



ผลของแคลเซียมซัลเฟตและแมกเนเซียมซัลเฟตต่อสมบัติทางกายภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปปราศจากกลูเตนจากแป้งผสมและโปรตีนจากถั่วลันเตา
Effect of Calcium Sulfate and Magnesium Sulfate on Physical Properties of Gluten-Free Instant Noodle Made from Mixed Flours and Pea Protein

สายธารธรรม เวศร์ภาดา, สิริندا กุสุมภ์*

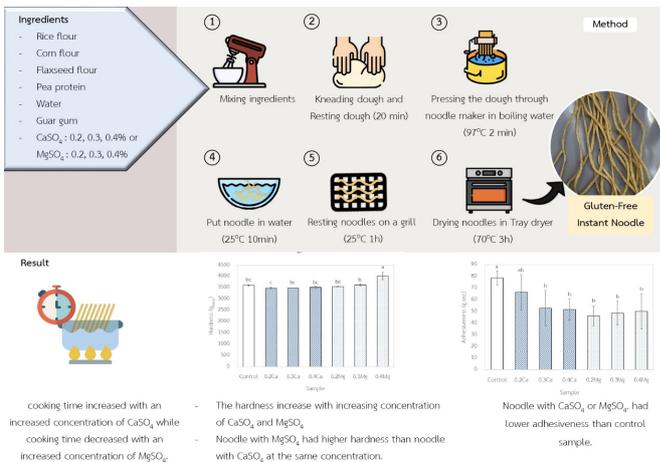
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Saitarntarm Wetpada, Sirinda Kusump*

Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani 12120

Received 9 May 2025; Received in revised 18 July 2025; Accepted 25 July 2025

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the effect of calcium and magnesium salts on the physical properties of gluten-free instant noodles made from a mixture of rice flour, corn flour, flaxseed flour, and pea protein. Calcium sulfate and magnesium sulfate were added at concentrations of 0-0.4% (w/w). The ingredients were mixed, and the resulting dough was kneaded and pressed through a noodle maker into boiling water at 97 °C for 2 minutes. The obtained noodles were allowed to rest for 1 hour before being dried in a tray dryer at 70 °C for 3 hours. The results showed that the water activity of the treatment ranged from 0.25-0.32. Noodles containing 0.4% calcium sulfate had the highest water activity (p<0.05). Cooking time increased with increasing concentration of calcium sulfate, whereas

it decreased with increasing concentration of magnesium sulfate. The hardness of noodles increased with increasing concentration of calcium sulfate or magnesium sulfate, with noodles containing 0.4% magnesium sulfate exhibiting the highest hardness (p<0.05). The addition of calcium sulfate or magnesium sulfate significantly decreased noodle adhesiveness (p<0.05). The brightness of the noodles containing magnesium sulfate was lower than that of the control (p<0.05).

คำสำคัญ

บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป;
ปราศจากกลูเตน;
แคลเซียมซัลเฟต;
แมกเนเซียมซัลเฟต;
แป้งข้าวเจ้า; แป้งข้าวโพด

Keywords

Instant noodle; Gluten-free;
Calcium sulfate;
Magnesium sulfate;
Rice flour; Corn flour

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการใช้เกลือแคลเซียมและแมกเนเซียมต่อสมบัติทางกายภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวโพดผสมแป้งข้าวเจ้า แป้งเมล็ดลินิน และโปรตีนจากถั่วลันเตา โดยการผสมส่วนผสมและเติมแคลเซียมซัลเฟต 0-0.4% หรือแมกเนเซียมซัลเฟต 0-0.4% w/w ขึ้นเป็นโดและกดผ่านเครื่องทำเส้นบะหมี่ลงในน้ำร้อน 97 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที นำเส้นมาพักไว้ 1 ชั่วโมง แล้วนำไปอบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปอบแห้งมีค่าแอดคิวิตีของน้ำอยู่ระหว่าง 0.25-0.32 โดยเส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟต 0.4% มี A_w สูงที่สุด (p<0.05) การเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตทำให้เวลาในการปรุงสุกเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นของแมกเนเซียมซัลเฟตทำให้เวลาในการปรุงสุกลดลง จากการศึกษาวิเคราะห์ลักษณะทางเนื้อสัมผัสพบว่าค่าความแข็งของเส้นบะหมี่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตสูงขึ้น โดยเส้นบะหมี่ที่เติมแมกเนเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.4% มีความแข็งสูงที่สุด (p<0.05) การเติมแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตทำให้ค่าการเกาะติดของเส้นบะหมี่ลดลง (p<0.05) และเส้นบะหมี่ที่เติมแมกเนเซียมซัลเฟตมีค่าความสว่างต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม (p<0.05)

*ผู้รับผิดชอบบทความ: sirinda@tu.ac.th

DOI: 10.14456/tstj.2026.3

1. บทนำ

โรคเซลิแอค (Celiac disease) หรือโรคแพ้กลูเตน เป็นโรคภูมิคุ้มกันตัวเองชนิดหนึ่งที่เกิดเมื่อร่างกายได้รับกลูเตน ระบบภูมิคุ้มกันจะไปทำลายวิลโลที่ทำหน้าที่ดูดซึมอาหารในลำไส้เล็ก ทำให้เกิดการอักเสบที่ลำไส้เล็ก [1] ผู้ป่วยจะมีอาการท้องอืด ปวดท้อง ท้องเสีย อาเจียน ดูดซึมสารอาหารผิดปกติและเกิดภาวะขาดสารอาหาร ปัจจุบันยังไม่มียารักษาโรคเซลิแอค ทำได้เพียงรับประทานอาหารปราศจากกลูเตน (Gluten free) ซึ่งคืออาหารที่ไม่มีข้าวสาลี ข้าวไรย์ และข้าวบาเลย์เป็นส่วนผสมหรือปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์และอุปกรณ์ในการผลิต [2]

ในปัจจุบันได้มีการใช้แป้งข้าวเจ้า แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และแป้งมันฝรั่ง เพื่อทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์อาหารปราศจากกลูเตน [3, 4, 5, 6] อย่างไรก็ตามการไม่มีกลูเตนในส่วนผสมทำให้ผลิตภัณฑ์ปราศจากกลูเตนมีความเหนียว ความแข็ง การขึ้นฟู และการยอมรับของผู้บริโภคเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากกลูเตนเป็นโปรตีนสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้างร่างแหของผลิตภัณฑ์ ทำให้โครงสร้างแข็งแรงและยืดหยุ่น เกิดการอุ้มน้ำและการจับอากาศ [7] จึงส่งผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสและการยอมรับทางประสาทสัมผัส งานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการผสมโปรตีนชนิดอื่นๆ ในสูตรผลิตภัณฑ์อาหารปราศจากกลูเตนสามารถปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งในด้านกายภาพและลักษณะทางประสาทสัมผัสได้ [8, 9, 10, 11] รวมทั้งการใช้โปรตีนถั่วในผลิตภัณฑ์เส้นปราศจากกลูเตน [12, 13, 14, 15] Sofi et al.[16] ผสมโปรตีนสกัดจากถั่วลูกไก่ที่ความเข้มข้น 2-10% w/w ของแป้งข้าวเจ้าในเส้นบะหมี่ที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า พบว่า เมื่อความเข้มข้นของโปรตีนสกัดจากถั่วลูกไก่เพิ่มขึ้น โดแป้งบะหมี่มีความยืดหยุ่นและความเหนียวเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรควบคุมที่ไม่ผสมโปรตีนสกัด และเส้นบะหมี่ที่ผสมโปรตีนสกัดจากถั่วลูกไก่ความเข้มข้น 6% ได้รับความยอมรับทางประสาทสัมผัส ด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นรส รสชาติ เนื้อสัมผัส และความ

ชอบโดยรวมสูงสุด ($p \leq 0.05$) Detchewa et al. [17] ผสมโปรตีนถั่วเหลืองไอโซเลต (SPI) 0, 2.5, 5, 7.5 และ 10% w/w ในสเปกตอปราศจากกลูเตน (GFRS) ทำจากแป้งข้าวเจ้าที่มีอะไมโลสสูงผสมกับแป้งข้าวเหนียวที่อัตราส่วน 90:10 พบว่าการเติม SPI ทำให้ Cooking time และ Cooking loss ลดลง โดย SPI 5% มี Cooking loss ต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) และ GFRS ที่เติม SPI 5% มีค่า Firmness และ Tensile strength เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม (SPI 0%) และสูตร SPI 2.5% นอกจากนี้ยังพบว่า GFRS ที่เติม SPI 5% ได้คะแนนการยอมรับด้านประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวมสูงสุด ($p \leq 0.05$) เมื่อเทียบกับ GFRS ที่เติม SPI ที่ความเข้มข้นอื่นๆ

สารประกอบแคลเซียมและแมกนีเซียมเป็นสารที่นิยมใช้ในการสร้างเจลโปรตีนโดยเฉพาะในการผลิตเต้าหู้ โดยการเชื่อมสายโพลีเปปไทด์ของโปรตีนถั่วเหลืองด้วยอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต ทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหที่อุ้มน้ำได้ เกิดเป็นก้อนเต้าหู้ [18, 19, 20] Kao et al. [21] ศึกษาผลของความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟต (0.2-0.5% w/v) ต่อโครงสร้างทางจุลภาคและลักษณะทางกายภาพของเต้าหู้ พบว่าเต้าหู้ที่มีแคลเซียมซัลเฟตเข้มข้น 0.4% มีโครงสร้างทางจุลภาคสม่ำเสมอ และโครงสร้างร่างแหมีความต่อเนื่องมากที่สุด ได้ Yield และความสามารถในการกักเก็บน้ำสูงสุด ($p \leq 0.05$) Zhu et al. [22] ศึกษาผลของการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ต่อสมบัติของเต้าหู้พบว่าเมื่อใช้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมสูงขึ้นเต้าหู้มีปริมาณความชื้นลดลงและมีค่าความแข็งสูงขึ้น

Raherison et al. [15] ใช้เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสในเส้นพาสต้าแป้งข้าวที่ผสมโปรตีนถั่วเขียว พบว่าเส้นพาสต้ามีความแข็งเพิ่มขึ้น เกิดรูพรุนในเส้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนสไปเชื่อมสายของโพลีเปปไทด์เกิดเป็นโครงสร้างร่างแหของโปรตีน ซึ่งเป็นการช่วยเสริมความแข็งแรงของร่างแหของโปรตีนในผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้จึงได้ทดลองใช้สารประกอบ

แคลเซียมและสารประกอบแมกเนเซียมที่มีสมบัติในการสร้างอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุล (Intermolecular interaction) ทำให้โปรตีนเกิดโครงสร้างร่างแหในผลิตภัณฑ์ได้เช่นกัน [18] ถึงแม้ว่าแคลเซียมและแมกเนเซียมมีจำนวนประจุเท่ากัน แต่เนื่องจากแคลเซียมและแมกเนเซียมมีจำนวนอิเล็กตรอนต่างกัน ทำให้แรงของการเกิดอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) กับโปรตีนมีความแรงไม่เท่ากัน [23] ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะต่างกัน Wang et al. [24] พบว่าเต้าหู้ที่ใช้สารตกตะกอนคือเกลือแมกเนเซียมมีความแข็ง (Hardness) สูงกว่าเต้าหู้ที่ใช้เกลือแคลเซียมตกตะกอน และเต้าหู้ที่ใช้แมกเนเซียมคลอไรด์เป็นสารตกตะกอนมีค่าความแข็งสูงที่สุด

โปรตีนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้มาจากถั่วลันเตาและเมล็ดลีนิน เนื่องจากถั่วลันเตามีโปรตีนสูงและประกอบด้วย กรดอะมิโนจำเป็นสูง เช่น Lysine, Leucine และ Phenylalanine [25] นอกจากนี้ ถั่วลันเตายังมีสารก่อภูมิแพ้ต่ำ (Low allergenicity) และไม่ผ่านการดัดแปลงทางพันธุกรรม [26] ส่วนเมล็ดลีนินมีโปรตีน ไขมัน และใยอาหารสูง โดยมีโปรตีนประมาณ 18% และโปรตีนเมล็ดลีนินมี Asparagine, Glutamic acid, Leucine และ Arginine สูง [27]

เนื่องจากไอออนแคลเซียมมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความสามารถในการจับพันธะกับโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน แตกต่างจากไอออนแมกเนเซียม [23] อิทธิพลของการเติมไอออนทั้งสองลงในสูตรของบะหมี่ปราศจากกลูเตนที่มีโปรตีนจากธัญพืช ถั่ว และเมล็ดลีนินเป็นส่วนผสมอาจจะทำให้ได้บะหมี่กึ่งสำเร็จรูปที่มีสมบัติแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยน้อยมากที่ศึกษาผลของการใช้สารประกอบแคลเซียมหรือแมกเนเซียมต่อคุณภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปปราศจากกลูเตน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพของบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปปราศจากกลูเตนที่ทำจากแป้งผสมของแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า แป้งเมล็ดลีนิน และโปรตีนจากถั่วลันเตา

โดยใช้แคลเซียมซัลเฟตและแมกเนเซียมซัลเฟตเป็นสารช่วยปรับเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 วัตถุดิบ

แป้งข้าวเจ้าตราช้างสามเศียร (บริษัท โรงเส้นหมี่ขอเฮง จำกัด ประเทศไทย) แป้งข้าวโพดตราคว้งทิงพิพย์ (บริษัท อาร์.เอส.โตเมสติก เทรดดิ้ง จำกัด ประเทศไทย) โปรตีนจากถั่วลันเตาตราวิชามิน (บริษัท แม็กซีโกลบอล มาร์เก็ตติ้ง จำกัด ประเทศไทย) ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนคาร์โบไฮเดรต และไขมัน 76.7%, 3.3% และ 10% ตามลำดับ เมล็ดลีนิน จากมูลนิธิโครงการหลวง (ประเทศไทย) บดจนเป็นผง และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 mesh ได้เป็นแป้งเมล็ดลีนิน (ประกอบด้วยโปรตีน 24.9% และไขมัน 35.5%) กั้วร็กัมจากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด (ประเทศไทย) แคลเซียมซัลเฟตและแมกเนเซียมซัลเฟต จากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด (ประเทศไทย)

2.2 การเตรียมบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปปราศจากกลูเตน

ปริมาณแป้งผสมของข้าวเจ้าและข้าวโพด (Cereal flour mix) และส่วนผสมอื่นที่ใช้ในการผลิตบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปปราศจากกลูเตนแสดงได้ (Table 1) โดยวิธีทำบะหมี่เริ่มจากผสมส่วนผสมแห้งให้เข้ากันก่อนแล้วค่อยๆ ผสมน้ำลงในส่วนผสมแห้ง นวดให้เข้ากันจนได้เป็นโดที่เป็นเนื้อเดียวกัน หลังจากพักโดในภาชนะที่มีฝาปิด ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที กดโดผ่านเครื่องรีดเส้น ให้ได้เส้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร แล้วนำเส้นไปลวกในน้ำร้อนอุณหภูมิ 97 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 นาที หลังจากนั้นตักเส้นใส่ในน้ำที่ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที และตักเส้นขึ้นมาพักบนตะแกรง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และอบแห้งในตู้อบแห้งแบบถาดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ได้เป็นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปอบแห้ง

Table 1 Gluten-free instant noodle formulations.

Ingredients	Concentrations (%)							
	Treatments	Control	0.2Ca	0.3Ca	0.4Ca	0.2Mg	0.3Mg	0.4Mg
Cereal flour mix		49.45	49.25	49.15	49.05	49.25	49.15	49.05
Flaxseed flour		5	5	5	5	5	5	5
Pea protein		5	5	5	5	5	5	5
Guar gum		1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
CaSO ₄		0	0.2	0.3	0.4	0	0	0
MgSO ₄		0	0	0	0	0.2	0.3	0.4
Water		39	39	39	39	39	39	39

2.3 การทดสอบทางกายภาพ

2.3.1 ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity)

นำบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปอบแห้งมาสับละเอียด แล้วนำไปวัดค่าแอกติวิตีของน้ำ (A_w) ด้วยเครื่องวัดแอกติวิตีของน้ำ (ยี่ห้อ AQUA LAB รุ่น CX2 ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.3.2 คุณภาพหลังการปรุงสุก

1. เวลาในการปรุงสุก (Cooking time) ต้มบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปอบแห้ง 5 กรัมในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ที่มีกระจกนาฬิกาปิด สุ่มตัวอย่างเส้นบะหมี่ต้มเมื่อเวลาผ่านไป 2 นาที และทุกๆ 30 วินาทีหลังจากนั้น ออกมาทดสอบด้วยกระดาษสี เวลาในการปรุงสุกคือเวลาที่มองเห็นส่วนทึบแสงตรงจุดกึ่งกลางของเส้นบะหมี่ต้ม [28] บะหมี่ที่ต้มตามเวลาในการปรุงสุกจะถูกเรียกว่าบะหมี่ที่ได้หลังการปรุงสุก

2. น้ำหนักที่ได้หลังการปรุงสุก (Cooking yield) ต้มบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปอบแห้ง 5 กรัม

ในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตรในบีกเกอร์ที่มีกระจกนาฬิกาปิดตามเวลาในการปรุงสุกของบะหมี่แต่ละทรีทเมนต์ที่ได้จากข้อ 1 นำเฉพาะบะหมี่ที่ได้หลังการปรุงสุกออกมาวางไว้บนตะแกรงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที คำนวณหาร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการปรุงสุก ดังสมการที่ (1) ส่วนน้ำที่เหลือจากการต้มบะหมี่ให้นำไปใช้วิเคราะห์ของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกในข้อ 3 [28]

$$\% \text{ Cooking yield} = \frac{\text{น้ำหนักบะหมี่หลังต้ม}}{\text{น้ำหนักบะหมี่ก่อนต้ม}} \times 100 \quad \dots (1)$$

3. ของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุก (Cooking loss) นำบีกเกอร์ที่ใส่น้ำที่เหลือจากการต้มบะหมี่จากข้อ 2 ไปอบในตู้อบลมร้อนจนไม่เหลือน้ำในบีกเกอร์ และบีกเกอร์หลังการอบแห้งมีน้ำหนักคงที่ คำนวณหาปริมาณของแข็งที่สูญเสียไประหว่างการต้ม ดังสมการที่ (2) [28]

$$\% \text{ Cooking loss} = \frac{(\text{น้ำหนักบีกเกอร์หลังอบ} - \text{น้ำหนักบีกเกอร์เปล่า})}{\text{น้ำหนักบะหมี่ก่อนต้ม}} \times 100 \quad \dots (2)$$

2.3.3 ลักษณะทางเนื้อสัมผัส การวัดลักษณะทางเนื้อสัมผัสใช้วิธี Texture profile analysis (TPA) โดยตัดแปลงจาก Choy et al. [29] เส้นขนมปังที่ต้มตามเวลาในการปรุงสุกถูกพักไว้บนตะแกรงที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที แล้วนำไปเก็บในภาชนะที่มีฝาปิดสนิทเป็นเวลา 30 นาที ก่อนนำเส้นขนมปังมาวัดค่าความแข็ง (Hardness) การทนการเคี้ยว (Chewiness) การเกาะติด (Adhesiveness) และการเกาะตัว (Cohesiveness) โดยใช้หัววัด cylinder probe P/50 โดยตั้งค่า Pre-Test speed, Test speed และ Post-Test speed เป็น 1, 5 และ 5 mm/sec ตามลำดับ และตั้งค่า Stain เท่ากับ 75%

2.3.4 ค่าความสว่าง (L^*) นำขนมปังที่ได้หลังการปรุงสุกมาวัดค่าความสว่าง (L^*) ด้วยเครื่องวัดค่าสี (ยี่ห้อ Hunter lab รุ่น CX2687 ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.4 การวางแผนการทดลอง และการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลโดยใช้ Analysis of variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple range test และวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ SPSS for windows version 21

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

3.1 ค่าแอกติวิตีของน้ำ

เมื่อวิเคราะห์ค่าแอกติวิตีของน้ำ (Water activity, A_w) ของขนมปังสำเร็จรูปอบแห้งพบว่ามีความอยู่ระหว่าง 0.25 - 0.32 (Table 2) และการเติมแคลเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.4% ทำให้ A_w ของขนมปังสำเร็จรูปอบแห้งมีค่าสูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่า ปริมาณไอออนแคลเซียมที่ความเข้มข้นนี้ทำให้

โปรตีนที่มีในสูตรคือโปรตีนถั่วลิสง โปรตีนเมล็ดถั่ว และโปรตีนข้าวเกิดเป็นโครงสร้างร่างแหเพิ่มขึ้นจำนวนมากและต่อเนื่อง [21] จากการเกิดอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic interaction) ระหว่างไอออนและโปรตีน ซึ่งมาช่วยเสริมร่างแหของโปรตีน-โปรตีนที่เกิดจากอันตรกิริยาที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic interaction) จึงสามารถกักเก็บน้ำไว้ในร่างแหที่ถูกรวบไว้โดยโมเลกุลของโปรตีนและน้ำอิสระที่ติดอยู่ภายในร่างแหของโปรตีน ทำให้ขนมปังสำเร็จรูปอบแห้งมีปริมาณน้ำอิสระสูงที่สุด อีกทั้งร่างแหของโปรตีนที่เกิดขึ้นอาจจะไปขัดขวางการเกิดร่างแหของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน [30] ทำให้สตาร์ชจับกับน้ำได้น้อยลง ปริมาณน้ำอิสระจึงสูง ในขณะที่การเติมแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.2-0.3% ไม่ทำให้ A_w ของขนมปังสำเร็จรูปอบแห้งแตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) อาจเป็นเพราะว่า มีไอออนแคลเซียมหรือไอออนแมกเนเซียมในปริมาณไม่มากพอที่จะทำให้เกิดโครงสร้างร่างแหของโปรตีนที่ต่อเนื่อง หรือจำนวนมากพอที่จะล้อมกักเก็บน้ำอิสระไว้ในร่างแหหรือมีร่างแหของโปรตีนไม่เพียงพอที่จะขัดขวางการเกิดร่างแหของแป้งสตาร์ชซึ่งมีสมบัติในการจับน้ำได้ดีกว่า [31] ทำให้เมื่อนำเส้นขนมปังไปอบแห้ง น้ำอิสระจึงระเหยไปอย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสนใจว่าเมื่อใช้แคลเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.4% เท่ากับแมกเนเซียมซัลเฟต เส้นขนมปังมีค่า A_w แตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ทั้งๆ ที่ไอออนแคลเซียมและไอออนแมกเนเซียมมีจำนวนประจุเท่ากันคือ +2 อาจเป็นเพราะว่าไอออนแคลเซียมมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงกว่าไอออนแมกเนเซียม ทำให้อันตรกิริยาระหว่างไอออนแคลเซียมกับโปรตีนมีความแรงมากกว่าอันตรกิริยาระหว่างไอออนแมกเนเซียมกับโปรตีน ส่งผลให้ร่างแหโปรตีนที่เกิดขึ้นมีลักษณะต่าง มีความสม่ำเสมอเป็นระเบียบไม่เท่ากัน จึงสามารถกักเก็บน้ำได้ไม่เท่ากัน [23]

Table 2 Water activity of gluten-free instant noodle added with calcium sulfate or magnesium sulfate

Treatments	Water activity
Control	0.262±0.02 ^{bc}
0.2Ca	0.261±0.00 ^{bc}
0.3Ca	0.251±0.01 ^c
0.4Ca	0.317±0.01 ^a
0.2Mg	0.274±0.01 ^b
0.3Mg	0.265±0.01 ^{bc}
0.4Mg	0.272±0.00 ^{bc}

^{a-c}Different letters in the same column indicate that values are significantly different ($p \leq 0.05$).

3.2 คุณภาพหลังการปรุงสุก

1. เวลาในการปรุงสุก (Cooking time)

ในขั้นตอนการเตรียมเส้นบะหมี่กิ่งสำเร็จรูป มีการลวกเส้นบะหมี่ในน้ำร้อนก่อนการนำมาทำแห้ง ซึ่งเป็นการทำพรีเจลาติไนซ์ของแป้งของเส้นบะหมี่ ทำให้เม็ดแป้งบางส่วนเกิดเจลาติไนซ์เซชัน และเมื่อวางพักไว้ก่อนนำไปทำแห้ง อะไมโลสเกิดการคืนตัว (Retrogradation) เชื่อมสายเป็นร่างแหบางส่วน แต่ยังคงมีเม็ดแป้งบางส่วนที่ยังไม่เกิดเจลาติไนซ์เซชัน เมื่อนำเส้นบะหมี่อบแห้งมาต้มให้สุกจนไม่เห็นส่วนที่บวม เวลาในการปรุงสุกแสดงถึงระยะเวลาการเกิดเจลาติไนซ์เซชันของแป้งสตาร์ชอย่างสมบูรณ์ [32] ตัวอย่างควบคุมมีค่าเวลาในการปรุงสุกต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่นๆ (Table 3) แสดงให้เห็นว่าแคลเซียมซัลเฟตและแมกนีเซียมซัลเฟตที่เติมลงในสูตรทำให้การเจลาติไนซ์เซชันของแป้งเกิดได้ยากขึ้น ไอออนแคลเซียมและไอออนแมกนีเซียมช่วยในการเชื่อมต่อสายโพลีเปปไทด์ของโปรตีนที่ใช้ในส่วนผสม [20, 33, 34] โครงสร้างร่างแหของโปรตีนที่เกิดขึ้นสามารถขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำที่ใช้ในการต้ม

ทำให้โมเลกุลของน้ำจำเป็นต้องใช้เวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เข้าใกล้แป้งสตาร์ชเพื่อทำให้เกิดเจลาติไนซ์เซชัน [30] การเพิ่มปริมาณแคลเซียมซัลเฟตทำให้เวลาในการปรุงสุกเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากร่างแหโปรตีนที่เกิดจากไอออนแคลเซียมมีความเป็นระเบียบ เกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กกระจายอย่างสม่ำเสมอ [21] จึงขัดขวางการเคลื่อนที่ของน้ำที่ใช้ในการต้มได้มาก ในขณะที่ร่างแหโปรตีนที่เกิดจากไอออนแมกนีเซียมมีการเกาะกลุ่มของโปรตีนที่ทำให้เกิดเส้นร่างแหที่มีความหนาและเกิดรูพรุนขนาดใหญ่ [24] ยังมีไอออนแมกนีเซียมมาก ยังมีโพรงขนาดใหญ่มาก น้ำที่ใช้ในการต้มอาจเคลื่อนที่เพื่อเข้าถึงเม็ดแป้งได้ง่ายกว่า ทำให้เวลาในการปรุงสุกลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเพิ่มขึ้น

2. น้ำหนักที่ได้หลังการปรุงสุก (Cooking yield)

น้ำหนักที่ได้หลังการปรุงสุก (Cooking yield) คือน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างหลังปรุงสุกเทียบกับตัวอย่างแห้ง [35] ซึ่งก็คือน้ำหนักของน้ำที่ใช้ในการต้มที่เข้ามาอยู่ในเส้นบะหมี่ ผลการทดลองพบว่าน้ำหนักที่ได้

Table 3 Cooking time, cooking yield, and cooking loss of gluten-free instant noodle

Treatments	Cooking time (min.)	Cooking yield (%) ^{ns}	Cooking loss (%) ^{ns}
Control	5.5	258.09 ± 5.23	1.68 ± 0.14
0.2Ca	6.0	241.29 ± 6.27	1.66 ± 0.31
0.3Ca	6.5	253.11 ± 10.54	1.54 ± 0.25
0.4Ca	7.0	250.24 ± 5.62	1.74 ± 0.36
0.2Mg	6.5	247.96 ± 7.27	1.71 ± 0.10
0.3Mg	6.0	240.78 ± 5.79	1.65 ± 0.19
0.4Mg	5.5	246.38 ± 5.77	1.55 ± 0.05

^{a-c}Different letters in the same column indicate that values are significantly different ($p \leq 0.05$);

^{ns}Not significant ($p > 0.05$) between values in the same column.

หลังการปรุงสุกของเส้นบะหมี่ไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) แต่ตัวอย่างควบคุมมีแนวโน้มของน้ำหนักที่ได้หลังการปรุงสุกสูงกว่าตัวอย่างอื่น (Table 3) อาจเป็นเพราะว่า นอกจากตัวอย่างควบคุมมีปริมาณแป้งซึ่งจับน้ำได้ดีกว่ามากกว่าตัวอย่างอื่นๆ และเม็ดแป้งของตัวอย่างควบคุมยังเกิดเจลลาคีโนซ์เซชั่นได้ง่ายกว่า อะไมโลสและอะไมโลเพคตินจึงจับกับน้ำที่ต้มได้ง่ายกว่า ในขณะที่เส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตมีร่างแหของโปรตีนที่ไปขัดขวางการเข้าถึงของน้ำกับเม็ดแป้ง และการจับของน้ำกับอะไมโลสและ อะไมโลเพคติน [30] ทำให้มีน้ำที่ถูกจับโดยแป้งสตาร์ชได้น้อยกว่าแนวโน้มของน้ำหนักที่ได้หลังการปรุงสุกจึงต่ำกว่าสอดคล้องกับ Lyu et al. [31] ที่ศึกษาโครงสร้างทางจุลภาคของเจลโปรตีนจากแป้งข้าวโพดและโปรตีนสกัดจากถั่วลิสงด้วยวิธี Confocal laser scanning microscopy (CLSM) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของโปรตีนสกัดจากถั่วลิสงเพิ่มขึ้นแป้งดูดซับน้ำน้อยลงทำให้เฟสของแป้งข้าวโพดมีความต่อเนื่องน้อยลง

3. ของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุก (Cooking loss)

ของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกคือการวัดปริมาณของแข็งที่หลุดออกจากเส้นบะหมี่ไปยังน้ำที่ใช้ต้ม ซึ่งค่านี้มักแสดงถึงเม็ดแป้งที่ไม่สามารถติดอยู่ในโครงสร้างของเส้นบะหมี่ [36] ถ้าโครงสร้างของเส้นบะหมี่อ่อนแอหรือแป้งเกิดเจลลาคีโนซ์เซชั่นได้น้อย เม็ดแป้งจะหลุดจากเส้นบะหมี่ได้ง่าย จากผลการทดลองพบว่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกของเส้นบะหมี่ไม่มีความแตกต่างกัน ($p > 0.05$) (Table 3) ทั้งๆ ที่มีค่าเวลาการปรุงสุกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของเส้นบะหมี่มีความสามารถใกล้เคียงกันในการเก็บส่วนผสมไว้โดยไม่สูญเสียไปยังน้ำต้ม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตมากขึ้น ค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเมื่อมีไอออนมากขึ้น โปรตีนมีการสานโครงสร้างร่างแหมากขึ้น ทำให้เม็ดแป้งหลุดออกจากเส้นบะหมี่ได้ยากขึ้น แตกต่างจากงานวิจัยของ Bolarinwa and

Oyesiji [37] ที่พบว่าพาสต้าปราศจากกลูเตนจากการปรุงสุกมากกว่าพาสต้าปราศจากกลูเตนที่ไม่ได้เติมแป้งถั่วเหลือง และมีของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกเพิ่มมากขึ้นเมื่อพาสต้ามีปริมาณแป้งถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเส้นบะหมี่ที่ใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟต 0.4% มีค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกสูงที่สุด ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะว่า ตัวอย่างนี้เป็นเส้นบะหมี่ที่ใช้เวลาในการปรุงสุกนานที่สุด เนื่องจากมีร่างแหของโปรตีนจำนวนมากจาก Electrostatic interaction ของโอออนและโปรตีนที่ไปขัดขวางการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำไปหาเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งบางส่วนหลุดออกจากเส้นบะหมี่ไปก่อนที่จะเกิดเจลลิตีไซเซชันอย่างสมบูรณ์ [38] นอกจากนี้เส้นบะหมี่ที่ใช้ความเข้มข้นของแมกเนเซียมซัลเฟตมากขึ้นมีค่าของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกลดลง ใช้เวลาในการปรุงสุกลดลง แสดงให้เห็นว่าการสานโครงสร้างร่างแหของโปรตีนโดยโอออนแมกเนเซียมทำให้เม็ดแป้งเกิดเจลลิตีไซเซชันได้เร็ว ลดการสูญเสียของแข็งระหว่างการปรุงสุกได้

3.3 ลักษณะเนื้อสัมผัส

1. ความแข็ง (Hardness)

เมื่อนำเส้นบะหมี่ที่ได้หลังการปรุงสุกไปวัดความแข็ง พบว่า เมื่อใช้ความเข้มข้นของแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตสูงขึ้น เส้นบะหมี่มีแนวโน้มค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) ยกเว้นที่ความเข้มข้นของแมกเนเซียมซัลเฟต 0.4% ทำให้เส้นบะหมี่มีความแข็งสูงสุดและต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p \leq 0.05$) (Figure 1a) ทั้งนี้เนื่องจากการเติมโอออนแคลเซียมหรือโอออนแมกเนเซียมลงในสูตรของเส้นบะหมี่ (pH ประมาณ 6.9) ทำให้เกิดการเชื่อมตอสาย โพลีเปปไทด์ของส่วนผสมที่ใช้ คือโปรตีนถั่วลิ้นเต่า (pI ประมาณ 4.3 [39]) โปรตีนเมล็ดลินิน (pI ประมาณ 4.2 [40]) โปรตีนข้าวเจ้า (pI ประมาณ 4.6 [41]) และโปรตีนข้าวโพด (pI ประมาณ

6.2 [42]) ด้วยอันตรกิริยาไฟฟ้าสถิต (Electrostatic interaction) ทำให้เส้นบะหมี่มีร่างแหโปรตีนเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ความแข็งของเส้นบะหมี่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่า เมื่อใช้สารตกตะกอนคือแมกเนเซียมซัลเฟต [43] หรือแคลเซียมซัลเฟต [21] ที่ความเข้มข้นมากขึ้น เค้าหุ้มค่าความแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้มีงานวิจัยที่ใช้ Differential scanning calorimetry, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction และ Rheology [44, 45, 46, 47] แสดงถึงการสร้างพันธะระหว่างโอออนแคลเซียมหรือโอออนแมกเนเซียมกับหมู่ไฮดรอกซิลบนสายของอะไมโลส ถึงแม้ว่าเป็นพันธะที่ไม่แข็งแรง แต่สามารถทำให้เจลของอะไมโลสมีค่า G' เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการเติมโอออนแคลเซียมหรือโอออนแมกเนเซียมลงในแป้งผสมที่ใช้ในการทดลองนี้ ทำให้อะไมโลสซึ่งหลุดออกมาจากเม็ดแป้งหลังการเกิดเจลลิตีไซเซชัน สานกันเป็นร่างแหของอะไมโลสซึ่งช่วยเสริมความแข็งของเส้นบะหมี่ปราศจากกลูเตนหลังการปรุงสุกได้ และเมื่อเปรียบเทียบกับความแข็งของเส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟตและแมกเนเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากัน พบว่าเส้นบะหมี่ที่เติมแมกเนเซียมซัลเฟตมีแนวโน้มค่าความแข็งสูงกว่า เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วระหว่างสายของโปรตีนและโอออนแมกเนเซียม ทำให้โปรตีนเกาะกลุ่มกันเป็นร่างแหที่มีความหนา โครงสร้างจึงแข็งแรงกว่า [24] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang et al. [24] ที่พบว่าเค้าหุ้มที่ตกตะกอนด้วยโอออนแมกเนเซียม มีค่าความแข็งสูงกว่าเค้าหุ้มที่ตกตะกอนด้วยโอออนแคลเซียม

2. การทนการเคี้ยว (Chewiness)

ค่าการทนการเคี้ยวของเส้นบะหมี่หลังการปรุงสุกไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามเส้นบะหมี่ที่เติมแมกเนเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 0.4% มีค่าการทนการเคี้ยวสูงที่สุด เนื่องจากโอออนแมกเนเซียมทำให้ได้ร่างแหของโปรตีนที่มีความหนา [24] จึงต้องใช้พลังงานในการเคี้ยวมาก

3. การเกาะติด (Adhesiveness)

ค่าการเกาะติดเป็นพลังงานที่ใช้ในการดึงหัววัดออกจากตัวอย่าง แสดงถึงความเหนียว (Stickiness) ที่ผิวของตัวอย่าง [48] เมื่อแปรงสตาโรกเกิดเจลลาตินไนซ์และคืนตัวเมื่ออุณหภูมิลดลง (Retrogradation) ทำให้เกิดการจับตัวเป็นร่างแหของแปรงสตาโรก โดยแปรงที่มีปริมาณอะไมโลสสูงกว่าสามารถคืนตัวได้เร็วกว่าแปรงที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำกว่า เนื่องจากอะไมโลส สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนได้เร็วกว่าอะไมโลเพคติน [49] ผลการทดลองพบว่า ค่าการเกาะติดของเส้นบะหมี่หลังการปรุงสุกของตัวอย่างควบคุมมีค่าสูงที่สุด ($p < 0.05$) และเส้นบะหมี่ที่ใช้ความเข้มข้นของเกลือแคลเซียมและเกลือแมกเนเซียม 0.2-0.4% มีค่าไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) (Figure 1c) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าการเติมไอออนแคลเซียมหรือไอออนแมกเนเซียมทำให้เกิดการเชื่อมของสายอะไมโลส [44, 45, 46, 47, 50] ทำให้เกิดลักษณะคล้ายร่างแหที่เกิดจากการคืนตัวของอะไมโลสเพิ่มขึ้น ค่าการเกาะติดของเส้นบะหมี่หลังการปรุงสุกที่มีการเติมแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตจึงต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม แตกต่างจาก Thirathumthavorn et al. [51] ที่พบว่าบะหมี่ปราศจากกลูเตนที่เติมโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองมีค่าการเกาะติดมากกว่า ($p < 0.05$) บะหมี่ที่สำเร็จรูปปราศจากกลูเตนที่ไม่เติมโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง

4. การเกาะตัว (Cohesiveness)

Szczesniak A.S. [48] ได้อธิบายค่าการเกาะตัวว่าเป็นค่าที่แสดงว่าตัวอย่างอาหารสามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้มากน้อยเพียงไรก่อนที่จะแตกหัก ซึ่งเป็นค่าที่เกี่ยวข้องกับพันธะภายในโครงสร้างของตัวอย่างอาหาร ผลการทดลองพบว่า เส้นบะหมี่หลังการปรุงสุกมีค่าการเกาะตัวไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) (Figure 1d) แสดงให้เห็นว่าถึงแม้ชนิดและขนาดแรงของพันธะที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของเส้นบะหมี่มีความแตกต่างกันระหว่างตัวอย่างควบคุม และตัวอย่างที่เติม

แคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตตามที่ได้อธิบายไว้แล้วในข้างต้น แต่เนื่องจากแรงเหล่านั้นเป็นแรงที่ใช้ดึงดูดกัน (Attractive force) เมื่อรวมกันจึงทำให้เส้นบะหมี่หลังการปรุงสุกสามารถต้านทานพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างก่อนที่จะแตกหักได้ใกล้เคียงกัน

3.4 ค่าความสว่าง (L*)

จากการวิเคราะห์ค่าความสว่างของเส้นบะหมี่ปรุงสุก พบว่า ค่าความสว่างของเส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.2-0.4% ไม่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม ($p > 0.05$) แต่เส้นบะหมี่ที่เติมแมกเนเซียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.2-0.4% มีค่าความสว่างต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม ($p < 0.05$) (Table 4) ค่าความสว่างของเจลขึ้นอยู่กับความเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogeneity) และความเป็นระเบียบของโครงสร้างภายใน (Ordered structure) เจลที่มีโมเลกุลของโพลีเมอร์จัดเรียงเป็นระเบียบ มีส่วนที่มีความเป็นผลึก (Crystalline region) มาก แสงสามารถส่องผ่านได้สะดวก เจลจึงมีความสว่างมาก [52] ไอออนแคลเซียมทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของสายโพลีเปปไทด์ได้อย่างเป็นระเบียบ ทำให้มีส่วนที่มีความเป็นผลึกมาก ในขณะที่ไอออนแมกเนเซียมทำให้เกิดการเกาะกลุ่มของสายโพลีเปปไทด์ โครงสร้างมีส่วนที่เป็นรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก ความเป็นระเบียบน้อยกว่า จึงทำให้เส้นบะหมี่ปรุงสุกที่มีแคลเซียมซัลเฟตเป็นส่วนผสมมีค่าความสว่างสูงกว่าเส้นบะหมี่ปรุงสุกที่มีแมกเนเซียมซัลเฟตเป็นส่วนผสม ทั้งนี้ ตัวอย่างควบคุมมีค่าความสว่างที่สุด ถึงแม้ไม่แตกต่างจากเส้นบะหมี่ที่มีไอออนแคลเซียมก็ตาม โดยปกติแล้วเจลของแป้งมีความสว่างมากกว่าเจลของโปรตีน เนื่องจากมีการเชื่อมต่อกันของสายโพลีแซคคาไรด์อย่างค่อนข้างเป็นระเบียบเมื่อคืนตัว [52] ในตัวอย่างควบคุมมีทั้งแป้ง โปรตีน และองค์ประกอบอื่น จึงอาจจะทำให้มีความเป็นผลึกของแป้งสตาโรกและโปรตีนใกล้เคียงกันกับเส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟต

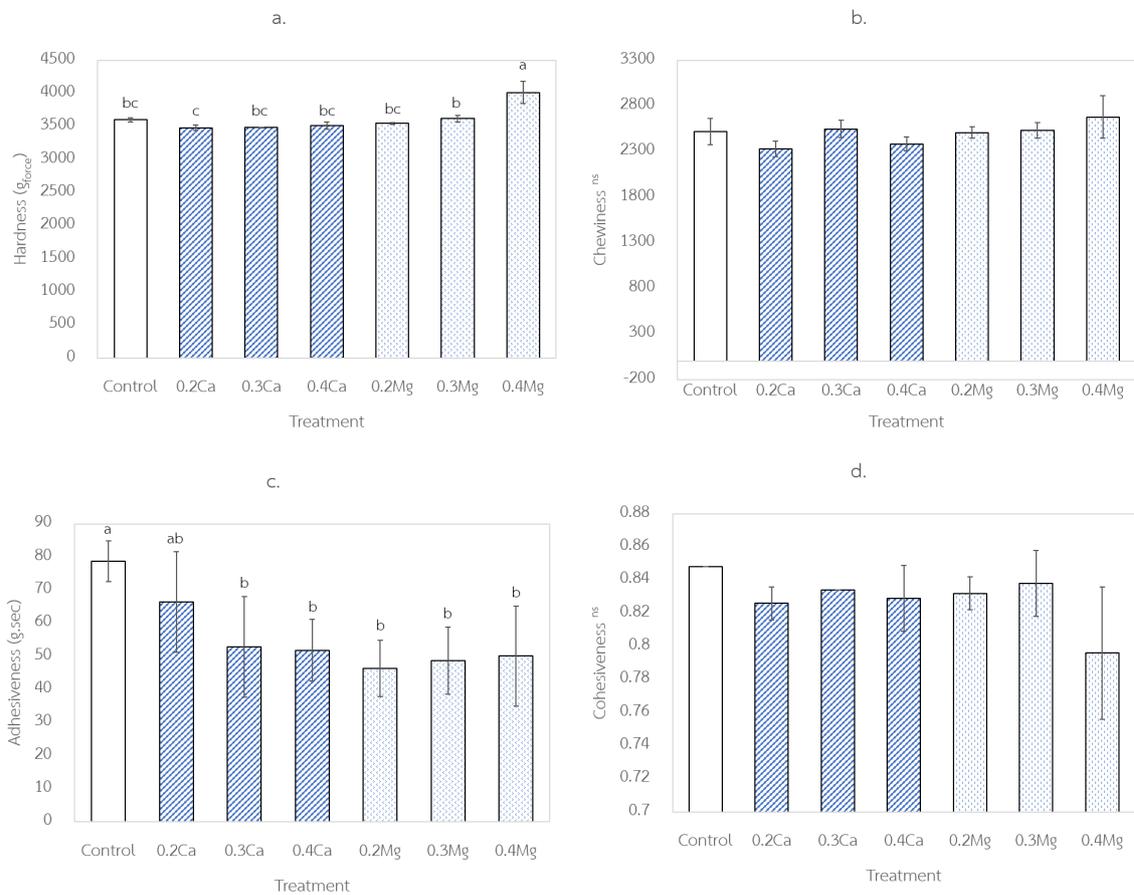


Figure 1 Effect of calcium sulfate and magnesium sulfate on (a.) Hardness, (b.) Chewiness, (c.) Adhesiveness and (d.) Cohesiveness of gluten-free instant noodles: (□) Control; (▨) Calcium sulfate treatment; (▩) Magnesium sulfate treatment

^{a-c}Different letters in the same column indicate that values are significantly different ($p \leq 0.05$);

^{ns}Not significant ($p > 0.05$) between values in the same column.

Table 4 Brightness of cooked gluten-free instant noodles

Treatments	L*
Control	70.88 ± 0.45 ^a
0.2Ca	70.32 ± 0.80 ^{ab}
0.3Ca	70.81 ± 0.25 ^a
0.4Ca	69.82 ± 1.01 ^{ab}
0.2Mg	69.69 ± 0.16 ^b
0.3Mg	69.39 ± 0.53 ^b
0.4Mg	69.51 ± 0.11 ^b

^{a-b}Different letters in the same column indicate that values are significantly different ($p \leq 0.05$)

สรุป

เกลือแคลเซียมและเกลือแมกเนเซียมเป็นสารประกอบที่ใช้ในการเชื่อมพันธะของสายโพลีเปปไทด์ในผลิตภัณฑ์หลากหลาย ดังนั้นการนำเกลือทั้งสองชนิดมาใช้ในเส้นบะหมี่ที่ทำจากแป้งปราศจากกลูเตนที่มีโปรตีนชนิดอื่นเป็นส่วนประกอบ จึงเป็นวิธีการปรับเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่ปราศจากกลูเตนได้ ในงานวิจัยนี้พบว่าการเติมเกลือแคลเซียมหรือเกลือแมกเนเซียมในแป้งผสมของแป้งข้าวโพด แป้งข้าวเจ้า แป้งเมล็ดลินิน และโปรตีนจากถั่วลันเตาทำให้สมบัติทางกายภาพของเส้นบะหมี่สำเร็จรูปปราศจากกลูเตนเปลี่ยนแปลงไป โดยเส้นบะหมี่ที่มีการเติมแคลเซียมซัลเฟตหรือแมกเนเซียมซัลเฟตมีค่าการเกาะติดต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) เส้นบะหมี่สูตรควบคุม เส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟตมีค่าความสว่างไม่แตกต่าง ($p > 0.05$) จากสูตรควบคุม แต่เส้นบะหมี่ที่เติมแมกเนเซียมซัลเฟตมีค่าความสว่างต่ำกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) และเส้นบะหมี่ที่เติมแคลเซียมซัลเฟต 0.3% มีค่าแอดคิวิตีของน้ำและของแข็งที่สูญเสียระหว่างการปรุงสุกต่ำที่สุด ดังนั้นเส้นบะหมี่ปราศจาก

กลูเตนที่ทำจากแป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด แป้งเมล็ดลินิน และโปรตีนจากถั่วลันเตาที่เติมแคลเซียมซัลเฟต 0.3% น่าจะเป็นสูตรที่ควรนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต และการวิเคราะห์สมบัติโดยใช้เครื่องมือ เช่น Scanning electron microscope (SEM), Confocal laser scanning microscopy (CLSM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) และ Rheology จะช่วยอธิบายอิทธิพลของการเติมไอออนแคลเซียมหรือไอออนแมกเนเซียมในบะหมี่ปราศจากกลูเตนที่ผสมแป้งและโปรตีนได้ในเชิงลึก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และอุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย

References

- [1] Gujral, N., Freeman, H.J. and Thomson, A.B., 2012, Celiac disease: Prevalence, diagnosis, pathogenesis and treatment, *World J. Gastroenterol.* 18(42): 6036-6059.
- [2] National Celiac Association 2024, What is Celiac Disease, Available Source: <https://nationalceliac.org/resources/what-is-celiac-disease>, December 25, 2024.
- [3] Qin, W., Lin, Z., Wang, A., Chen, Z., He, Y., Wang, L., Liu, L., Wang, F. and Tong, L.T., 2021, Influence of particle size on the properties of rice flour and quality of gluten-free rice bread, *Food Sci. Technol.* 151: 112236.
- [4] Najjingo, E., Byakika, S. and Mukisa, I.M., 2024, Physical properties, nutritional profile, and consumer acceptability of gluten-free breakfast flakes from cassava flour, *Appl. Food Res.* 4(2): 100541.
- [5] Ferreira, S.M.R., De Mello, A.P., De Caldas Rosa, M., Kruger, C.C.H., Azoubel, P.M. and De Oliveira Alves, M.A., 2016, Utilization of sorghum, rice, corn flours with potato starch for the preparation of gluten-free pasta, *Food Chem.* 191: 147-151.
- [6] Halim, M.D.A., Alharbi, S.A., Alarfaj, A.A., Almansour, M.I., Ansari, M.J., Nessa, M.J., Kabir, F.N.A. and Khatun, A.A., 2024, Improvement and quality evaluation of gluten-free cake supplemented with sweet potato flour and carrot powder, *Appl. Food Res.* 4: 100543.
- [7] Beyond Celiac 2025, The Gluten-Free Diet, Available Source: <https://www.beyondceliac.org/gluten-free-diet/what-is-gluten/>, April 24, 2025.
- [8] Zhao, F., Li, Y., Li, C., Ban, X., Cheng, L., Hong, Y., Gu, Z. and Li, Z., 2022, Insight into the regulations of rice protein on the gluten-free bread matrix properties, *Food Hydrocoll.* 131: 107796.
- [9] Dilrukshi, H.N., Torrico, D.D., Brennan, M.A. and Brennan, C.S., 2022, Effects of extrusion processing on the bioactive constituents, *in vitro* digestibility, amino acid composition, and antioxidant potential of novel gluten-free extruded snacks fortified with cowpea and whey protein concentrate, *Food Chem.* 389: 133107.
- [10] Silva, P.G., Kalschne, D.L., Salvati, D., Bona, E. and Rodrigues, A.C., 2022, Aquafaba powder, lentil protein and citric acid as egg replacer in gluten-free cake: A model approach, *Appl. Food Res.* 2(2): 100188.
- [11] Rolandelli, G., Shan, S. and Campanella, O.H., 2024, Effects of alkalinization and addition of pea protein as a co-protein to zein for the development of gluten-free doughs, *Food Hydrocoll.* 146: 109313.
- [12] Shukla, V., Martinez, A.C., Li, Y.O. and Pardo, G.D., 2023, Optimization of gluten-free pasta formulation enriched with pulse protein isolates, *J. Culin. Sci. Technol.* 21(1): 99-117.

- [13] Rachman, A., Brennan, M.A., Morton, J., Torrico, D. and Brennan, C.S., 2023, *In-Vitro* digestibility, protein digestibility corrected amino acid, and sensory properties of banana-cassava gluten-free pasta with soy protein isolate and egg white protein addition, *Food Sci. Hum. Wellness* 12(2): 520-527.
- [14] Pinel, P., Robert, M., Putois, A., Claudel, J., Barron, C., Menard, O., Micard, V. and Lacanal, C.B., 2025, *In Vitro* protein digestibility of gluten-free climate-smart cowpea-based pasta, *Food Res. Int.* 208: 116100.
- [15] Raheison, A.R., Laohakunjit, N., Uthairatanakij, A., Vongsawasdi, P., Kaisangsri, N. and Selamassakul, O., 2025, Unveiling the effects of psyllium husk, mung bean protein, and transglutaminase on the quality characteristics of heat moisture-treated gluten-free rice pasta, *Int. J. Food Sci. Technol.* 60(1): vvae090.
- [16] Sofi, S.A., Singh, J., Chhikara, N., Panghal, A. and Gat, Y., 2020, Quality characterization of gluten free noodles enriched with chickpea protein isolate, *Food Biosci.* 36: 100626.
- [17] Detchewa, P., Thongngam, M., Jane, J.L. and Naivikul, O., 2016, Preparation of gluten-free rice spaghetti with soy protein isolate using twin-screw extrusion, *J. Food Sci. Technol.* 53: 3485-3494.
- [18] Wang, W., Shen, M., Liu, S., Jiang, L., Song, Q. and Xie, J., 2018, Gel properties and interactions of *Mesona blumes* polysaccharide-soy protein isolates mixed gel: The effect of salt addition, *Carbohydr. Polym.* 192: 193-201.
- [19] Chu, L., Yang, L., Li, J., Lin, L. and Zheng, G., 2019, Effect of *Smilax china* L. starch on the gel properties and interactions of calcium sulfate-induced soy protein isolate gel, *Int. J. Biol. Macromol.* 135: 127-132.
- [20] Li, Y., Wan, Y., Mamu, Y., Xu, J. and Guo, S., 2023, Aggregation and gelation of soymilk protein after alkaline heat treatment: Effect of coagulants and their addition sequences, *Food Hydrocoll.* 135: 108178.
- [21] Kao, F.J., Su, N.W. and Lee, M.H., 2003, Effect of calcium sulfate concentration in soymilk on the microstructure of firm tofu and the protein constitutions in tofu whey, *J. Agric. Food Chem.* 51: 6211-6216.
- [22] Zhu, Q., Wu, F., Saito, M., Tatsumi, E. and Yin, L., 2016, Effect of magnesium salt concentration in water-in-oil emulsions on the Physical properties and microstructure of tofu, *Food Chem.* 201: 197-204.
- [23] Cacace, M.G., Landau, E.M. and Ramsden, J.J., 1997, The hofmeister series: salt and solvent effects on interfacial phenomena, *Q. Rev. Biophys.* 30(3): 241-277.
- [24] Wang, Y., Yang, X. and Li, L., 2020, A new style of fermented tofu by *Lactobacillus casei* combined with salt coagulant, *3 Biotech.* 10(2): 81.

- [25] Lu, Z.X., He, J.F., Zhang, Y.C. and Bing, D.J., 2020, Composition, Physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 60(15): 2593-2605.
- [26] Gwiazda, S., Rutkowski, A. and Kocon, J., 1979, Some functional properties of pea and soy bean protein preparations, *Nahrung.* 23(7): 681-686.
- [27] Oomah, B.D., Mazza, G. and Kenaschuk, E.O., 1992, Cyanogenic compounds in flaxseed, *J. Agric. Food Chem.* 40(8): 1346-1348.
- [28] AACC, 2000, Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th Ed., American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, 1200 p.
- [29] Choy, A.L., Morrison, P.D., Hughes, J.G., Marriott, P.J. and Small, D.M., 2013, Quality and antioxidant properties of instant noodles enhanced with common buckwheat flour, *J. Cereal Sci.* 57: 281-287.
- [30] Zhao, Y., Dai, X., Mackon, E., Ma, Y. and Liu, P., 2022, Impacts of protein from high-protein rice on gelatinization and retrogradation properties in high and low-amylose reconstituted rice flour, *Agronomy (Basel, Switz.)* 12(6): 1431.
- [31] Lyu, Z., Sala, G. and Scholten, E., 2022, Water distribution in maize starch-pea protein gels as determined by a novel confocal laser scanning microscopy image analysis method and its effect on structural and mechanical properties of composite gels, *Food Hydrocoll.* 133(5): 107942.
- [32] Koh, W.Y., Matanjun, P., Lim, X.X. and Kobun, R., 2022, Sensory, Physicochemical, and cooking qualities of instant noodles incorporated with red seaweed (*Eucheuma denticulatum*), *Foods.* 11(17): 2669.
- [33] Gan, J., Kong, X., Xiao, Z., Chen, Y., Du, M., Wang, Y., Wang, Z., Cheng, Y. and Xu, B., 2022, Calcium binding mechanism of soybean peptide with histidine alteration by molecular docking analysis and spectroscopic methods, *Foods.* 11(20): 3290.
- [34] Lu, W., Zhang, Y., Zhang, C., Chen, D. and Xiao, C., 2023, Influence of calcium sulfate incorporated with gluconolactone coagulant on the quality of whole soybean flour tofu, *Food Chem.:X.* 17(7): 100527.
- [35] Chung, H.J., Cho, A. and Lim, S.T., 2012, Effect of heat-moisture treatment for utilization of germinated brown rice in wheat noodle, *Food Sci. Technol.* 47(2): 342-347.
- [36] Liang, Y., Qu, Z., Liu, M., Wang, J., Zhu, M., Liu, Z., Li, J., Zhan, X. and Jia, F., 2020, Effect of curdlan on the quality of frozen-cooked noodles during frozen storage, *J. Cereal Sci.* 95(3): 103019.
- [37] Bolarinwa, I.F. and Oyesiji, O.O., 2021, Gluten free rice-soy pasta: Proximate composition, textural properties and sensory attributes, *Heliyon.* 7(1): e06052.

- [38] Limroongreungrat, K., Suksomboon, A. and Sangnark, A., 2015, Development of Functional Rice Pasta Supplemented With Pulse Flour, Research Report, Burapha University, Chonburi, 92 p. (in Thai)
- [39] Doan, C.D. and Ghosh, S., 2019, Formation and stability of pea proteins nanoparticles using ethanol-induced desolvation, *Nanomaterials*. 9(7): 949.
- [40] Lan, Y., Ohm, J.B., Chen, B. and Rao, J., 2020, Physicochemical properties and aroma profiles of flaxseed proteins extracted from whole flaxseed and flaxseed meal, *Food Hydrocoll.* 104(4): 105731.
- [41] Shin, F.F. and Daigle, K., 1997, Use of enzymes for the separation of protein from rice flour, *Cereal Chem.* 74(4): 437-441.
- [42] Wu, Y., Du, J., Zhang, J., Li, Y. and Gao, Z., 2023, pH effect on the structure, Rheology, and electrospinning of maize zein, *Foods*. 12(7): 1395.
- [43] Yang, X., Wang, Y., Hao, M. and Li, L., 2020, Synergistic effect of the lactic acid bacteria and salt coagulant in improvement of quality characteristics and storage stability of tofu, *J. Oleo Sci.* 69(11): 1455-1465.
- [44] Ding, X., Li, X., Cai, Q., Ma, Z., Ren, T. and Hu, X., 2023, Effect of calcium hydroxide on Physicochemical and *In Vitro* digestibility properties of Tartary buckwheat starch-rutin complex prepared by pre gelatinization and co-gelatinization methods, *Foods*. 12(5): 951.
- [45] Tian, X., Huang, J., Li, H., Zhang, C., Li, T. and Pan, Y., 2025. Effects of calcium citrate on the stability of rice starch in a level 3 liquid system, *Food Hydrocoll.* 167(2): 111420.
- [46] Yang, Q., Zhang, X., Gu, C., Li, M., Hu, X., Gao, Y., Min, Z., Zhang, W. and Wu, W., 2024, The mediation mechanism of calcium ions on black bean type 3 resistant starch: metabolomics, structure characteristics and digestibility, *Food Chem.* 446: 138883.
- [47] Haixia, Z., Zhiguang, C., Junrong, H. and Huayin, P., 2022, Exploration of the process and mechanism of magnesium chloride induced starch gelatinization, *Int. J. Biol. Macromol.* 205: 118-127.
- [48] Szczesniak, A.S., 2002, Texture is a sensory property, *Food Qual. Prefer.* 13(4): 215-225.
- [49] Bresciani, A., Vaglia, V., Saitta, F., Fessas, D., Casiraghi, M.C., Erba, D., Pagani, M.A., Lee, J.Y., Kang, J.W., Ko, J.M., Bocchi, S., Cho, J.H. and Marti, A., 2022, High-amylose and Tongil type Korean rice varieties: Physical properties, cooking behaviour and starch digestibility, *Food Sci. Biotechnol.* 31(6): 681-690.
- [50] Nilsson, K., Johansson, M., Sandstrom, C., Eriksson Rohnish, H., Hedenqvist, M.S. and Langton, M., 2023, Pasting and gelation of faba bean starch-protein mixtures, *Food Hydrocoll.* 138: 108494.

- [51] Thirathumthavorn, D., Sintongtanaput, A., Wongpracharat, S., Chai-Uea, P. and Udomrati, S., 2022, Physicochemical properties of instant fried gluten-free noodles incorporating defatted rice berry bran and soy protein isolate, *Braz. J. Food Technol.* 25: e2022045.
- [52] Oakenfull, D., Pearce, J. and Burley, R.W., 1997, Protein Gelation, pp. 111-142, In Damodaran, S. and Paraf, A. (Ed.), *Food Proteins and Their Applications*, Marcel Dekker, Inc., New York.