

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว

องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใยหยาบ (crude fiber) ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์โบไฮเดรต ดังแสดงในตารางที่ 4.1 โดยจะเห็นได้ว่าแป้งข้าวเหนียวมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก 92.39 กรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง รองลงมาเป็นโปรตีน 6.52 กรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ไขมัน 0.64 กรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง เส้นใยหยาบ 0.31 กรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง และเถ้า 0.14 กรัมต่อ 100 กรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียว

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g/100 g dry basis)**
ความชื้น*	11.15±0.29
โปรตีน	6.52±0.07
ไขมัน	0.64±0.01
เส้นใยหยาบ	0.31±0.11
เถ้า	0.14±0.00
คาร์โบไฮเดรต	92.39±0.21

* ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก

** ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

4.2 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนในแป้งข้าวเหนียว

จากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในแป้งข้าวเหนียวด้วยวิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวมีกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบทั้งหมด 18 ชนิด รวมถึงกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายทั้ง 8 ชนิด ได้แก่ isoleucine leucine lysine methionine phenylalanine threonine tryptophan และ valine โดยมีปริมาณ glutamic acid สูงสุด (908 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียว) คิดเป็นร้อยละ 13.60 ของโปรตีนทั้งหมด กรดอะมิโนที่พบเป็นอันดับรองลงมา คือ aspartic acid (776 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียว) สำหรับไลซีนจะพบเป็นองค์ประกอบเท่ากับ 260 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียว และมี cystine ต่ำสุด (77 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมแป้งข้าว

เหนียว) ซึ่งสอดคล้องกับ USDA (2005) ที่รายงานว่าแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณ glutamic acid สูงสุด รองลงมา คือ aspartic acid และมี cystine ต่ำสุด นอกจากนี้แป้งข้าวเหนียวที่ใช้เป็นวัตถุดิบนี้ยังมี ปริมาณ isoleucine lysine methionine threonine tryptophan และ valine สูงกว่าค่าที่ USDA รายงานไว้ เนื่องจากโปรตีนข้าวมีโครงสร้างโมเลกุลของกลูเทลินซึ่งมีกรดอะมิโนหลายชนิดในปริมาณที่ สมดุลจึงเป็น โปรตีนคุณภาพดีกว่าโปรตีนในธัญชาติอื่น (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2547) และมี องค์ประกอบเป็น โปรตีนที่ไม่ก่อให้เกิดการแพ้

ตารางที่ 4.2 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในแป้งข้าวเหนียว

กรดอะมิโน*	ปริมาณกรดอะมิโนต่อ แป้งข้าวเหนียว 100 กรัม (g/100 g rice flour)	ปริมาณกรดอะมิโน ต่อ โปรตีน 100 กรัม (g/100 g protein)	ปริมาณกรดอะมิโนต่อ แป้งข้าวเหนียว 100 กรัม (USDA) (g/100 g rice flour)
alanine	0.290	4.34	0.332
arginine	0.294	4.40	0.516
glutamic acid	0.908	13.60	1.097
glycine	0.203	3.04	0.267
histidine	0.273	4.09	0.149
isoleucine	0.334	5.00	0.244
leucine	0.443	6.63	0.488
lysine	0.260	3.89	0.207
methionine	0.325	4.87	0.144
phenylalanine	0.307	4.60	0.317
cystine	0.077	1.15	0.107
aspartic acid	0.776	11.62	0.549
tyrosine	0.332	4.97	0.314
proline	0.270	4.04	0.278
serine	0.370	5.54	0.310
threonine	0.290	4.34	0.210
tryptophan	0.143	2.14	0.072
valine	0.783	11.73	0.348

* รายชื่อกรดอะมิโนที่ปรากฏเป็นตัวอักษรเข้มคือกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย

4.3 ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส

จากผลการศึกษาภาวะที่เหมาะสมโดยมีการแปรค่าความเข้มข้นเอนไซม์ร้อยละ 0.010 0.025 และ 0.040 อุณหภูมิ 80 85 และ 90 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการย่อย 90 120 และ 150 นาที ตามลำดับ ออกแบบการทดลองแบบ Box-Benken Design และติดตามปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง และร้อยละผลผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ภาวะที่สามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีร้อยละผลผลิตสูงที่สุด เป็นภาวะที่สามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีปริมาณโปรตีนน้อยที่สุด สำหรับภาวะที่สามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีปริมาณโปรตีนสูงที่สุดจะเป็นภาวะที่มีร้อยละผลผลิตน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าปริมาณโปรตีนจะมีค่าผกผันกับร้อยละผลผลิต ดังนั้นจึงไม่สามารถเลือกภาวะใดภาวะหนึ่งที่ทำให้ทั้งปริมาณโปรตีนสูงที่สุดและร้อยละผลผลิตสูงที่สุดจากทั้ง 15 ภาวะนี้ได้

ตารางที่ 4.3 ปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง และร้อยละผลผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตได้จากภาวะต่างๆ

ภาวะที่	ความเข้มข้นเอนไซม์ (%)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาในการย่อย (นาที)	ร้อยละผลผลิต*	ปริมาณโปรตีน * (%)
1	0.010	80	120	17.54 ± 0.64	37.20 ± 1.35
2	0.010	85	90	15.66 ± 0.55	41.67 ± 1.46
3	0.010	85	150	21.06 ± 0.04	30.89 ± 0.04
4	0.010	90	120	16.30 ± 0.37	40.03 ± 0.92
5	0.025	80	90	16.09 ± 1.40	40.67 ± 3.54
6	0.025	80	150	22.18 ± 0.62	29.42 ± 0.81
7	0.025	85	120	16.14 ± 0.01	40.41 ± 0.04
8	0.025	85	120	16.62 ± 0.13	39.23 ± 0.31
9	0.025	85	120	18.44 ± 0.54	35.39 ± 1.05
10	0.025	90	90	15.10 ± 0.40	43.20 ± 1.16
11	0.025	90	150	17.76 ± 1.21	36.81 ± 2.51
12	0.040	80	120	16.33 ± 0.91	40.01 ± 2.23
13	0.040	85	90	14.37 ± 1.03	45.37 ± 0.08
14	0.040	85	150	16.67 ± 1.07	39.20 ± 2.53
15	0.040	90	120	18.31 ± 0.36	35.62 ± 0.71

* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 2 ซ้ำ

เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้ Response-Surface Methodology (RSM) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ศึกษากับค่าตอบสนอง พบว่าระยะเวลาในการย่อยเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละผลผลิตและปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ความเข้มข้นเอนไซม์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละผลผลิตและปริมาณโปรตีนอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chang และคณะ (1986) ที่พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นเอนไซม์สูงขึ้นอัตราการย่อยเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยหรือค่อนข้างคงที่ระดับอุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยก็มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงร้อยละผลผลิตและปริมาณโปรตีนอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) เช่นกัน สามารถแสดงสมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นเอนไซม์ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการย่อย และปริมาณ โปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง ได้ดังสมการ 4.1 ($R^2 = 0.75$)

$$\begin{aligned} \text{Protein (\%)} = & -36.9227 + 1727.39815 E + 3.17550 T - 1.44237 t + \\ & 1953.70370 E^2 - 0.022717 T^2 + (5.55093 \times 10^{-4}) t^2 \\ & - 24.06667 (ET) + 2.56111 (Et) + 0.013100 (Tt) \dots\dots\dots(4.1) \end{aligned}$$

เมื่อ E = ความเข้มข้นเอนไซม์ (%)
T = อุณหภูมิในการย่อย ($^{\circ}\text{C}$)
t = เวลาในการย่อย (นาที)

โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 85 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส แสดงในรูป 3 มิติ ได้ดังภาพที่ 4.1 4.2 และ 4.3 ตามลำดับ พบว่าระยะเวลาในการย่อยมากขึ้นปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากเอนไซม์สามารถย่อยส่วนที่เป็นสตาร์ชได้มากขึ้นทำให้โปรตีนบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้อ้อย่างอิสระ และละลายอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลว ซึ่งถูกกำจัดไปกับ supernatant หลังจากขั้นตอนการปั่นเหวี่ยงทำให้มีโปรตีนที่เหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของแข็งมีปริมาณลดลง สำหรับความเข้มข้นเอนไซม์และอุณหภูมินั้นมีผลต่อปริมาณโปรตีนอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นเอนไซม์ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการย่อย และร้อยละผลผลิต (yield) สามารถแสดงได้ดังสมการ 4.2 ($R^2 = 0.79$)

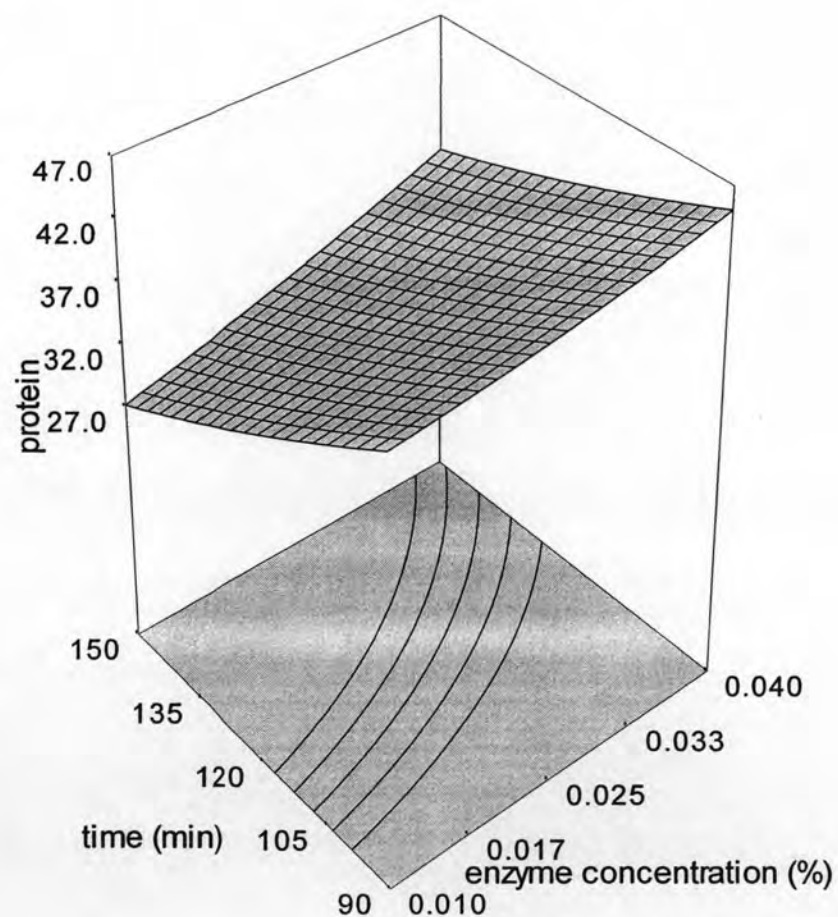
$$\begin{aligned} \text{Yield (\%)} = & 111.75227 - 687.64815 E - 2.74492 T + 0.52607 t - \\ & 1753.70370 E^2 + 0.017917 T^2 + (2.97685 \times 10^{-4}) t^2 \\ & + 10.7333 (ET) - 1.7222 (Et) - (5.71667 \times 10^{-3}) (Tt) \dots\dots\dots(4.2) \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อร้อยละผลผลิตที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส 85 องศาเซลเซียส และ 90 องศาเซลเซียส แสดงในรูปกราฟ 3 มิติ ได้ดังภาพที่ 4.4 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อระยะเวลาในการย่อยมากขึ้นร้อยละผลผลิตมีแนวโน้มสูงขึ้น และเมื่อความเข้มข้นเอนไซม์สูงขึ้นร้อยละผลผลิตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้จากงานวิจัยของ Ozbek และ Yuceer (2001) รายงานว่าทั้งโปรตีนและผลิตภัณฑ์จากการไฮโดรไลซิสสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ α -อะมิเลสได้ ดังนั้นในช่วงแรกของการย่อย เอนไซม์สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วทำให้มีปริมาณโปรตีน และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฮโดรไลซิสในสตาร์ชปริมาณสูง ซึ่งสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ทำให้การไฮโดรไลซิสสตาร์ชส่วนที่เหลือน้อยลง ส่งผลให้ปริมาณแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีร้อยละการผลิตสูงขึ้น

DESIGN-EXPERT Plot

protein
X = A: Enz. Conc. (%)
Y = C: time (min)

Actual Factor
B: Temp. = 80 °C

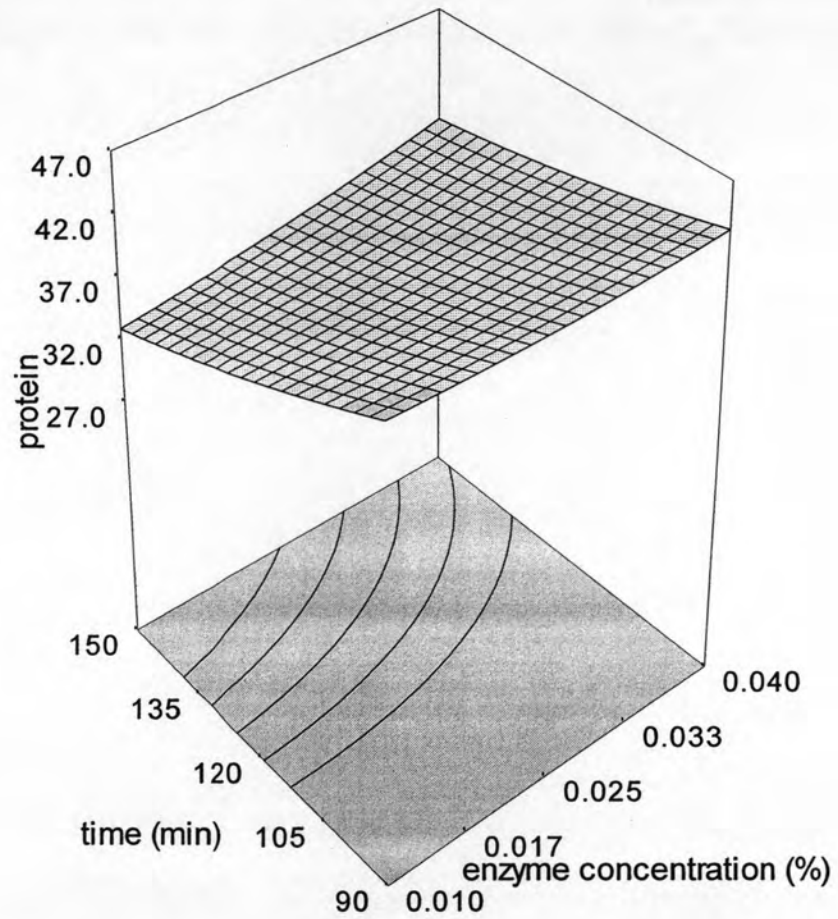


รูปที่ 4.1 อิทธิพลของระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง ที่อุณหภูมิในการย่อย 80 องศาเซลเซียส

DESIGN-EXPERT Plot

protein
 X= A: Enz. Conc. (%)
 Y= C: time (min)

Actual Factor
 B: Temp. = 85 °C

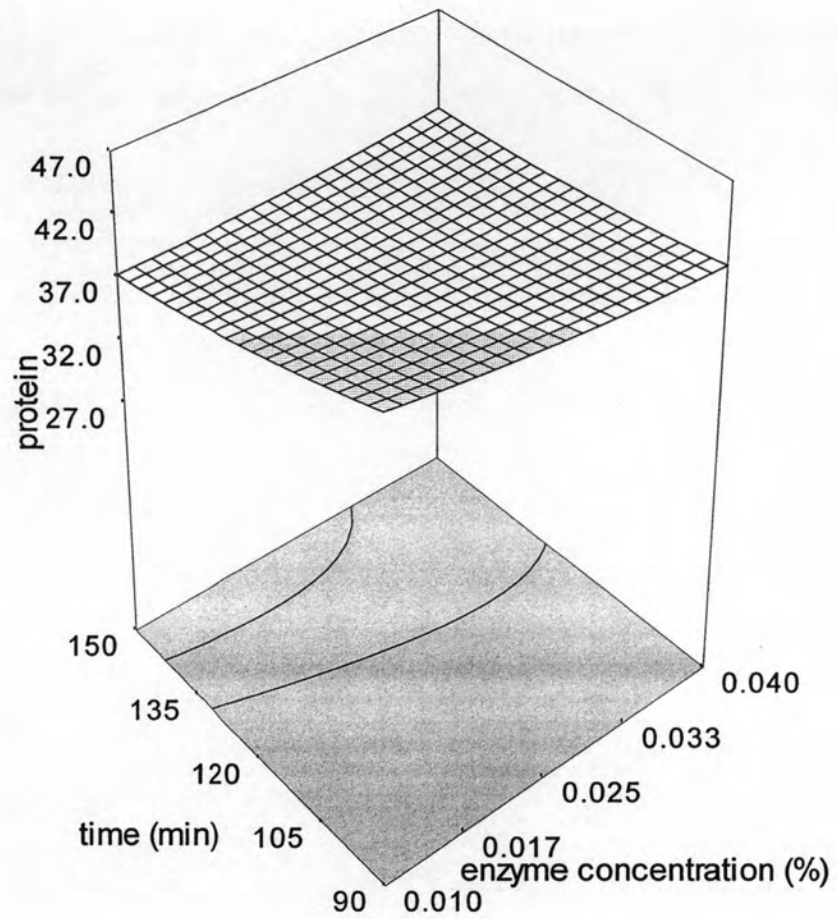


รูปที่ 4.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อปริมาณ โปรตีนใน
 แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่อุณหภูมิในการย่อย 85 องศาเซลเซียส

DESIGN-EXPERT Plot

protein
 X = A: Enz. Conc. (%)
 Y = C: time (min)

Actual Factor
 B: Temp. = 90 °C

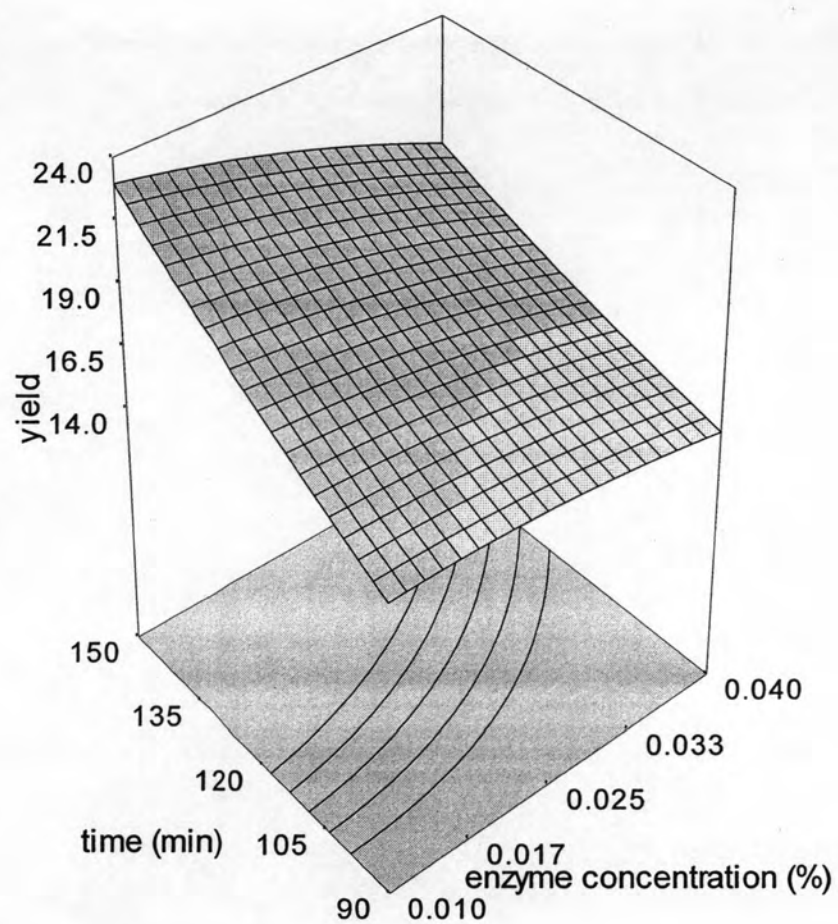


รูปที่ 4.3 อิทธิพลของระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่อุณหภูมิในการย่อย 90 องศาเซลเซียส

DESIGN-EXPERT Plot

yield
 X = A: Enz. Conc. (%)
 Y = C: time (min)

Actual Factor
 B: Temp. = 80 °C



รูปที่ 4.4 อิทธิพลของระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อร้อยละผลผลิต
 ที่อุณหภูมิในการย่อย 80 องศาเซลเซียส

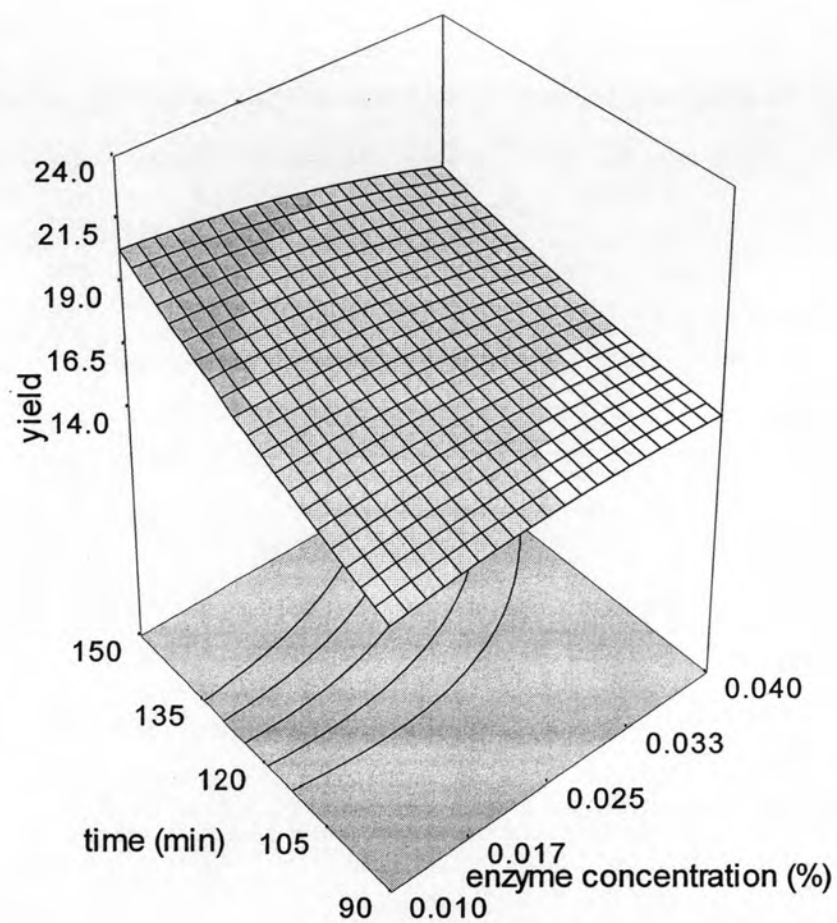
DESIGN-EXPERT Plot

yield

X = A: Enz. Conc. (%)

Y = C: time (min)

Actual Factor
B: Temp. = 85 °C



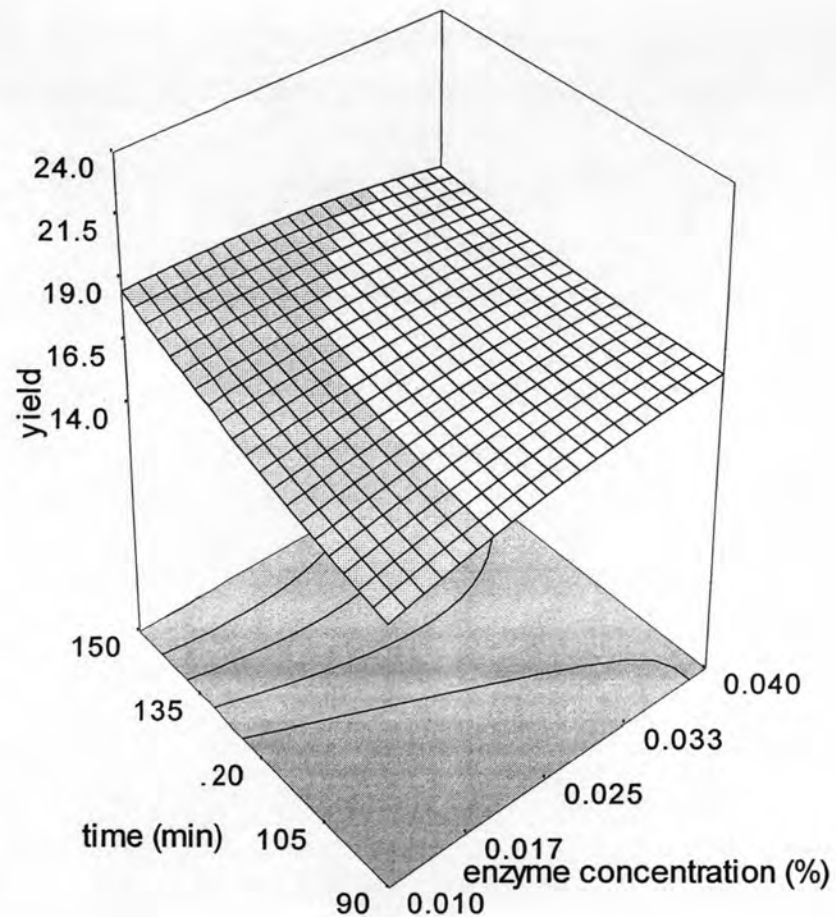
รูปที่ 4.5 อิทธิพลของระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อร้อยละผลผลิต
ที่อุณหภูมิในการย่อย 85 องศาเซลเซียส

DESIGN-EXPERT Plot

yield

X = A: Enz. Conc. (%)

Y = C: time (min)

Actual Factor
B: Temp. = 90 °C

รูปที่ 4.6 อิทธิพลของระยะเวลาในการย่อยและความเข้มข้นเอนไซม์ต่อร้อยละผลผลิต
ที่อุณหภูมิในการย่อย 90 องศาเซลเซียส

จากภาวะที่ทำการทดลองใช้ความเข้มข้นเอนไซม์ α -อะมิเลส ในช่วงร้อยละ 0.010-0.040 อุณหภูมิในช่วง 80-90 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการย่อย 90-150 นาที สามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วงร้อยละ 29.42-45.37 และมีร้อยละผลผลิตในช่วง 14.37-22.18 ในการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อให้ได้แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีปริมาณโปรตีนสูงพอควร โดยที่ยังมีร้อยละผลผลิตสูงด้วยนั้น จำเป็นจะต้องกำหนดข้อจำกัดในการผลิต เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณโปรตีนและร้อยละผลผลิตอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ทางสถิติ ($p > 0.05$) จึงกำหนดข้อจำกัดภาวะที่ต้องการ โดยใช้อุณหภูมิในการผลิตครั้งที่ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิต่ำที่สุด ความเข้มข้นเอนไซม์อยู่ในช่วงร้อยละ 0.010-0.040 ระยะเวลาในการย่อย 90-150 นาที และสามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่อย่างน้อยร้อยละ 36 และร้อยละผลผลิตสูงสุด จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert version 6.0.10 (Stat-Ease, Inc., USA) สามารถเลือกภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงได้ 3 ภาวะ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 เมื่อทำการทดลองเพื่อยืนยันการผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในทั้ง 3 ภาวะ พบว่าจากทั้ง 3 ภาวะสามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีปริมาณโปรตีน และร้อยละผลผลิต ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 36.57-37.86 และร้อยละผลผลิต 17.25-17.85 และพบว่าแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตตามภาวะทั้ง 3 มีปริมาณโปรตีนและร้อยละผลผลิตแตกต่างจากค่าทำนายโดยมีค่าเบี่ยงเบนของปริมาณโปรตีนอยู่ในช่วงร้อยละ 3.71-6.05 และค่าเบี่ยงเบนของร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วงร้อยละ 3.06-7.30 จะเห็นได้ว่าค่าเบี่ยงเบนของปริมาณโปรตีนและร้อยละผลผลิตอยู่ในช่วงไม่เกินร้อยละ 10 ดังนั้นสมการ 4.1 และ 4.2 ที่ใช้ทำนายภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสามารถนำมาใช้ในหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตจริงได้ โดยจากผลการทดลองผลิตตามภาวะดังกล่าว พบว่า ภาวะที่ 3 ที่ใช้เอนไซม์เข้มข้นร้อยละ 0.010 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการย่อย 99 นาที ซึ่งเป็นภาวะที่สามารถผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีร้อยละผลผลิตเท่ากับ 17.25 และมีปริมาณโปรตีนเท่ากับร้อยละ 37.86 เป็นภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส เนื่องจากเป็นภาวะที่ใช้เอนไซม์และเวลาในการย่อยน้อยที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนจากค่าทำนายน้อยที่สุด แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตได้มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลอ่อน รูปที่ 4.7 แสดงแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงเทียบกับแป้งข้าวเหนียว จะเห็นได้ว่าแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีลักษณะเป็นผงสีครีม เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเหนียวซึ่งมีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว สีเหลืองของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงอาจเกิดจากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ที่มีโปรตีนและน้ำตาลรีดิวซิงเป็นสารตั้งต้น รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแป้งข้าวเหนียวแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 (a) และแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงแสดงไว้ในรูปที่ 4.8 (b) จะเห็นได้ว่าแป้งข้าวเหนียวประกอบด้วยอนุภาคแป้งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหลายเหลี่ยม รูปร่างไม่แน่นอน ผิวขรุขระประกอบด้วยอนุภาคย่อยเกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนอนุภาคเหล่านี้ประกอบด้วยเม็ดสตาร์ช (starch granules) โปรตีนสะสม (storage protein) โดยเม็ดสตาร์ชไม่ปรากฏแยกออกมาจากองค์ประกอบอื่นอย่างชัดเจน ส่วนแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงประกอบด้วยอนุภาคแป้งที่มีรูปร่างไม่แน่นอน มีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ ไม่เป็นเม็ดเหมือนแป้งข้าวเหนียว เนื่องจากเม็ดสตาร์ชในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงถูกทำลายในขั้นตอนเจลาติไนเซชันและถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -อะมิเลส ที่กำลังขยาย 5,000 เท่าจะเห็นได้ว่าผิวของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีลักษณะขรุขระและเชื่อมติดกัน

ตารางที่ 4.4 ภาวะในการผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงโดยใช้เอนไซม์ α -อะมิเลส ที่ได้จากโปรแกรม Design-Expert

ภาวะที่	ความเข้มข้น เอนไซม์ (%w/v)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลาใน การย่อย (นาที)	ร้อยละผลผลิต (ค่าทำนาย)	ร้อยละผลผลิต ^{ns} * (ค่าที่ได้จากการผลิตจริง)	ค่าเบี่ยงเบน ** (%)	ปริมาณโปรตีน (%) (ค่าทำนาย)	ปริมาณโปรตีน ^{ns} * (%) (ค่าที่ได้จากการผลิตจริง)	ค่าเบี่ยงเบน ** (%)
1	0.024	80	106	16.85	17.58±0.26	+4.15	39.08	37.86±1.93	-3.22
2	0.021	80	103	16.77	17.85±0.71	+6.05	39.24	36.57±1.46	-7.30
3	0.010	80	99	16.61	17.25±0.91	+3.71	39.02	37.86±0.83	-3.06

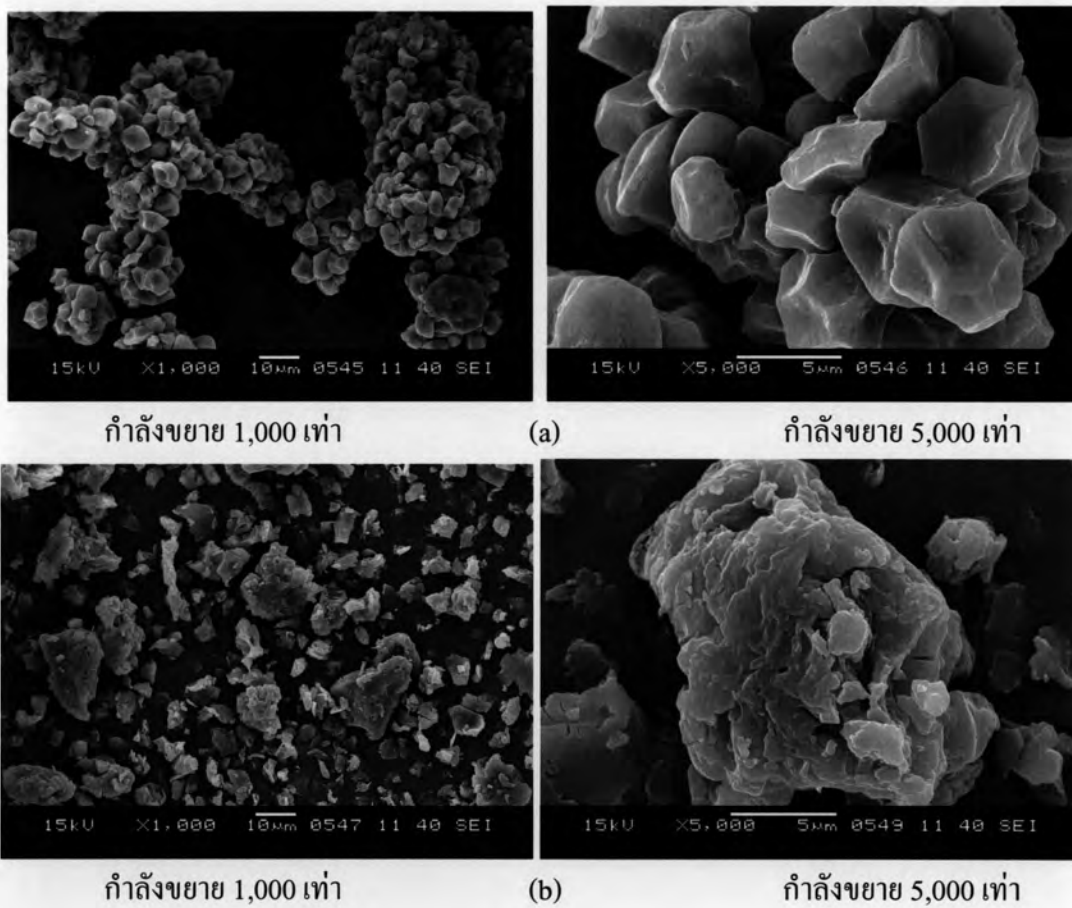
ns ค่าที่อยู่ในสควมภ์เดียวกันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3ซ้ำ

** ค่าเบี่ยงเบน = $\frac{\text{ค่าที่ได้จากการผลิตจริง} - \text{ค่าทำนาย}}{\text{ค่าที่ได้จากการผลิตจริง}} \times 100$



รูปที่ 4.7 แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงและแป้งข้าวเหนียว



กำลังขยาย 1,000 เท่า

(a)

กำลังขยาย 5,000 เท่า

กำลังขยาย 1,000 เท่า

(b)

กำลังขยาย 5,000 เท่า

รูปที่ 4.8 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope) ของแป้งข้าวเหนียว (a) และแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง (b) กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 5,000 เท่า ตามลำดับ

4.4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

เมื่อผลิตแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงตามภาวะที่เลือกได้จากหัวข้อ 4.3 ให้ได้ปริมาณมากเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใยหยาบ (crude fiber) ปริมาณเถ้า และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตได้ตามภาวะที่ใช้เอนไซม์ α -อะมิเลสเข้มข้นร้อยละ 0.010 อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และระยะเวลาในการย่อย 99 นาทีนั้นมีปริมาณโปรตีน (35.91 กรัมต่อ 100 กรัม) สูงกว่าในแป้งข้าวเหนียว (6.52 กรัมต่อ 100 กรัม) ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ 5.5 เท่า จากภาวะที่เลือกมาเมื่อนำมาใช้ในการผลิตปริมาณที่มากขึ้นพบว่าปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงลดลงจากที่ผลิตได้ในขั้นตอนการหาภาวะที่เหมาะสมในหัวข้อ 4.3 เนื่องจากในการผลิตแป้งข้าวเหนียวปริมาณมากนี้เป็นการผลิตแบบกะ ดังนั้นในการผลิตแต่ละครั้งอาจได้แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีปริมาณโปรตีนแตกต่างกันซึ่งปริมาณโปรตีนนี้ (35.91 กรัมต่อ 100 กรัม) เป็นค่าเฉลี่ยจากการผลิต และมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลงเป็น 2 ใน 3 ส่วนของแป้งข้าวเหนียวที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (คาร์โบไฮเดรตในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง เท่ากับ 61.88 กรัมต่อ 100 กรัม และในแป้งข้าวเหนียวเท่ากับ 92.39 กรัมต่อ 100 กรัม) สำหรับองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ไขมัน เส้นใยหยาบ มีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบปริมาณไขมันของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงกับในตารางที่ 2.5 พบว่าไขมันในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตได้มีปริมาณต่ำกว่าในงานวิจัยของ Chang และคณะ (1986) เนื่องจากในงานวิจัยของ Chang ใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบซึ่งมีอะมิโลสสูงกว่าแป้งข้าวเหนียวและอะมิโลสสามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไขมันได้ (amylose-lipid complex) ดังนั้นเมื่ออะมิโลสถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -อะมิเลสจึงทำให้ไขมันที่เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอะมิโลสสามารถอยู่เป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นไขมันในแป้งข้าวโปรตีนสูงจึงมีปริมาณสูงกว่าในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

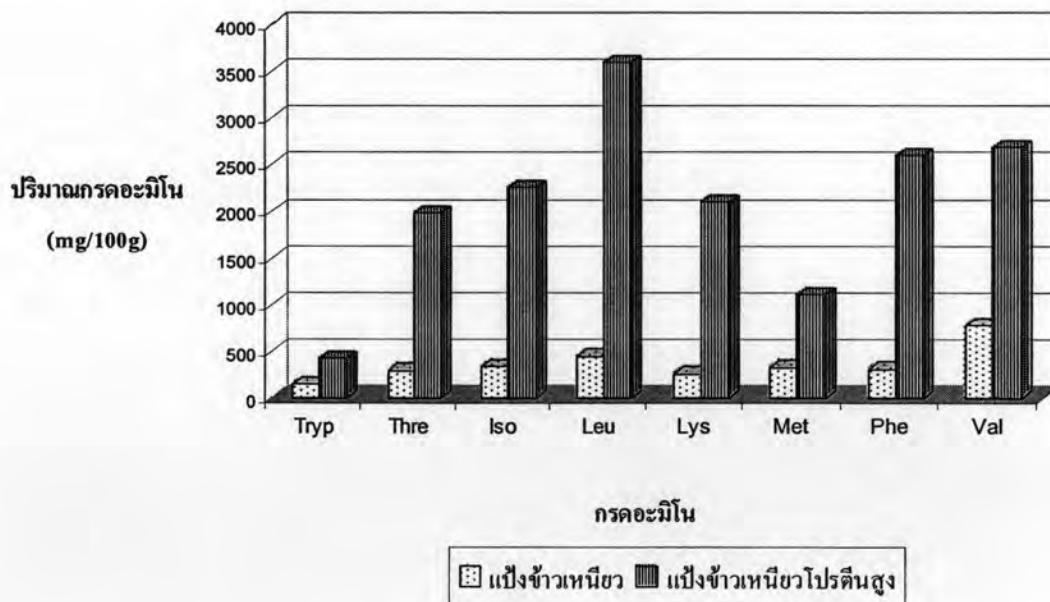
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g/100 g dry basis)
ความชื้น*	7.87±0.21
โปรตีน	35.91±0.27
ไขมัน	0.81±0.71
เส้นใยหยาบ	0.42±0.05
เถ้า	1.01±0.25
คาร์โบไฮเดรต	61.88±0.07

* ร้อยละโดยน้ำหนักเปียก

4.5 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

จากการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในแป้งข้าวเหนียวด้วยวิธี HPLC ได้แสดงผลดังตารางที่ 4.6 โดยพบว่าโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบทั้งหมด 18 ชนิด รวมถึงกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายทั้ง 8 ชนิด ได้แก่ isoleucine leucine lysine methionine phenylalanine threonine tryptophan และ valine เหมือนในแป้งข้าวเหนียวที่เป็นวัตถุดิบ แต่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นที่พบในวัตถุดิบ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีปริมาณ aspartic acid (8,699 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง) สูงสุด มี tryptophan (424 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง) ต่ำสุด และมี lysine (2,103 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง) สูงกว่าในแป้งข้าวเหนียว (260 มิลลิกรัม ต่อ 100 กรัมแป้งข้าวเหนียว) เมื่อเปรียบเทียบสัดส่วนปริมาณกรดอะมิโนต่อ 100 กรัมโปรตีนของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง กับในแป้งข้าวเหนียว จะเห็นได้ว่าแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีสัดส่วนปริมาณกรดอะมิโน arginine glutamic acid glycine isoleucine leucine lysine cystine tyrosine และ aspartic acid ต่อ 100 กรัมโปรตีนมีค่าสูงขึ้นซึ่งมี leucine lysine เป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย ส่วน tryptophan และ valine ต่อ 100 กรัมโปรตีนมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการผลิตต้องผ่านขั้นตอนให้ความร้อนซึ่งอาจทำให้กรดอะมิโนบางชนิดสลายตัว



รูปที่ 4.9 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นที่มีอยู่ในแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

ตารางที่ 4.6 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

กรดอะมิโน	ปริมาณกรดอะมิโนต่อ	ปริมาณกรดอะมิโนต่อ
	แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง 100 กรัม (g/100 g high protein glutinous rice flour)	โปรตีน 100 กรัม (g/100 g protein)
Alanine	1.986	3.88
Arginine	4.535	8.86
Glutamic acid	7.475	14.60
Glycine	1.904	3.72
Histidine	1.757	3.43
Isoleucine	2.256	4.41
Leucine	3.596	7.03
Lysine	2.103	4.11
Methionine	1.108	2.16
Phenylalanine	2.603	5.09
Cystine	1.278	2.50
Aspartic acid	8.699	16.99
Tyrosine	2.599	5.08
Proline	1.623	3.17
Serine	2.571	5.02
Threonine	1.986	3.88
Tryptophan	0.424	0.83
Valine	2.683	5.24

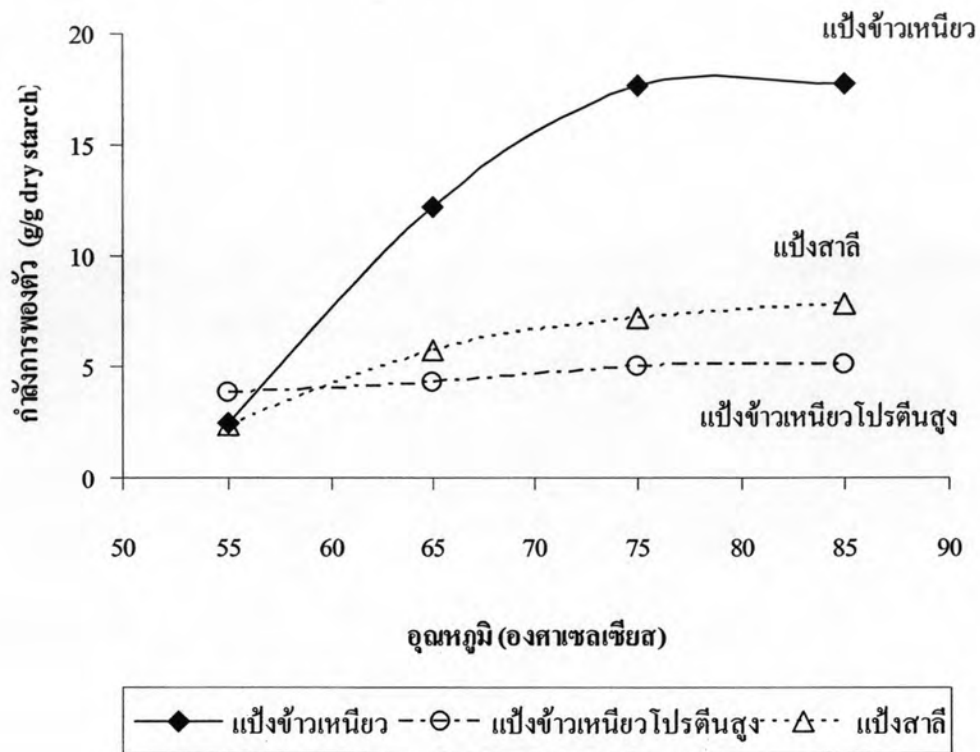
* รายชื่อกรดอะมิโนที่ปรากฏเป็นตัวอักษรเข้มคือกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกาย

4.6 สมบัติเชิงหน้าที่ของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

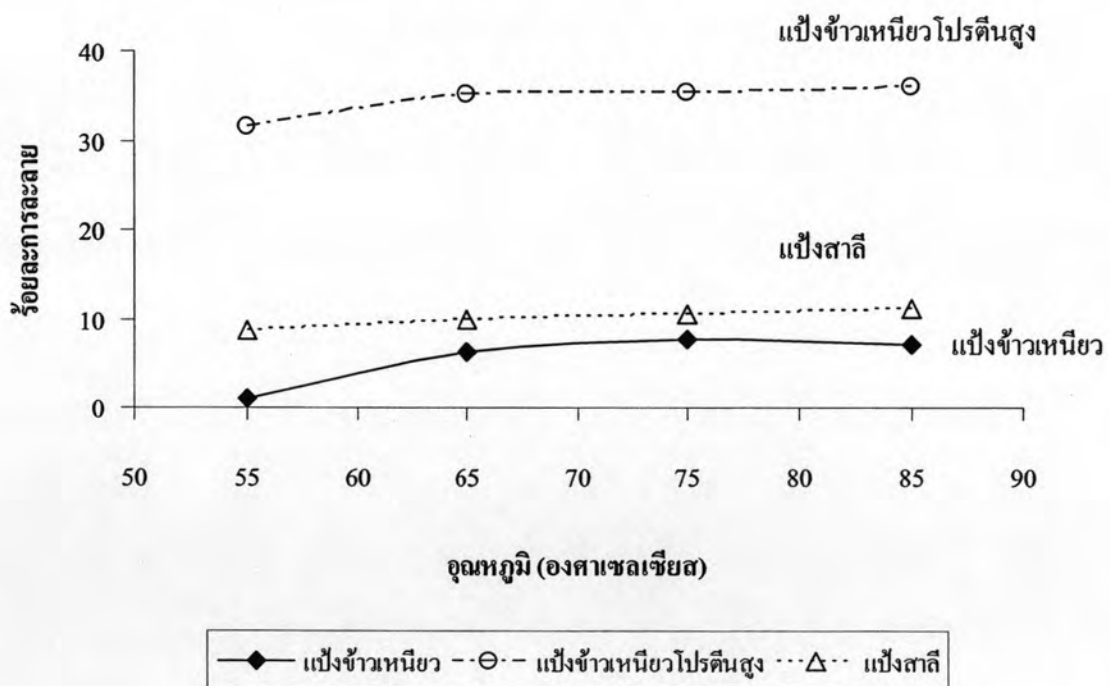
4.6.1 กำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

เมื่อศึกษากำลังการพองตัวและร้อยละการละลายของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง โดยวัดค่าการพองตัวและการละลายของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่อุณหภูมิ 55-85 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีกำลังการพองตัวสูงขึ้นแต่ก็ยังต่ำกว่ากำลังการพองตัวของแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลี ดังแสดงในภาพที่ 4.9 โดยแป้งข้าวเหนียวมีกำลังการพอง

ตัวที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส สูงสุด (17.73 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) รองลงมาเป็นแป้งสาลี (7.84 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) และแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีกำลังการพองตัวต่ำที่สุด (5.11 กรัมต่อกรัมแป้งแห้ง) ตามลำดับ สมบัติการพองตัวและการละลายนั้นเกิดจากเม็ดสตาร์ชซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในแป้งเกิดการดูดซับน้ำและมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เนื่องจากเม็ดสตาร์ชส่วนใหญ่ในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงนั้นถูกทำลายไปในขั้นตอนการเจลาติไนซ์และถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส จึงทำให้แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ชนินันท์ วรรณะหทัย (2542) ที่พบว่าข้าวเหนียวที่มีโปรตีนสูงจะมีกำลังการพองตัวต่ำกว่าข้าวเหนียวที่มีโปรตีนต่ำกว่า เนื่องจากพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนเกาะเกี่ยวกับเม็ดสตาร์ชซึ่งขัดขวางการดูดซับน้ำของเม็ดแป้งทำให้แป้งพองตัวได้น้อย โดยในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีปริมาณกรดอะมิโน cystine สูงขึ้นซึ่งแสดงให้เห็นว่ามีพันธะไดซัลไฟด์มากขึ้นทำให้เม็ดแป้งพองตัวและดูดซับน้ำได้น้อยลง สำหรับแป้งข้าวเหนยวนั้นมีกำลังการพองตัวสูงกว่าแป้งสาลีมาก เนื่องจากแป้งสาลีมีปริมาณอะมิโลสและไขมันสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว โดยมีรายงานว่าอะมิโลส และไขมันเป็นองค์ประกอบที่ทำให้โครงสร้างผลึกของเม็ดสตาร์ชถูกทำลายได้ยากเมื่อได้รับความร้อน (Lii และคณะ, 1995; 1996; Tsai และคณะ, 1997) เนื่องจากอะมิโลสที่ขนาดโมเลกุลใหญ่เกิดเป็นเกลียวคู่กับองค์ประกอบอื่นในเม็ดสตาร์ช มีผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายในเม็ดสตาร์ชเพิ่มสูงขึ้น ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงในการทำให้เม็ดสตาร์ชพองตัว ในส่วนของร้อยละการละลายนั้นพบว่า แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีร้อยละการละลายสูงกว่าแป้งข้าวเหนียว และแป้งข้าวสาลี ดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีร้อยละการละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส สูงที่สุด (35.88) รองลงมาเป็นแป้งสาลี (11.08) และแป้งข้าวเหนียวมีร้อยละการละลายต่ำที่สุด (7.16) ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงถูกเอนไซม์ตัดพันธะ α -1,4 glucosidic linkage ภายในโมเลกุลสตาร์ชเกิดเป็น oligosaccharide หรือ saccharide มากขึ้นจึงสามารถละลายน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้การย่อยยังทำให้โปรตีนบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้อยู่อย่างอิสระ



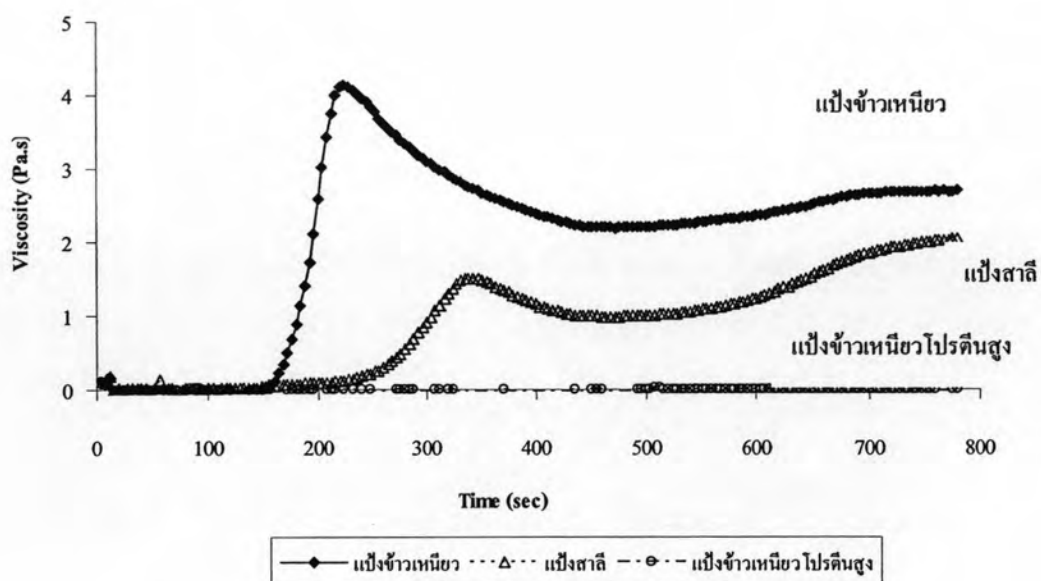
รูปที่ 4.10 กำลังการพองตัวของแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง และแป้งสาลี



รูปที่ 4.11 ร้อยละการละลายของแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง และแป้งสาลี

4.6.2 การเปลี่ยนแปลงความหนืด โดยใช้เครื่องวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อได้รับความร้อน (Rapid-Viscoanalyzer, RVA)

ผลจากการวัดการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงเทียบกับแป้งข้าวเหนียวและแป้งข้าวสาลี พบว่าแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงไม่มีสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อได้รับความร้อนทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการผลิตน้ำแป้งต้องผ่านกระบวนการเจลาติไนเซชัน และถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -อะมิเลส ทำให้แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ผลิตได้ไม่มีสมบัติการเปลี่ยนแปลงความหนืดเมื่อได้รับความร้อน เส้นกราฟของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงไม่ปรากฏ peak ที่ชัดเจน เมื่อเทียบกับแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลี ดังแสดงในภาพที่ 4.11 สำหรับการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลีดังแสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า peak viscosity ของแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลีเท่ากับ 4.202 Pa.s และ 1.481 Pa.s ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าแป้งข้าวเหนียวมีค่า peak viscosity สูงกว่าแป้งสาลี เนื่องจากแป้งสาลีมีกำลังการพองตัวปานกลาง ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณอะมิโลสและไขมันดังที่ได้อธิบายในสมบัติกำลังการพองตัว จึงทำให้แป้งสาลีมีความหนืดต่ำกว่าแป้งข้าวเหนียว นอกจากนี้แป้งข้าวเหนียวยังมี pasting temperature ต่ำกว่าแป้งสาลี โดยแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลี pasting temperature เท่ากับ 68.2 องศาเซลเซียส และ 85.93 องศาเซลเซียส ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแป้งข้าวเหนียวเกิดการเจลาติไนซ์ได้ง่ายกว่าแป้งสาลี ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณอะมิโลสน้อยกว่าแป้งสาลี จึงเกิดเจลาติไนซ์ได้ง่ายกว่า ซึ่งค่า pasting temperature ที่พบในการทดลองนี้สอดคล้องกับค่า gelatinization temperature ของแป้งข้าวเหนียว (55-65 องศาเซลเซียส) ที่ Belitz และ Grosch (1986) รายงานไว้ ทั้งนี้ช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์นั้นจะผันแปรตามวิธีที่ใช้วัด และอัตราส่วนของแป้งต่อน้ำ (นิริยา รัตนาปนนท์, 2545) ส่วน peak time ของแป้งข้าวเหนียวและแป้งสาลีพบว่ามีค่าเท่ากับ 3.70 นาที และ 5.73 นาที ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า แป้งข้าวเหนียวมีค่า peak time ต่ำกว่าแป้งสาลี แสดงว่าแป้งข้าวเหนียวมีความหนืดที่คงทนต่อความร้อนและแรงเจือนน้อยกว่าแป้งสาลี



รูปที่ 4.12 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเหนียว แป้งสาลี และแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง

ตารางที่ 4.7 ค่าการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง และแป้งสาลี

แป้ง	แป้งข้าวเหนียว*	แป้งข้าวสาลี*	แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง
Peak (Pa.s)	4.203 ± 0.01 ^a	1.482 ± 0.03 ^b	-
Trough (Pa.s)	2.224 ± 0.05 ^a	0.947 ± 0.03 ^b	-
Breakdown (Pa.s)	1.979 ± 0.05 ^a	0.508 ± 0.02 ^b	-
Final Viscosity (Pa.s)	2.721 ± 0.04 ^a	2.203 ± 0.03 ^b	-
Set back (Pa.s)	0.497 ± 0.001 ^b	1.060 ± 0.01 ^a	-
Peak time (min)	3.700 ± 0.05 ^b	5.730 ± 0.00 ^a	-
Pasting Temperature (°C)	68.200 ± 0.64 ^b	85.930 ± 0.60 ^a	-

- ไม่สามารถวัดค่าได้

a,b,c...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันแถวเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

4.7 การทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในการผลิตบะหมี่ white salted noodle

4.7.1 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวสาลี ได้แก่ ปริมาณความชื้น ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณเส้นใยหยาบ ปริมาณเถ้า และคำนวณปริมาณคาร์โบไฮเดรตได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า แป้งสาลีมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่ 8.26 กรัมต่อ 100 กรัม ซึ่งสูงกว่าปริมาณโปรตีนในแป้งข้าวเหนียว (6.52 กรัมต่อ 100 กรัม) โปรตีนในแป้งสาลีมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างจากธัญพืชชนิดอื่น ทั้งในด้านปริมาณและลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพ ลักษณะโครงสร้างของโปรตีนในแป้งสาลีมี 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นกลูเตน และส่วนที่ไม่เป็นกลูเตน ส่วนที่เป็นกลูเตนประกอบด้วยโปรตีนที่ละลายทั้งในกรดและด่าง มี 2 ชนิด คือ gliadin และ glutenin ในปริมาณใกล้เคียงกัน โดย gliadin เป็นโปรตีนที่ให้ลักษณะ สภาพยืดหยุ่นน้อย ส่วน glutenin เป็นโปรตีนที่ให้ลักษณะสภาพยืดหยุ่นมาก และสามารถรวมตัวกับไขมันได้ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540) ปริมาณโปรตีนและคุณภาพของกลูเตนในแป้งสาลีมีผลต่อความยืดหยุ่น และความคงตัวของเส้นบะหมี่ (อรอนงค์ นัยวิกุล, 2540)

ตารางที่ 4.8 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งสาลี

องค์ประกอบ	ปริมาณ (g/100 g dry basis)**
ความชื้น*	9.77±0.33
โปรตีน	8.26±0.06
ไขมัน	0.81±0.16
เส้นใยหยาบ	0.21±0.05
เถ้า	0.75±0.17
คาร์โบไฮเดรต	89.97±0.05

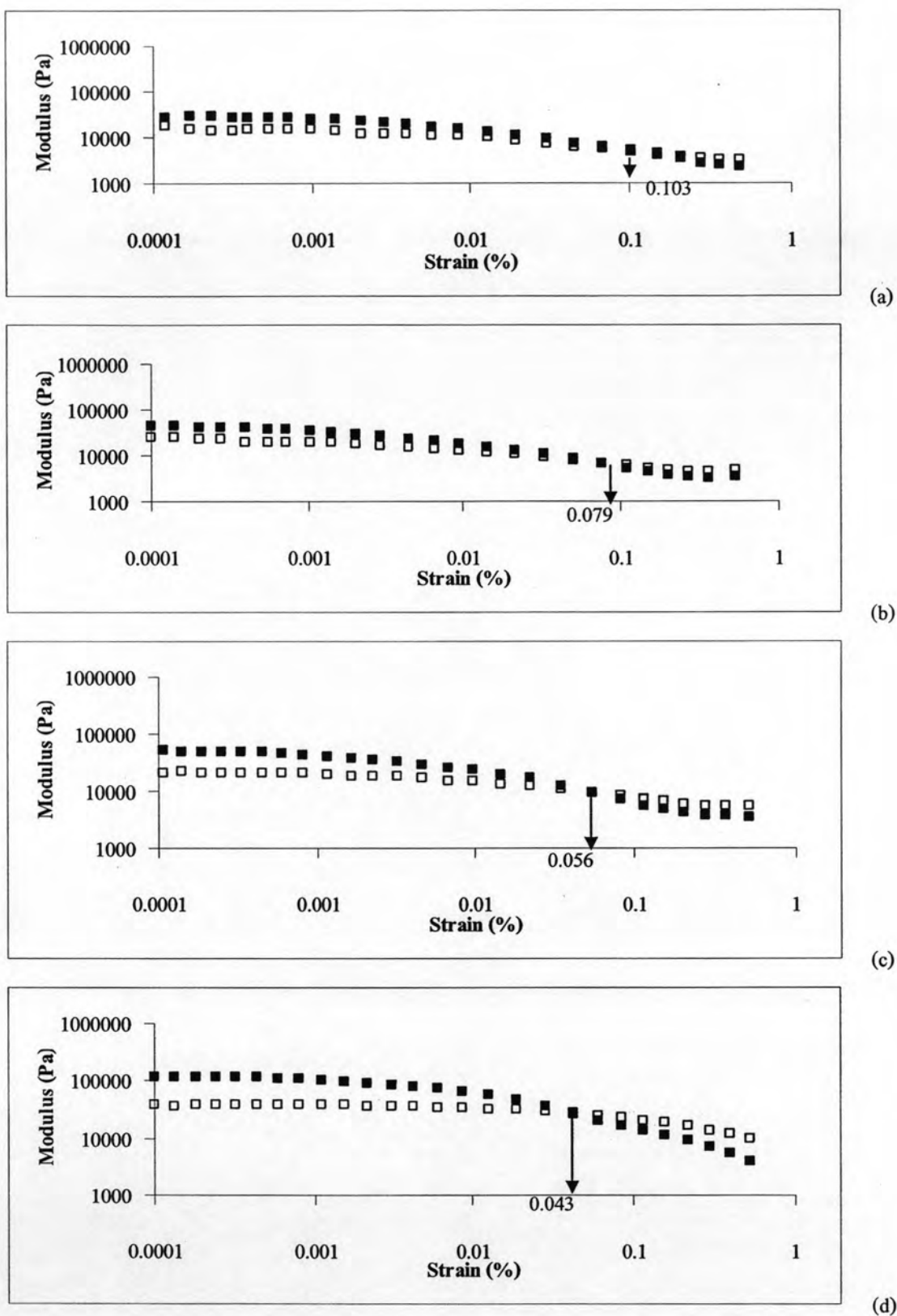
* ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก

** ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

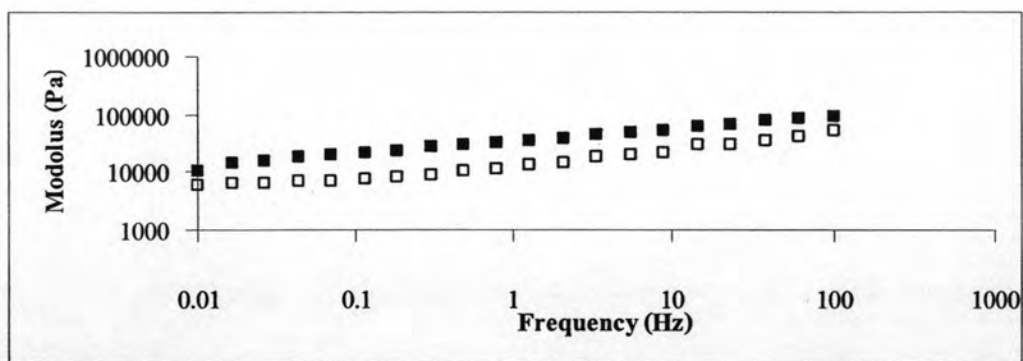
4.7.2 Rheological property ของโคบะหมี่ white salted noodle ที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในสัดส่วนต่างๆ

จากการศึกษา rheological property ของโคบะหมี่ white salted noodle ที่มีการทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในสัดส่วนต่างๆ โดย ค่า G' (elastic modulus) จะเป็นค่าที่บ่งถึงความ เป็น elastic solid ของตัวอย่าง และ ค่า G'' (viscous modulus) เป็นค่าที่บ่งถึงความ เป็น liquid ของตัวอย่าง จากภาพที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว

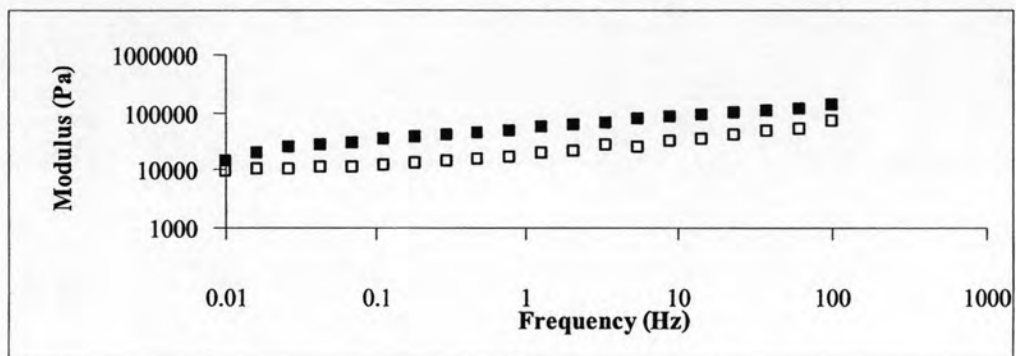
โปรตีนสูงร้อยละ 10 20 และ 30 ค่า G' จะสูงขึ้นตามลำดับ แสดงว่าโคะหมีมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อมีปริมาณแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในสูตรเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาจุดตัดระหว่างค่า G' และ G'' จะเห็นได้ว่าสูตรที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในปริมาณมากขึ้น จะมีจุดตัดระหว่างค่า G' และ G'' ที่ค่า strain ลดลงโดยโคะหมีสูตรควบคุม และสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาธิตด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 20 และ 30 มีค่า strain ณ จุดตัดของ G' และ G'' เท่ากับ 0.103, 0.079, 0.056 และ 0.043 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าโคะหมีที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในปริมาณเพิ่มทำให้โคมีความยืดหยุ่นลดลงจึงมีการสูญเสียโครงสร้างที่ค่า strain ลดลง และจากภาพที่ 4.13 ผลการทดลอง frequency sweep test จะเห็นได้ว่าโคะหมีจะมีค่า G' สูงกว่าค่า G'' ในทุกสูตร โดยโคะหมีทุกสูตรมีค่า G' และ G'' เพิ่มขึ้นตาม frequency โดยมีค่าความชันของเส้นกราฟใกล้เคียงกัน แสดงว่าโคะหมีทุกสูตรมีลักษณะการตอบสนองต่อแรงคล้ายกัน โดยโคสูตรที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในปริมาณมากขึ้นค่า G' และ G'' จะสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดเนื้อสัมผัสของโคะหมีโดยใช้เครื่อง instron texture analyzer ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสคือ เมื่อทดแทนแป้งสาธิตด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในสัดส่วนที่มากขึ้นทำให้โคะหมีมีความเหนียวและยืดหยุ่นลดลง การเพิ่มปริมาณการทดแทนแป้งสาธิตด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในปริมาณมากขึ้นทำให้โคะหมีมีความยืดหยุ่นน้อยลง เนื่องจากความยืดหยุ่นในโคะนั้นเกิดจากโปรตีนกลูเตนในแป้งสาธิต เมื่อมีการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงจึงทำให้มีปริมาณโปรตีนกลูเตนใน โคลดลง และโปรตีนในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงไม่มีสมบัติในการเกิดโคและให้ความยืดหยุ่นแก่โคได้ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าสูตรที่มีการทดแทนร้อยละ 20 และ 30 มีค่า G' ใกล้เคียงกัน และสูงกว่าสูตรอื่นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตามการทดสอบแบบ frequency sweep test นี้ให้ผลการทดสอบในเชิงคุณภาพในการศึกษาผลของการทดแทนแป้งสาธิตด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในเชิงปริมาณจำเป็นจะต้องทำการทดสอบอื่นต่อไป ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การทดสอบแบบ creep/recovery test ซึ่งจะแสดงผลในส่วนต่อไป



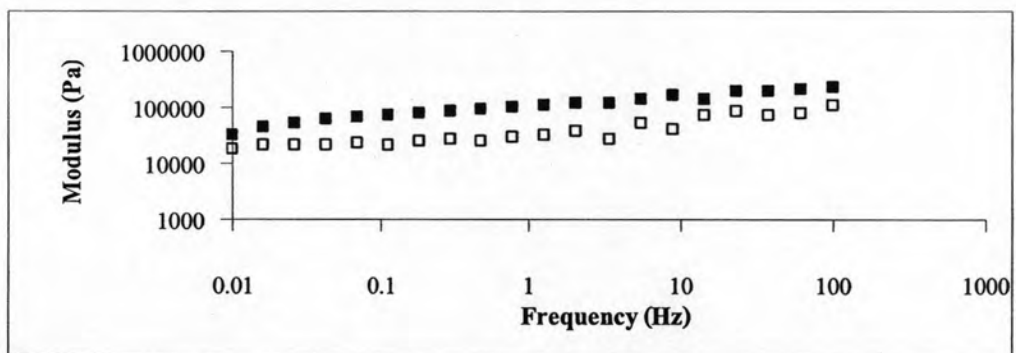
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์แบบ log-log ระหว่าง modulus และค่า strain ของโดบะหมี่ white salted noodle วัดโดย amplitude sweep test (หัววัด ETC PP40 , strain ร้อยละ 0.01- 50 ที่ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง ร้อยละ 0 (a) 10 (b) 20 (c) และ 30 (d) (■ G' □ G'')



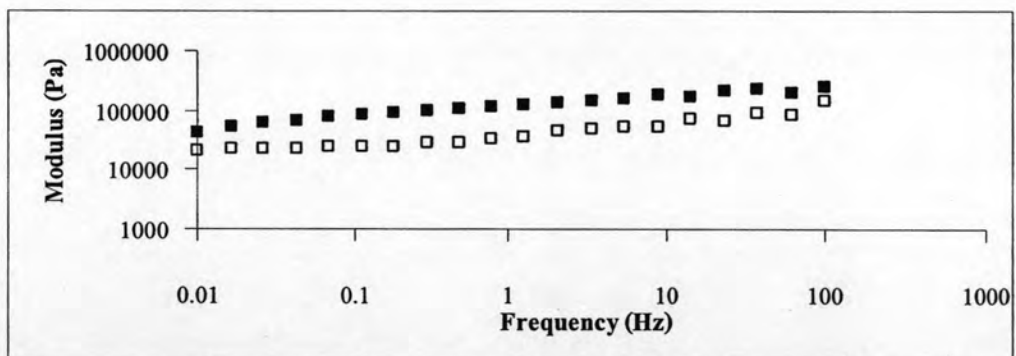
(a)



(b)



(c)

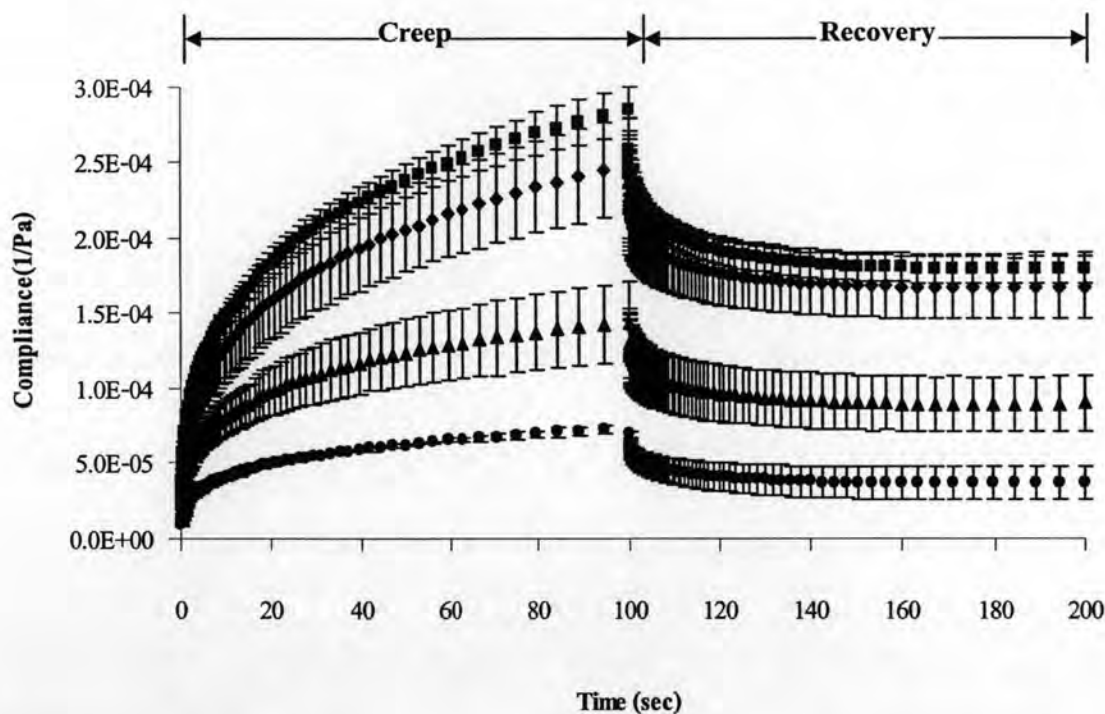


(d)

รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์แบบ log-log ระหว่าง modulus และค่า frequency ของโดบะหมี white salted noodle วัดโดย frequency sweep test (หัววัด ETC PP40 , frequency 0.01- 100 Hz, อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) ปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง ร้อยละ 0 (a) 10 (b) 20 (c) และ 30 (d) (■ G' □ G'')

จากการทดสอบ creep/ recovery test ของ โดปะหมีจะ ได้ค่า instantaneous compliance (J_0) ซึ่งเป็นค่าการเปลี่ยนรูปร่างของวัสดุเมื่อได้รับแรงกระทำซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า instantaneous elastic modulus (G_0) โดย $J_0 = 1/ G_0$ ค่า retarded compliance (J_1) ซึ่งสัมพันธ์กับค่า retard modulus (G_1) โดย $J_1 = 1/ G_1$ และ Newtonian viscosity (μ_0) เป็นค่าความหนืดในส่วนที่เป็นของเหลวโดยรูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า creep compliance และเวลาในการทดสอบของ โดปะหมี white salted noodle เมื่อใช้สมการที่ 2.3 สามารถหาค่า J_0 , J_1 ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณการทดแทนทำให้ค่า J_0 มีแนวโน้มลดลง โดยในสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงสูตรควบคุมมีค่า J_0 เท่ากับ $3.25 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ และในสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 20 และ 30 มีค่า $4.63 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ $1.39 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ และ $1.056 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ ตามลำดับ สูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 มีค่า J_0 สูงกว่าสูตรอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับ โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีค่า J_0 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่าน้อยกว่าสูตรควบคุม และสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_0 และค่า G_0 สามารถอธิบายได้ว่า โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่มีค่า J_0 ลดลงนั้นจะมีค่า G_0 สูงขึ้น นั่นคือ โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงมีสมบัติในการต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยทันทีสูงขึ้น โดย โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 จะมีสมบัติต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยทันทีมากกว่าสูตรควบคุม และ โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่า J_1 ใน โดปะหมีสูตรควบคุม ($1.05 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$) และ โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 ($1.17 \times 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$) มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่สูงกว่าใน โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 20 ($6.81 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$) และ 30 ($3.11 \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 20 มีค่า J_1 สูงกว่าใน โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 30 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากความสัมพันธ์ระหว่างค่า J_1 กับค่า G_1 สามารถอธิบายได้ว่า โดปะหมีที่มีค่า J_1 ลดลงนั้นจะมีค่า G_1 สูงขึ้น นั่นคือ โดปะหมีมีสมบัติต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหน่วงมากขึ้น เมื่อมีการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงเพิ่มขึ้น โดยสูตรควบคุม และ โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 มี สมบัติในการต้านการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบหน่วงน้อยกว่าในสูตรที่ทดแทนร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ นั่นคือ โดปะหมีสูตรควบคุม และ โดปะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 ยืดหยุ่นดีกว่า

โคะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 20 และร้อยละ 30 ตามลำดับ สำหรับค่า μ_0 ของโคะหมีในสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 30 (2.97×10^6 Pa.s) มีค่ามากที่สุด รองลงมาเป็นโคะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 20 (1.41×10^6 Pa.s) โคะหมีสูตรควบคุม (8.18×10^5 Pa.s) และโคะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 (7.34×10^5 Pa.s) ตามลำดับ โดยค่า μ_0 ในโคะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 30 และ 20 มีค่าแตกต่างจากสูตรอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับค่า μ_0 ในโคะหมีสูตรควบคุม และโคะหมีสูตรที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 10 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แสดงว่าเมื่อมีการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในปริมาณมากขึ้น โคะหมีจะมีค่าความหนืดในส่วนที่เป็นของเหลวสูงขึ้น แต่ทำให้ความยืดหยุ่นลดลง สอดคล้องกับผลการทดลอง amplitude sweep test และ frequency sweep เนื่องจากในแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงไม่มีโปรตีนที่ให้สมบัติให้ความยืดหยุ่น และการทดแทนแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงนี้ทำให้สัดส่วนของปริมาณโปรตีนจากแป้งสาลีที่มีสมบัติยืดหยุ่นมีปริมาณน้อยลง จึงทำให้โคะหมีที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในปริมาณสูงขึ้นไปมีความยืดหยุ่นลดลง



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า creep compliance และเวลาของโคะหมี white salted noodle วัด โดย creep recovery test (stress 10 Pa, creep time 100 วินาที, recovery time 100 วินาที, อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส)
(◆ 0% (control) ■ 10% ▲ 20% และ ● 30%)

ตารางที่ 4.9 ค่า creep compliance ของโคพะหมี่

สูตร	J_0 (1/Pa)*	J_1 (1/Pa)*	λ_{ret} (s)*	μ_0 (Pa.s)*
control	$3.25 \times 10^{-5} \pm 6.37 \times 10^{-6b}$	$1.05 \times 10^{-4} \pm 1.43 \times 10^{-5a}$	5.11 ± 0.79^{ab}	$8.18 \times 10^5 \pm 88458^c$
10%	$4.63 \times 10^{-5} \pm 8.41 \times 10^{-6a}$	$1.17 \times 10^{-4} \pm 7.49 \times 10^{-6a}$	5.84 ± 0.89^a	$7.34 \times 10^5 \pm 22050^c$
20%	$1.39 \times 10^{-5} \pm 5.43 \times 10^{-6c}$	$6.81 \times 10^{-5} \pm 9.29 \times 10^{-6b}$	3.07 ± 0.49^c	$1.41 \times 10^6 \pm 285955^b$
30%	$1.056 \times 10^{-5} \pm 2.02 \times 10^{-6c}$	$3.11 \times 10^{-5} \pm 3.40 \times 10^{-6c}$	3.99 ± 0.93^{bc}	$2.97 \times 10^6 \pm 141677^a$

a,b,c...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันในสดมภ์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ซ้ำ

4.7.3 สมบัติของพะหมี่หลังต้มสุก

จากการวัด cooking loss ของพะหมี่สูตรต่างๆ พบว่าเมื่อทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงในสูตรการผลิตพะหมี่สูงขึ้น ค่า cooking loss มีค่ามากขึ้น โดยในสูตรที่ทดแทนร้อยละ 30 จะมีค่า cooking loss สูงที่สุด (ร้อยละ 15.30) รองลงมาในสูตรที่ทดแทนร้อยละ 20 (ร้อยละ 14.42) และร้อยละ 10 (ร้อยละ 3.11) ตามลำดับ เนื่องจากแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงสามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับค่าร้อยละการละลายของแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง จึงทำให้แป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงบางส่วนละลาย ออกมามากในขั้นตอนการต้มเส้นพะหมี่ เมื่อวัดเนื้อสัมผัสของพะหมี่ลวกสุกด้วยเครื่อง instron texture analyzer โดยวัดแรงดึง (tension) เพื่อวัดค่าความเหนียวของพะหมี่ โดยดูจากแรงสูงสุดที่ใช้ดึงให้เส้นพะหมี่ขาดออกจากกัน และค่า extension ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.10 ค่า tension ของพะหมี่สูตร control (28.27 g) มีค่าสูงกว่าในสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 30 (26.19 g) ร้อยละ 20 (25.60 g) และร้อยละ 10 (26.10 g) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ค่า tension ของพะหมี่ในสูตรที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงร้อยละ 30 ร้อยละ 20 และร้อยละ 10 มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) สำหรับค่า extension ระยะทางที่เส้นพะหมี่ยืดตัวได้พบว่าพะหมี่ต้มสุกทั้ง 4 สูตรมีค่า extension ในช่วง 3.42-4.67 มิลลิเมตร ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

ตารางที่ 4.10 สมบัติของบะหมี่ white salted noodle หลังต้มสุก

ปริมาณการทดแทน (%)	Cooking loss* (%)	Tension** (g _f)	Extension ^{ns**} (mm.)
0	1.79±0.14 ^d	28.27±0.93 ^a	3.42±1.07
10	3.11±0.34 ^c	26.10±0.77 ^b	3.58±1.53
20	14.42±0.10 ^b	25.60±0.48 ^b	4.67±1.37
30	15.30±0.24 ^a	26.19±0.79 ^b	3.42±1.69

ns ค่าที่อยู่ในแถวตั้งเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

a,b,c...ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกัน ในสดมภ์เดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

* ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 3 ชั่วโมง

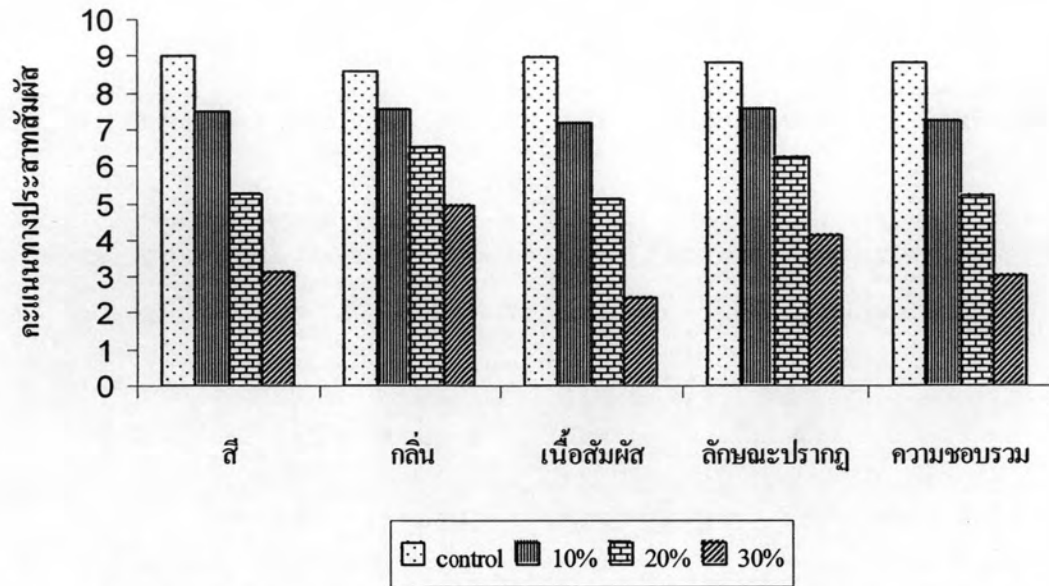
** ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ 15 ชั่วโมง

จากตาราง 4.10 พบว่าความเหนียวของเส้นบะหมี่หลังต้มสุกนั้นมีค่า tension ลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูง เส้นบะหมี่หลังต้มสุกจะมีลักษณะขาดและหักง่าย นอกจากนี้จะมีแรงต้านการดึงลดลงแล้วยังทำให้เกิดของแข็งเหลืออยู่ในภาชนะหลังต้มสุก ที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณการทดแทนที่เพิ่มขึ้นอีกด้วย โดยเฉพาะในการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงที่ปริมาณ 30% โดยเส้นบะหมี่จะมีการหักง่ายในขณะต้มและมีของแข็งเหลืออยู่ในน้ำที่ใช้ต้ม ซึ่งผลดังกล่าวเกิดจากโค ไม่งคั่ว เนื่องจากมีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งโปรตีนสูงทำให้ปริมาณแป้งสาลีลดลง ส่งผลให้โปรตีนกลูเตนซึ่งเป็น โครงร่างหลักลดลง และ โครงร่างที่เกิดขึ้นจากกลูเตนที่เหลืออยู่ไม่แข็งแรงพอที่จะเก็บองค์ประกอบส่วนอื่นเอาไว้ได้ จึงทำให้เกิดการสูญเสียของแข็งบางส่วนในขณะต้มสูงกว่าบะหมี่ที่ใช้แป้งสาลีเพียงอย่างเดียว

4.7.4 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของบะหมี่ต้มสุก

บะหมี่ที่ผลิตได้จะนำมาต้มสุกในน้ำเดือดเป็นเวลา 1-2 นาที แช่ในน้ำเย็น สะเด็ดน้ำแล้วทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสทางด้าน สี (สีเหลือง คล้ำ → สีขาวนวล) กลิ่น (มีกลิ่นผิดปกติ → ไม่มีกลิ่น) เนื้อสัมผัส (นิ่มละ → เหนียวนุ่ม) ลักษณะปรากฏ (เส้นดูแห้งหยาบ → เส้นมีความมันวาว เนียน) และความชอบรวม (ไม่ชอบมาก → ชอบมากที่สุด) มีสเกลคะแนน 1-10 โดยใช้ผู้ทดสอบทั้งฝึกฝนจำนวน 15 คน ได้ผลคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสดังแสดงในรูปที่ 4.16 และตารางที่ ง.1 โดยคะแนนคุณภาพด้านสีของบะหมี่มีค่าลดลงโดยในสูตรควบคุมมีคะแนนคุณภาพสีเท่ากับ 9.02 ในสูตรที่ทดแทนร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีคะแนนคุณภาพด้านสี เท่ากับ 7.46 5.27 และ 3.14 ตามลำดับ ค่าสีมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คะแนนคุณภาพด้านกลิ่นของบะหมี่สูตร control และสูตรที่ทดแทนร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีค่าเท่ากับ 8.59 7.51 6.48 และ 4.91 ตามลำดับ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเส้นบะหมี่ที่มีการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงเพิ่มขึ้นจะมีสีเหลืองคล้ำและมีกลิ่นผิดปกติมากขึ้น โดยเฉพาะในสูตรที่ทดแทนร้อยละ 30 ซึ่งมีคะแนนด้านสีและลักษณะปรากฏต่ำกว่า 5 สำหรับคะแนนคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของบะหมี่ ในสูตรควบคุม และสูตรที่ทดแทนร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีค่าเท่ากับ 8.98 7.17 5.19 และ 2.39 ตามลำดับ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คะแนนคุณภาพด้านลักษณะปรากฏของบะหมี่ ในสูตรควบคุม และสูตรที่ทดแทนร้อยละ 10 ร้อยละ 20 และร้อยละ 30 มีค่าเท่ากับ 8.78 7.55 6.20 และ 4.11 ตามลำดับ มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จะเห็นได้ว่าบะหมี่ที่มีการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงในปริมาณมากขึ้นทำให้บะหมี่มีเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มและมีความมันวาวลดลง ซึ่งลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียวนุ่มลดลงเมื่อทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงในปริมาณสูงขึ้น สอดคล้องกับค่าสมบัติด้านเนื้อสัมผัสที่วัดด้วยเครื่อง instron texture analyzer แต่ผู้ทดสอบจะสามารถสังเกตความแตกต่างของเนื้อสัมผัสความนุ่มเหนียวของบะหมี่ได้ดีกว่าค่าความเหนียวที่วัดได้จากเครื่อง instron texture analyzer ซึ่งแสดงค่าความเหนียวของบะหมี่ที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงทุกสูตรแตกต่างจากสูตรที่ไม่มีการทดแทนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ระหว่างสูตรที่มีการทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงในสัดส่วนต่างๆ บะหมี่มีค่าความเหนียวที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยคะแนนความชอบโดยรวมสำหรับเส้นบะหมี่ที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงร้อยละ 30 มีคะแนนน้อยที่สุดคือ 2.99 ส่วนเส้นบะหมี่ที่ทดแทนด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงร้อยละ 10 และร้อยละ 20 ได้คะแนนความชอบโดยรวม 7.55 และ 6.20 ตามลำดับ โดยค่าความชอบทั้งสามค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงในการผลิตบะหมี่ white salted noodle ร้อยละ 10 และร้อยละ 20 นั้นผู้บริโภคสามารถยอมรับได้โดยมีคะแนนการทดสอบมากกว่า 5 สำหรับสูตรที่ทดแทนร้อยละ 30 มีคะแนนต่ำกว่า 5 จึงเป็นสูตรที่ผู้บริโภคน่าจะไม่ยอมรับ ดังนั้นการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงในการผลิตบะหมี่ white salted noodle สามารถทดแทนไม่ควรเกินร้อยละ 20 ในการนำแป้งข้าวเหนียว โปรตีนสูงไปใช้ในการผลิตเส้นบะหมี่นั้นต้องได้รับการพัฒนาสูตรต่อไป หรืออาจนำไปใช้ในการผลิตภัณฑ์อาหารอื่น



รูปที่ 4.16 สมบัติทางประสาทสัมผัสของบะหมี่ white salted noodle ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเหนียวโปรตีนสูงต่ำสุด