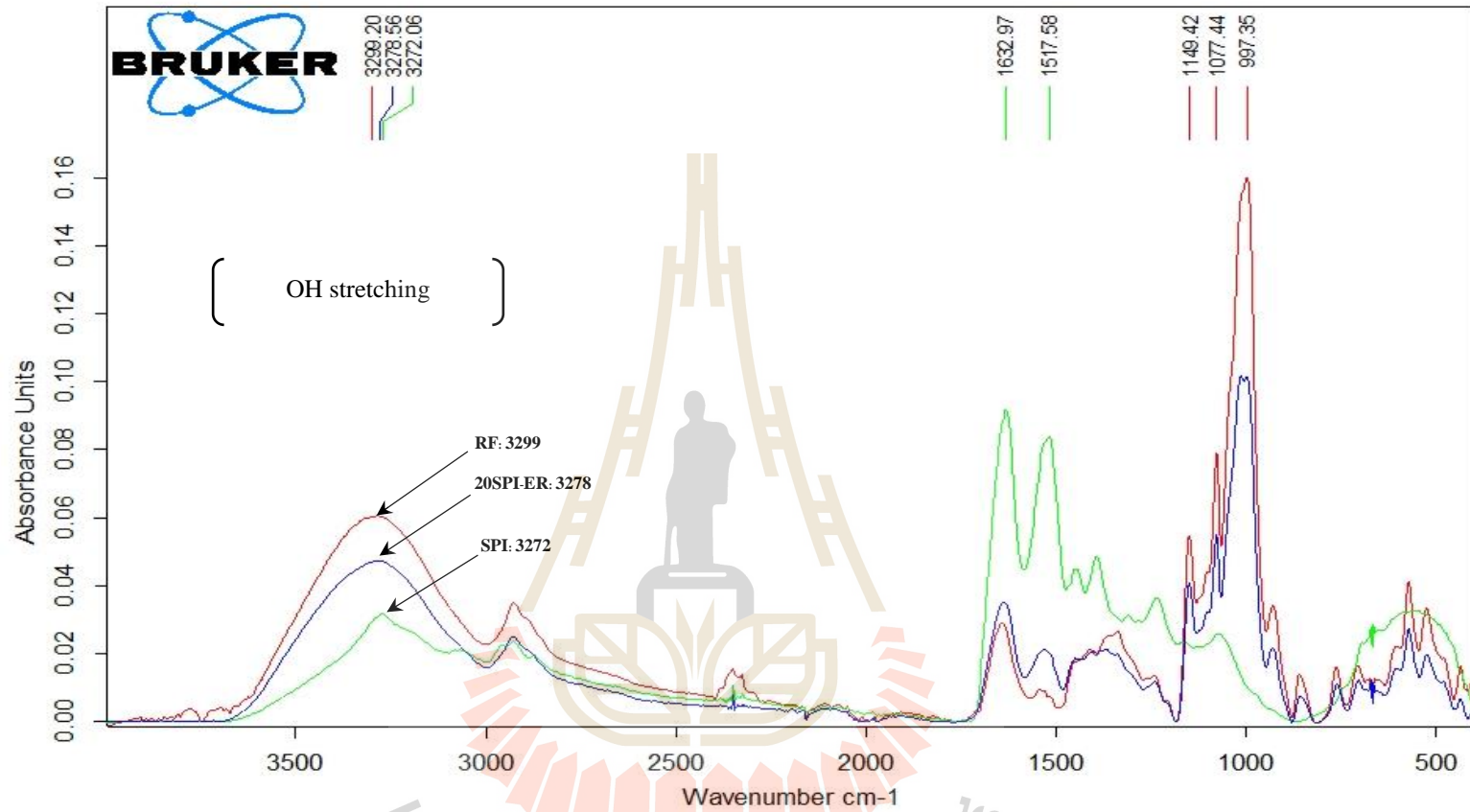
ศึกษาปฏิสัมพันธ์ทางเคมีระหว่างโปรตีนกับแป้งข้าวเจ้าในข้าวขึ้นรูปโปรตีนสูงด้วยเครื่อง FTIR ดังภาพที่ 4.8 โดยความยาวคลื่นที่ 1053 , 1047 , 1040 และ 1022 cm^{-1} แสดงถึงการจัดเรียงโมเลกุลแบบเกลียวคู่ (short-range ordering) และส่วนอสัณฐาน (amorphous areas) (van Soest, Tournois, de Wit and Vliegenthart, 1995) นอกจากนี้ความยาวคลื่นที่ 994 cm^{-1} แสดงถึงการสั่นของพันธะ COH และปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำกับสตาร์ช เช่น พันธะไฮโดรเจน (van Soest et al., 1995) นอกจากนี้ความยาวคลื่นที่บ่งบอกถึงโปรตีนอย่างชัดเจน ได้แก่ 1691 , 1647 , 1635 , 1620 , 1536 , และ 1515 cm^{-1} โดยความยาวคลื่นในช่วงที่เฉพาะเจาะจงกับ amide I และ amide II ได้แก่ 1580 – 1720 cm^{-1} และ 1480 – 1580 cm^{-1} ตามลำดับ (Li, Dobraszczyk, Dias and Gil, 2006)

เมื่อเติม SPI ลงในข้าวขึ้นรูปพบว่า สตาร์ชฟิสิกในช่วงความถี่ 800 – 1200 cm^{-1} มีความสูงลดลง ในขณะที่โปรตีนฟิสิกในช่วงความยาวคลื่น 1500 – 1700 cm^{-1} เพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิสิกในช่วง 3000 – 3600 cm^{-1} ที่แสดงถึงการยืดออกของพันธะ OH (Kizil, Irudayaraj and Seetharaman, 2002) มีการขยับไปที่ความยาวคลื่นต่ำลงซึ่งบ่งบอกว่ากระบวนการเอกทฤษฎี

สามารถทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่าง SPI และสตาร์ช (Lu et al., 2016) ในขณะที่ปฏิสัมพันธ์ทางเคมีระหว่างโยอาหารกับแป้งข้าวเจ้าในข้าวขึ้นรูปไม่สามารถเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการเอทริวชัน

4.1.5 สมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

สมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุกแสดงดังตารางที่ 4.2 แสดงโดยพบว่าค่า n^* ของทุกตัวอย่างข้าวขึ้นรูปหุงสุกมีค่าต่ำกว่า 1 (0.035-0.101) ซึ่งบ่งบอกถึงพฤติกรรมการไหลแบบ shear thinning โดยค่า consistency coefficient (K^*) และค่า loss tangent ($\tan \delta$) ถูกนำมาใช้อธิบายความแข็งและความเหนียวของข้าวหุงสุก (Li et al., 2016) จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งและค่าความเหนียวของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20SPI-ER มีค่าสูงกว่า control, 20CB-ER, และ 20RMD-ER อย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับกับค่า storage modulus (G') ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20SPI-ER ที่มีค่าสูงกว่า control อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติม 20%SPI ที่ทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลง การพองตัวของเม็ดแป้งและสายอะมิโลสที่กระจายตัวอยู่อาจรวมกับสายโพลีเมอร์ของโปรตีนเกิดเป็นโครงข่าย (Ramírez Ortiz, San Martín-Martínez and Martínez Padilla, 2008) และเพิ่มค่า G' ของข้าวขึ้นรูป นอกจากนี้การเติม SPI ยังเปลี่ยนแปลงสมบัติทางความหนืด (viscoelastic properties) ของข้าวขึ้นรูปหุงสุกให้มีความเป็น elastic มากกว่า viscous โดยผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ (Qiu et al., 2015) ซึ่งพบว่า การเติม SPI มีผลทำให้ค่าความหนืดของสตาร์ชข้าวโพดและสตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าค่าความแข็งและค่าความเหนียวในตารางที่ 4.2 และค่า G' ของข้าวหุงสุก 20CR-ER มีค่าสูงกว่า control ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้าวโพดสามารถรวมตัวกับเจลสตาร์ชได้ดี โดยโครงสร้างของเจลสตาร์ชที่ผสมกับโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจะแข็งแรงกว่าเจลสตาร์ชเพียงอย่างเดียว (Sun, Wu, Bu and Xiong, 2015) แต่อย่างไรก็ตามข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20CB-ER มีค่าความแข็งและค่าความเหนียวต่ำกว่าข้าวขึ้นรูปหุงสุก



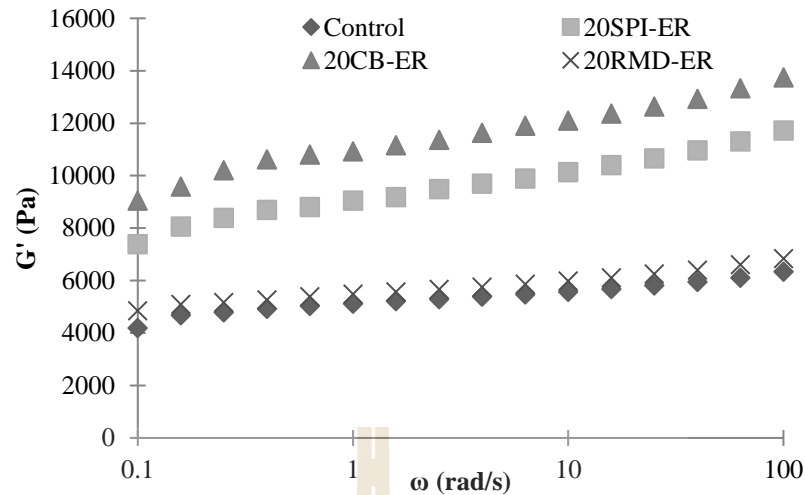
ภาพที่ 4.8 Fourier transform infrared (FTIR) spectra ของแป้งข้าวเจ้า (RF), โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (SPI) และข้าวขึ้นรูปที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER)

20SPI-ER เล็กน้อย ซึ่งการที่อุณหภูมิจนเกิดการเกิดเจลลาคีโนเซชัน (T_o , T_p) ของ 20CB-ER มีค่าต่ำและการกระจายตัวของอนุภาครำข้าวโพดในโครงข่ายของเจลอาจส่งผลให้สมบัติทาง viscoelastic ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20CB-ER มีค่าต่ำกว่าข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20SPI-ER ในขณะที่ RMD ส่งผลต่อค่า G' ของข้าวหุงสุก 20RMD-ER เพียงเล็กน้อยถึงแม้ว่าค่าความแข็งและค่าความเหนียวต่ำของข้าวหุงสุก 20RMD-ER จะมีค่าสูงกว่า control ดังตารางที่ 4.2 โดยอาจเป็นผลมาจากสมบัติการเกิดเพสท์ของ 20RMD-ER มีค่าความหนืดสูงสุด(peak viscosity) และค่าความหนืดต่ำสุด (final viscosity) ต่ำกว่า control แต่อย่างไรก็ตามค่าความหนืดสูงสุด, T_o และ T_p ของ 20RMD-ER ไม่แตกต่างจาก control อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกได้ว่าการพองตัวของเม็ดแป้งใน 20RMD-ER และ control ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จึงมีผลทำให้ viscoelastic ของข้าวหุงสุก 20RMD-ER แตกต่างจาก control เพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ RMD ยังไม่สามารถเกิดโครงข่ายร่วมกับเจลสตาร์ชได้เนื่องจาก RMD เป็นโพลีแซคคาไรด์สายสั้นที่มีค่า dextrose equivalent (DE) น้อยกว่า 20 และสามารถละลายน้ำได้(Ohkuma et al., 2008)

ตารางที่ 4.2 สมบัติทางรีโอโลยีของข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

Sample	K*	tan δ at 10 rad/s	n*
Control	313.42 ± 1.27 c	0.066 ± 0.002 c	0.089 ± 0.001 a
20SPI-ER	838.21 ± 17.71 a	0.085 ± 0.001 a	0.052 ± 0.011 b
20CB-ER	816.79 ± 27.89 a	0.072 ± 0.003 b	0.035 ± 0.013 b
20RMD-ER	376.88 ± 8.44 b	0.069 ± 0.003 b	0.090 ± 0.005 c

อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 4.9 Storage modulus ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

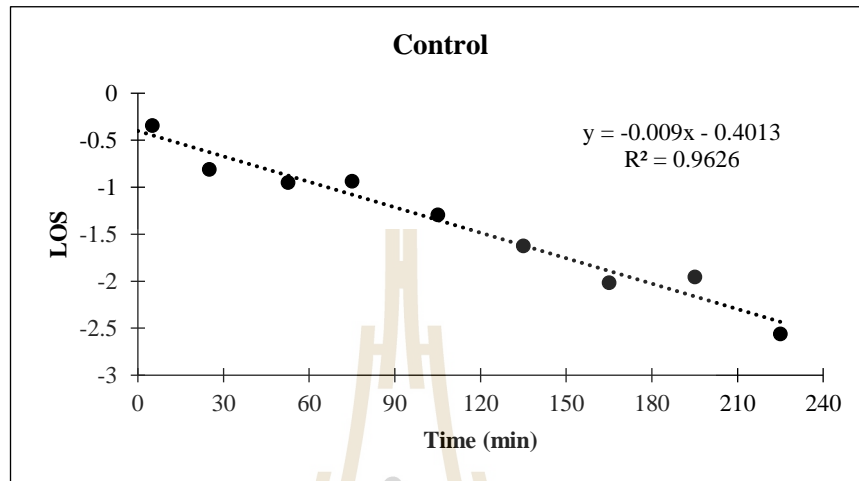
4.2 การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกและข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน

อัตราการย่อยของสตาร์ชเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่า glycemic response วิธีการวิเคราะห์แบบ Log of slope (LOS) นั้นมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอัตราการย่อยและสามารถแยกความแตกต่างในการย่อยของสตาร์ชซึ่งเดิมไม่สามารถแยกอย่างชัดเจนได้จากเส้นโค้งของการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม (Edwards, Warren, Milligan, Butterworth and Ellis, 2014) การวิเคราะห์แบบ LOS ยังสามารถหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้าย (end-point product concentration: C_{∞}) และอัตราการย่อย (pseudo first-order digestibility rate constant: k) ที่เกิดขึ้นในอัตราการย่อยอาหารจากเร็วไปช้าตามกระบวนการย่อยสลาย (Butterworth, Warren, Grassby, Patel and Ellis, 2012) ในอาหารที่มีสตาร์ชเป็นองค์ประกอบจะมีอัตราการย่อยที่หลากหลาย การวิเคราะห์ด้วย LOS สามารถแสดงเส้นตรงได้ 2 ช่วง หรือมากกว่านั้น โดยความชันของเส้นตรงแต่ละช่วงคืออัตราการย่อยของแต่ละช่วง เช่น k_1 , k_2 และสามารถหาค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้ายในแต่ละช่วงได้ เช่น $C_{\infty 1}$, $C_{\infty 2}$ (Edwards et al., 2014) ดังนั้นการวิเคราะห์แบบ LOS จึงเหมาะสมที่จะแสดงให้เห็นถึงความสามารถย่อยได้ของข้าวขึ้นรูปเสริมโปรตีนและใยอาหาร

4.2.1 ผลของโปรตีนและใยอาหารต่อการย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ข้าวขึ้นรูปเสริมโปรตีนและใยอาหารที่ระดับ 10% และ 20% แสดงลักษณะ digestion curve 2 แบบ คือ single-phase และ two-phase pseudo-first order โดยค่า C_{∞} และอัตราการย่อยของช่วงแสดงในตารางที่ 4.3 จากการศึกษาพบว่าข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control) แสดง

ลักษณะ digestion curve แบบ single-phase pseudo-first order ดังภาพที่ 3.10 และมีค่า C_{∞} สูงสุดจึงส่งผลให้ข้าวขึ้นรูปหุงสุกอยู่ในกลุ่ม high GI food



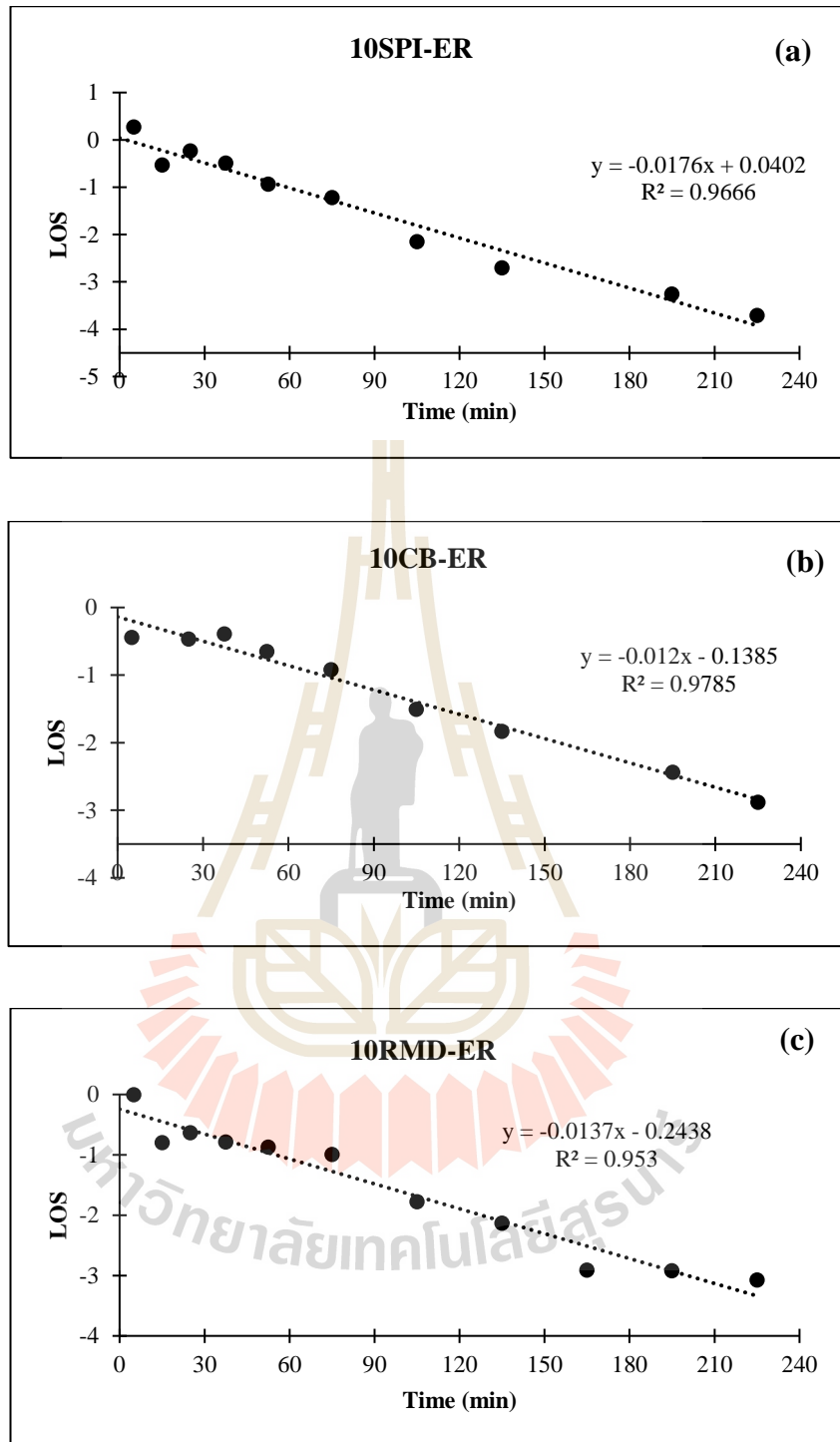
ภาพที่ 4.10 LOS plot การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุก

ตารางที่ 4.3 *In-vitro* digestion parameters และค่า eGI ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก (control), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% (10SPI-ER) และ 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% (10CB-ER) และ 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% (10RMD-ER) และ 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

Sample	$k(\times 10^{-3})$	C_{∞}	eGI
Control	9.10±0.64 c	75.08±4.27 a	86.24±5.62 a
10SPI-ER	15.00±2.29 ab	60.85±1.60 b	63.13±2.29 c
10CB-ER	11.40±2.60 bc	70.40±3.55 a	66.98±1.36 bc
10RMD-ER	12.20±0.84 bc	60.09±1.50 b	69.66±1.15 b
20RMD-ER	11.50±0.56 bc	58.68±0.48 b	67.99±3.08 bc

Sample	$k_1(\times 10^{-3})$	$k_2(\times 10^{-3})$	$C_{\infty 2}$	eGI
20SPI-ER	22.90±2.02 a	10.00±2.48 c	47.64±0.76 c	55.72±1.36 d
20CB-ER	3.40±0.66 b	18.50±3.19 a	72.22±3.17 a	63.32±2.29 c

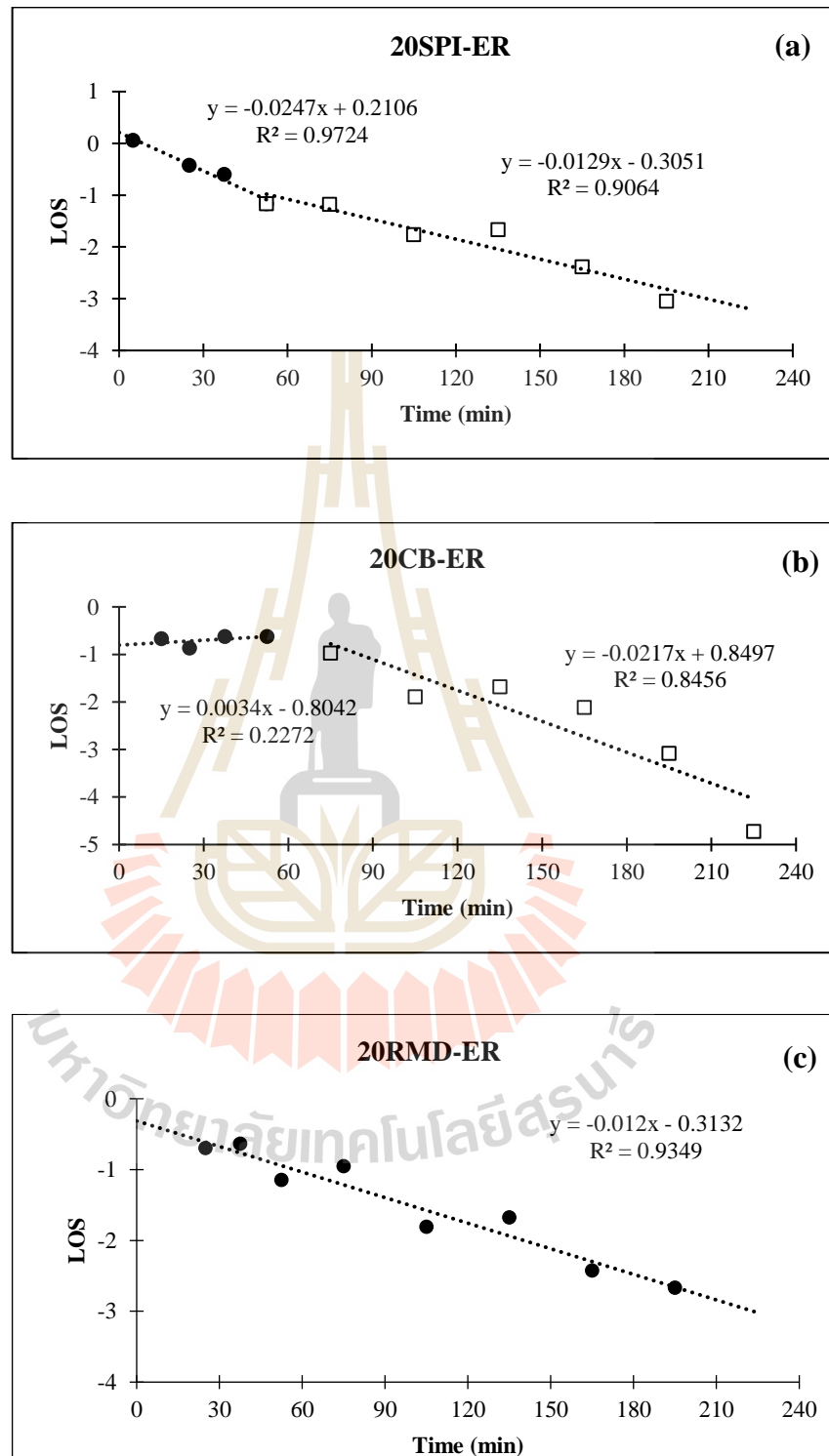
อักษรที่แตกต่างกันตามแนวตั้ง หมายถึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 4.11 LOS plot การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (10SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% ราข้าวโพด (10CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% resistant maltodextrin (10RMD-ER)

ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (10SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% รำข้าวโพด (10CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 10% resistant maltodextrin (10RMD-ER) แสดงลักษณะ digestion curve แบบ single-phase pseudo-first order ดังภาพที่ 4.11 และการเสริมใยอาหารทั้ง 2 ชนิดที่ระดับ 10% ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราการย่อย (k) ของข้าวขึ้นรูปอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า C_{∞} ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 10CB-ER สูงกว่าข้าวขึ้นรูปหุงสุก 10SPI-ER และ 10RMD-ER อย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.3) ซึ่งอาจเป็นผลมาจากอนุภาคขนาดใหญ่ของรำข้าวโพดจึงเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับเจลสตาร์ชในการดูดซับเอนไซม์ส่งผลให้สตาร์ชถูกย่อยได้มากขึ้นและมีค่า C_{∞} สูง นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวขึ้นรูปหุงสุก 10SPI-ER มีค่า GI ต่ำกว่า control และ 10RMD-ER โดยข้าวขึ้นรูปหุงสุก 10SPI-ER อาจมีค่าความแข็งและค่าความเหนียวที่สูงกว่าจึงถูกย่อยได้น้อยกว่า

เมื่อระดับการทดแทนเพิ่มเป็น 20% พบว่า ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER) และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER) แสดงลักษณะ digestion curve แบบ two-phase pseudo-first order kinetic ดังภาพที่ 4.12 (a) และ 4.12(b) โดยข้าวหุงสุก 20SPI-ER มีอัตราการย่อยในช่วงแรกเร็วซึ่งบ่งบอกว่าความสมบูรณ์แข็งแรง (integrity) ของเจลข้าวหุงสุกลดลงเนื่องจากการย่อยในกระเพาะอาหาร แต่เนื่องจากข้าวหุงสุก 20SPI-ER มีค่าความแข็งและค่าความเหนียวสูงจึงสามารถช่วยลดความสามารถในการซึมผ่านของเอนไซม์เข้าไปภายในเจลแป้งที่เหลืออยู่ จึงมีผลทำให้อัตราการย่อยในช่วงที่ 2 (k_2) ต่ำกว่าในช่วงแรก (k_1) และยังส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้ายของช่วงที่ 2 ($C_{\infty 2}$) และค่า eGI ต่ำกว่า control ในขณะที่ข้าวหุงสุก 20CB-ER มีค่า k_1 เนื่องจากในช่วงแรกเจลข้าวหุงสุกยังมีความสมบูรณ์แข็งแรงสูงและข้าวหุงสุก 20CB-ER มีค่าความแข็งและค่าความเหนียวสูงเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้ enzyme accessibility ต่ำลงและอัตราการถูกย่อยลดลง แต่เมื่อถูกย่อยไปเป็นเวลาหนึ่งชั่วโมงพบว่าความสมบูรณ์แข็งแรงของเจลข้าวหุงสุก 20CB-ER ลดลงในระหว่างการย่อยจึงทำให้ enzyme accessibility เพิ่มขึ้นและส่งผลให้ k_2 มีค่าสูง นอกจากนี้ยังพบว่าค่า eGI ของข้าวหุงสุก 20CB-ER มีค่าสูงกว่าข้าวหุงสุก 20SPI-ER โดยหลายงานวิจัยก่อนหน้านี้รายงานว่า ใยอาหารสามารถลดความสมบูรณ์แข็งแรงของโครงข่ายเจลได้ (Li et al., 2018; Tudorică, Kuri and Brennan, 2002) Tudorică et al. (2002) รายงานว่าการลดลงของค่าความแน่นเนื้อ (firmness) ในเส้นพาสต้าอาจเป็นผลมาจากการเสริมใยอาหารสามารถขัดขวางโครงข่ายของโปรตีนและสตาร์ชของเส้นพาสต้า และมีงานวิจัยที่พบว่าใยอาหารจากรำข้าวมีผลทำลายความสมบูรณ์แข็งแรงของโครงข่ายเจลสตาร์ชของพาสต้าจากแป้งข้าว (Li et al., 2018) นอกจากนี้พบว่าค่า C_{∞} ของข้าวหุงสุก 10CB-ER และ $C_{\infty 2}$ ของข้าวหุงสุก 20CB-ER ไม่แตกต่างจากค่า C_{∞} ของข้าวหุงสุก control อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งบ่งบอกว่าเมื่ออนุภาคของรำข้าวโพดหลุดออกไประหว่างกระบวนการย่อยแล้วนั้นความสมบูรณ์แข็งแรงของข้าวหุงสุกเสริมรำข้าวโพดไม่แตกต่างจากข้าวหุงสุก control



ภาพที่ 4.12 LOS plot การย่อยของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% โปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลท (20SPI-ER), ข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% รำข้าวโพด (20CB-ER), และข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริมด้วย 20% resistant maltodextrin (20RMD-ER)

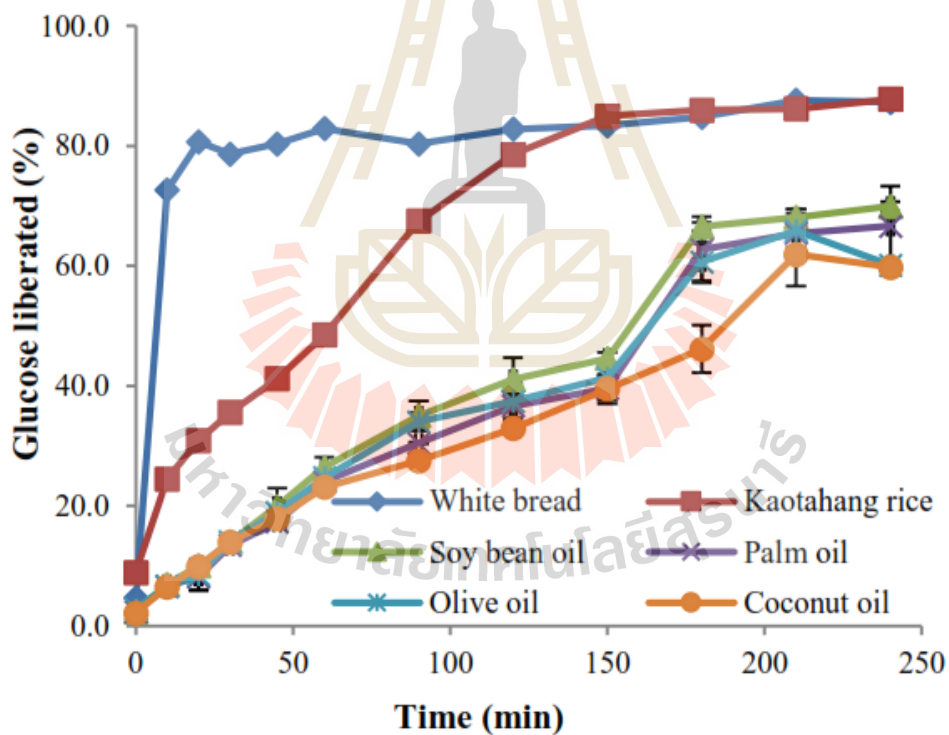
ในขณะที่ข้าวหุงสุก 20RMD-ER แสดงลักษณะ digestion curve เหมือนกับข้าวหุงสุก 10RMD-ER และ control คือ single-phase pseudo-first order kinetic ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีลักษณะเจลในระหว่างการย่อยแบบ homogeneous เหมือนกันและค่า G' ของข้าวขึ้นรูปที่เสริม RMD หุงสุกไม่แตกต่างจากข้าวหุงสุก control นอกจากนี้ยังพบว่าระดับการเสริมใยอาหารทั้งสองชนิดไม่มีผลต่อค่าความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้ายและไม่มีผลต่อค่า eGI อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตามการเสริม SPI และใยอาหารมีผลทำให้ข้าวขึ้นรูปหุงสุกมีค่า eGI อยู่ในช่วงปานกลาง (medium GI)

4.2.2 ผลของกรดไขมันต่อการย่อยของข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน

ศึกษาผลของกรดไขมันจากน้ำมันพืช 4 ชนิด ได้แก่ น้ำมันมะพร้าว (lauric acid, C12), น้ำมันปาล์ม (palmitic acid, C16), น้ำมันมะกอก (oleic acid, C18:1) และน้ำมันถั่วเหลือง (linoleic acid, C18:2) ต่อค่า eGI และปริมาณ starch fraction ได้แก่ สตาร์ชที่ถูกย่อยได้เร็ว (rapidly digestible starch, RDS), สตาร์ชที่ถูกย่อยได้ช้า (slowly digestible starch, SDS) และสตาร์ชทนย่อย (resistant starch, RS) ของข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมัน พบว่า ข้าวหุงสุก (control) มีปริมาณกลูโคสที่ถูกย่อย (% glucose liberated) สูงกว่าข้าวหุงสุกผสมน้ำมันดังภาพที่ 4.13 จึงแสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำมันในข้าวหุงสุกสามารถช่วยลดปริมาณกลูโคสที่ถูกย่อยได้ โดยค่า eGI ของข้าวหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าวมีค่าต่ำกว่า control ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ RS ที่มีค่าสูงกว่า control ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เนื่องจาก lauric acid ในน้ำมันมะพร้าวเป็นกรดไขมันสายสั้นจึงสามารถเกิด amylose-lipids complex (ALC) ได้ดีกว่ากรดไขมันชนิดอื่นๆ โดย ALC ที่เกิดขึ้นสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้กับส่วนผลึกของสตาร์ชและช่วยเพิ่มความสามารถในการทนต่อการย่อยของเอนไซม์ได้ (Crowe, Seligman and Copeland, 2000; Tufvesson, Skrabanja, Björck, Elmståhl and Eliasson, 2001) จึงมีผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้นและลดค่า eGI อัตราการถูกย่อยที่ช้าลงของ ALC จะสัมพันธ์กับระดับการเกิด complex กับสายโซ่เกลียวคู่ และถ้า complex ที่เกิดขึ้นมีความเป็นผลึกที่แข็งแรงจะส่งผลให้ทนต่อการย่อยได้ดี (Seneviratne and Biliaderis, 1991) ในขณะที่น้ำมันพืชชนิดอื่นที่มีกรดไขมันสายยาวกว่า lauric acid จึงสามารถเกิด ALC ได้น้อยกว่าส่งผลให้มีปริมาณ RS น้อยกว่าข้าวหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าวและมีค่า eGI สูงกว่าข้าวหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าว Kaur et al. (2000) ศึกษาผลของกรดไขมัน 3 ชนิด ได้แก่ myristic acid (C14:0), palmitic acid (C16:0) และ stearic acid (C18:0) ต่อการเกิด ALC ในแป้งข้าวหุงสุก พบว่า myristic acid ซึ่งเป็นกรดไขมันที่มีสายสั้นที่สุดสามารถเกิด ALC ได้มากที่สุดและ stearic acid เกิด ALC ได้น้อยที่สุด โดยข้าวหุงสุกผสมน้ำมันมีค่า eGI อยู่ในกลุ่มอาหาร GI ต่ำ (low GI)

ตารางที่ 4.4 ปริมาณ starch fraction และค่า eGI ของข้าวขาวตาแห้งหุงสุก (control), ข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันมะกอก และน้ำมันถั่วเหลือง

Sample	Starch fraction (%)			eGI
	RDS	SDS	RS	
Tahang white rice (control)	19.8	42.9	37.3	82.9±0.0
Tahang white rice + soybean oil	6.8	28	65.2	51.1±1.8
Tahang white rice + palm oil	5.5	25.6	69.2	47.1±2.8
Tahang white rice + olive oil	5.0	26	69.0	47.5±0.5
Tahang white rice + coconut oil	6.8	20.7	72.3	42.4±1.8



ภาพที่ 4.13 Digestion profiles ของขนมปังขาว (reference food) ข้าวขาวตาแห้งหุงสุก (control), และข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าว, น้ำมันปาล์ม, น้ำมันมะกอก และน้ำมันถั่วเหลือง

4.2.3 ผลของการแช่แข็งและทำละลายต่อการย่อยของข้าวหุงสุกผสมน้ำมัน

เมื่อข้าวหุงสุก (control) ผ่านการแช่แข็งและทำละลายแล้วพบว่าค่า eGI ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 4.5) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวหุงสุกที่ไม่ผ่านการแช่แข็งและทำละลาย (ตารางที่ 4.4) เนื่องจากหลังการทำละลายแล้วนั้นสายอะมิโลสในข้าวหุงสุกที่ไม่ผสมน้ำมันสามารถกลับมาจัดเรียงตัวใหม่เป็นสายโซ่เกลียวคู่ได้ ซึ่งโครงสร้างของสายโซ่เกลียวคู่นี้สามารถทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์จึงมีผลให้ค่า eGI ของ control ลดลง โดยผลที่ได้เหมือนกับการศึกษาของ Frei et al. (2003) ซึ่งรายงานว่าค่า eGI ของข้าวหุงสุกที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C นาน 24 ชั่วโมงมีค่าต่ำกว่าข้าวหุงสุก ในขณะที่ค่า eGI ของข้าวหุงสุกที่ผสมน้ำมันปาล์มเมื่อผ่านการแช่แข็งและทำละลายแล้วทำให้ ค่า eGI ลดลงเพียงเล็กน้อยประมาณ 3.6-4.6% (ตารางที่ 4.5) อาจเป็นผลมาจากน้ำมันที่ขัดขวางการจัดเรียงโครงสร้างผลึกใหม่ โดย ALC ที่เกิดขึ้นก่อนการแช่แข็งส่งผลให้ค่า eGI ของข้าวหุงสุกผสมน้ำมันปาล์มมีค่าต่ำกว่า control นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวหุงสุกผ่านการแช่แข็งและทำละลายด้วยวิธีไมโครเวฟเปรียบเทียบกับวิธีอุ่นในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 37°C มีค่า eGI ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.5 ค่า eGI ของข้าวขาวตาแห้งหุงสุก (control) และข้าวขาวตาแห้งหุงสุกผสมน้ำมันปาล์ม ที่ผ่านการแช่แข็งและทำละลายด้วยวิธีไมโครเวฟและวิธีอุ่นในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 37°C

Sample	eGI	
	Microwave cooking	Water bath at 37°C
Tahang white rice (control)	55.5	58.0
Tahang white rice + palm oil	43.5	42.5

บทที่ 5

ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

การเสริมโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) ลงในข้าวขึ้นรูปสามารถชะลอการเกิดเจลาติไนเซชันของสตาร์ช และทำให้ค่าความแข็ง, ค่าความเหนียว และค่า G' ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20SPI-ER เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อการลดลงของความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้าย แต่ความสมบูรณ์แข็งแรงของข้าวขึ้นรูปหุงสุกที่เสริม SPI จะลดลงในขั้นตอนการย่อยที่กระเพาะอาหารจึงทำให้อัตราการย่อยสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม SPI ยังสามารถที่จะลดปริมาณกลูโคสที่ถูกย่อยออกมาของข้าวขึ้นรูปได้ ในขณะที่การเสริมรำข้าวโพดในข้าวขึ้นรูปมีผลทำให้สตาร์ชเกิดเจลาติไนเซชันได้เร็วขึ้นเนื่องจากอนุภาคของรำข้าวโพดมีผลในการเพิ่มพื้นที่ผิวการดูดซับน้ำของเม็ดแป้ง และค่าความแข็ง, ค่าความเหนียว และค่า G' ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20CB-ER ที่มีค่าสูงจึงส่งผลให้มีความสมบูรณ์แข็งแรงของข้าวขึ้นรูปหุงสุกสูงในช่วง first-phase digestion และช่วยลดความสามารถในการซึมผ่านของเอนไซม์เข้าไปภายในเจลแป้ง แต่ความสมบูรณ์แข็งแรงของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20CB-ER จะลดลงในระหว่างกระบวนการย่อยมีผลทำให้อัตราการย่อยสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้นในช่วง second-phase digestion การเสริม resistant maltodextrin (RMD) ในข้าวขึ้นรูปมีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้งและการลดลงของค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายของ 20RMD-ER ซึ่งทำให้ค่าความแข็ง, ค่าความเหนียว และค่า G' ของข้าวขึ้นรูปหุงสุก 20RMD-ER เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ข้าวขึ้นรูปเสริม RMD หุงสุกมีลักษณะ homogeneous matrix จึงทำให้ digestion profile เป็นแบบ single-phase pseudo-first order kinetic

ดังนั้นการเสริม SPI และใยอาหารลงในข้าวขึ้นรูปจึงมีผลทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้ายลดลงและทำให้ข้าวขึ้นรูปอยู่ในกลุ่ม GI ปานกลาง โดยข้าวขึ้นรูปที่เสริมโปรตีนหุงสุกสามารถเพิ่มความสมบูรณ์แข็งแรงของข้าวขึ้นรูปหุงสุกและทำให้ความเข้มข้นของกลูโคสที่จุดสุดท้ายต่ำกว่าข้าวขึ้นรูปที่เสริมใยอาหารหุงสุก นอกจากนี้ยังพบว่าข้าวหุงสุกผสมน้ำมันพืชมีผลในการลดค่า eGI ทำให้อยู่ในกลุ่ม GI ต่ำ โดยข้าวหุงสุกผสมน้ำมันมะพร้าวสามารถเกิด amylose lipid complex ได้ดีจึงมีปริมาณ RS สูงจึงมีค่า GI ต่ำกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ การแช่แข็งและทำละลายของข้าวหุงสุกมีผลทำให้ค่า eGI ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเปรียบเทียบวิธีการทำละลายด้วยวิธีไมโครเวฟกับวิธีอุ่นในอ่างน้ำที่อุณหภูมิ 37°C พบว่ามีค่า eGI ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

บรรณานุกรม

- Acquistucci, R., Bucci, R., Magri, A. D. and Magri, A. L. (1997). Thermal analysis of food carbohydrates by determination of starch gelatinization phenomena. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**, 357(1): 97-100.
- Ai, Y., Hasjim, J. and Jane, J.-l. (2013). Effects of lipids on enzymatic hydrolysis and physical properties of starch. **Carbohydrate Polymers**, 92(1): 120-127.
- Åkerberg, A., Liljeberg, H. and Björck, I. (1998). Effects of Amylose/Amylopectin Ratio and Baking Conditions on Resistant Starch Formation and Glycaemic Indices. **Journal of Cereal Science**, 28(1): 71-80.
- Amano, Y., Sugiyama, M., Lee, J. S., Kawakubo, K., Mori, K., Tang, A. C. and Akabayashi, A. (2007). Glycemic Index-Based Nutritional Education Improves Blood Glucose Control in Japanese Adults: A randomized controlled trial. **Diabetes Care**, 30(7): 1874-1876.
- Anderson, R. A., Conway, H. F. and Peplinski, A. J. (1970). Gelatinization of Corn Grits by Roll Cooking, Extrusion Cooking and Steaming. **Starch/Stärke**, 22(4): 130-135.
- Barron, C., Buleon, A., Colonna, P. and Della Valle, G. (2000). Structural modifications of low hydrated pea starch subjected to high thermomechanical processing. **Carbohydrate Polymers**, 43(2): 171-181.
- Butterworth, P. J., Warren, F. J., Grassby, T., Patel, H. and Ellis, P. R. (2012). Analysis of starch amylolysis using plots for first-order kinetics. **Carbohydrate Polymers**, 87(3): 2189-2197.

- Cooke, D. and Gidley, M. J. (1992). Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. **Carbohydrate Research**, 227(0): 103-112.
- Crowe, T. C., Seligman, S. A. and Copeland, L. (2000). Inhibition of Enzymic Digestion of Amylose by Free Fatty Acids In Vitro Contributes to Resistant Starch Formation. **The Journal of Nutrition**, 130(8): 2006-2008.
- Doner, L. W. and Hicks, K. B. (1997). Isolation of Hemicellulose from Corn Fiber by Alkaline Hydrogen Peroxide Extraction. **Cereal Chemistry**, 74(2): 176-181.
- Edwards, C. H., Warren, F. J., Milligan, P. J., Butterworth, P. J. and Ellis, P. R. (2014). A novel method for classifying starch digestion by modelling the amylolysis of plant foods using first-order enzyme kinetic principles. **Food and Function**, 5(11): 2751-2758.
- Frei, M., Siddhuraju, P. and Becker, K. (2003). Studies on the in vitro starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines. **Food Chemistry**, 83(3): 395-402.
- Gannon, M. C., Nuttall, F. Q., Neil, B. J. and Westphal, S. A. (1988). The insulin and glucose responses to meals of glucose plus various proteins in type II diabetic subjects. **Metabolism**, 37(11): 1081-1088.
- Gannon, M. C., Nuttall, F. Q., Saeed, A., Jordan, K. and Hoover, H. (2003). An increase in dietary protein improves the blood glucose response in persons with type 2 diabetes. **The American Journal Of Clinical Nutrition**, 78(4): 734-741.
- Godet, M. C., Buléon, A., Tran, V. and Colonna, P. (1993). Structural features of fatty acid-amylose complexes. **Carbohydrate Polymers**, 21(2-3): 91-95.

- Hu, P., Zhao, H., Duan, Z., Linlin, Z. and Wu, D. (2004). Starch digestibility and the estimated glycemic score of different types of rice differing in amylose contents. **Journal of Cereal Science**, 40(3): 231-237.
- Kato, N. and Iwami, K. (2002). Resistant Protein; Its Existence and Function Beneficial to Health. **Journal of Nutritional Science and Vitaminology**, 48(1): 1-5.
- Kaur, K. and Singh, N. (2000). Amylose-lipid complex formation during cooking of rice flour. **Food Chemistry**, 71(4): 511-517.
- Kiszonas, A. M., Fuerst, E. P. and Morris, C. F. (2013). Wheat Arabinoxylan Structure Provides Insight into Function. **Cereal Chemistry**, 90(4): 387-395.
- Kizil, R., Irudayaraj, J. and Seetharaman, K. (2002). Characterization of Irradiated Starches by Using FT-Raman and FTIR Spectroscopy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 50(14): 3912-3918.
- Lebail, P., Buleon, A., Shifan, D. and Marchessault, R. H. (2000). Mobility of lipid in complexes of amylose-fatty acids by deuterium and ¹³C solid state NMR. **Carbohydrate Polymers**, 43(4): 317-326.
- Li, H., Prakash, S., Nicholson, T. M., Fitzgerald, M. A. and Gilbert, R. G. (2016). Instrumental measurement of cooked rice texture by dynamic rheological testing and its relation to the fine structure of rice starch. **Carbohydrate Polymers**, 146: 253-263.
- Li, J.-Y., Yeh, A.-I. and Fan, K.-L. (2007). Gelation characteristics and morphology of corn starch/soy protein concentrate composites during heating. **Journal of Food Engineering**, 78(4): 1240-1247.
- Li, W., Dobraszczyk, B. J., Dias, A. and Gil, A. M. (2006). Polymer conformation structure of wheat proteins and gluten subfractions revealed by ATR-FTIR. **Cereal Chemistry**, 83(4): 407-410.

- Li, W., Wei, D., Sumei, Z., Haifeng, Q., Hui, Z. and Xiguang, Q. (2018). Effect of rice bran fibre on the quality of rice pasta. **International Journal of Food Science and Technology**, 53(1): 81-87.
- Lu, Z.-H., Donner, E., Yada, R. Y. and Liu, Q. (2016). Physicochemical properties and in vitro starch digestibility of potato starch/protein blends. **Carbohydrate Polymers**, 154: 214-222.
- Mayachiew, P., Charunuch, C. and Devahastin, S. (2015). Physicochemical and Thermal Properties of Extruded Instant Functional Rice Porridge Powder as Affected by the Addition of Soybean or Mung Bean. **Journal of Food Science**, 80(12): E2782-2791.
- Miller, J. C. (1994). Importance of glycemic index in diabetes. **The American Journal Of Clinical Nutrition**, 59(3): 747S-752S.
- Mira, I., Persson, K. and Villwock, V. K. (2007). On the effect of surface active agents and their structure on the temperature-induced changes of normal and waxy wheat starch in aqueous suspension. Part I. Pasting and calorimetric studies. **Carbohydrate Polymers**, 68(4): 665-678.
- Nayak, B., De J. Berrios, J. and Tang, J. (2014). Impact of food processing on the glycemic index (GI) of potato products. **Food Research International**, 56(0): 35-46.
- Ohkuma, K. and Wakabayashi, S. (2008). Fibersol-2: A Soluble, Non-Digestible, Starch-Derived Dietary Fibre. In B. V. McCleary & L. Prosky (Eds.), **Advanced Dietary Fibre Technology** (pp. 509-523): Blackwell Science Ltd.
- Qiu, C., Li, X., Ji, N., Qin, Y., Sun, Q. and Xiong, L. (2015). Rheological properties and microstructure characterization of normal and waxy corn starch dry heated with soy protein isolate. **Food Hydrocolloids**, 48(Supplement C): 1-7.

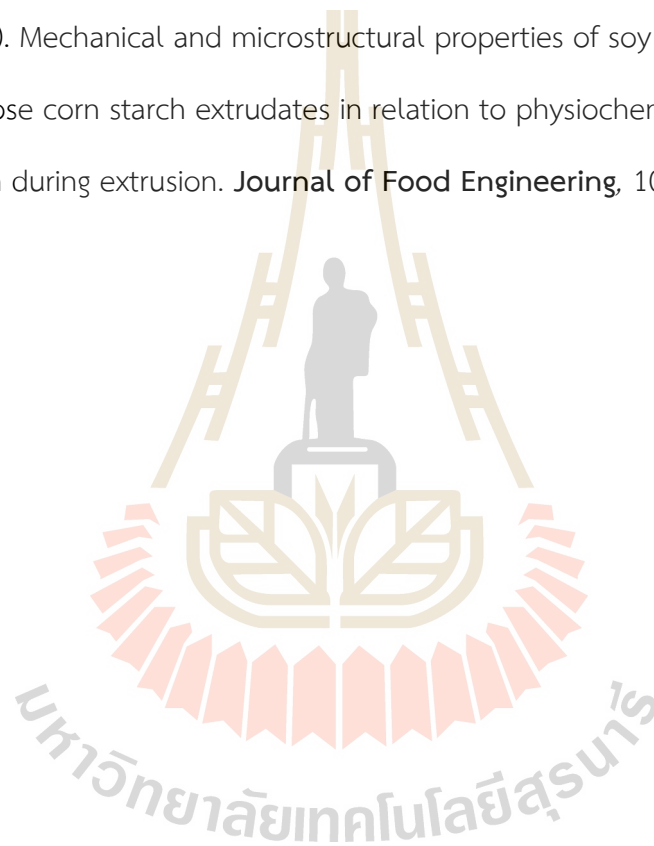
- Ramírez Ortiz, M. E., San Martín-Martínez, E. and Martínez Padilla, L. P. (2008). Rheological and Thermal Properties of Extruded Mixtures of Rice Starch and Isolated Soy Protein. **Starch/Stärke**, 60(10): 577-587.
- Reed, M. O., Ai, Y., Leutcher, J. L. and Jane, J.-l. (2013). Effects of Cooking Methods and Starch Structures on Starch Hydrolysis Rates of Rice. **Journal of Food Science**, 78(7): H1076-H1081.
- Remondetto, G., Añón, M. C. and González, R. J. (2001). Hydration Properties of Soybean Protein Isolates. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 44: 425-431.
- Ribotta, P. D., Colombo, A., León, A. E. and Añón, M. C. (2007). Effects of Soy Protein on Physical and Rheological Properties of Wheat Starch. **Starch/Stärke**, 59(12): 614-623.
- Sagum, R. and Arcot, J. (2000). Effect of domestic processing methods on the starch, non-starch polysaccharides and in vitro starch and protein digestibility of three varieties of rice with varying levels of amylose. **Food Chemistry**, 70(1): 107-111.
- Seneviratne, H. D. and Biliaderis, C. G. (1991). Action of α -amylases on amylose-lipid complex superstructures. **Journal of Cereal Science**, 13(2): 129-143.
- Srikaeo, K. and Sopade, P. A. (2010). Functional properties and starch digestibility of instant Jasmine rice porridges. **Carbohydrate Polymers**, 82(3): 952-957.
- Sun, Q., Wu, M., Bu, X. and Xiong, L. (2015). Effect of the Amount and Particle Size of Wheat Fiber on the Physicochemical Properties and Gel Morphology of Starches. **PLOS ONE**, 10(6): e0128665.

- Tian, Y., Zhan, J., Zhao, J., Xie, Z., Xu, X. and Jin, Z. (2013). Preparation of products rich in slowly digestible starch (SDS) from rice starch by a dual-retrogradation treatment. **Food Hydrocolloids**, 31(1): 1-4.
- Tudorică, C. M., Kuri, V. and Brennan, C. S. (2002). Nutritional and Physicochemical Characteristics of Dietary Fiber Enriched Pasta. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 50(2): 347-356.
- Tufvesson, F., Skrabanja, V., Björck, I., Elmståhl, H. L. and Eliasson, A.-C. (2001). Digestibility of Starch Systems Containing Amylose–Glycerol monopalmitin Complexes. **LWT - Food Science and Technology**, 34(3): 131-139.
- Tufvesson, F., Wahlgren, M. and Eliasson, A.-C. (2003). Formation of Amylose-Lipid Complexes and Effects of Temperature Treatment. Part 2. Fatty Acids. **Starch - Stärke**, 55(3-4): 138-149.
- van Soest, J. J. G., Tournois, H., de Wit, D. and Vliegthart, J. F. G. (1995). Short-range structure in (partially) crystalline potato starch determined with attenuated total reflectance Fourier-transform IR spectroscopy. **Carbohydrate Research**, 279(C): 201-214.
- von Bibra, H., Wulf, G., St John Sutton, M., Pfützner, A., Schuster, T. and Heilmeyer, P. (2014). Low-carbohydrate/high-protein diet improves diastolic cardiac function and the metabolic syndrome in overweight-obese patients with type 2 diabetes. **IJC Metabolic and Endocrine**, 2(0): 11-18.
- Yang, N., Liu, Y., Ashton, J., Gorczyca, E. and Kasapis, S. (2013). Phase behaviour and in vitro hydrolysis of wheat starch in mixture with whey protein. **Food Chemistry**, 137(1–4): 76-82.
- Yong, L. Z., Chan, C. H., Garcia, C. and Sopade, P. A. (2011). Weighing up whey fortification of foods: Implications for kinetics of starch digestion and

estimated glycemic index of model high-protein-low-carbohydrate food systems. **Carbohydrate Polymers**, 84(1): 162-172.

Yu, S., Jiang, L.-Z. and Kopparapu, N. K. (2015). Impact of Soybean Proteins Addition on Thermal and Retrogradation Properties of Nonwaxy Corn Starch. **Journal of Food Processing and Preservation**, 39(6): 710-718.

Zhu, L.-J., Shukri, R., de Mesa-Stonestreet, N. J., Alavi, S., Dogan, H. and Shi, Y.-C. (2010). Mechanical and microstructural properties of soy protein – high amylose corn starch extrudates in relation to physiochemical changes of starch during extrusion. **Journal of Food Engineering**, 100(2): 232-238.



ประวัติผู้วิจัย

นางสุนันทา ทองทา

นางสุนันทา ทองทา เกิดเมื่อวันที่ 27 ตุลาคม 2506 ณ จังหวัดนครราชสีมา ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วยศาสตราจารย์ สังกัดสาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วท.บ. (พัฒนาผลิตภัณฑ์) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2529 จบการศึกษาระดับปริญญาโท วท.ม. (วิทยาศาสตร์การอาหาร) จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปี พ.ศ. 2533 จากนั้นเข้ารับราชการบรรจุตำแหน่งอาจารย์ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในปีเดียวกัน ต่อมาในปี พ.ศ. 2536 ได้รับทุน Fulbright จากมูลนิธิการศึกษาไทย-อเมริกัน ไปศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก ที่ University Of Illinois at Urbana-Champaign สหรัฐอเมริกา และสำเร็จการศึกษาในปี พ.ศ. 2541

นางสุนันทา ทองทา ได้มีผลงานทางวิชาการดังต่อไปนี้

1. ผลงานตีพิมพ์

- Keeratiburana, T., Hansen, A. R., Soontaranon, S., Blennow, A. and **Tongta, S.** 2020. Pre-treatment of granular rice starch to enhance branching enzyme catalysis. *Carbohydrate Polymers*, 247: 116741. (IF 7.182)
- Sarifudin, A., Keeratiburana, T., Soontaranon, S., Tangsathikulchai, C. and **Tongta, S.** 2020. Pore characteristics and structural properties of ethanol-treated starch in relation to water absorption capacity. *LWT-Food Science and Technology*, 129: July 2020: 109555. (IF 3.714) <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109555>
- Sarifudin, A., Soontaranon, S., Peerapattana, J. and **Tongta, S.** 2020. Mechanical strength, structural and hydration properties of ethanol-treated starch tablets and their impact on the release of active ingredients. *Journal of Biological Macromolecules*, 149:541-551. (IF 4.784)
- Keeratiburana, T., Hansen, A. R., Soontaranon, S., **Tongta, S.** and Blennow, A. 2020. Porous rice starch produced by combined ultrasound-assisted ice recrystallization and enzymatic hydrolysis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 145:100-107. (IF 4.784)
- Keeratiburana, T., Hansen, A. R., Soontaranon, S., Blennow, A. and **Tongta, S.** 2020. Porous high amylose rice starch modified by amyloglucosidase and maltogenic α -amylase. *Carbohydrate Polymers*, 230: 15 February 2020: 115611. (IF 6.044)
- Promptiputtanapon, K., Sorndech, W. and **Tongta, S.** 2020. Surface Modification of Tapioca Starch by Using the Chemical and Enzymatic Method. *Starch/Stärke*, 72 (3-4): 1-6. doi: 10.1002/star.201900133. (IF 1.795)

- Na-Nakorn, K., Kulrattanak, T., Hamaker, B. R. and **Tongta, S.** 2019. Starch digestion kinetics of extruded reformed rice is changed in different ways with added protein or fiber. *Food & Function*, 10: 4577-4583. (IF 3.241)
- Sarifudin, A., Soontaranon, S., Rugmai, S. and **Tongta, S.** 2019. Structural transformations at different organizational levels of ethanol-treated starch during heating. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132:1131-1139. (IF 4.784)
- Sorndech, W., Rodtong, S., Blennow, A. and **Tongta, S.** 2019. Impact of resistant maltodextrins and resistant starch on human gut microbiota and organic acids production. *Starch/Stärke*, 71:1-8. doi: 10.1002/star.201800231. (IF 1.795)
- Boonna, S., Rolland-Sabatéb, A., Lourdin, D. and **Tongta, S.** 2019. Macromolecular characteristics and fine structure of amyloamylase-treated cassava starch. *Carbohydrate Polymers*, 204: 143-150. (IF 6.044)
- Waraporn, S., Na Nakorn, K., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2018. Isomalto-oligosaccharides: Recent insights in production technology and their use for food and medical applications. *LWT-Food Science and Technology*, 95:135-142. (IF 3.714)
- Boonna, S. and Tongta, S. 2018. Structural transformation of crystallized debranched cassava starch during dual hydrothermal treatment in relation to enzyme digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 191: 1-7. (IF 6.044)
- Yuwang, P., Sulaeva, I., Hell, J., Henniges, U., Böhmendorfer, S., Rosenau, T., Chitsomboon, B. and **Tongta, S.** 2018. Phenolic compounds and antioxidant properties of arabinoxylan hydrolysates from defatted rice bran. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98:140-146. (IF 2.422)
- Sorndech, W., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2018. Slowly digestible- and non-Digestible α -glucans: An enzymatic approach to starch modification and nutritional effects. *Starch/Stärke*, 70 (9-10): 1-11.
- Sorndech, W., Sagnelli, D., Blennow, A., and **Tongta, S.** 2017. Combination of amylase and transferase catalysis to improve IMO compositions and productivity. *LWT-Food Science and Technology*, 79:479-486. (IF 3.714)
- Sorndech, W., Sagnelli, D., Meier, S., Jansson, A.M., Lee, B-H., Hamaker, B.R., Rolland-Sabatéb, A., Hebelstruph, K.H., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2016. Structure of branching enzyme- and amyloamylase modified starch produced from well-defined amylose to amylopectin substrates. *Carbohydrate Polymers*, 152: 51-61. (IF 6.044)

- Kiatponglarpa, W., Rugmai, S., Rolland-Sabatéb, A., Buléon, A., and **Tongta, S.** 2016. Spherulitic self-assembly of debranched starch from aqueous solution and its effect on enzyme digestibility. *Food Hydrocolloids*, 55:235-243. (IF 5.839)
- Somdech, W., Meier, S., Jansson, A. M., Sagnelli, D., Hindsgaul, O., **Tongta, S.**, and Blennow, A. 2015. Synergistic Amylomaltase and Branching Enzyme Catalysis to Suppress Cassava Starch Digestibility. *Carbohydrate Polymers*, 132:409-418. (IF 6.044)
- Prompiputtanapon, K. and **Tongta, S.** 2015. Modification of tapioca starch granule surfaces on soluble fiber formation. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*. 1(1): 116-121.
- Tananchai, C., **Tongta, S.** and Rodtong, S. 2015. Evaluation of different resistant starch types for stimulating growth of the dominant lactic acid bacteria inhabiting human colon. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*. 1(1): 197-200.
- Kiatponglarp, W., **Tongta, S.**, Rolland-Sabatéb, A., and Buléon, A. 2015. Crystallization and chain reorganization of debranched rice starches in relation to resistant starch formation. *Carbohydrate Polymers*. 122:108-144. (IF 6.044)
- Chaisiricharoenkul, J., **Tongta S.** and Intarapichet, K. 2011. Structure and chemical and physicochemical properties of Job's tear (*Coix lacryma-jobi* L.) kernels and flours. *Suranaree J. Sci. Technol.* 18(2):109-122.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. 2010. Effect of dehydration methods on digested starch fractions of retrograded debranched rice starch. *Suranaree J. Sci. Technol.* 17(4):359-368.
- Apirattananusorn, S., **Tongta, S.**, Cui, S.W., and Wang, Q. 2008. Chemical, molecular, and structural characterization of alkali extractable polysaccharides from Job's Tears. *J. Agric. Food. Chem.* 56:8549-8557. (IF 3.571)
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2008. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. *Asian Journal of Food and Agro-Industry*, 1(02):97-104.
- Phoungchandand, S., Bhulaidok, S., Nantachai, K., Woraphuttaporn, W., **Tongta, S.** and Suvannason, V. 2007. Influence of various cereal flours on physical properties of expanded extrudates. *Khon Kaen University Research Journal*. 12(4):431-441.
- Kiatponglarp, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and Physical Properties of Debranched Tapioca Starch. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 14(2):195-204.

Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2007. Effect of full fat soy flour on characteristics of soy protein meat analog. *Suranaree Journal of Science and Technology*, 14(2):185-193.

Pakdeechanuan, P., Intarapichet, K. and **Tongta, S.** 2007. Effect of extrusion parameters on conjugated linoleic acids of corn extrudate. *J. Agric. Food. Chem.*, 55: 1463-1468. (IF 3.571)

Tongta, S., Kiatpongarp, W. and K. Sriroth, K. 2004. Effect of aging temperature on retrogradation of concentrated cassava starch gel. In 'Starch: Progress in Structural studies, Modifications and Applications' Tomasik, P., Yuryev, V.P. and Bertoft, E. (eds.). pp. 357-364. Drukarnia GS, Cracow.

Sottirattanapan, P. and **Tongta, S.** 2003. Effect of extrusion parameters on physical characteristics of rice extrudate. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 10(3):220-229.

Nantachai, K. Srijesdaruk, V., **Wiriyaiprom, S.** and Tungwongchai, R. 1997. Sensory perceptions of sugarcane juices. *Khon Kaen University Research Journal*. 2(1):10-17.

2. ทรัพย์สินทางปัญญา

1. อนุสิทธิบัตร ชื่อ กระบวนการผลิตแป้งที่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำและทนต่อสภาวะการหุงต้มและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกรรมวิธีดังกล่าว เลขที่คำขอ 15033001693 ยื่นจดปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทย

2. อนุสิทธิบัตร ชื่อ กระบวนการผลิตแป้งด้านทานชนิด 4 เลขที่อนุสิทธิบัตร 1303006876 วันออกอนุสิทธิบัตร 20 มกราคม 2559 ยื่นจดปี พ.ศ. 2558 ประเทศไทย

3. อนุสิทธิบัตร ชื่อ กระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ชนิด 3 เลขที่อนุสิทธิบัตร 1303000062 วันออกอนุสิทธิบัตร 3 สิงหาคม 2558 ยื่นจดปี พ.ศ. 2556 ประเทศไทย

3. การประชุมระดับนานาชาติ

Sarifudin, A., Soontaranon, S., Rugmai, S., & **Tongta, S.** 2019. Alterations on the structural and morphological properties of ethanol-treated starch before and after hydration. The 21st Food Innovation ASIA Conference. June 13-15, 2019. Bangkok, Thailand.

Sarifudin, A., Soontaranon, S., Rugmai, S., & **Tongta, S.** 2018. Effect of storage humidity on the structural, morphological properties and water adsorption capacity of ethanol-treated starch. The 4th International Symposium on Applied Chemistry (ISAC) 2018. November 1-2, 2018. Bumi Serpong Damai (BSD) City, Tangerang, Indonesia.

- Boonna, S., Rolland-Sabaté, A., Lourdin, D. and **Tongta, S.** 2018. Crystallization of debranched amylomaltase-treated cassava starches in relation to thermal stability and enzyme digestibility. Starch Round Table EU (SRTEU) 2018. October 18-19, 2018. Norwich, United Kingdom.
- Boonna, S., Rolland-Sabaté, A., Lourdin, D. and **Tongta, S.** 2018. Macromolecular characteristics and fine structure of amylomaltase-treated cassava starch. 2018 AACC International's Annual Meeting (Cereals & Grains 18). October 21-23, 2018. London, United Kingdom.
- Nontamas, P. and **Tongta, S.** 2017. Effect of conditioning time and starch granule surface modification on starch citrate formation. Starch Update 2017: The 9th International Conference on Starch Technology. February 27-28, 2017. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S., Lourdin, D and Tongta, S. Enzymatic Modification and Hydrothermal Treatments on Starch Digestibility of Cassava Starch. EU-Starch Round Table 2016. November 17-18, 2016. Lille, France.
- W. Sorndech, D. Sagnelli, S. Meier, A. M. Jansson, B. H. Lee, B. R. Hamaker, A. Rolland-Sabaté, K. H. Hebelstrup, **S. Tongta** and A. Blennow. 2016. Effect of Amylose Content on Branching Enzyme and Amylomaltase Chain Transfer. 2016 IFT Annual Meeting, July 17-19, 2016. Chicago, USA.
- Nontamas, P. and **Tongta, S.** 2015. Resistant starch and properties of the native and cross-linked starch exposed to electron beam irradiation. In Proceeding of Starch Update 2015: The 8th International Conference on Starch Technology, p.147-151. December 3-4, 2015. Bangkok, Thailand.
- Sorndech, W., Meier, S., Hebelstrup, K. H., **Tongta, S.** & Blennow, A. 2015. Effect of amylose content on amylomaltase and branching enzyme catalysis to produce soluble indigested α -glucan fraction. In Proceeding of Starch Update 2015: The 8th International Conference on Starch Technology, p.71-76. December 3-4, 2015. Bangkok, Thailand.
- Sorndech, W., Meier, S., Hebelstrup, K. H., Tongta, S. & Blennow, A. (2015). Correlation between starch modified by enzymes and soluble-, slowly- and indigested α -glucan formation. The 41st Congress on Science and Technology of Thailand, November 6-8, 2015, Nakhon Ratchasima, Thailand.

- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2015. Improvement of resistant starch content and cooking stability of debranched cassava starch by hydrothermal treatment. AACC International Centennial Meeting. October 18-21, 2015. Minneapolis, Minnesota, U.S.A.
- Kiatpongarp, W., Rugmai, S., Buléon, A, and **Tongta, S.** 2015. Crystallization behaviour of debranched rice starches monitored by time-resolved synchrotron wide-angle X-ray scattering. AACC International Centennial Meeting. October 18-21, 2015. Minneapolis, Minnesota, U.S.A.
- Promptiputtanapon, K., and **Tongta, S.** 2014. Modification of tapioca starch granule surface on soluble fiber formation. The 2nd International Conference on Agricultural and Agro-Industry. November 20-21, 2014. Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.
- Tananchai, C., **Tongta, S.**, and Rodtong, S. 2014. Evaluation of different resistant starch types for stimulating growth of the dominant lactic acid bacteria inhabiting human colon. The 2nd International Conference on Agricultural and Agro-Industry. November 20-21, 2014. Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand.
- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.**, and Buleon, A. 2013. Resistant starch formation of rice from different varieties. The 5th ASIAHORCs Joint Symposium. November 26-28, 2013. Nusa Dua, Bali, Indonesia
- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.**, and Buleon, A. 2013. Formation of spherulites from debranched rice starches and their digestibility. In Proceeding of Starch Update 2013: The 7th International Conference on Starch Technology, p 182-187. November 21-22, 2012. Bangkok, Thailand.
- Jampatesh, S, and **Tongta, S.** 2013. Impacts of Heating Processes on Physical Properties of Resistant Citrate Rice Starch. In Proceeding of Starch Update 2013: The 7th International Conference on Starch Technology, p.219-226. November 21-22, 2012. Bangkok, Thailand.
- Thanompolkrung, T., Tongta, S. and Yongsawatdigul, J. Effect of sodium sulfite on pasting and textural properties of aged rice. AACC International Meeting, September 29-October 2, 2013. Albuquerque, New Mexico U.S.A.
- Kiatpongarp, W., **Tongta, S.** and Buléon, A. 2012. Crystallization behavior of debranched waxy rice starch in relation to enzyme digestibility, thermal

properties and microstructure. XIX International Starch Convention. September 18-20, 2012. Moscow, Russia.

Kiatpongarp, W., **Tongta, S.**, Rugmai, S., and Soontaranon, S. 2012. Preliminary study of starch granular structure using synchrotron radiation WAXS and SAXS techniques. AOFSTR 2012, the 6th Asia Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research. August, 8-12, 2012. Bangkok, Thailand

Yuwang, P. and **Tongta, S.** 2012. Enzymatic extraction of rice bran arabinoxylans and antioxidant property. Plant and Seaweed Polysaccharides workshop. July 17-20, 2012. Nantes, France.

Tongta, S. and Boonna, S. 2012. Effect of resistant rice starch supplementation on characteristics of rice noodle. Plant and Seaweed Polysaccharides workshop. July 17-20, 2012. Nantes, France.

Lapkhoksung, A. and **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. 2012. Effects of pullulanase and isoamylase and rice varieties on resistant starch type III formation. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 90-95. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.

Charoenporn, S. and **Tongta, S.** 2012. Physicochemical and rheological properties of extruded high amylose rice flour. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 244-249. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.

Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2012. Formation of resistant starch type II and type III with hydrolysis of alpha-amylase. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 340-345. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.

Tongta, S., Boonna, S., Kitiratanakornkul, C. and Nular, T. 2012. Dough and bread characteristics with supplementation of resistant rice starch. In Proceeding of Starch Update 2011: The 6th International Conference on Starch Technology, p 346-351. February 13-14, 2012. Bangkok, Thailand.

Tongta, S. and Boonna, S. 2011. Characteristics of rice-based extruded snack with resistant starch supplementation. Poster presentation in IFT Annual Meeting, June 11-14, 2011, New Orleans, LA USA.

- Tongta, S.** and Kiatpongarp, W. 2010. Effect of acid dextrinization and annealing on resistant starch type III formation. Oral presentation XVIII International Starch Convention. June 21-25, 2010. Cracow, Poland.
- Thanompolkrung, T., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2010. Conformational changes of rice proteins affecting on pasting and textural properties of rice. Poster presentation in Food Innovation Asia Conference 2010. June 17-18, 2010. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Chaisiricharoenkul, J. and **Tongta, S.** 2009. Effect of extrusion parameters on starch digestion and physicochemical properties of Job's Tear (*Coix lacryma jobi* L.) flour. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical properties of waxy and high amylose rice flour during storage. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2009. Comparative effect of different temperature cycling on resistant starch formation. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Boonna, S. 2009. Physical modification of rice flour by extrusion. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Tongta, S.** and Kiatpongarp, W. 2009. Impact of enzyme concentration and hydrolysis time on resistant starch formation. In Proceeding of Starch Update 2009: The 5th International Conference on Starch Technology. September 24-25, 2009. Bangkok, Thailand.
- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2009. Physicochemical and textural properties of high amylose rice during storage In Proceeding of Food Innovation Asia Conference 2009. June 18-19, 2009. BITEC, Bangkok, Thailand.
- Boonna, S., **Tongta, S.** and Piyachomkwan, K. 2009. Effect of aging condition on resistant starch formation of rice starch. Poster presentation in 2009 IFT Annual Meeting. June 6-9, 2009. Anaheim, CA, USA.

- Dalai, N. and **Tongta, S.** 2008. Comparative study on physical properties of waxy and non-waxy rice during storage. . In Proceeding of The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2008. Effect of starch content and aging temperature on slowly digestible starch and resistant starch formation in debranched rice starch. . In Proceeding of The 34th Congress on Science and Technology of Thailand. October 31-November 2, 2008. Bangkok, Thailand.
- Boonna, S. and **Tongta, S.** 2007. Effect of drum drying parameters on physical properties of pregelatinized rice flour. In Proceeding of Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2007. Structural and physical properties of enzyme-resistant starch produced from debranched and retrogradation of cassava starch. In Proceeding of Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of annealing on physicochemical properties of waxy and normal rice starches. In Proceeding of Starch Update 2007: The 4th International Conference on Starch Technology. November 6-7, 2007. Bangkok, Thailand.
- Chaisirichoenkul, J. and **Tongta, S.** 2007. Physicochemical and antioxidant properties of Job's Tear Flour. In Proceeding of The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul, J. 2007. Effect of soy protein isolate on chemical and physical characteristics of meat analog. In Proceeding of The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Siriboon, B. and **Tongta, S.** 2007. Effect of Annealing on Physicochemical Properties of Waxy Rice. In Proceeding of The 9th Agro-Industrial Conference, Food Innovation Asia 2007. June 14-15, 2007. Bangkok, Thailand.
- Apirattananusorn, S., Cui, S.W., Wang, Q. and **Tongta, S.** 2006. Extraction and composition of water-unextractable arabinoxylans from Job's tears (*Coix*

lacryma-jobi L.) (Abstract. pp. 238 and Poster presentation). 2006 CIFST/AAFC Joint Conference, May 28-30, 2006. Montreal, Canada.

Kiatpongarp, W. and **Tongta, S.** 2006. Effect of debranching on enzyme resistant starch formation in tapioca starch. In Proceeding of The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.

Tongta, S., Ningsanond, S. and Boonna, S. 2006. Influence of hydrocolloids and soy milk solid on physical and textural qualities of soy yoghurt. In Proceeding of The 8th Agro-Industrial Conference. June 15-16, 2006. Bangkok, Thailand.

Rareunrom, K., **Tongta, S.** and Yongsawatdigul. 2004. Structure and texture characteristic of soy protein meat analog. In Proceeding of The 6th Agro-Industrial Conference. May 28-29, 2004. Bangkok, Thailand.

Wiriyapirom, S., Wei, L.S. and Padua, G.W. 1996. Effect of soy protein isolates on physical characteristics of extruded expanded half-products. A presentation In Annual IFT Meeting. June 26, 1996. New Orleans, USA

Wiriyapirom, S., Padua, G.W. and Wei, L.S. 1996. Effect of extrusion parameters on physical properties of half-products fortified with soy protein. A presentation In Annual IFT Meeting. June 15, 1997. Orlando, USA

สถานที่ติดต่อ: สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร สำนักเทคโนโลยีการเกษตร
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 22-4266 โทรสาร (044) 22-4150