

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปราย

4.1 ผลศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่เหนียวน้ำและไม่ได้เหนียวน้ำด้วยความร้อน

ข้าวเจ้าเหลือง 11 เป็นข้าวที่ปลูกได้ในประเทศไทยและนิยมใช้ในการผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวอย่างแพร่หลาย ในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ได้จากการแยกสิ่งเจือปนและบดให้ละเอียดจากเมล็ด เปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ผ่านการเหนียวน้ำในสถานะที่มีน้ำด้วยความร้อนที่ 121 °ซ นาน 1 ชั่วโมง โดยไม่นำไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 60 °ซ ได้ผลแสดงดังตาราง 4.1

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ก่อนและหลังการเหนียวน้ำด้วยความร้อนไม่มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ไม่ได้รับการเหนียวน้ำด้วยความร้อนมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใย และปริมาณคาร์โบไฮเดรตทั้งหมดร้อยละ 11.88, 5.81, 0.93, 0.47, 0.38 และ 80.53 ตามลำดับ ส่วนแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ได้รับการเหนียวน้ำด้วยความร้อนมีปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า เส้นใย และปริมาณคาร์โบไฮเดรต เท่ากับร้อยละ 11.00, 5.51, 0.89, 0.58, 0.39 และ 81.63 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามแป้งทั้ง 2 ตัวอย่าง มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยพบว่าแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ได้รับการเหนียวน้ำมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยคิดเป็นร้อยละ 13.91 ซึ่งมากกว่าแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ไม่ได้รับการเหนียวน้ำที่มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพียงร้อยละ 2.67 ทั้งนี้การเหนียวน้ำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยขึ้น จะเกิดขึ้นเมื่อทำให้แป้งสุกเหนืออุณหภูมิที่ทำให้เกิดเจลลิตีโนเซชัน การเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งข้าวหลังการให้ความร้อนในหม้อหนึ่งความดันนี้สอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Siljestrom and Asp (1985) ซึ่งทำการทดลองในแป้งสาลี โดยมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยร้อยละ 9 หลังการให้ความร้อนในหม้อหนึ่งความดัน ในขณะที่แป้งสาลีที่ไม่ผ่านการทำให้สุก มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยน้อยกว่าร้อยละ 1

เมื่อพิจารณาปริมาณอะมิโลสของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่นำมาศึกษาพบว่า มีปริมาณร้อยละ 26.73 ซึ่งมีปริมาณมากกว่าร้อยละ 25 จึงจัดแป้งข้าวชนิดนี้ เป็นแป้งข้าวชนิดที่มีอะมิโลสสูง ผลการทดลองวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ในตารางที่ 4.1 มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Sureporn (2009) ที่รายงานปริมาณความชื้น โปรตีน และไขมันร้อยละ 9.47, 0.91 และ 0.36 ตามลำดับ

ตาราง 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ไม่ได้เหนียวนำด้วยความร้อนและได้เหนียวนำด้วยความร้อน

องค์ประกอบทางเคมี	แป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ไม่ได้เหนียวนำด้วยความร้อน(แป้งดิบ)	แป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ผ่านการเหนียวนำด้วยความร้อน
ความชื้น ^{ns}	11.88±0.95	11.00±0.81
โปรตีน ^{ns}	5.81±1.17	5.51±1.27
ไขมัน ^{ns}	0.93±0.05	0.89±0.08
เถ้า ^{ns}	0.47±0.00	0.58±0.09
เส้นใย ^{ns}	0.38±0.06	0.39±0.15
แป้งทนต่อการย่อย	2.67±1.29 ^b	13.91±0.16 ^a
คาร์โบไฮเดรตทั้งหมด ^{ns}	80.53±0.00	81.63±0.00
อะมิโลส	26.73±0.37	

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีอักษร^{a, b} ในแนวนอนเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่ามีความต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ns = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวนอนเดียวกันไม่มีความต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

4.2 ผลเปรียบเทียบชนิดของสารละลายที่ใช้เหนียวนำการเกิดแป้งที่ทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวอะมิโลสสูง

4.2.1 ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11

ในการผลิตแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวอะมิโลสสูง โดยใช้สารละลายที่แตกต่างกัน 10 ชนิดในระหว่างการให้ความร้อนขึ้น และนำไปผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยระยะเวลาการบ่มแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2

ผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ชนิดของสารละลายและระยะเวลาในการบ่มแตกต่างกันมีผลต่อการเกิดปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการใช้สารละลายกรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลที่ระยะเวลาการบ่ม 72 ชั่วโมง และการใช้สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลที่ระยะเวลาในการบ่ม 0 ชั่วโมง หรือไม่ได้บ่ม มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เกิดขึ้นน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 2.33 และ 2.11 ตามลำดับ ส่วนการใช้น้ำเป็นสารละลายและใช้ระยะเวลาในการบ่มคือ 0 ชั่วโมงหรือไม่ได้บ่ม มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เกิดขึ้นมากที่สุด คือ ร้อยละ 13.91 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Onyangko และคณะ (2006) ที่ศึกษาอิทธิพลของเวลาและอุณหภูมิในการบ่มหลังการให้ความร้อนด้วย

หม้อหนึ่งความดันต่อการเกิดแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพของการย่อยแป้งมันสำปะหลังด้วยสารละลายกรดชนิดต่างๆ โดยพบว่า ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.44 เป็น 9.68 หลังการให้ความร้อนในหม้อหนึ่งความดันในสถานะที่มีน้ำกลั่นเป็นตัวทำละลายและผ่านการต้มที่อุณหภูมิ 100°C เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง

ตาราง 4.2 ผลของสารละลายและระยะเวลาการบ่มต่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3

สารละลาย	ระยะเวลาการบ่ม (h)	แป้งทนต่อการย่อย (%)	% การเปลี่ยนแปลง
น้ำ	0	13.91±0.16 ^a	420.97
	24	7.07±1.23 ^{defg}	164.79
	48	9.53±1.25 ^b	256.93
	72	9.32±1.09 ^b	249.06
เอทานอล	0	8.79±0.94 ^{bc}	229.21
	24	6.08±1.73 ^{fghi}	127.72
	48	7.03±0.24 ^{defg}	163.30
	72	8.46±1.95 ^{bcd}	216.85
กรดแลคติก 10 mmol	0	8.11±0.78 ^{bcde}	203.75
	24	9.66±1.84 ^b	261.80
	48	6.51±0.19 ^{efghi}	143.82
	72	6.91±0.82 ^{defgh}	158.80
กรดแลคติก 10 mmol ใน เอทานอล	0	5.39±0.80 ^{ghi}	101.87
	24	9.34±0.26 ^b	249.81
	48	6.05±0.94 ^{fghi}	126.59
	72	2.33±0.49 ^j	-12.73
กรดแลคติก 20 mmol	0	8.14±1.77 ^{bcde}	204.87
	24	6.28±0.05 ^{fghi}	135.20
	48	6.14±0.17 ^{fghi}	129.96
	72	5.95±0.26 ^{fghi}	122.85
กรดแลคติก 20 mmol ใน เอทานอล	0	6.47±0.37 ^{efghi}	142.32
	24	6.18±0.21 ^{fghi}	131.46
	48	6.18±0.21 ^{fghi}	131.46
	72	5.87±1.02 ^{fghi}	119.85
กรดซิตริก 10 mmol	0	4.90±0.31 ⁱ	83.52
	24	5.60±0.07 ^{ghi}	109.74
	48	7.21±0.22 ^{bcde}	207.49
	72	6.77±0.16 ^{defgh}	153.56
กรดซิตริก 10 mmol ใน เอทานอล	0	2.11±0.75 ^j	-20.97
	24	6.07±0.06 ^{fghi}	127.34
	48	6.27±0.03 ^{fghi}	134.83
	72	7.47±0.16 ^{cdef}	179.78
กรดซิตริก 20 mmol	0	5.19±0.30 ^{hi}	94.38
	24	3.12±0.07 ⁱ	16.85
	48	4.81±0.03 ⁱ	80.15
	72	6.26±0.08 ^{fghi}	134.46
กรดซิตริก 20 mmol ใน เอทานอล	0	4.82±0.09 ⁱ	80.52
	24	5.73±0.10 ^{fghi}	114.61
	48	6.05±0.01 ^{fghi}	126.59
	72	5.95±0.09 ^{fghi}	122.85

ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีอักษร ^{a, b, c, ...} ในแนวตั้งเดียวกันแสดงว่ามีความต่างกันอย่างสถิติ ($p \leq 0.05$) ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเริ่มต้นในแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 มีค่าร้อยละ 2.67

การใช้น้ำเป็นสารละลายและใช้ระยะเวลาในการบ่ม 0 ชั่วโมงหรือไม่ได้บ่มนั้น ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ไม่ได้ทำการเหนียวนำด้วยความร้อนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงสูงถึง 420.97 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการเกิดแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 มาจากการเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ของโมเลกุลอะมิโลส (Eerlingen *et al.*, 1993) โดยรีโทรเกรเดชันจะเกิดขึ้นเมื่อแป้งหรือสตาร์ชได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลในเซชันและเมื่อให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง และเมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลรูปร่างเกลียวสุ่มของอะมิโลส (random coil) จะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนเกิดเป็นสายเกลียวคู่ (double helices) ซึ่งจะสามารถอุ้มน้ำและไม่มี การดูดน้ำเข้ามาอีก ส่งผลให้มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก และเมื่อปล่อยให้เกิดรีโทรเกรเดชันต่อไป สายเกลียวคู่ที่เกิดขึ้นจะมารวมตัวกันและมีลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างที่แน่นและมีความเป็นผลึกที่แข็งแรงมากขึ้น (Haralampu, 2000) ผลจากการให้ความร้อนแก่สารละลายแป้งโดยใช้หม้อหนึ่งความดัน ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นสอดคล้องกับ ผลงานวิจัยของ Siljestrom and Asp (1985) ซึ่งนำแป้งสาลีมาผ่านการให้ความร้อนด้วยหม้อหนึ่งความดัน แล้วพบการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งทนต่อการย่อยจากน้อยกว่าร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 9

จากการผลิตแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวอะมิโลสสูงโดยใช้สารละลายที่แตกต่างกัน 10 ชนิดในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนขึ้น และระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60°ซ แตกต่างกัน 4 ระดับนั้น พบว่า เมื่อใช้ระยะเวลาในการบ่มเพิ่มขึ้นจนถึง 72 ชั่วโมง ตัวอย่างที่ใช้น้ำ เอทานอล กรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L กรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอล กรดแลคติกความเข้มข้น 20 mmol/L และกรดแลคติกความเข้มข้น 20 mmol/L ในเอทานอล เป็นสารละลายทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) กล่าวคือ การใช้น้ำทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 13.91 เป็น 9.32 การใช้เอทานอลทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 8.79 เป็น 8.46 การใช้กรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 8.11 เป็น 6.91 ส่วนการใช้กรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอล ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 5.39 เป็น 2.33 การใช้กรดแลคติกความเข้มข้น 20 mmol/L ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 8.14 เป็น 5.95 และกรดแลคติกความเข้มข้น 20 mmol/L ในเอทานอลทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 6.47 เป็น 5.87 (ตารางที่ 4.2) เมื่อใช้ระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60°ซ นาน 24 ชั่วโมง พบว่า การใช้กรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ทำให้มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเท่ากับร้อยละ 9.66 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ ผลงานวิจัยของ Onyango *et al.* (2006) ที่พบการเพิ่มขึ้นของปริมาณแป้งทนต่อการย่อยในแป้งสาลีเป็นร้อยละ 9.89 หลังจากการใช้กรดแลคติกและบ่มที่ 60°ซ นาน 24 ชั่วโมง

ในขณะที่การผลิตแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวอะมิโลสสูง โดยใช้ระยะเวลาในการบ่มที่อุณหภูมิ 60°ซ เพิ่มขึ้นจนถึง 72 ชั่วโมง ในตัวอย่างที่ใส่สารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 10 mmol/L และกรดซิตริกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอล นั้น พบว่าทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นเดียวกัน กล่าวคือ ตัวอย่างที่ใส่สารละลายกรดซิตริกความ

เข้มข้น 10 mmol/L ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 4.90 เป็น 6.77 การใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 2.11 เป็น 7.47 ซึ่งสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Lin และคณะ (2011) ที่ศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยของแป้งข้าวโพดหลังจากการย่อยด้วยกรด-เอทานอลร่วมกับการให้ความร้อนขึ้น โดยพบว่าวิธีการดังกล่าวนี้ทำให้ปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยในแป้งข้าวโพดปกติมีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.5 เป็น 9.2 แป้งข้าวโพด Hylon V มีค่าเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 12.2 เป็น 24.1 และแป้งข้าวโพด Hylon VII มีปริมาณแป้งที่ทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 18.0 เป็น 36.2 ผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ยังพบว่าการผลิตแป้งทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวอะมิโลสสูง เมื่อใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 20 mmol/L และกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 20 mmol/L ในเอทานอล ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยมีค่าคงที่อย่างมีนัยสำคัญ โดยตัวอย่างที่ใช้สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 20 mmol/L ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 3.12 ถึง 6.26 กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 4.82 ถึง 6.05 สำหรับการใส่สารละลายกรด จะเป็นการลดขนาดโมเลกุลของแป้ง โดยกรดจะย่อยพันธะ glucosidic linkages ของแป้งไปเป็นสายโซ่ที่สั้น และช่วยทำให้การคืนตัวเกิดขึ้นได้ในอัตราที่เพิ่มขึ้น ซึ่งมีข้อมูลว่า อัตราการคืนตัวของแป้งจะเกิดสูงสุดเมื่อขนาดโมเลกุล (degree of polymerization) ของอะมิโลสมีค่าเท่ากับ 100 ถึง 200 และอัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของสายอะมิโลสยาว หรือสั้นกว่านี้

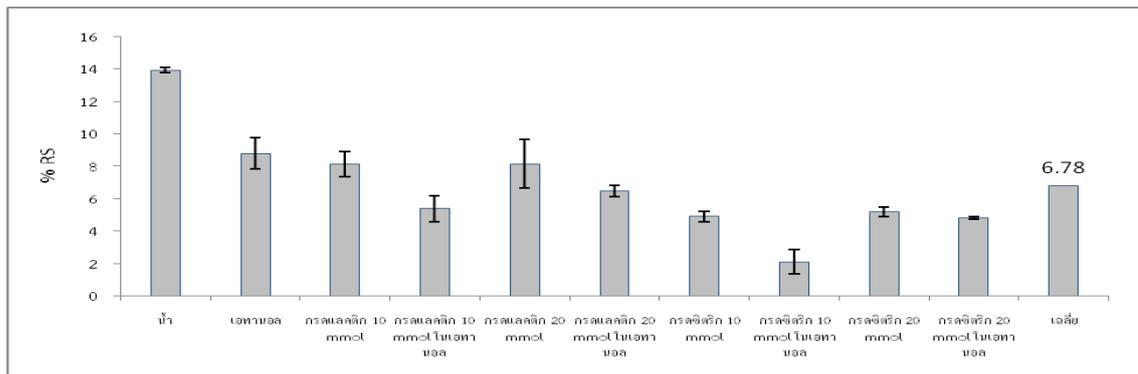
ภาพประกอบ 4.1 แสดงผลของสารละลายต่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อยที่ระยะเวลาในการบ่มต่างๆ พบว่า สารละลายและระยะเวลาในการบ่มมีผลต่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อย โดยแป้งข้าวที่ใช้ น้ำเป็นตัวทำละลายที่ระยะเวลาในการบ่ม 0, 48 และ 72 ชั่วโมง (ภาพ A, C, D) มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเกิดขึ้นมากกว่าสารละลายชนิดอื่นๆ คือ มีค่าร้อยละ 13.91, 9.53 และ 9.32 ตามลำดับ ซึ่งในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็น การใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจะส่งเสริมให้โมเลกุลของแป้งที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจนอยู่ในรูปของร่างแห และเมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจึงจะคลายตัวออก ซึ่งทำให้เม็ดแป้งเริ่มดูดน้ำแล้วพองตัว โมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายจะออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อทิ้งไว้ให้น้ำเย็นตัวลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา โดยเฉพาะส่วนของ อะมิโลสที่มีขนาดของโมเลกุลที่เหมาะสม คือ ไม่สั้นหรือยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกันและกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก

ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การคืนตัวของแป้งหรือการเกิดแป้งทนต่อการย่อย (Leach *et al.*, 1959) เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาการบ่ม 24 ชั่วโมง (ภาพ B) พบว่าแป้งข้าวที่ใช้สารละลายกรดแลคติกมีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นมากที่สุด (ร้อยละ 9.66) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Onyango *et al.* (2006) ซึ่งใช้สารละลายกรดแลคติกเป็นตัวทำละลายในขณะที่ให้ความร้อนแก่แป้งมันสำปะหลังด้วยหม้อนึ่งแรงดันสูงที่อุณหภูมิ 121 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยกรดจะทำให้เกิดการไฮโดรไลซ์พันธะไกลโคซิดิกได้ง่ายกว่า และเมื่อนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จึงทำให้เกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ระหว่างโมเลกุลด้วยพันธะไฮโดรเจนทำให้เกิดแป้งทนต่อการย่อยที่มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 9.89

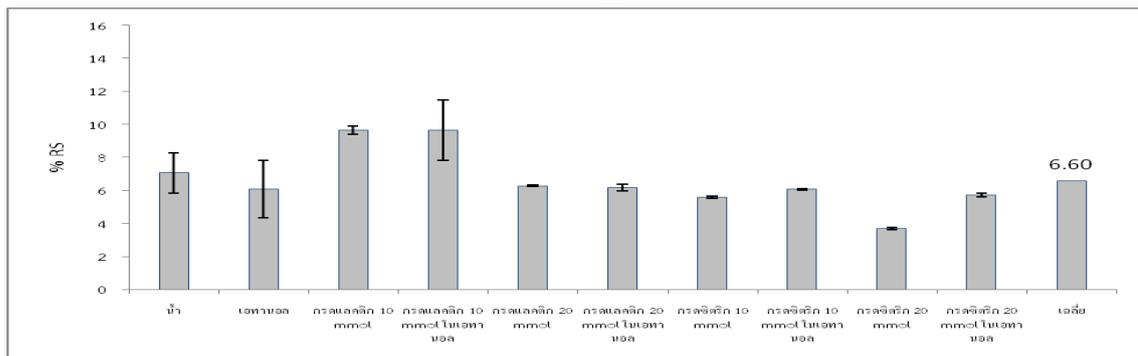
เมื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาการบ่มที่มีต่อปริมาณการเกิดแป้งทนต่อการย่อย โดยนำปริมาณแป้งทนต่อการย่อยที่เกิดจากการใช้สารละลายชนิดต่างๆ ทั้ง 10 ชนิดมาหาค่าเฉลี่ยที่ระยะเวลา

0, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง พบว่า ที่ระยะเวลาการบ่ม 0 ชั่วโมง มีค่าเฉลี่ยมากที่สุด (ร้อยละ 6.78) แสดงให้เห็นว่าที่ระยะเวลาในการบ่ม 0 ชั่วโมงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบ่มเพื่อทำให้เกิดแบ่งทนต่อการย่อย ในขณะที่ระยะเวลาในการบ่ม 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ทำให้เกิดแบ่งทนต่อการย่อยโดยเฉลี่ยลดลง คือ ร้อยละ 6.60, 6.56, 6.52 ตามลำดับ

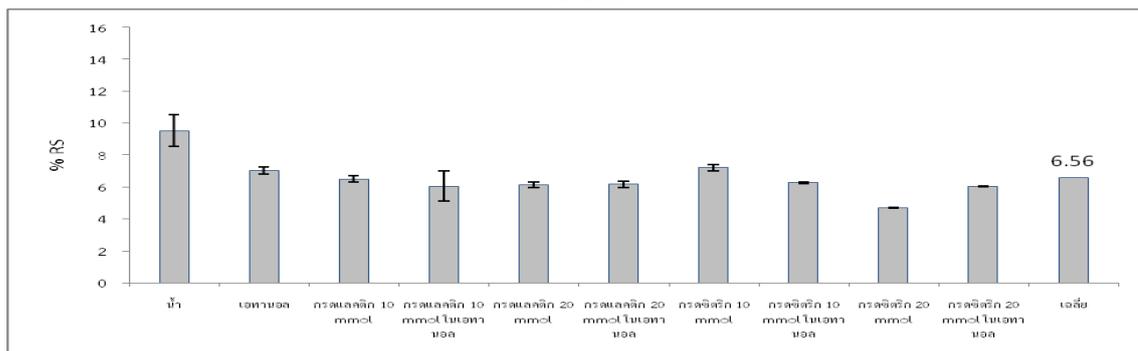
A: 0 ชั่วโมง



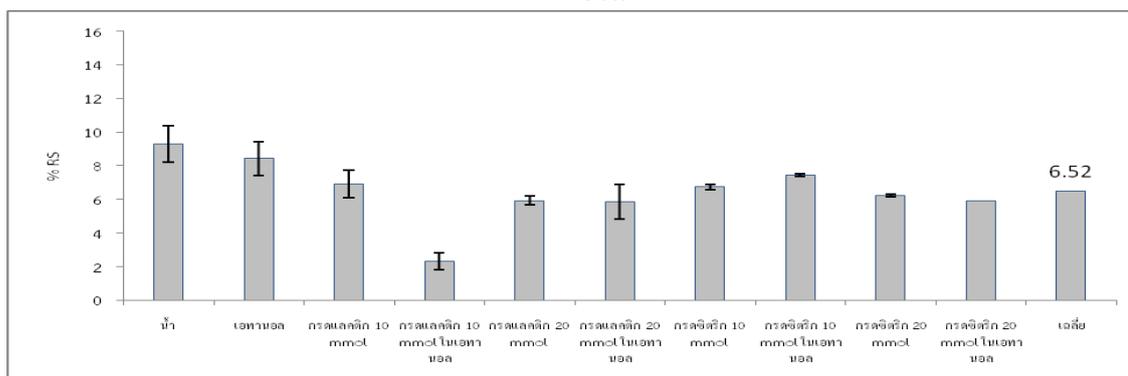
B: 24 ชั่วโมง



C: 48 ชั่วโมง



D: 72 ชั่วโมง



ภาพประกอบ 4.1 ผลของสารละลายต่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อยที่ระยะเวลาในการบ่มต่างๆ

4.2.2 ปริมาณแป้งที่ย่อยได้และปริมาณแป้งทั้งหมด

ผลการวิเคราะห์ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ (Digestible starch) ในตัวอย่างแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นในสารละลายแตกต่างกัน 10 ชนิด และผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน 4 ระดับ แสดงดังตาราง 4.3

จากตาราง พบว่า ปริมาณแป้งที่ย่อยได้มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยการใช้สารละลายกรดแลกติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลที่ระยะเวลาการบ่ม 72 ชั่วโมง และสารละลายกรดซิทริกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลที่ระยะเวลาการบ่ม 0 ชั่วโมงหรือไม่ได้บ่ม มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้มากที่สุด คือ ร้อยละ 83.48 และ 83.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่การใช้น้ำเป็นสารละลายที่ระยะเวลาในการบ่ม 0 ชั่วโมงหรือไม่ได้บ่ม มีปริมาณแป้งที่ย่อยได้น้อยที่สุดเป็นร้อยละ 72.63 ทั้งนี้ข้อสังเกตว่า ปริมาณแป้งที่ย่อยได้มีค่าลดลงเมื่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้สารละลายที่แตกต่างกันและอุณหภูมิในการบ่มแตกต่างกัน ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อปริมาณแป้งทั้งหมด ($p > 0.05$) โดยมีปริมาณแป้งทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 83.37–87.32

4.2.3 ระดับการเกิดเจลลาทีไนเซชัน (เปอร์เซ็นต์ Degree of gelatinization)

จากการวิเคราะห์ระดับการเกิดเจลลาทีไนซ์ของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ให้ความร้อนขึ้นในสารละลายแตกต่างกัน 10 ชนิด และผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 60°C ด้วยระยะเวลาแตกต่างกัน 4 ระดับ พบว่า แป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ใช้น้ำและกรดแลกติกความเข้มข้น 10 mmol/L เป็นตัวทำละลายและมีระยะเวลาในการบ่มเป็น 0, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง มีระดับการเกิดเจลลาทีไนซ์สูงกว่าตัวอย่างที่ใช้สารละลายเอทานอลและกรดแลกติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอล อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.05$

จากตาราง 4.4 พบว่า การใช้น้ำและสารละลายกรดแลกติกความเข้มข้น 10 mmol/L และระยะเวลาในการบ่มเป็น 0, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง ตัวอย่างแป้งมีระดับการเกิดเจลลาทีไนซ์อยู่ระหว่าง ร้อยละ 98.64–99.86 ส่วนอย่างที่ใช้สารละลายเอทานอลและกรดแลกติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอล ที่ระยะเวลาในการบ่ม 0, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง มีระดับการเกิดเจลลาทีไนซ์

ระหว่างร้อยละ 58.25 – 59.91 สอดคล้องกับการทดลองของ Ritruengdech *et al.* (2012) ที่รายงาน ว่า เมื่อให้ความร้อนแก่แป้งข้าวที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 100°C ทำให้มีระดับการเกิดเจลาทีโนสเพิ่มขึ้น ร้อยละ 90.79 และ ระยะเวลาการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้น้ำแป้งเกิดเจลาทีโนสเพิ่มขึ้น นอกจากนั้น Beleia *et al.* (2006) ยังรายงานว่าการเพิ่มระยะเวลาการต้มมันสำปะหลังสายพันธุ์ IAPAR-19 Pioneira ในน้ำเดือดที่อุณหภูมิ 98°C จาก 3 นาที เป็น 12 นาที ทำให้มีระดับการเกิดเจลาทีโนสเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 63.8 เป็น 98.0

ตาราง 4.3 ผลของสารละลายและระยะเวลาในการบ่มต่อปริมาณแป้งที่ย่อยได้และปริมาณแป้งทั้งหมด

สารละลาย	ระยะเวลาในการบ่ม (h)	แป้งที่ย่อยได้ (%)	แป้งทั้งหมด ^a (%)
น้ำ	0	72.62±0.22 ^j	86.53±0.06
	24	78.63±1.59 ^{efghi}	85.70±0.35
	48	75.54±0.35 ^{defghi}	85.07±1.61
	72	73.60±0.30 ^{hi}	83.60±1.06
เอทานอล	0	75.25±0.39 ^{ghi}	84.03±0.54
	24	79.26±0.06 ^{bcdefg}	85.34±1.79
	48	78.40±0.44 ^{cdefgh}	85.43±0.69
	72	74.23±1.09 ^{efghi}	83.55±0.00
กรดแลคติก 10 mmol	0	75.30±0.53 ^{efghi}	83.41±0.31
	24	74.95±0.60 ^{fghi}	84.29±0.87
	48	77.58±1.56 ^{defghi}	84.90±1.37
	72	77.57±0.10 ^{defghi}	84.48±0.71
กรดแลคติก 10 mmol ในเอทานอล	0	79.18±0.71 ^{bcdefg}	84.57±0.09
	24	77.65±0.79 ^{defghi}	87.31±1.64
	48	79.26±0.69 ^{bcdefg}	85.31±0.64
	72	83.48±0.05 ^a	85.81±0.54
กรดแลคติก 20 mmol	0	76.72±0.25 ^{efghi}	84.86±0.73
	24	78.92±0.10 ^{bcdefg}	85.20±0.16
	48	79.08±0.00 ^{bcdefg}	85.22±0.17
	72	78.05±0.07 ^{defghi}	84.00±0.19
กรดแลคติก 20 mmol ในเอทานอล	0	77.54±0.65 ^{defghi}	84.01±0.88
	24	79.09±0.54 ^{bcdefg}	85.27±0.76
	48	77.34±0.58 ^{defghi}	83.52±0.36
	72	78.50±0.49 ^{cdefgh}	86.72±0.67
กรดซิตริก 10 mmol	0	79.01±0.56 ^{bcdefg}	83.91±0.88
	24	78.60±0.68 ^{cdefgh}	84.19±0.56
	48	75.16±0.11 ^{efghi}	83.37±0.33
	72	79.58±0.68 ^{bcdef}	86.35±0.22
กรดซิตริก 10 mmol ในเอทานอล	0	83.04±0.03 ^a	85.15±0.07
	24	78.09±0.20 ^{defghi}	84.16±0.26
	48	77.57±0.10 ^{defghi}	83.84±0.06
	72	78.84±0.70 ^{bcdefg}	86.31±0.67
กรดซิตริก 20 mmol	0	81.74±0.42 ^{bcd}	86.92±0.12
	24	82.20±0.27 ^{bc}	85.32±0.35
	48	80.09±0.05 ^{bcde}	84.90±0.09
	72	80.87±0.13 ^{bcde}	87.13±0.22
กรดซิตริก 20 mmol ในเอทานอล	0	79.59±0.01 ^{bcdef}	84.42±0.07
	24	78.26±0.07 ^{cdefgh}	84.00±0.18
	48	79.32±0.11 ^{bcdefg}	85.37±0.12
	72	79.43±0.07 ^{bcdefg}	85.38±0.02

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีอักษร^{a, b, c, ...}ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่ามีความต่างกันทางสถิติ (p<0.05)

ตาราง 4.4 ระดับการเกิดเจลลาตินในเซชันของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11

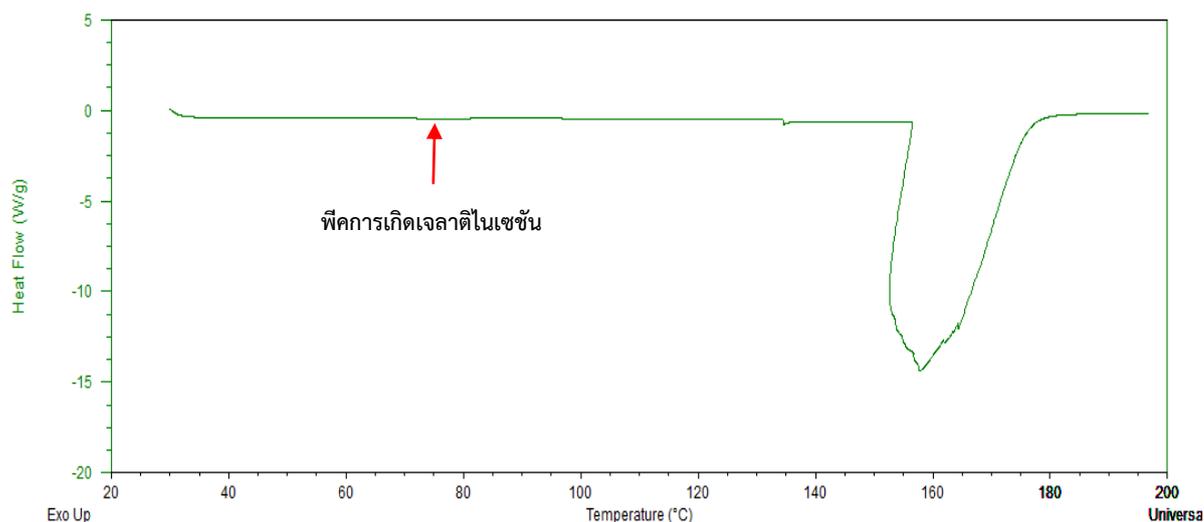
สารละลาย	ระยะเวลาบ่ม (h)	ระดับการเกิดเจลลาตินในเซชัน (%)
น้ำ	0	99.47±1.53 ^a
	24	99.46±0.76 ^a
	48	99.18±1.15 ^a
	72	99.69±0.77 ^a
เอทานอล	0	59.56 ±1.80 ^b
	24	59.60±1.07 ^b
	48	59.55±0.38 ^b
	72	58.24±0.06 ^b
กรดแลคติก 10 mmol	0	98.64±0.00 ^a
	24	99.15±0.72 ^a
	48	99.18±0.67 ^a
	72	99.32±0.61 ^a
กรดแลคติก 10 mmol ในเอทานอล	0	59.87 ±0.82 ^b
	24	60.72 ±0.17 ^b
	48	60.32 ±0.73 ^b
	72	59.91± 0.86 ^b

ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีอักษร ^{a, b} ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่ามีความต่างกันทางสถิติ ($p < 0.05$)

4.2.4 คุณสมบัติทางด้านความร้อน (Thermal properties)

สำหรับการเกิดเจลลาตินในเซชันจะเกี่ยวข้องกับการคลายตัวและหลอมเหลวของพันธะภายนอกของอะมิโลเพคตินซึ่งอยู่รวมกันในลักษณะเกลียวคู่ และจะเกิดการหลอมเหลวในระหว่างเกิดเจลลาตินใน-เซชัน โดยเริ่มต้นจากการจับตัวกันของแป้งกับน้ำและเกิดการพองตัวของส่วนอสัณฐานในเม็ดแป้ง ซึ่งทำให้เกิดการยึดและทำลายโครงสร้างส่วนผลึกตามมา (Hoover and Manuel, 1996) ทั้งนี้กระบวนการเกิดเจลลาตินในเซชันไม่ได้เกิดเฉพาะอุณหภูมิใดอุณหภูมิหนึ่งแต่เกิดเป็นช่วงอุณหภูมิประมาณ 8-12°C โดยการตรวจสอบกระบวนการเจลลาตินในเซชัน นอกจากการใช้การสังเกตการเปลี่ยนโครงสร้างการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แล้ว สามารถตรวจสอบโดยเครื่องมือที่วัดและบันทึกปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นที่นิยมในปัจจุบันคือ เครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) ที่ใช้วัดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือทางเคมีของวัสดุในรูปฟังก์ชันกับอุณหภูมิ ตามปกติพอลิเมอร์ต่างๆ ในรูปผลึกและอสัณฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เมื่อได้รับความร้อน สตาร์ชก็เช่นเดียวกันในสภาพที่มีน้ำน้อยเมื่อให้ความร้อนจะมีอุณหภูมิหลอมละลาย (T_m) ที่สูงมาก กล่าวคือ ในช่วง 160-200°C แต่เมื่อเพิ่ม

ปริมาณน้ำมากขึ้นอุณหภูมิของการหลอมละลายก็จะลดลง เมื่อปริมาณน้ำมีประมาณ 70 ส่วนหรือมากกว่า การหลอมละลาย ก็คือ การเกิดเจลาตินในเซชัน ภาพที่ 4.2 แสดงตัวอย่างเทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้นโดยใช้สารละลายที่แตกต่างกันและอุณหภูมิในการต้มแตกต่างกัน



ภาพประกอบ 4.2 เทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่แสดงส่วนพีคการเกิดเจลาตินในเซชัน

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางความร้อนของแป้ง แสดงดังตารางที่ 4.5 พบว่าแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชัน (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c) และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยอุณหภูมิในการเกิดเจลาตินในเซชันมีค่าอยู่ระหว่าง 67.69 – 68.60 °ซ อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟสมีค่า 73.77 – 74.89 °ซ อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟสมีค่าระหว่าง 81.02 – 86.05 °ซ และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสอยู่ระหว่าง 1.17 – 1.66 J/g ซึ่งการที่ค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสมีค่าน้อยกว่าค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 (Native) เกิดขึ้นเนื่องมาจากแป้งบางส่วนอาจเกิดเจลาตินในซีไปแล้วในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนขึ้น (Hoover and Vasanthan, 1994)

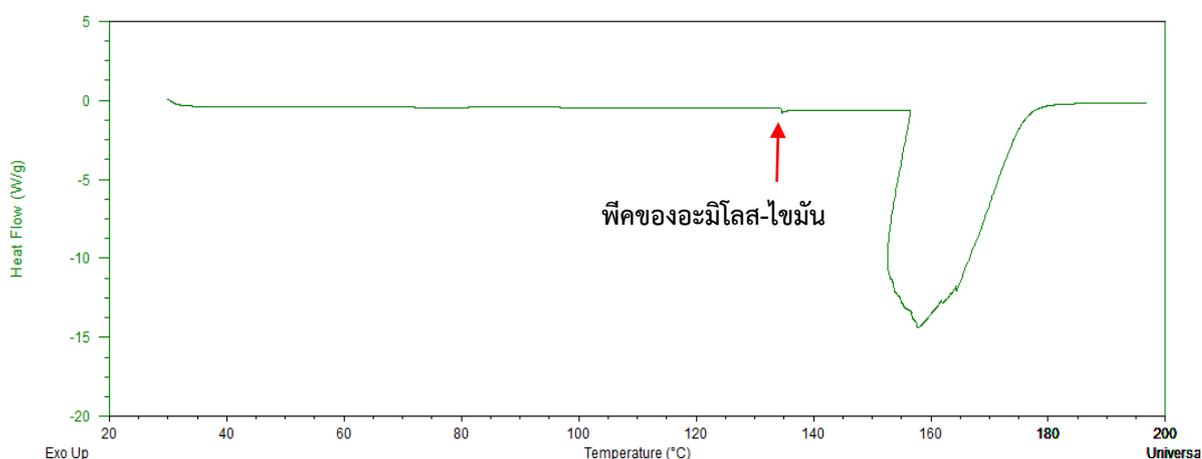
ตาราง 4.5 คุณสมบัติทางด้านความร้อนของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่ผ่านการให้ความร้อนขึ้น

สารละลาย	ระยะเวลาบ่ม (h)	T _o (°C) ^{ns}	T _p (°C) ^{ns}	T _c (°C) ^{ns}	ΔH (J/g) ^{ns}
แป้งข้าวเจ้า น้ำ	-	68.49±0.40	74.48±0.00	85.24±2.77	1.76±0.00
	0	ND	ND	ND	ND
	24	ND	ND	ND	ND
	48	ND	ND	ND	ND
	72	ND	ND	ND	ND
เอทานอล	0	68.06 ±0.28	74.07±0.23	84.75 ±0.92	1.57 ±0.03
	24	68.15 ±0.38	74.38± 0.00	85.10± 1.45	1.41 ±0.20
	48	68.24 ±0.38	74.89 ±0.28	86.05 ±1.11	1.66 ±0.04
	72	68.03± 0.39	74.34 ±0.25	84.76 ±0.35	1.55 ±0.17
กรดแลคติก 10 mmol	0	ND	ND	ND	ND
	24	ND	ND	ND	ND
	48	ND	ND	ND	ND
	72	ND	ND	ND	ND
กรดแลคติก 10 mmol	0	68.60 ±0.57	74.24± 0.02	81.02 ±1.11	1.17± 0.31
	24	67.69 ±0.04	73.77± 0.12	83.25± 1.47	1.27± 0.19
ในเอทานอล	48	68.35 ±0.10	74.63 ±0.00	83.52 ±0.29	1.31± 0.07
	72	68.38± 0.38	74.07± 0.02	83.22 ±0.37	1.29± 0.08

ns = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความต่างกันทางสถิติ (p>0.05)

ND = ตรวจไม่พบค่าดังกล่าว

จากการทดลองยังพบว่า เมื่อให้อุณหภูมิในการวิเคราะห์สูงขึ้นจะมีพีคปรากฏอีก 2 พีค โดยส่วนที่หนึ่ง คือ พีคส่วนของอะมิโลส-ไขมัน (amylose-lipid complex) แสดงดังภาพประกอบ 4.3



ภาพประกอบ 4.3 เทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่แสดงส่วนพีคของอะมิโลส-ไขมัน

จากตาราง 4.6 พบว่าแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak temperature, T_p) อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c) และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส อยู่ระหว่าง $135.53\text{--}137.37^\circ\text{C}$ อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟสอยู่ระหว่าง $135.94\text{--}136.99^\circ\text{C}$ อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟสอยู่ระหว่าง $139.31\text{--}142.15^\circ\text{C}$ และค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส อยู่ระหว่าง $2.07\text{--}2.63\text{ J/g}$ การมีไขมันในแป้งจะมีผลต่อคุณสมบัติของแป้งเนื่องจากไขมันหรือลิพิด (lipid) จะเกิดการรวมตัวกับอะมิโลสในแป้งเกิดเป็นสารเชิงซ้อนของอะมิโลส-ไขมัน (amylose-lipid complex)

ตาราง 4.6 คุณสมบัติทางด้านความร้อนของส่วนอะมิโลส - ลิปิด

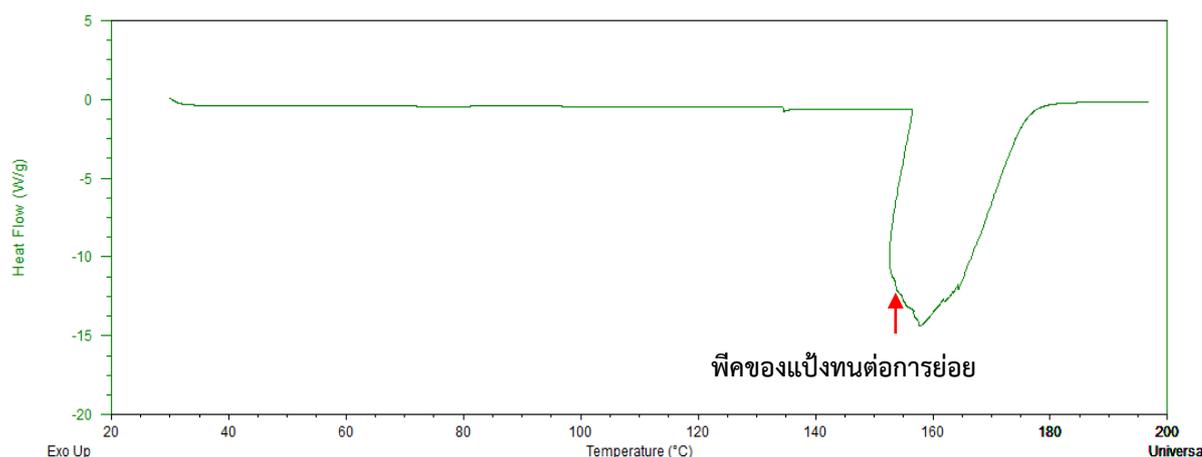
สารละลาย	ระยะเวลา บ่ม (h)	$T_o(^{\circ}\text{C})^{ns}$	$T_p(^{\circ}\text{C})^{ns}$	$T_c(^{\circ}\text{C})^{ns}$	$\Delta H (\text{J/g})^{ns}$
น้ำ	0	135.86±0.10	136.33±0.14	140.46 ±0.11	2.63± 0.04
	24	135.85± 0.11	136.07± 0.23	139.31± 0.47	2.10 ±0.09
	48	135.93± 0.00	136.19 ±0.14	142.15± 0.13	2.62± 0.07
	72	135.53± 1.23	135.94 ±1.48	139.81 ±1.78	2.07 ±0.04
เอทานอล	0	136.06 ±0.60	136.35±0.67	141.74 ±0.64	2.40 ±0.23
	24	136.15 ±0.30	136.32± 0.28	140.23± 0.94	2.43 ±0.06
	48	136.77 ±0.84	137.36 ±1.39	141.42 ±0.71	2.20 ±0.24
	72	136.05± 0.60	136.37 ±0.69	141.54 ±0.25	2.36 ±0.05
กรดแลคติก 10 mmol	0	136.42 ±0.05	136.99 ±0.00	141.51± 0.06	2.25± 0.11
	24	136.15 ±0.30	136.32±0.28	139.86 ±0.40	2.14± 0.11
	48	137.37 ±0.54	138.35± 0.15	142.20± 0.09	2.10 ±0.01
	72	135.80 ±0.53	136.07± 0.11	139.46± 0.14	2.21 ±0.11
กรดแลคติก 10 mmol ใน เอทานอล	0	136.17±0.34	136.59± 0.57	141.65 ±0.48	2.30± 0.12
	24	135.86 ±0.00	136.33 ±0.01	139.76± 0.40	2.35± 0.18
	48	135.75 ±0.11	136.07± 0.00	139.04 ±0.02	2.07± 0.01
	72	136.72± 0.20	136.87± 0.00	141.38 ±0.20	2.55± 0.02

ns = ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในแนวตั้งเดียวกันไม่มีความต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$)

สำหรับ amylose-lipid complex นี้ไม่ละลายน้ำ แต่พันธะที่ยึดเหนี่ยวกันจะถูกทำลายเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 120°C ทำให้ส่วนของอะมิโลส สามารถละลายออกมาได้ (Davies *et al.*, 1980) ลิปิดที่จับอยู่กับเม็ดแป้งนี้อาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ลิปิดที่เป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้งอย่างแท้จริง โดยพบอยู่ภายในเม็ดแป้ง ในแป้งข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีพบว่า เป็นลิปิดประเภทไลโซ-ฟอสโฟไลปิดทั้งหมด ในขณะที่ในแป้งข้าวเจ้า ข้าวโอ๊ตและข้าวโพด พบว่าเป็นกรดไขมันประมาณร้อยละ 30-60 ส่วนแป้งข้าวเหนียว ข้าวโพดเหนียว ข้าวบาร์เลย์เหนียว และข้าวสาลีเหนียวซึ่งมีอะมิโลสต่ำมาก พบว่ามีปริมาณลิปิดต่ำมากเช่นกัน และแบ่งจากข้าวเหล่านี้ เมื่อกลายพันธุ์ให้มีอะมิโลสสูงก็จะพบลิปิดในปริมาณมากด้วย (Morrison, 1995) ลิปิดอีกประเภทเป็นลิปิดที่มาจากเนื้อเยื่อส่วนอื่นๆ เช่น จากเมมเบรนและสเฟียร์โรโซม ซึ่งจะจับอยู่กับเม็ดแป้งแบบหลวมๆ ประกอบด้วยลิปิดพวกไตรกลีเซอไรด์ ไดเอซิลไกลโคไลปิดและฟอสโฟไลปิด ระหว่างการเจริญของข้าว จะเกิดการย่อยสลายลิปิดบางส่วนได้ กรดไขมันและโมโนเอซิลกลีเซอไรด์ ในขณะที่สกัดแป้ง แม้ว่าเม็ดแป้งจะพองตัวเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่กรดไขมันและโมโนเอซิลไลปิดเหล่านี้สามารถถูกดูดซึมเข้าไปในบริเวณชั้นผิวของเม็ดแป้งได้ จึงเรียก

ลิปิดส่วนนี้ว่า starch surface lipids สำหรับแบ่งจากเอนโดสเปิร์มของพวกธัญพืช จะมีไขมันเป็นส่วนหนึ่งของเม็ดแป้ง (integral lipids) แตกต่างจากเม็ดแป้งจากมันฝรั่ง ถั่วประเภทต่างๆ หรือจากส่วนอื่นๆ ของธัญพืชที่ไม่พบ integral lipids

สำหรับพีคส่วนที่สอง สันนิษฐานว่าเป็นพีคของแป้งทนต่อการย่อย (Resistant starch) แสดงดังภาพประกอบ 4.4



ภาพประกอบ 4.4 เทอร์โมแกรมของแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ที่แสดงส่วนพีคของแป้งทนต่อการย่อย

จากตาราง 4.7 พบว่าแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 มีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟส (onset temperature, T_o) อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟส (peak temperature, T_p) และอุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟส (conclusion temperature, T_c) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยพบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟสมีค่าระหว่าง 153.03 – 159.15 °ซ อุณหภูมิสูงสุดของการเปลี่ยนเฟสอยู่ระหว่าง 154.62 – 165.57 °ซ อุณหภูมิสุดท้ายของการเปลี่ยนเฟสอยู่ระหว่าง 175.27 – 187.68 °ซ แต่ค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟส (ΔH) มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสของการใช้น้ำเป็นสารละลาย และระยะเวลาในการบ่ม 0 ชั่วโมงหรือไม่ได้บ่ม มีค่ามากที่สุด คือ 1235.50 J/g ในขณะที่การใช้น้ำเป็นสารละลายกรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอล ที่ระยะเวลาในการบ่ม 72 ชั่วโมง และสารละลายกรดแลคติกความเข้มข้น 10 mmol/L ในเอทานอลที่ระยะเวลาในการบ่ม 0 ชั่วโมงหรือไม่ได้บ่ม มีค่าพลังงานของการเปลี่ยนเฟสน้อยที่สุดคือ 878.50 และ 942.10 J/g ตามลำดับ

ตาราง 4.7 คุณสมบัติทางด้านความร้อนของแป้งทนต่อการย่อยจากแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11

สารละลาย	ระยะเวลา บ่ม (h)	T ₀ (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH (J/g)
น้ำ	0	157.73±0.30 ^{ab}	160.01±1.14 ^a	187.68±1.91 ^a	1235.50±1.14 ^a
	24	156.81±0.21 ^{abc}	162.93±1.23 ^a	183.14±1.12 ^a	1072.50±1.23 ^{cdef}
	48	158.05±0.00 ^a	158.92±0.74 ^a	179.29±1.12 ^a	1016.00±0.74 ^{efgh}
	72	158.48±0.00 ^a	162.08±0.37 ^a	183.26±0.04 ^a	1022.00±0.37 ^{efgh}
เอทานอล	0	150.40±1.17 ^{abc}	155.86±1.64 ^a	177.76±1.32 ^a	1105.00±1.64 ^{bcde}
	24	154.09±0.00 ^{abc}	166.93±0.82 ^a	186.09±1.54 ^a	1058.00±0.82 ^{defg}
	48	157.95±0.01 ^a	159.60±1.71 ^a	177.83±1.87 ^a	1153.50±1.71 ^{bc}
	72	159.15±0.14 ^a	165.40±0.37 ^a	183.47±1.71 ^a	1046.00±1.58 ^{efg}
กรดแลคติก 10 mmol	0	154.33±0.45 ^{abc}	160.17±1.85 ^a	181.73±0.74 ^a	1000.30±1.85 ^{fgh}
	24	153.03±0.86 ^{abc}	159.25±0.73 ^a	176.01±0.20 ^a	1103.00±0.73 ^{bcde}
	48	153.35±1.54 ^{abc}	155.59±0.65 ^a	175.27±1.76 ^a	970.80±1.17 ^{gh}
	72	153.27±1.53 ^{abc}	154.62±1.81 ^a	174.13±1.81 ^a	1034.00±1.28 ^{efgh}
กรดแลคติก 10 mmol ในเอทานอล	0	155.22±0.88 ^{abc}	156.48±1.17 ^a	175.44±1.83 ^a	942.10±2.23 ^{ghi}
	24	157.52±0.00 ^{ab}	159.20±0.01 ^a	178.76±0.79 ^a	1185.59±1.36 ^b
	48	156.54±0.01 ^{abc}	157.77± 0.00 ^a	176.45±1.83 ^a	1140.59±2.85 ^{bcd}
	72	156.88±0.00 ^{abc}	165.57± 0.00 ^a	184.83±1.86 ^a	878.50±1.98 ⁱ

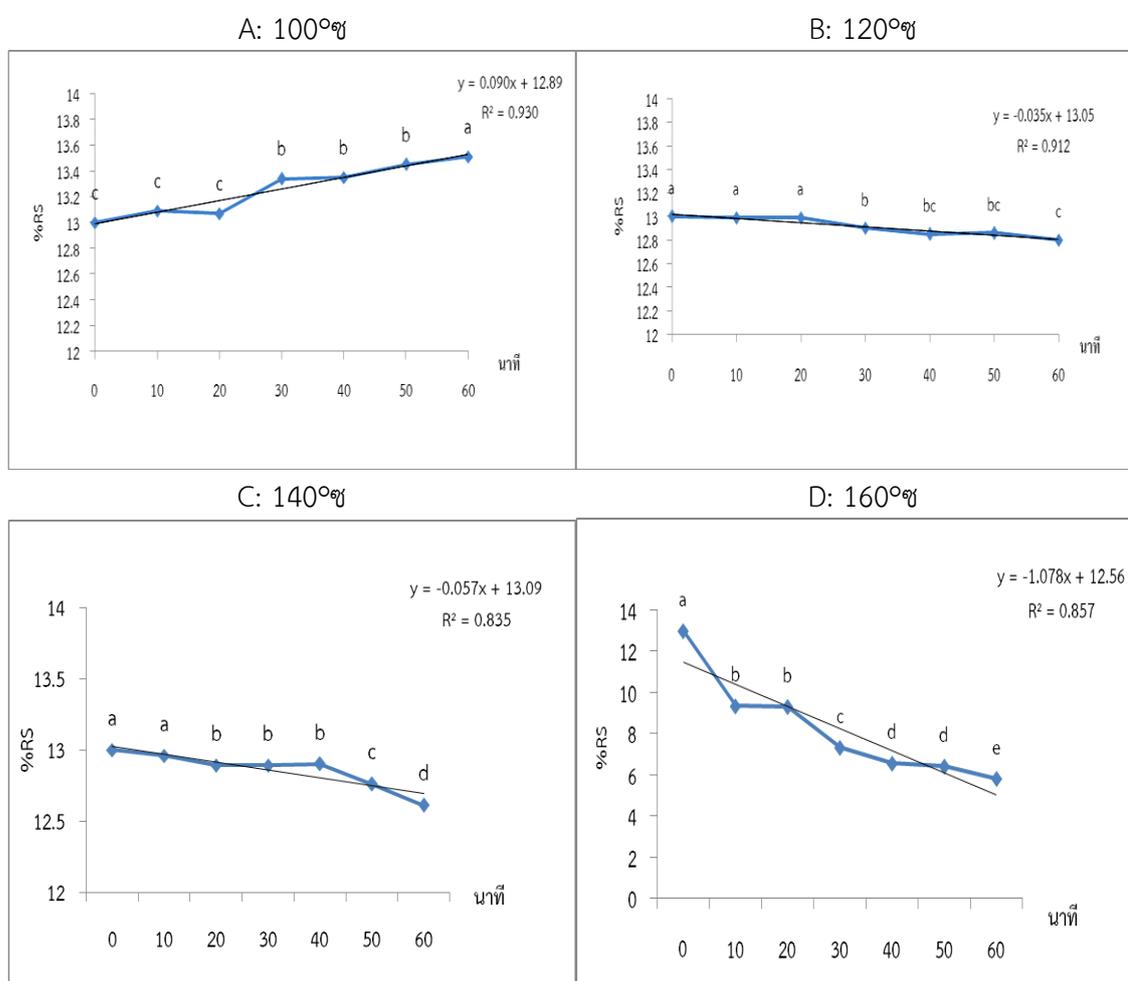
ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มีอักษร^{a, b, c, ...}ในแนวตั้งเดียวกันกำกับต่างกันแสดงว่ามีความต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในการที่แป้งมีอุณหภูมิเริ่มต้นของการเปลี่ยนเฟสสูงขึ้น เนื่องมาจากการตัดแปรด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น ส่งผลเพิ่มปริมาณผลึกภายในเม็ดแป้งที่มีการจัดเรียงของสายพอลิเมอร์ภายในส่วนของอสัณฐาน หรืออาจเกิดจากการเกาะเกี่ยวกันของสายเกลียวคู่ภายในบริเวณส่วนอสัณฐานทำให้เกิดแรงยึดเกาะกันเพิ่มสูงขึ้น ทำให้ทนต่อความร้อนได้เพิ่มสูงขึ้นและส่งผลให้ใช้พลังงานในการทำลายโครงสร้างสูงด้วยเช่นกัน (Lawal, 2005)

4.3 ผลศึกษาความคงตัวของความร้อนของแป้งที่ทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 จากแป้งข้าวอะมิโลสสูง

จากการศึกษาความคงตัวของความร้อนของแป้งที่ทนต่อการย่อยชนิดที่ 3 โดยมีอุณหภูมิในระหว่างการอบด้วยตู้อบลมร้อนที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ 100, 120, 140 และ 160°C และระยะเวลาให้ความร้อนแตกต่างกัน 6 ระดับ คือ 10, 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแป้งทนต่อการย่อยกับเวลาการให้ความร้อน ก็จะได้กราฟเป็นเส้นตรงที่มีความชัน $\pm k$ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.5

จากกราฟ A-D พบว่า การเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้งทนต่อการย่อยตามระยะเวลาของการให้ความร้อนที่เพิ่มขึ้น ณ อุณหภูมิต่างๆ เป็นปฏิกิริยาอันดับศูนย์ คือ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาคงที่เสมอ



ภาพประกอบ 4.5 ผลของระยะเวลาในการอบต่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อยที่อุณหภูมิต่างๆ

ผลของระยะเวลาการอบต่อปริมาณแป้งทนต่อการย่อย พบว่า ที่อุณหภูมิ 100°C เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบเพิ่มขึ้นถึง 60 นาที ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญจากร้อยละ 13.00 เป็น 13.50 ในขณะที่การใช้อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C เมื่อใช้ระยะเวลาในการอบ

เพิ่มขึ้นถึง 60 นาที ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิ 120°C มีปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 13.00 เป็น 12.80 ส่วนที่อุณหภูมิ 140°C ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 13.00 เป็น 12.61 และที่อุณหภูมิ 160°C การอบเป็นระยะเวลา 60 นาทีทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงจากร้อยละ 13.00 เป็น 5.81

ตาราง 4.8 สมการถดถอยของปริมาณแป้งทนต่อการย่อย

อุณหภูมิ (°C)	k	R ²
100	0.09	0.93
120	-0.04	0.91
140	-0.06	0.84
160	-1.08	0.86

การถดถอย (regression) เป็นการวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ (mathematical relationship) ระหว่างตัวแปร 2 ตัวหรือตัวแปรมากกว่า 2 ตัว โดยที่มีตัวแปร 1 ตัวเป็นตัวแปรตาม (dependent variable) และตัวแปรอีก 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัวเป็นตัวแปรอิสระ (independent variable) จากตารางที่ 4.8 สมการถดถอยของปริมาณแป้งทนต่อการย่อยแสดงดังต่อไปนี้

$$\text{อุณหภูมิ } 100^{\circ}\text{C} \text{ คือ } 0.09(t) + 12.89 = \text{RS}$$

$$\text{อุณหภูมิ } 120^{\circ}\text{C} \text{ คือ } -0.04(t) + 13.05 = \text{RS}$$

$$\text{อุณหภูมิ } 140^{\circ}\text{C} \text{ คือ } -0.06(t) + 13.09 = \text{RS}$$

$$\text{อุณหภูมิ } 160^{\circ}\text{C} \text{ คือ } -1.08(t) + 12.56 = \text{RS}$$

โดยที่

t คือ เวลาการอบ

RS คือ ปริมาณแป้งทนต่อการย่อย

สำหรับค่าความชัน (k) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณแป้งทนต่อการย่อยต่อระยะเวลาในการอบที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าความชัน (k) ที่อุณหภูมิ 100°C มีค่าเป็นบวก ($k = 0.09$) เนื่องจากในระหว่างการอบ ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในขณะที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C ทำให้ปริมาณแป้งทนต่อการย่อยลดลงได้ โดยที่ค่าความชัน (k) มีค่าเป็น -0.04, -0.06 และ -1.08 ตามลำดับ ซึ่งการที่ค่าความชันที่อุณหภูมิ 160°C มีค่าติดลบสูงกว่าอุณหภูมิอื่นๆ เป็นการยืนยันถึงการลดลงอย่างมากของปริมาณแป้งทนต่อการย่อย สำหรับค่า R² หรือสัมประสิทธิ์แห่งการกำหนด (coefficient of determination) ซึ่งเป็นค่าสัดส่วนที่บอกให้ทราบว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่งด้วยสมการถดถอยเชิง

เส้นได้ดีเพียงใด โดยไม่คำนึงถึงว่าตัวแปรใดเป็นตัวแปรอิสระหรือตัวแปรตาม ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้าค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 ก็แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่งด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นได้ดี แต่ถ้า R^2 มีค่าน้อยมากก็แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรหนึ่งไม่สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของอีกตัวแปรหนึ่งด้วยสมการ จากตารางที่ 4.8 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ของสมการถดถอยที่อุณหภูมิ 100, 120, 140 และ 160°C มีค่าเท่ากับ 0.93, 0.91, 0.84 และ 0.86 ตามลำดับ

จากข้อมูลการทดลองในงานวิจัยนี้ สามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาผลิตภัณฑ์จากแป้งทนต่อการย่อย เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับแป้งข้าวเจ้าเหลือง 11 ต่อไปได้ เช่น การใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์อาหาร ทั้งเป็นแหล่งของเส้นใยในขนมปัง มีฟีนอล และอาหารเข้าจากธัญพืช เนื่องจากแป้งที่ได้มีอนุภาคขนาดเล็ก ไม่มีรสขาคิ และมีการอุ้มน้ำไม่มาก นอกจากนี้ยังอาจมีประโยชน์ที่หลากหลายในผลิตภัณฑ์อาหาร เนื่องจากคุณสมบัติที่มีสีขาว ขนาดอนุภาคเล็กและมีกลิ่นอ่อน โดยจะช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเส้นใยสูงให้มีคุณภาพและการยอมรับของผู้บริโภคใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์อาหารสูตรปกติหรือสูตรทั่วไป ช่วยปรับปรุงการขยายตัวในผลิตภัณฑ์อาหารเข้าที่ทำจากธัญพืชที่ผ่านกระบวนการอัดพอง ช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์เค้กและบราวนี่ และช่วยปรับปรุงการพองตัวในขนม โดยปริมาณการใช้ขึ้นอยู่กับชนิดผลิตภัณฑ์