



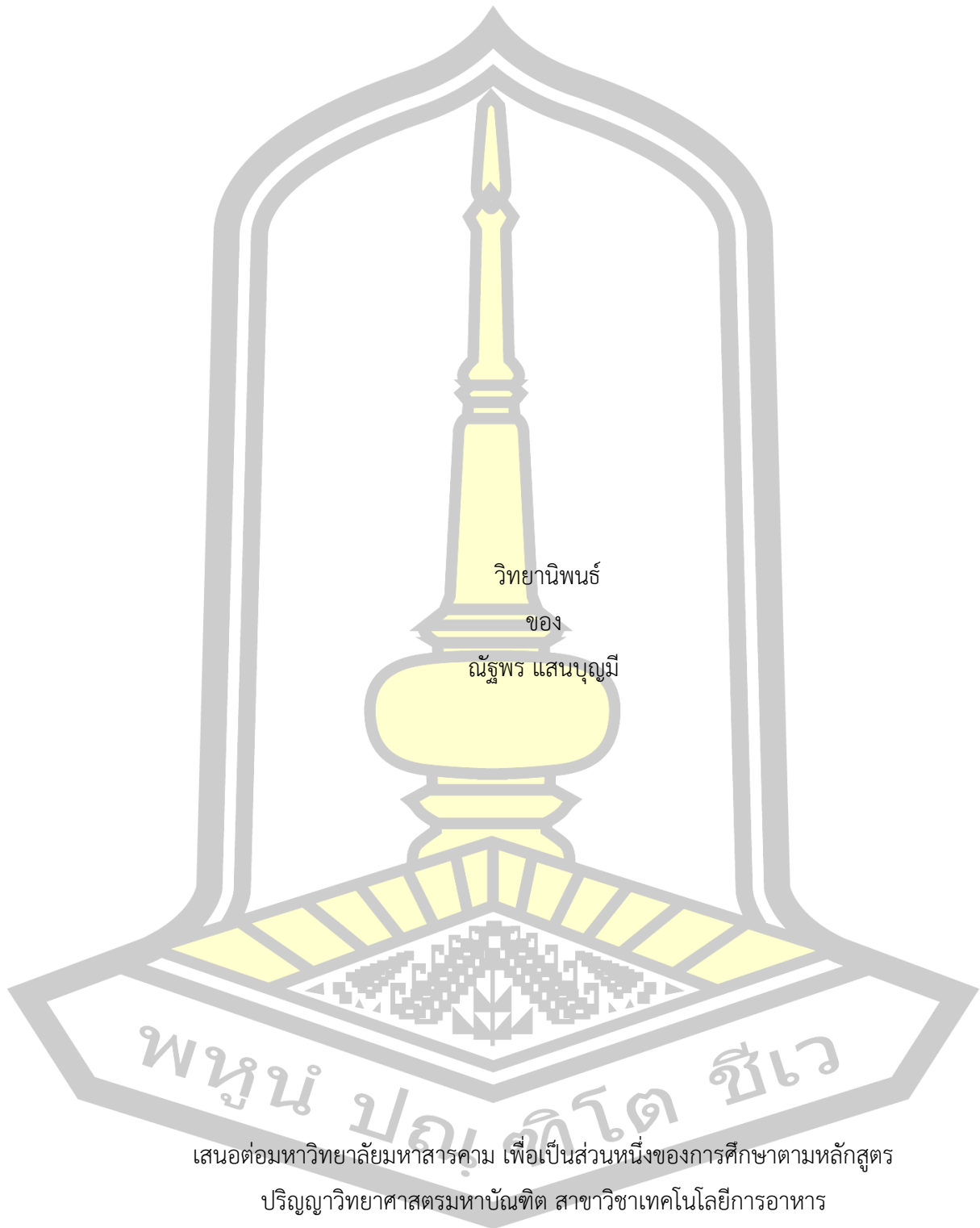
การปรับปรุงคุณภาพและสมบัติของเจลซูริมิโดยส่วนประกอบเชิงหน้าที่จากธรรมชาติ

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ณัฐพร แสนบุญมี

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร  
เมษายน 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การปรับปรุงคุณภาพและสมบัติของเจลซูริมิโดยส่วนประกอบเชิงหน้าที่จากธรรมชาติ



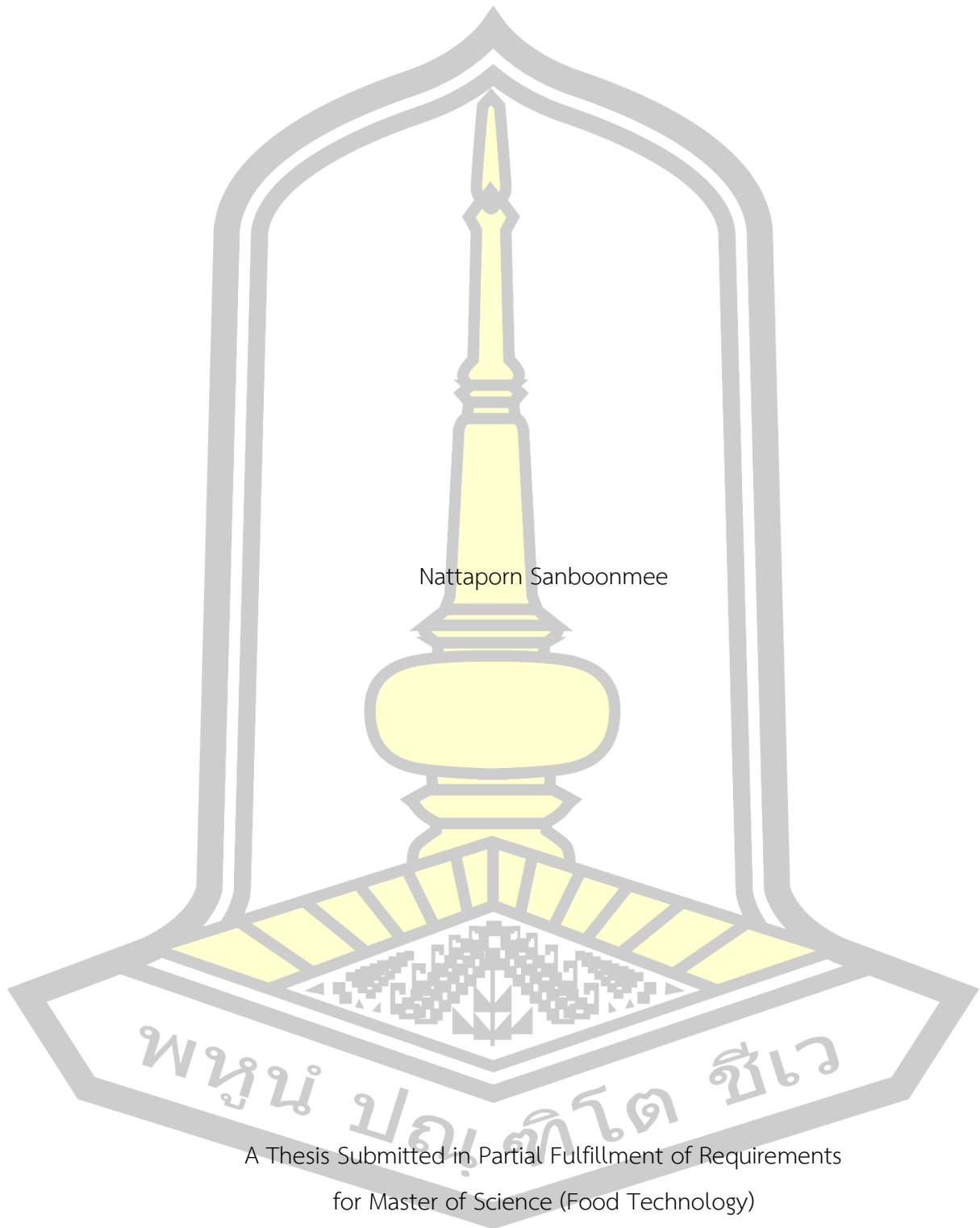
เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร

เมษายน 2568

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Improvement of quality and surimi gel properties by natural functional ingredients



Nattaporn Sanboonmee

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Master of Science (Food Technology)

April 2025

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวณัฐพร แสนบุญมี  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ชีระพันธ์ จำเริญพัฒน์ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศ. ดร. ศิริธร ศิริอมรพรณ )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผศ. ดร. เกียรติศักดิ์ บรรลือ )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ปริญญาธิ์ อิศรานูวัฒน์ )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการอาหาร ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....  
(ศ. ดร. ปรีชา ประเทพา )

คณบดีคณะเทคโนโลยี

.....  
(ผศ. ดร. พลเดช เขาวรัตน์ )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

พูน บัณฑิต ชีวะ

**ชื่อเรื่อง** การปรับปรุงคุณภาพและสมบัติของเจลซูริมิโดยส่วนประกอบเชิงหน้าที่จากธรรมชาติ

**ผู้วิจัย** ณัฐพร แสสนบุญมี

**อาจารย์ที่ปรึกษา** ศาสตราจารย์ ดร. ศิริฉัตร ศิริอมรพรรณ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ บรรลือ

**ปริญญา** วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต **สาขาวิชา** เทคโนโลยีการอาหาร

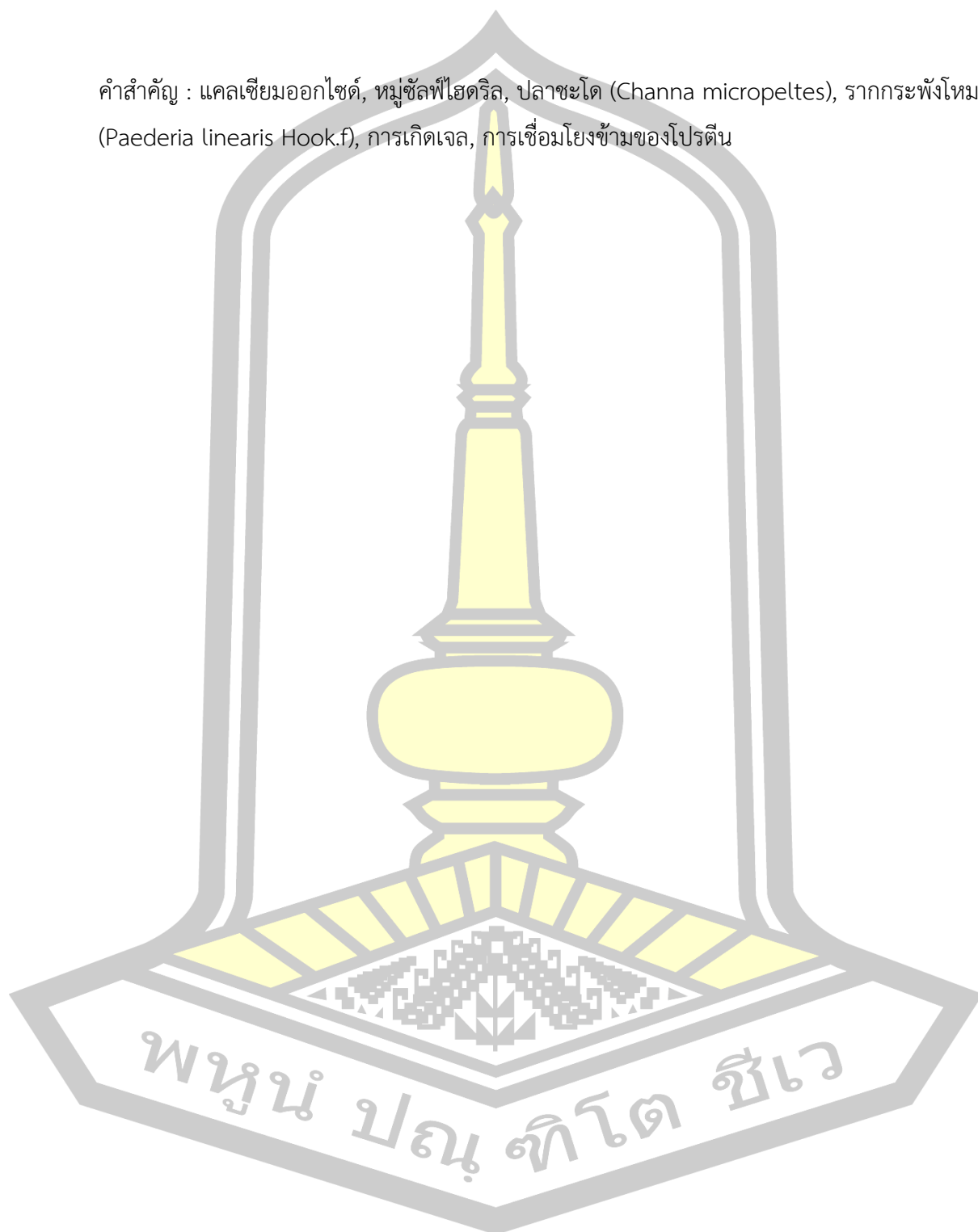
**มหาวิทยาลัย** มหาวิทยาลัยมหาสารคาม **ปีที่พิมพ์** 2568

### บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ได้จากเปลือกไข่และสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม (*Paederia linearis Hook.f*) ความเข้มข้นต่างกัน (0–10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) ต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเจลจากซูริมิ *Channa micropeltes* ผลการศึกษาพบว่า การเติม CaO ที่ความเข้มข้น 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ส่งผลให้คุณสมบัติของเจลดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยความแข็งแรงเจลเพิ่มขึ้นร้อยละ 48.2 ความต้านทานการแตกหักเพิ่มขึ้นร้อยละ 26 และการยืดตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 18 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.76 การวิเคราะห์สมบัติการไหล (Rheology Properties) พบว่า ค่ามอดูลัสเก็บพลังงาน ( $G'$ ) และมอดูลัสสูญเสียพลังงาน ( $G''$ ) เพิ่มขึ้น ซึ่งบ่งชี้ถึงความยืดหยุ่นและความหนืดที่เพิ่มขึ้นของเจลในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นโครงสร้างเจลที่มีความเรียบเนียนและหนาแน่นพร้อมรูขนาดเล็กที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมของ CaO การวิเคราะห์ SDS-PAGE ยืนยันว่า CaO กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ช่วยในการเชื่อมโยงระหว่างโซ่หนักของไมโอซิน (MHC) และพันธะไดซัลไฟด์ ผลการศึกษาสำหรับสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมที่ 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  สามารถปรับปรุงคุณสมบัติของเจลอย่างมีนัยสำคัญโดย ความต้านทานการแตกหัก การยืดตัวและความแข็งของเจลเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.27, 36.25 และ 82.88 ตามลำดับและความสามารถในการกักเก็บน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 33.46 และสามารถลดปริมาณโปรตีนหมูซัลไฟไฮดริลได้ 5.51  $\mu\text{mol}/\text{g}$  ซึ่งผลกระทบอธิบายได้ว่าการส่งเสริมการเชื่อมโยงโปรตีนไมโอซิน ผ่านกระบวนการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ทำให้เจลมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ภาพโครงสร้าง SEM แสดงถึงการกระจายอย่างสม่ำเสมอและมีรูขนาดเล็ก ในขณะที่การวิเคราะห์ SDS-PAGE แสดงให้เห็นว่าหมูซัลไฟไฮดริลช่วยเพิ่มกิจกรรมของ TGase ส่งเสริมการเชื่อมโยงระหว่างโซ่หนักของไมโอซิน (MHC) และแอกติน ส่งเสริมการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นระหว่าง

กระบวนการให้ความร้อนซึ่งส่งผลให้เนื้อเจลมีความแข็งแรงและเนื้อสัมผัสเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : แคลเซียมออกไซด์, หมูซิลไฟไฮดริล, ปลาชะโด (*Channa micropeltes*), รากกระพังโหม (*Paederia linearis* Hook.f), การเกิดเจล, การเชื่อมโยงข้ามของโปรตีน



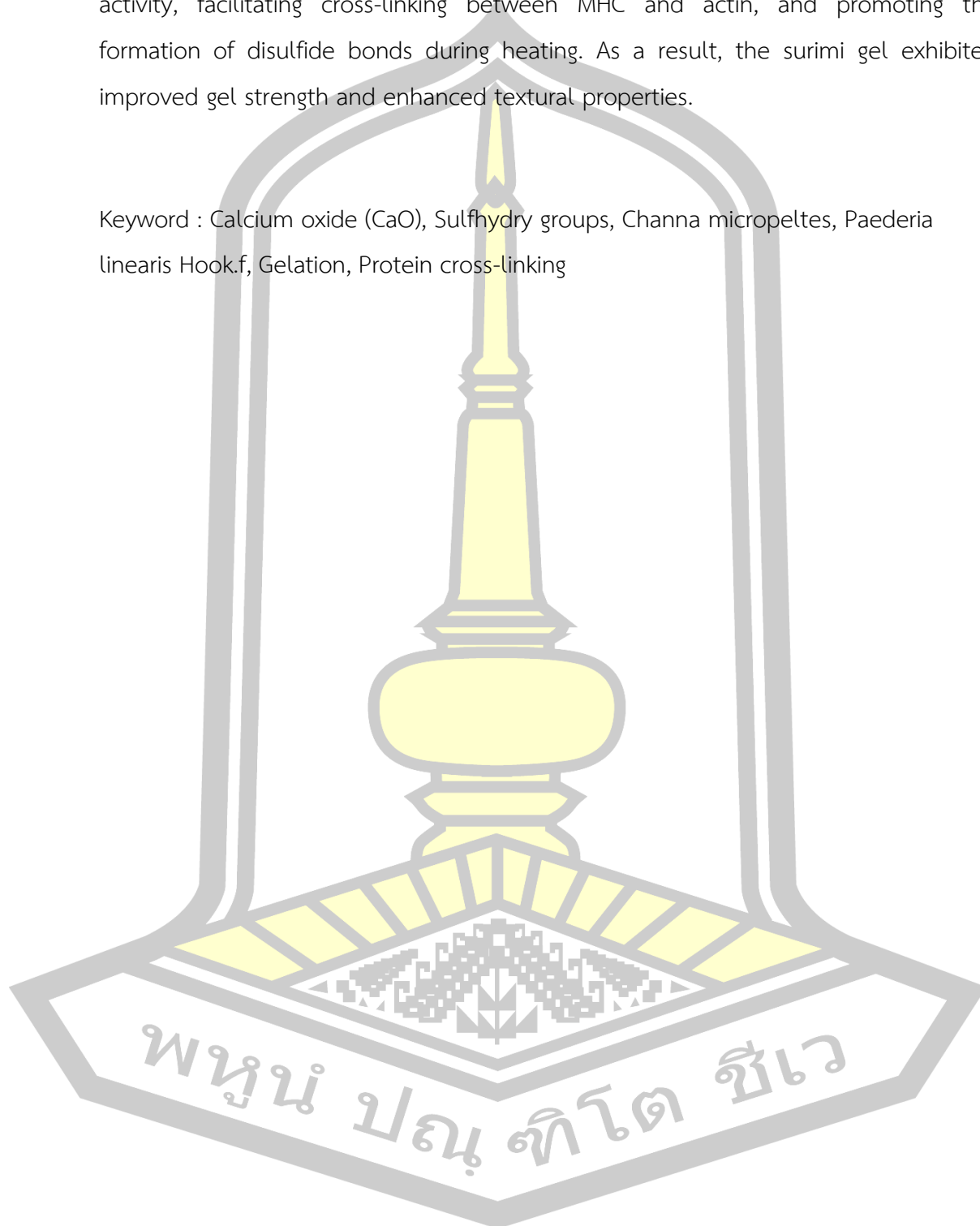
<b>TITLE</b>	Improvement of quality and surimi gel properties by natural functional ingredients		
<b>AUTHOR</b>	Nattaporn Sanboonmee		
<b>ADVISORS</b>	Professor Sirithon Siriamornpun , Ph.D. Assistant Professor Kriangsak Banlue , Ph.D.		
<b>DEGREE</b>	Master of Science	<b>MAJOR</b>	Food Technology
<b>UNIVERSITY</b>	Maharakham University	<b>YEAR</b>	2025

### ABSTRACT

This study investigates the effects of calcium oxide (CaO) derived from eggshells and varying concentrations of sulfhydryl group extract from *Paederia linearis Hook.f roots* (0–10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) on the physicochemical properties of *Channa micropeltes* surimi gel. The results demonstrate that the addition of CaO at 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  significantly enhanced gel properties, with gel strength increasing by 48.2%, breaking force increasing by 26%, and deformation improving by 18%, compared to the control group ( $p < 0.05$ ). Additionally, water-holding capacity increased by 9.76%. Rheological analysis revealed significant increases in both the storage modulus ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ), suggesting enhanced gel elasticity and viscosity during heating. Scanning electron microscopy (SEM) images exhibited a uniform, dense gel structure with small pores at the optimal CaO concentration. SDS-PAGE analysis confirmed that CaO activated transglutaminase (TGase) activity, which facilitated cross-linking between myosin heavy chain (MHC) and disulfide bonds. Regarding the sulfhydryl group extract from *Paederia linearis Hook.f roots*, the optimal concentration of 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  significantly improved gel properties, with gel strength increasing by 82.88%, breaking force increasing by 34.27%, and deformation increasing by 36.25%. Additionally, water-holding capacity increased by 33.46%, and sulfhydryl group content decreased by 5.51  $\mu\text{mol}/\text{g}$ . This effect was attributed to the promotion of myosin protein cross-linking, through disulfide formation resulting in stronger, more elastic gels. SEM analysis revealed a uniformly distributed small-pore

structure, while SDS-PAGE analysis showed that sulfhydryl groups enhanced TGase activity, facilitating cross-linking between MHC and actin, and promoting the formation of disulfide bonds during heating. As a result, the surimi gel exhibited improved gel strength and enhanced textural properties.

Keyword : Calcium oxide (CaO), Sulfhydry groups, Channa micropeltes, Paederia linearis Hook.f, Gelation, Protein cross-linking



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์เป็นอย่างดีได้ด้วยความช่วยเหลือ และการให้คำปรึกษาจาก คณะอาจารย์ที่ปรึกษา คือ ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมรพรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและผู้ช่วย ศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ บรรลือ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำแนะนำในทุกขั้นตอนในการศึกษา การวางแผนการศึกษาตลอดทั้งหลักสูตร การออกแบบการศึกษาระบบการเรียนการสอนเพื่อให้ได้คำตอบ ถูกต้อง ตลอดจนการเขียนรายงานทางวิชาการ การตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ รวมทั้ง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการ ดำเนินการวิจัย ขอขอบพระคุณคณาจารย์ ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ คณะ เทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการและงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพันธ์ จำเริญพัฒน์ คณะแพทย์แผนไทยและแพทย์ ทางเลือก มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดาทิพย์ อินทร์ชื่น และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริยาภรณ์ อิศรานัฐวัฒน์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กรรมการสอบที่กรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่ง ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิพงษ์ พุ่มคำ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำและความอนุเคราะห์เกี่ยวกับการศึกษาค้นคว้าวิเคราะห์เคลือบ ออกไซด์ ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เอกพล วังคะฮาด คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย มหาสารคาม ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการศึกษาค้นคว้าวิเคราะห์หาโปรตีน และขอขอบพระคุณวิทยาลัย เกษตรและเทคโนโลยีร้อยเอ็ด ที่ให้โอกาสในการศึกษาและพัฒนาตนเองตลอดจนให้ความอนุเคราะห์ การศึกษาพืชพรรณรากกระพังโหมจนสำเร็จลุล่วง

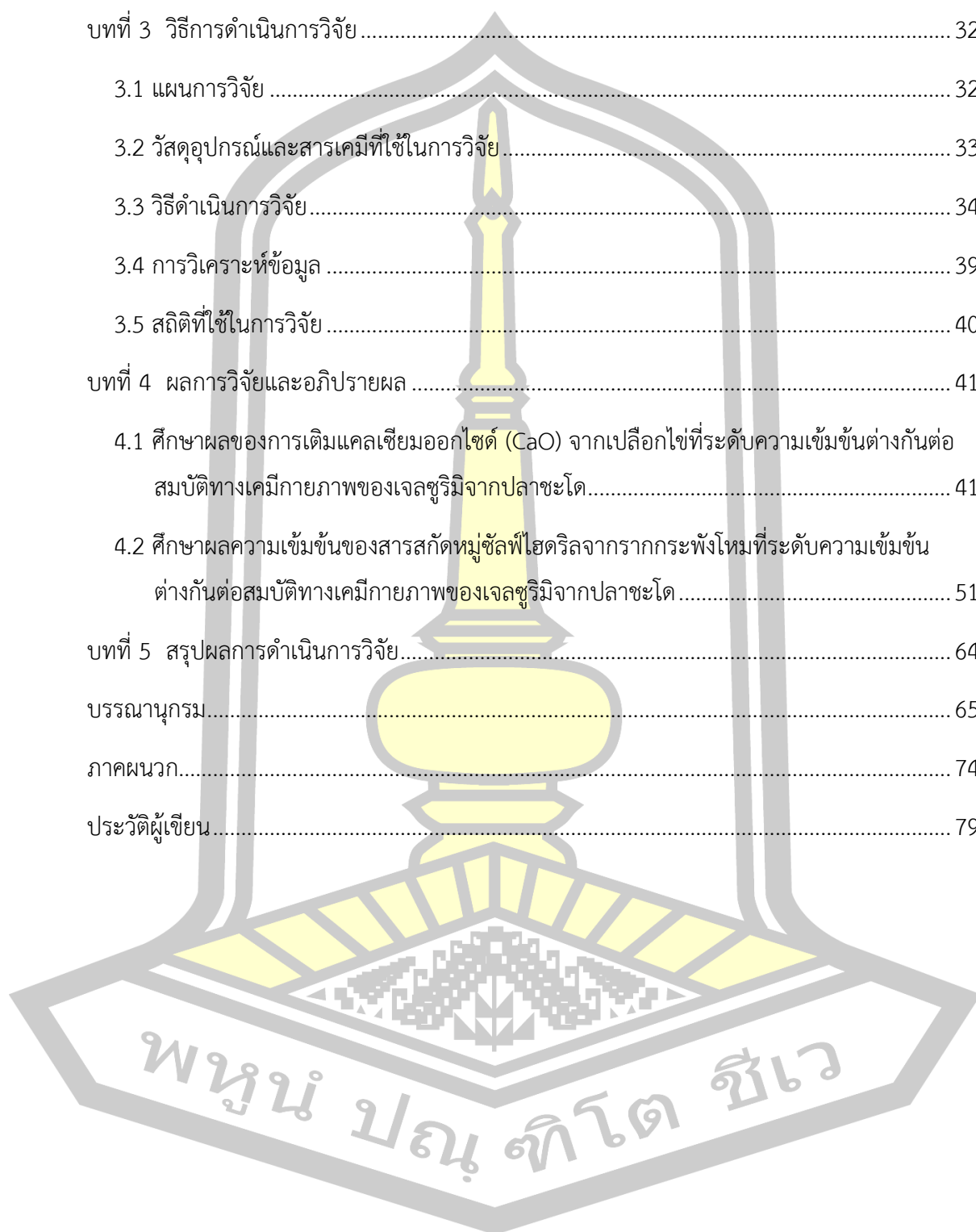
ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ คณะเทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่อำนวยความสะดวก อุปกรณ์และสารเคมี ตลอดจนให้คำแนะนำในการวิเคราะห์และใช้งานเครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบุพการี ที่คอยสนับสนุนให้กำลังใจและกำลังทรัพย์ขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ ทุกคนที่คอยแนะนำและช่วยเหลือจนทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีทุก ประการ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
1.4 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เปลือกไข่ (Egg shell).....	5
2.2 กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่.....	7
2.3 กระจังไหม ( <i>Paederia linearis hook.f</i> ).....	14
2.4 ปลาชะโด ( <i>Channa micropeltes</i> ).....	16
2.5 กลไกการเกิดเจลของเนื้อปลา (Gelation mechanism of fish muscle protein).....	17
2.6 โปรตีน (Protein).....	22
2.7 ซูริมิและผลิตภัณฑ์เจลซูริมิ (Surimi and surimi gel products).....	24

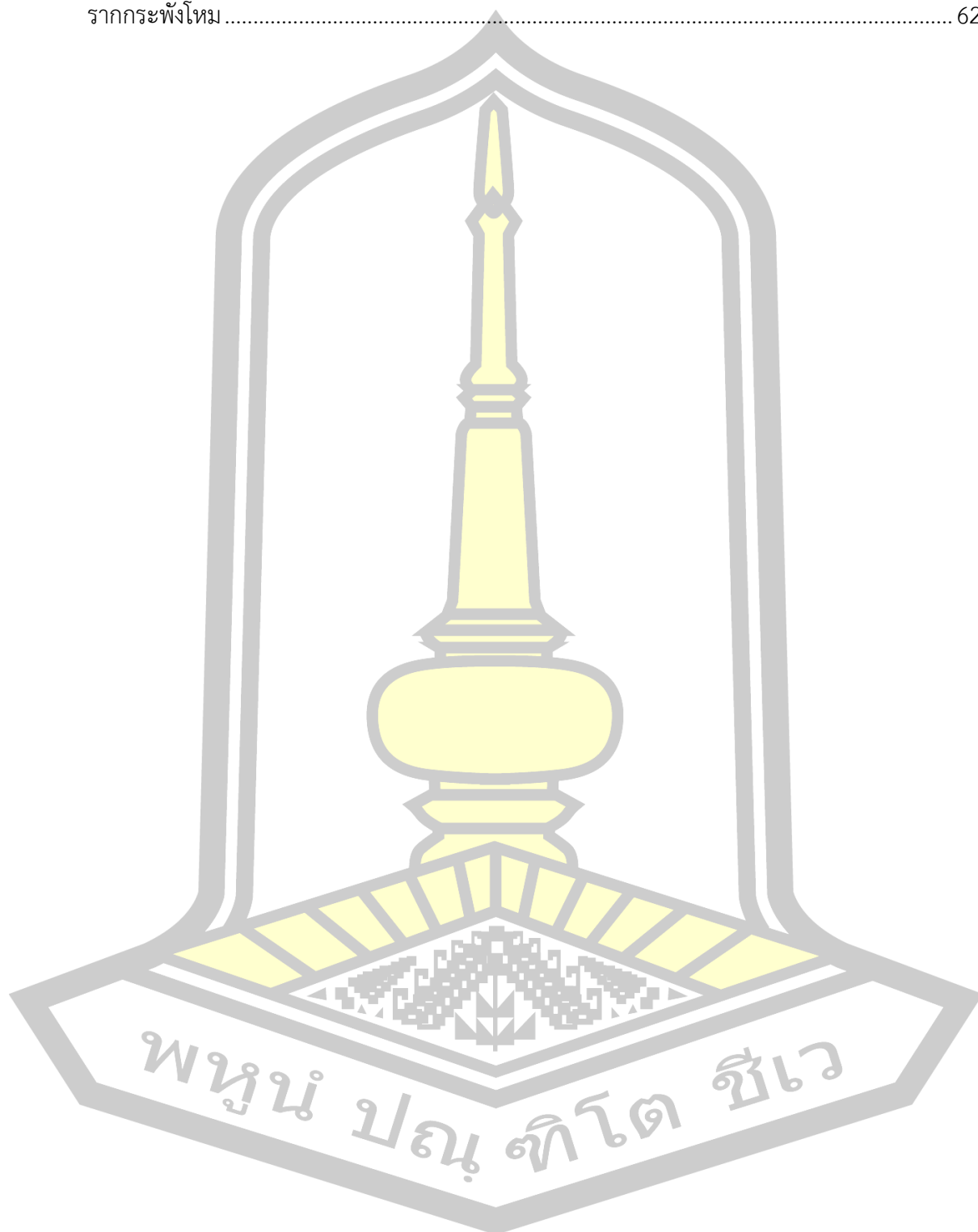
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 แผนการวิจัย.....	32
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	33
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	34
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
3.5 สถิติที่ใช้ในการวิจัย.....	40
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	41
4.1 ศึกษาผลของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด.....	41
4.2 ศึกษาผลความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินการวิจัย.....	64
บรรณานุกรม.....	65
ภาคผนวก.....	74
ประวัติผู้เขียน.....	79



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 คุณค่าทางโภชนาการของผงเปลือกไข่.....	6
ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่.....	9
ตารางที่ 3 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) สภาวะการเผาในระยะเวลาต่างกัน.....	9
ตารางที่ 4 Breaking force, Deformation และ Gel strength ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	42
ตารางที่ 5 Expressible moisture content ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	43
ตารางที่ 6 Whiteness ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	43
ตารางที่ 7 ค่า TCA-soluble protein content ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	44
ตารางที่ 8 ปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	45
ตารางที่ 9 Breaking force, Deformation และ Gel strength ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	52
ตารางที่ 10 Expressible moisture content ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	53
ตารางที่ 11 Whiteness ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	54
ตารางที่ 12 ค่า TCA-soluble protein content ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	55
ตารางที่ 13 Protein sulfhydryl content ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน.....	56

ตารางที่ 14 การเชื่อมโยงระหว่างการใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และหมูซัลไฟไฮดริลจาก รากกระพังโหม.....	62
---	----



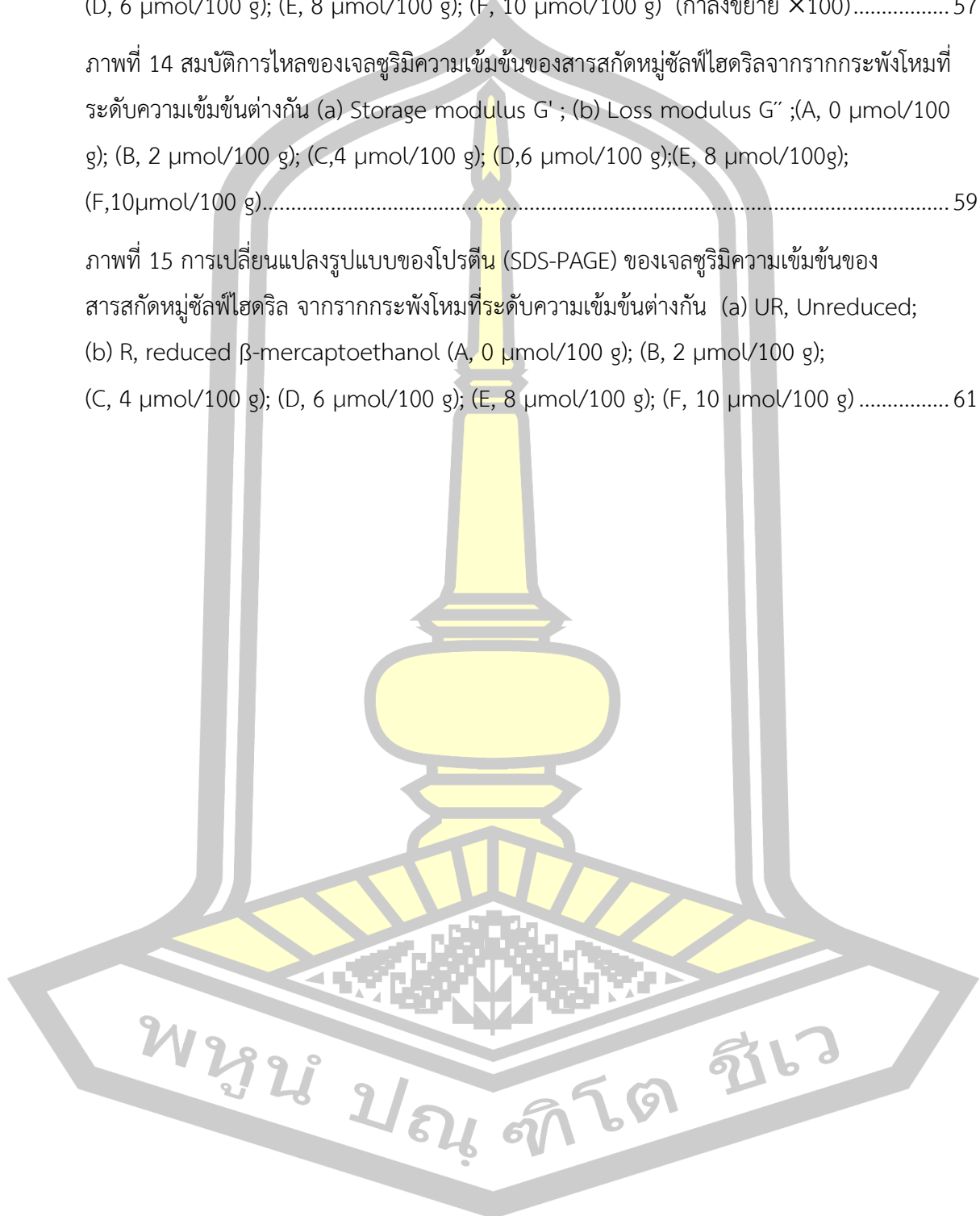
## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของไข่ไก่ .....	7
ภาพที่ 2 วิเคราะห์ XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์.....	8
ภาพที่ 3 เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate) .....	10
ภาพที่ 4 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln).....	10
ภาพที่ 5 ต้น ใบ และรากกระพังโหมม .....	15
ภาพที่ 6 รากกระพังโหมม .....	15
ภาพที่ 7 ปลาชะโด .....	17
ภาพที่ 8 แบบจำลองการเกิดเจลของโปรตีนจากเนื้อปลาในระยะต่าง ๆ ณะให้ความร้อน .....	17
ภาพที่ 9 ผลิตภัณฑ์ซูริมิ.....	25
ภาพที่ 10 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน ; (A, 0 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ) (กำลังขยาย $\times 100$ ) .....	46
ภาพที่ 11 สมบัติการไหลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน;(a) Storage modulus $G'$ ;(b) Loss modulus $G''$ ;(A, 0 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ) .....	48
ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีน (SDS-PAGE) ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน (a) UR, Unreduced; (b) R, reduced $\beta$ -mercaptoethanol (A, 0 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10 $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ) .....	50
ภาพที่ 13 โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมมที่ระดับ	

ความเข้มข้นต่างกัน : (A) control (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ) (กำลังขยาย  $\times 100$ )..... 57

ภาพที่ 14 สมบัติการไหลของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน (a) Storage modulus  $G'$ ; (b) Loss modulus  $G''$ ; (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ )..... 59

ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีน (SDS-PAGE) ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน (a) UR, Unreduced; (b) R, reduced  $\beta$ -mercaptoethanol (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ) ..... 61



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ซูริมิ (Surimi) เป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนจากปลาที่ผ่านกระบวนการแปรรูป นิยมใช้ในการผลิตอาหาร เช่น คามาโบโกะ (Kamaboko) เต้าหู้ปลา ลูกชิ้นปลา และปูอัด (Feng et al. 2023) มีโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ (ไมโอซินและแอกติน) เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเกิดเจลที่ส่งผลต่อเนื้อสัมผัสและความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40°C กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ Transglutaminase (TGase) ช่วยสร้างโครงข่ายโปรตีนสามมิติให้เสถียรภาพ จากนั้นให้ความร้อนต่อที่อุณหภูมิ 80 ถึง 90°C เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเจลและความสมบูรณ์ของโครงสร้างเจล ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีโครงสร้างที่แข็งแรงขึ้น การเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดเจลของซูริมิจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์คุณภาพสูง (Wang Yudong et al. 2024) ยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้บริโภค ทั้งในภาคอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปลาชะโด (*Channa micropeltes*) เป็นปลากินเนื้อในแหล่งน้ำจืด พบพื้นที่เขตร้อนและกึ่งเขตร้อนทั่วโลก (Zuraini et al. 2006) ด้วยเนื้อของปลาชะโดมีสีขาวนุ่ม มีก้างน้อย และให้โปรตีนทำให้ปลาชะโดเหมาะแก่การนำมาเป็นวัตถุดิบที่มีคุณภาพสำหรับการผลิตซูริมิ เป็นผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปจากเนื้อปลา ด้วยคุณค่าทางโภชนาการ (โปรตีนคุณภาพสูง ไขมันต่ำ) และรสชาติที่ดีทำให้ผลิตภัณฑ์ซูริมิได้รับความนิยมและบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั่วโลก (Zhao et al. 2023) อย่างไรก็ตาม การปรับปรุงคุณสมบัติการเกิดเจลของซูริมิจากปลาชะโดเป็นงานวิจัยที่ต้องได้รับการศึกษาเพิ่มเติมควบคู่ไปกับเจลที่ได้จากการเตรียมแคลเซียมไอออนแคลเซียม  $Ca^{2+}$  ช่วยในการเปลี่ยนสภาพโปรตีนลดพลังงานอิสระที่จำเป็นต่อการถ่ายโอนหมู่ที่ไม่ชอบน้ำเข้าสู่สารละลาย (Lertwittayanon et al. 2013)  $Ca^{2+}$  และช่วยให้โครงสร้างไมโอซินของปลาคลายตัว พบได้จากหมู่ฟังก์ชันสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ นอกจากนี้  $Ca^{2+}$  สามารถทำลายโครงสร้าง  $\alpha$ -เฮลิกซ์ของไมโอซิน ส่งเสริมปฏิกิริยาไฮโดรโฟบิก และเพิ่มคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัส (Yongsawatdigul and Sinsuwan 2007) นอกจากนี้ เอนไซม์ Transglutaminase (TGase) เป็นเอนไซม์ที่ขึ้นกับ  $Ca^{2+}$  ถูกกระตุ้นโดยการเติมสารประกอบแคลเซียมลงในเนื้อซูริมิ ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านเนื้อสัมผัสของเจลซูริมิ (Yin, Reed, and Park 2014; Yongsawatdigul, Worratao, and Park 2002) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมอาหารเป็นแหล่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่คุ้มค่า สามารถผลิตได้โดยผ่านกระบวนการเผาอุณหภูมิ 800°C ได้รับความบริสุทธิ์สูงกว่าร้อยละ 98 (Pornchai, Putkham, and Putkham 2016) มีบทบาทสำคัญการเกิดเจลความยืดหยุ่น และความแข็งแรงของโครงสร้างในซูริมิ โดยส่งเสริมการเชื่อมโยงโปรตีนผ่าน

ปฏิกิริยาไฮโดรโฟบิกและการสร้างพันธะไดซัลไฟด์เพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างเจล (Yu et al. 2017) สอดคล้องกับการนำแคลเซียมจากผงเปลือกไข่ไก่มาช่วยปรับปรุงคุณภาพความยืดหยุ่นของขนมปัง (Platon et al. 2020) และนำมาเป็นวัตถุดิบอาหาร เช่น อาหารเสริมแคลเซียม

นอกจากนี้เจลจากสารสกัดจากรากกระพังโหม (*Paederia linearis hook.f*) ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่น ความแข็งแรงเจล ลดปริมาณหมู่ซัลไฟด์ไตรลทั้งหมดในผลิตภัณฑ์การผลิตซูริมิ โดยคุณสมบัติของเนื้อปลาขึ้นอยู่กับ Myofibrillar proteins โดยเฉพาะ Actomyosin เป็นโปรตีนหลักใน Myofibrils เกิดเจลและโครงสร้างของ Actomyosin ด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ค่า pH และชนิดของ Actomyosin การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและพื้นผิวของโปรตีนที่ความร้อนในระยะเวลาสั้นมีผลต่อความสามารถในการละลาย แต่ไม่มีผลต่อการสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (Liu et al. 2011) และ การใช้ความร้อนสามารถปรับปรุงรสชาติเพิ่มขึ้นของความชื้นผิวและหมู่ซัลไฟด์ไตรลทั้งหมด โดยการเชื่อมกับกรดอะมิโนที่สามารถทำปฏิกิริยาหมู่ซัลไฟด์และพันธะไฮโดรโฟบิก (Xu et al. 2019) นอกจากนี้กลุ่มซัลไฟด์ไตรลภายในโมเลกุล Actomyosin สามารถสร้างพันธะไดซัลไฟด์ผ่านปฏิสัมพันธ์ของโปรตีนและเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างโปรตีน (Hsu et al. 2007) นอกจากนี้สารสกัดจากรากกระพังโหมลดปริมาณโปรตีนที่ละลายในกรดไตรคลอโรอะซิติก (Banlue, Sarapoka, and Wongpinij 2018) รวมถึงเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำและช่วยส่งเสริมให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในเจลที่เติมสารสกัดด้วยน้ำได้ดี

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีจุดมุ่งหมายในการศึกษาการประยุกต์ใช้การเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่และความเข้มข้นของสารสกัดหมู่ซัลไฟด์ไตรลจากรากกระพังโหมในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเจลโปรตีนจากเนื้อปลาชะโด เพื่อส่งเสริมปรับปรุงสมบัติด้านเนื้อสัมผัสและความยืดหยุ่นจากเจลเนื้อปลา เพื่อเพิ่มความหลากหลายของการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ไก่และกระพังโหม และเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการเป็นทางเลือกให้กับกลุ่มที่ขาดแคลเซียมหรือผู้ที่ต้องการเสริมแคลเซียมให้เพียงพอกับร่างกายและเป็นช่องทางการตลาดของกลุ่มอาหาร เพื่อสุขภาพตลอดจนเป็นการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ไก่ที่เป็นเศษเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมอาหาร

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการเติมสารสกัดหมู่ซัลไฟด์ไตรลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด

### 1.3 ความสำคัญของงานวิจัย

สามารถทราบชนิดและความเข้มข้นของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ และความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่เหมาะสมต่อความสามารถในการเกิดเจลของโปรตีนจากเนื้อปลาชะโด

### 1.4 สมมติฐานของการวิจัย

ปริมาณความเข้มข้นของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่และความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่มีผลต่อการส่งเสริมคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของเจลโปรตีนจากเนื้อปลาชะโด

### 1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 สิ่งที่น่าสนใจคือ ชูริมิจากปลาชะโด

1.5.2 ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

1.5.2.1 ตัวแปรต้น ได้แก่

1.5.2.1.1 ความเข้มข้นของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ และความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม

1.5.2.1.2 ระยะเวลาของการให้ความร้อน

1.5.2.2 ตัวแปรตาม ได้แก่

1.5.2.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ Breaking force, Deformation, Gel strength ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Expressible moisture contents) ความขาว (Whiteness) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) สมบัติการไหล (Rheology Properties)

1.5.2.2.2 คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ TCA-soluble protein, Total sulfhydryl Groups (TSH), Protein sulfhydryl groups (PSH), Sodium Dodecyl Sulphate Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS-PAGE)

1.5.2.3 ตัวแปรควบคุม ได้แก่

1.5.2.3.1 ระยะเวลาในการให้ความร้อน (2-Step heating)

1.5.2.3.1.1 ครั้งที่ 1 ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 นาที

1.5.2.3.1.2 ครั้งที่ 2 ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 20 นาที

1.5.2.3.2 ขนาดของตัวอย่าง  $\varnothing$  2.5×2.5 cm

1.5.2.3.3 ความชื้นของชูริมีร้อยละ 80

## 1.6 นิยามศัพท์เฉพาะ

ซูริมิ (Surimi) หมายถึง การนำเนื้อปลาสดผ่านกระบวนการแยกก้างออก ล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อนำไขมันและองค์ประกอบที่ละลายน้ำออก จากนั้นเติมสารช่วยป้องกันการสูญเสียธรรมชาติของโปรตีน เช่น น้ำตาล หรือซอร์บิทอล ฟอสเฟตแล้วเก็บในรูปของผลิตภัณฑ์แช่แข็งเพื่อผลิตต่อไป

เนื้อปลาบด (Minced Fish) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำปลาที่ผ่านกระบวนการเบื้องต้นคือ ตัดหัวควักไส้หรือขึ้นเนื้อปลาที่ได้จากการแล่ไปแยกเนื้อออกจากส่วนของก้างและหนังปลาด้วยเครื่องแยกเนื้อและมืองค์ประกอบเคมีสีและกลิ่นปกติ

เจลกระพังโหม หมายถึง การนำรากมาล้างทำความสะอาดหั่นเป็นชิ้นเล็กแล้วบดให้ละเอียด จากนั้นเข้าเครื่องปั่นกรองด้วยผ้าขาวบางและแยกกาก แล้วกรองด้วยกระดาษกรองอีกชั้น ได้สารสกัดจากรากกระพังโหม

แคลเซียมออกไซด์ หมายถึง การนำเปลือกไข่ไก่ที่เป็นของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไข่ การบริโภครากคั่วเร็วและชุมชน โดยนำมาล้างทำความสะอาด การนึ่งฆ่าเชื้ออบด้วยอุณหภูมิสูง 800 °C ที่ระยะเวลา 4 ชั่วโมง ได้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกไข่ไก่จะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย แบ่งออกเป็นหัวข้อตามลำดับดังนี้

- 2.1 เปลือกไข่ (Egg shell)
- 2.2 กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่
- 2.3 รากกระพังโหม (*Paederia linearis hook.f*)
- 2.4 ปลาชะโด (*Channa micropeltes*)
- 2.5 กลไกการเกิดเจลของเนื้อปลา (Gelation mechanism of fish muscle protein)
- 2.6 โปรตีน (Protein)
- 2.7 ซูริมิและผลิตภัณฑ์เจลซูริมิ (Surimi and surimi gel products)
- 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เปลือกไข่ (Egg shell)

ไข่เป็นแหล่งอาหารที่อุดมด้วยคุณค่าทางโภชนาการ อาทิเช่น โปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ เป็นต้น โดยเฉพาะโปรตีนจากไข่ไก่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่เฉพาะตัว เช่น คุณสมบัติการเกิดเจล การเกิดฟอง (ไข่ขาว) และคุณสมบัติอิมัลซิไฟเออร์ (ไข่แดง) และเปลือกไข่นำมาใช้ประโยชน์ทางเกษตรกรรม (Sharif, Saleem, and Javed 2018) ไข่มีสีน้ำตาลหรือสีขาวขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์แม่ไก่ สีไข่ไม่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนาการ ส่วนประกอบสำคัญของเปลือกไข่คือ แคลเซียม มีลักษณะเป็นแท่ง ๆ มาต่อกันในการสร้างเปลือกไข่แต่ละฟองนั้นจะใช้แคลเซียมประมาณ 2 กรัม มีคอลลาเจนสานกันเป็นข่ายและหินปูน (แคลเซียมคาร์บอเนต) ทำให้เปลือกไข่เป็นสารเคลือบที่สามารถป้องกันเชื้อแบคทีเรียไม่ให้เปลือกไข่มีรูขนาดเล็ก ในแม่ไก่จะมีเมือกเคลือบที่ผิวของเปลือกไข่ เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศและน้ำผ่านเข้าไปได้ หากเก็บไว้นานเมือกจะแห้งไปกับอากาศทำให้ไข่เสื่อมคุณภาพ

##### 2.1.1 องค์ประกอบทางเคมีและโภชนาการของไข่

ไข่ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ เปลือกไข่ (Egg shell) ร้อยละ 9.5 ไข่ขาว (Egg white) ร้อยละ 63 และไข่แดง (Egg yolk) ร้อยละ 27.5 ของเปลือกไข่ทั้งหมด และส่วนรับประทานของไข่ประกอบด้วยน้ำร้อยละ 74 โปรตีนร้อยละ 12 ไขมันร้อยละ 12 คาร์โบไฮเดรตร้อยละ <1 รวมทั้งวิตามินและแร่ธาตุ องค์ประกอบทางเคมีและสารอาหารของไข่มีสัดส่วนโปรตีนกระจายทั้งในไข่ขาว (โอวัลบูมิน, โอโวทรานเฟอริน, โอโวมูคอยด์, โอโวมูซิน ฯลฯ) และไข่แดง (ไลโปโปรตีนสูง, ไลโปโปรตีนต่ำ และลิพิดิน) โปรตีนจากไข่ใช้เป็นมาตรฐานในการวัดคุณภาพของโปรตีนในอาหารอื่น ๆ ซึ่งไข่เกือบทั้งหมดอยู่ในไข่แดงและไขมันในไข่แดงประมาณร้อยละ 65 เป็นไตรกลีเซอไรด์ ในขณะที่

ฟอสโฟลิปิดคอเลสเตอรอลและแคโรทีนอยด์ร้อยละ 30, 4 และ 1 ตามลำดับ ไข่เป็นแหล่งสารอาหารรองที่ดี เช่น วิตามินและแร่ธาตุ ประกอบด้วยร้อยละ 16, 29, 19 และ 9 ของปริมาณฟอสฟอรัส ซีลีเนียม เหล็ก และสังกะสีควรได้รับในแต่ละวัน (RDI) และร้อยละ 10 ของ RDI ของวิตามิน A, D, E, K, B2 บี 12 ไบโอดีน และกรดแพนโทธีนิก (Nimalaratne and Wu 2015)

นอกจากนี้เปลือกไข่พบมากที่สุดคือ ไข่ แคลเซียม โปรตีน และสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบมีโครงสร้างของ Dolomite มีความแข็งกว่า Calcite มีสารเชิงซ้อนในโพลีแซคคาไรด์ ประกอบด้วย Galactosamine, Glucosamine, Galactose, Fructose, Glucose, Sialic acids และเยื่อหุ้มเปลือกไข่มี Protoporphyrin เล็กน้อย จึงนำมาผลิตเป็นแหล่งแคลเซียมคาร์บอเนต

**ตารางที่ 1** คุณค่าทางโภชนาการของผงเปลือกไข่

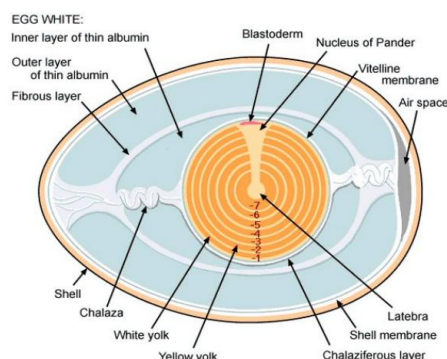
ส่วนต่างๆ	ผงเปลือกไข่สีขาว(%)	เปลือกไข่สีขาว(%)
ความชื้น	0.46	0.20
โปรตีน	3.92	5.04
ไข่	94.61	94.28
ไขมัน	0.35	0.08
แคลเซียม	34.12	33.13
แมกนีเซียม	0.29	0.36
ฟอสฟอรัส	0.04	0.07
โซเดียม	0.05	0.04
โพแทสเซียม	0.03	0.04

ที่มา : (Subhajit et al. 2017)

### 2.1.2 โครงสร้างของไข่ไก่

โครงสร้างของเปลือกไข่ไก่มีพื้นผิวขรุขระและเป็นเม็ดทราย มีรูขนาดเล็กมากถึง 17,000 รู เปลือกไข่ประกอบด้วย ผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตเกือบทั้งหมดและเป็นเยื่อซึมผ่าน (Semipermeable membrane) กล่าวคือ อากาศและความชื้นสามารถผ่านเข้าออกได้ เปลือกไข่มีชั้นเคลือบบาง ๆ ด้านนอกสุด เรียกว่า "บลูม" (Bloom) หรือ "คิวติเคิล" (Cuticle) ช่วยป้องกันเชื้อแบคทีเรียและฝุ่นละออง โดยแบ่งส่วนประกอบของเปลือกไข่เป็นชั้นต่างๆ (ภาพที่ 1) ดังต่อไปนี้

1. เยื่อหุ้มด้านในและด้านนอก (Inner and outer membranes) เยื่อโปรตีนสองชั้นใสที่อยู่ระหว่างเปลือกไข่กับไข่ขาวทำหน้าที่ ป้องกันเชื้อแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพเพราะประกอบด้วยเคราติน (keratin) เป็นโปรตีนชนิดเดียวกับที่พบในเส้นผมของมนุษย์
2. ช่องอากาศ (Air cell) ช่องอากาศเกิดขึ้นเมื่อไข่เย็นลงและหดตัวหลังจากถูกวางไข่ระหว่างเยื่อหุ้มด้านในและด้านนอก
3. ไข่ขาวหรืออัลบูเมน (Albumen) ประกอบด้วยชั้นหนาและชั้นบางสลับกันสี่ชั้น และประกอบด้วยโปรตีนประมาณ 40 ชนิด ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของไข่ขาวร่วมกับน้ำ
4. สายคาลเซซา (Chalazae) เส้นสีขาวขุ่นที่มัดไข่แดงให้อยู่ตรงกลางไข่ ทำหน้าที่เหมือนสมอเรือ โดยยึดเยื่อหุ้มไข่แดงไว้กับเยื่อเปลือกไข่ หากเห็นได้ชัดแสดงว่าไข่ยังสด
5. เยื่อหุ้มไข่แดง (Vitelline membrane) เป็นเยื่อใสที่ห่อหุ้มไข่แดง
6. ไข่แดง (Yolk) มีปริมาณน้ำต่ำกว่าไข่ขาวแต่มีโปรตีนมากกว่ารวมถึงไขมัน วิตามิน และแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ธาตุเหล็ก, วิตามิน A, วิตามิน D, แคลเซียม, ไทอามีน และไรโบฟลาวิน และไข่แดงยังเป็นแหล่งของเลซิธิน (Lecithin) ซึ่งเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ที่มีประสิทธิภาพ
7. สีของไข่แดง มีตั้งแต่เหลืองอ่อนจนถึงส้มขึ้นอยู่กับอาหารและสายพันธุ์ของแม่ไก่



ภาพที่ 1 โครงสร้างของไข่ไก่

ที่มา : (Liao et al. 2021)

## 2.2 กระบวนการผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่

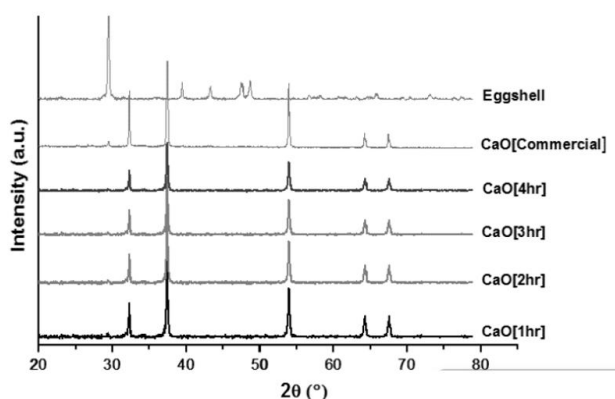
การเปลี่ยนรูปเป็นแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ไก่จะเปลี่ยนรูปไปเป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่อุณหภูมิ 800 °C ขึ้นไป นอกจากนี้พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมคือตั้งแต่ 2 ชั่วโมงขึ้นไป ส่วนการให้ความร้อนกับเปลือกไข่ 800 °C ในสภาพอากาศปกติกับการให้ความร้อนในสภาวะที่ใช้แก๊สไนโตรเจน พบว่าให้ผลในการเปลี่ยนรูปจากแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) เป็นแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ไม่แตกต่างกัน ดังนี้

### 2.2.1 กระบวนการทางความร้อน

จากการศึกษาของ (Cree and Rutter 2015) โดยการวิเคราะห์ค่า XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่ที่ผ่านการเผาด้วยความร้อนช่วงเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า อุณหภูมิ 150 °C ถึง 650 °C เกิดผลึกแร่ธาตุของแคลเซียมคาร์บอเนต ส่วนอุณหภูมิ 650 °C แคลเซียมคาร์บอเนต เปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ และอุณหภูมิ 700 °C เริ่มเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์อุณหภูมิ 750 °C ถึง 800 °C

### 2.2.2 การใช้อุณหภูมิสูงเป็นแคลเซียมออกไซด์

จากการศึกษาของ (Pornchai et al. 2016) ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ด้วยเทคนิค XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) เศษเปลือกไข่ไก่ผ่าน กระบวนการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง (ภาพที่ 2) พบว่า การแคลไซน์ระยะเวลา 1 ชั่วโมง สามารถสังเคราะห์ได้ผลึกแคลเซียมออกไซด์ที่ผลิตจากเปลือกไข่มีความบริสุทธิ์เทียบเท่ากับผลึกแคลเซียมออกไซด์เชิงพาณิชย์



ภาพที่ 2 วิเคราะห์ XRD (การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์) ของเปลือกไข่และแคลเซียมออกไซด์ ที่ได้จากการแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 800 °C ระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 ชั่วโมง

ที่มา : (Pornchai et al. 2016)

### 2.2.3 แคลเซียมออกไซด์ (Calcium oxide)

การผลิตแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากการเผาวัสดุใด ๆ มีส่วนผสมของหินปูนเป็นองค์ประกอบอุณหภูมิมากกว่า 825 °C เรียกกระบวนการเผาใหม่นี้ว่า Calcination โดยมีสูตรทางเคมีคือ CaO มีฤทธิ์เป็นด่าง ผงสีขาว กัดกร่อนมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยทำปฏิกิริยากับ CO<sub>2</sub> ที่อยู่ในอากาศระยะเวลานานถึงกลับเป็น CaCO<sub>3</sub> ดังนั้นการเก็บรักษาต้องระวังไม่ให้อากาศสามารถผ่านเข้าไปในภาชนะที่ใช้โดยความบริสุทธิ์ของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากตัวอย่างเปลือกไข่เผาจะสูงกว่าความบริสุทธิ์เล็กน้อยปูนขาวเกรดอุตสาหกรรมร้อยละ 94.3 แต่ต่ำกว่าความบริสุทธิ์ของเกรด

ห้องปฏิบัติการเล็กน้อยแคลเซียมออกไซด์ร้อยละ 98.2 เมื่อเปรียบกับการเตรียมแคลเซียมออกไซด์โดยการเผาในเตาเผาจำนวนมากจากเปลือกไข่โดยใช้เตาโรตารี (Chuakham et al. 2021) ดังตารางที่ 2 และดังตารางที่ 3

**ตารางที่ 2** องค์ประกอบทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่

สารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกไข่ (ร้อยละ)
CaO	98.0
MgO	0.984
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.530
Na <sub>2</sub> O	0.162
SO <sub>3</sub>	0.107
K <sub>2</sub> O	0.034

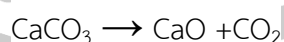
ที่มา : (Pornchai et al. 2016)

**ตารางที่ 3** แคลเซียมออกไซด์ (CaO) สภาวะการเผาในระยะเวลาต่างกัน

สภาวะการเผาเปลือกไข่ไก่	ร้อยละ
800 °C 1 ชั่วโมง	97.90
800 °C 2 ชั่วโมง	98.00
800 °C 3 ชั่วโมง	97.90
800 °C 4 ชั่วโมง	97.90

ที่มา : (Pornchai et al. 2016)

นอกจากนี้แคลเซียมออกไซด์ได้จากการใช้เทคโนโลยีการเผาเปลือกไข่ที่อุณหภูมิสูงในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเรียกว่าระบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เรียกว่ากระบวนการแคลเซเนชัน (Calcination) ดังสมการ

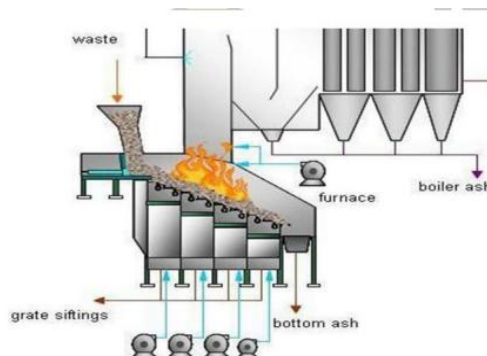


แคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากเปลือกไข่มีคุณสมบัติเหมือนกันแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผาหินปูนหรือปูนขาว (Lime) ที่มีจำหน่ายทั่วไป จึงสามารถนำไปใช้ปรับสภาพของดินและน้ำที่เป็นกรดใช้

ในการผลิตโซดาไฟและสารฟอกขาว และใช้เป็นสารดูดความชื้นและสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในการผลิตไบโอดีเซล

## 2.2.4 ประเภทและการทำงานของเตาเทคโนโลยี

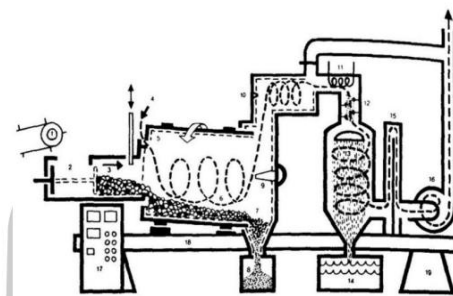
2.4.1.1 เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate) เตาเผามูลฝอยแบบการเผาไหม้มวล เป็นระบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังภาพที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยตะแกรงที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีการเผาไหม้บนตะแกรงมีเคลื่อนที่และลำเลียงมูลฝอยจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้าย



ภาพที่ 3 เตาเผาแบบตะแกรงเคลื่อนที่ (Moving Grate)

ที่มา: (Chuakham et al. 2021)

2.4.1.2 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln) ส่วนใหญ่จะเป็นแบบผนังอิฐทนไฟเป็นผนัง ถ้ำทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1 ถึง 5 เมตร และยาวตั้งแต่ 8 ถึง 20 เมตร สามารถเผาทำลายมูลฝอย มีตั้งแต่ 2.4 ตันต่อวัน (0.1 ตันต่อชั่วโมง) จนถึงประมาณ 480 ตันต่อชั่วโมง (20 ตันต่อชั่วโมง) อัตราส่วนอากาศส่วนเกินที่ใช้มีปริมาณที่มากกว่าแบบที่ใช้กับเตาเผาแบบตะแกรง และอาจมากกว่าเตาเผาแบบฟลูอิดไดซ์เบด คือ เตาเผาแบบหมุนมีประสิทธิภาพพลังงานต่ำกว่าเล็กน้อยแต่มีค่ามากกว่าร้อยละ 80



ภาพที่ 4 เตาเผาแบบหมุน (Rotary Kiln)

ที่มา : (Chuakham et al. 2021)

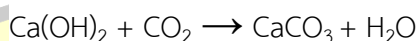
## 2.2.5 แคลเซียมคาร์บอเนตและการบริโภค

แคลเซียมในผงเปลือกไข่จะอยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต เกือบมีแคลเซียมร้อยละ 40 โดยน้ำหนักและไม่ละลายน้ำไม่มีรสและไม่ระคายเคืองสามารถทำปฏิกิริยากับ HCl ในกระเพาะอาหารและใช้เป็นยาลดกรด กลไกออกฤทธิ์ทางชีวภาพอ้างอิงถึงแคลเซียมจากผงเปลือกไข่ที่มีรพุนสามารถดูดซึมได้ดีในลำไส้ของมนุษย์ จากการศึกษาพบว่า อัตราการดูดซึมของผงละเอียดร้อยละ 34.8 สูงกว่าผงหยาบร้อยละ 21.3 การดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้เล็กส่วนต้นในลำไส้เล็กโดยใช้ตัวขนส่งแคลเซียม  $\text{Ca}^{2+}$  จับกับโปรตีนที่จับกับ Ca เรียกว่า แคลบินดิน (D28k) และสุดท้ายปั๊ม ATP บังคับให้อิออนเข้าสู่กระแสเลือด แคลเซียมประมาณร้อยละ 1 ถูกดูดซึมในเลือดและเนื้อเยื่อกระดูก แคลเซียมส่วนเกินจะถูกขับออกทางไต

### 2.2.5.1 แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate)

เปลือกไข่ไก่พบแคลเซียมคาร์บอเนตประมาณร้อยละ 94 และพบธาตุอาหารหลายชนิด สามารถใช้ทำปุ๋ยหรือใช้ไล่แมดเพราะมีธาตุกำมะถันเป็นองค์ประกอบ สามารถใช้ปรับสภาพดินเป็นกรดให้เป็นกลางมากขึ้น เปลือกไข่ไก่บดเป็นตัวดูดซับโลหะหนักบางชนิด เช่น ดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียของโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ใช้ปรับ pH ของน้ำเสียแทนการใช้ปูนขาว นอกจากนี้นำมาใช้ในทางโภชนาการเปลือกไข่บดใช้ผสมในอาหารเพื่อเสริมแคลเซียม เช่น ผสมเปลือกไข่บดในผลิตภัณฑ์ขนมอบกรอบ และใช้เป็นแหล่งแคลเซียมเสริมในอาหารสัตว์

การเกิดสารประกอบคาร์บอเนต (Lime carbonation) เกิดจากแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) หรือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต ( $3\text{CaO}_2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) ในสารเพิ่มเสถียรภาพจะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เกิดเป็นสารประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$  หรือ  $3\text{CaCO}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) กับน้ำ ดังสมการดังนี้



2.2.5.1.1 การผลิตแคลเซียมคาร์บอเนต การผลิตจากแหล่งแร่ธรรมชาติ แบ่งได้ 2 วิธี

1. การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาบดเรียกว่า Ground calcium carbonate (GCC)
2. การนำแคลเซียมคาร์บอเนตจากธรรมชาติมาตกผลึกใหม่เรียกว่า Precipitated calcium carbonate (PCC)

### 2.2.5.2 คุณสมบัติเฉพาะ

- สูตรโมเลกุล  $\text{CaCO}_3$  ประกอบด้วย CaO ร้อยละ 56 และ  $\text{CO}_2$
- น้ำหนักโมเลกุลร้อยละ 100.09
- สถานะเป็นผงสีขาว มีความสว่างสูง ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และคงสภาพได้ดี

- ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity) ประมาณร้อยละ 2.72

- ความแข็งระดับ 3

- สลายตัวเมื่อเผาโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 825 °C

- ไม่ละลายน้ำ และแอลกอฮอล์ แต่สามารถละลายได้เมื่อมีก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เคลือแอมโมเนีย และละลายในน้ำได้น้อยลงเมื่อแอลคาไลไฮดรอกไซด์ สำหรับน้ำแคลเซียมคาร์บอเนตละลายอยู่จะทำให้มีสภาพเป็นด่างหรือเรียกน้ำกระด้าง และตกตะกอนเมื่อ CO<sub>2</sub> แยกตัว

### 2.2.5.3 ข้อกำหนดเฉพาะ

ปริมาณไม่น้อยกว่าร้อยละ 98.0 ของแคลเซียมคาร์บอเนต ภายหลังจาก  
การทำให้แห้ง

### 2.2.5.4 ข้อกำหนดของสารแปลกปน

- แมกนีเซียม และเกลือแอลคาไลค์ไม่มากกว่าร้อยละ 1

- ตะกั่ว ไม่มากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม

- ฟลูออไรด์ ไม่มากกว่า 40 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม

- โลหะหนัก (คำนวณเป็นตะกั่ว) ไม่มากกว่า 30 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม

- อาร์เซนิก (คำนวณเป็น As) ไม่มากกว่า 3 มิลลิกรัมต่อ 1 กิโลกรัม

### 2.2.5.5 ประโยชน์แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium Carbonate)

1. ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารนิยม ใช้ในรูปของ Dietary supplement, Alkali, Dough conditioner, Firming agent, Yeast food โดยจะใช้ในอาหารประเภทชีส ผักผลไม้ กระป๋อง หมากฝรั่ง แยม เยลลี่ นมผง และครีมเทียม นอกจากนี้แคลเซียมคาร์บอเนตสามารถนำมา บริโภคในรูปการอัดเม็ดเป็นอาหารเสริมแคลเซียมเพื่อเสริมสร้างกระดูกและป้องกันโรคกระดูกพรุน

2. การใช้ในภาคการเกษตร การใช้แคลเซียมคาร์บอเนตมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าในอุตสาหกรรมอาหาร การเผาหินปูนโดยตรงหรือการนำกากแคลเซียมคาร์บอเนตเหลือทิ้งใน กระบวนการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความบริสุทธิ์สูงส่วนใหญ่เป็นการปรับปรุงคุณสมบัติดินและ น้ำรวมถึงเพื่อการปรับความเป็นกรดต่างและการฆ่าเชื้อโรค

### 2.2.5.6 การใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี อุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมของแป้ง ยาสีฟัน ผงซักฟอก ยาและเวชภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงใช้ในการผลิตชิ้นส่วน อุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น คอมพิวเตอร์ ฉนวนหุ้มสายไฟฟ้า กระจก ปากกา ยางลบ ถุงมือ แวนตา เป็นต้น ในอุตสาหกรรมกระดาษใช้แคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารตัวเติมเพื่อลดปริมาณเยื่อกระดาษและ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติกระดาษ เช่น ความขาวสว่าง เคลือบผิวกระดาษให้เรียบ เป็นต้น

#### 2.2.5.7 คุณสมบัติแคลเซียมคาร์บอเนตที่นำมาใช้ประโยชน์

1. มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก
2. มีพื้นที่ผิวสูง ไม่ทำปฏิกิริยากับสารอื่นที่เติมในกระบวนการผลิต
3. มีองค์ประกอบสูง
4. มีการกระจายตัวดี
5. ไม่เป็นพิษ ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ ไม่เกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดความร้อน

#### 2.2.5.8 ข้อควรระวังการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต

1. เมื่อผสมกับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดการคายความร้อน
2. เมื่อผสมกับกรดโดยเฉพาะกรดซัลฟูริกจะเกิดปฏิกิริยารุนแรงทำให้เกิดการคายความร้อนและเกิดฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
3. แคลเซียมคาร์บอเนตจะอยู่ในรูปผงขนาดเล็ก เมื่อมีการใช้งานควรสวมผ้าปิดจมูกให้มิดชิดหากสูดดมเข้าสู่ร่างกายจะทำให้เกิดการระคายเคืองในระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากจะทำปฏิกิริยากับน้ำจนเกิดความร้อน และเกิดสภาพกรดขึ้น

### 2.2.6 แนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกไข่ไก่

การนำเปลือกไข่ไก่ที่เป็นของเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปโดยองค์ประกอบหลักของเปลือกไข่ไก่คือ สารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีคุณค่าและนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ด้านต่างๆ ด้านปิโตรเคมี ด้านการแพทย์ ด้านเวชสำอาง ด้านพืชกรรม ด้านสัตวศาสตร์และด้านอาหารมนุษย์โดยกระบวนการผลิตหลายขั้นตอน เริ่มจากการทำความสะอาด นึ่งฆ่าเชื้อ การแยกเยื่อเปลือกไข่ไก่ การทำให้แห้งด้วยการอบที่อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 24 ชั่วโมง พักให้เย็น นำไปบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาดน้อยกว่า 500 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำเปลือกไข่ไก่เผาที่อุณหภูมิสูง 800 °C ระยะเวลา 4 ชั่วโมง โดยแคลเซียมคาร์บอเนตจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์หลังจากนั้นจะได้ผงของเปลือกไข่

เปลือกไข่ไกมีแคลเซียมประมาณร้อยละ 38 เป็นแหล่งแคลเซียมตามธรรมชาติ (เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต) สามารถเพิ่มลงในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ ได้ เช่น ขนมปัง, บิสกิต, โยเกิร์ต, ทาขนมปังไปแลนด์ โดยประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) ร้อยละ 98.20 โดยน้ำหนักของเปลือกไข่ไก่เมกนีเซียมคาร์บอเนตแคลเซียมฟอสเฟต และแร่ธาตุต่าง ๆ รวมทั้งโปรตีนและน้ำ นอกจากนี้ประโยชน์เปลือกไข่ไก่ นำมาใช้ประโยชน์ในด้านเกษตรกรรม อาทิเช่น ปรับปรุงดิน อาหารสัตว์ การกำจัดมดและแมลงในครัวเรือน และนำมาใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย และด้านอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น อุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสี อุตสาหกรรมพลาสติก พีวีซี อุตสาหกรรมยาง ใช้เป็นส่วนผสมของแป้ง ยาสีฟัน ผงซักฟอก ยา และเวชภัณฑ์ต่าง ๆ รวมถึงใช้ใน

การผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ และด้านอุตสาหกรรมอาหาร ช่วยลดปริมาณแคโรทีนอยด์ กรดไขมัน อิสระและช่วยปรับปรุงคุณภาพความยืดหยุ่นของขนมปัง (Platon et al. 2020) สอดคล้องกับ งานวิจัยของ (Subhajit et al. 2017) การใช้ผงเปลือกไข่มีแคลเซียมร้อยละ 98 สามารถช่วยลด อาหารผู้ป่วยโรคกระดูกพรุนแคลเซียมจากเปลือกไข่เป็นแหล่งธรรมชาติที่ดีและสามารถดูดซึม ร้อยละ 90 เค้กเป็นแบบแป้งผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ที่ดึงดูดผู้บริโภค มีอายุการเก็บรักษานาน และต้นทุนค่อนข้าง ต่ำ อัตราการแข่งขันเชิงพาณิชย์และความต้องการผลิตภัณฑ์จากธรรมชาติที่ได้รับการส่งเสริมสุขภาพ เพิ่มขึ้นปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการของเค้กรวมถึงระบบการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทาง โภชนาการ จึงทำให้การขยายการใช้เปลือกไข่ในอุตสาหกรรมอาหารความคุ้มค่ามากขึ้น

ดังนั้นเปลือกไข่จึงเป็นแหล่งแคลเซียมธรรมชาติที่ดี สามารถใช้เป็นอาหารเสริมแคลเซียม เป็นแร่ธาตุจำเป็นต่อสุขภาพร่างกายมนุษย์ในด้านต่าง ๆ ทางสรีรวิทยาการทำงานและการบำรุงรักษา เนื้อเยื่อกระดูกแคลเซียมจะรวมตัวเป็นส่วนประกอบทางโครงสร้างฟอสฟอรัสเพื่อประกอบเป็นส่วน ของแร่ธาตุในกระดูก มีหน้าที่เป็นองค์ประกอบทางเมตาบอลิซึมชีวเคมีและกระบวนการทางสรีรวิทยา แคลเซียมมีบทบาทสำคัญในการการรักษาและป้องกันการขาดแร่ธาตุของกระดูก อย่างกว้างขวาง แหล่งเสริมแคลเซียมที่ใช้คือ  $\text{CaCO}_3$  บริสุทธิ์ที่มีปริมาณสูงปริมาณแคลเซียมร้อยละ 40 (Subhajit et al. 2017)

### 2.3 กระพังโหม (*Paederia linearis hook.f*)

กระพังโหมหรือตดหมูตดหมา (*Paederia linearis hook.f*) จัดอยู่ในสกุล *Paederia* วงศ์ Rubiaceae ชื่อสามัญ : Skunk-vine ชื่อเรียกทั่วไป กระพังโหม ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ เป็นพืชจำพวกไม้เถาเลื้อยประเภทล้มลุก ลำต้นมีขนาดเล็กเลื้อยตามพื้นดินหรือพันต้นไม้ ลำต้นและ ใบมียางสีขาว มีกลิ่นเหม็น ใบเป็นใบเดี่ยวออกเป็นคู่ตรงข้าม ใบสีเขียวเนื้อในบาง ก้านใบสั้นเส้นใบ โค้งจรดกันที่ใกล้ ๆ ขอบใบ ดอกออกเป็นช่อดอกเล็ก ๆ ตรงซอกใบหรือโคนก้านใบ ช่อละ 2-3 ดอกมี กลีบเลี้ยง 5 กลีบขนาดเล็กกลีบปลายกลีบแยกกัน กลีบด้านนอกสีขาว กลีบด้านในสีม่วงแดงหรือสีชมพู ประดับด้วยสีม่วงจุดสีน้ำตาล เกสรตัวผู้มี 5 อัน เกสรตัวเมีย 1 อันอยู่ตรงกลาง ผลเป็นฝักยาวสีเขียวยาว ประมาณ 4-7 เซนติเมตร กว้าง 1.6 เซนติเมตร เป็นวัชพืชที่พบตามสวนหรือพื้นที่ฝนตกชุ่มชื้นทั่วไป ทุกภูมิภาคของประเทศไทย มีรากได้ดินทำหน้าที่สะสมอาหาร นิยมนำรากของต้นกระพังโหมมาคั้นน้ำ หรือนำไปทำขนมที่มีแป้งข้าวเหนียวเป็นส่วนผสม หรือผลิตภัณฑ์อาหารคาว รากกระพังโหมช่วยเพิ่ม ความหวาน ความนุ่มยืดหยุ่นและพองตัวได้ง่าย



ภาพที่ 5 ต้น ใบ และรากกระพังโหม

และมีการศึกษา (Padtakenang and Promprom 2019) ใช้สารสกัดจากรากกระพังโหมที่สกัดด้วยเมทานอลตรวจพบสารประกอบฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) และฟีนอลิก (Phenolic) เมื่อนำไปทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันโดยวิธี  $\alpha$ -carotene bleaching assay, DPPH radical-scavenging assay และวิธี Reducing power ability assay พบว่า สารสกัดจากรากมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเทียบกับสารมาตรฐาน Butylated hydroxytoluene (BHT) และ Ascorbic acid ดังนั้น สารสกัดจากรากตดหมุดตมามีฤทธิ์ต้านออกซิเดชันและไม่เป็นพิษในระดับเซลล์ รากตดหมุดตมามีหลายพันธุ์ ชนิดใบใหญ่ ใบรูปไข่ มีขนสั้นๆ ปกคลุม เรียกว่า ตูดหมู หรือ ตดหมู หรือกระพังโหมใหญ่ ชนิดใบเล็กรูปเรียวยาว ไม่มีขน ไม่มียาง ไม่มีกลิ่นเหม็นอ่อน ๆ



ภาพที่ 6 รากกระพังโหม

### 2.3.1 การนำมาใช้ประโยชน์ทางด้านอาหาร

กระพังโหมหรือตดหมุดตมามีสรรพคุณรักษาอาการอักเสบบริเวณคอปาก รักษาบาดแผล ประุงเป็นยาขับน้ำนม แก้บิดไข้ แก้พิษไข้ ขับปัสสาวะ แก้ตัวร้อน ขับลมแก้ธาตุพิการ เจริญอาหาร ขับพยาธิ แก้ดีรั่ว แก้กามะนาด แก้เริม งูสวัด แก้ปวดแสบปวดร้อน ทาเป็นอาหารบำรุงกำลังสำหรับคนฟื้นไข้ หรือคนชรา เป็นยาอายุวัฒนะ ถอนพิษต่าง ๆ เช่น ถอนพิษสุรา ยาสูบ พิษจากอาหาร รวมทั้งแก้ท้องเสีย ซึ่งสรรพคุณแก้ท้องเสียมีการวิจัยทางวิทยาศาสตร์พบว่าสารสกัดจากรากกระพังโหมสามารถแก้อาการท้องเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนของใบ ใช้แก้ปวดฟัน แก้กามะนาด แก้การปวดแสบปวดร้อนที่ผิวหนัง ส่วนของรากนำมาต้มดื่มทำให้อาเจียน แก้โรคดีซ่าน ใช้บ้วนปาก

รักษาอาการปวดฟัน แก่ริดสีดวงทวาร แก่ปวดฟัน นอกจากนี้ยังใช้แก้อาการปัสสาวะขัด โดยนำใบมาต้มแล้วนำมาตำให้แหลก จากนั้นนำไปโปะลงบนท้องทำให้สามารถขับปัสสาวะออกมาได้ นอกจากนี้ใบ นำมาต้มดื่มสามารถขับนิ่วออกจากกระเพาะปัสสาวะ และน้ำต้มจากใบนำมาเช็ดตัวจะทำให้ไข้ลด หรือนำผ้าสะอาดมาชุบน้ำต้มจากใบวางไว้บนศีรษะช่วยในการลดไข้ได้อย่างดี และน้ำต้มจากใบใช้เป็นน้ำอาบสำหรับผู้ป่วยที่เป็นโรคไขข้อ ส่วนของเปลือกใช้ในการขับลม ส่วนผลใช้เป็นยาแก้ปวดฟัน และทาฟันให้เป็นสีดำ ส่วนใบอ่อนนำมาปรุงอาหาร สมัยโบราณใช้น้ำคั้นจากเถาและใบของ กระพังโหมมาผสมปรุงเป็นขนมขี้หนู ทำให้ขนมขี้หนูเป็นสีเขียวและนิยมนำรากมาตำและผสมกับน้ำนำมากรองเพื่อเป็นส่วนผสมในขนมข้าวพอง (ข้าวเกรียบว่าว) เพื่อการตัดแปรสภาพแป้ง (Modified starch) โดยการเชื่อมพันธะระหว่างโมเลกุลแป้ง (Cross-linking starch) ทำให้ข้าวเกรียบพองตัวและป้องกันการคืนตัวของแป้ง

#### 2.4 ปลาชะโด (*Channa micropeltes*)

ปลาชะโด มีชื่อสามัญ Giant snake-head fish ชื่อวิทยาศาสตร์ *Channa micropeltes* อยู่ในวงศ์ ปลาช่อน (*Channidae*) รูปร่างลักษณะเป็นปลาน้ำจืดที่มีขนาดใหญ่ มีเกล็ด ปากกว้างฟันแหลมคม เป็นสัตว์กินเนื้อ พบได้ในหลายพื้นที่เขตร้อนและกึ่งเขตร้อนทั่วโลก (Zuraini et al. 2006) และพบได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย ลักษณะทั่วไปของปลาชะโด เป็นปลาที่ขนาดใหญ่พิเศษโดยมีความยาว 1.5 เมตรและเติบโตได้ถึง 30 กิโลกรัม ลำตัวตอนขนาดเล็กมีสีน้ำตาลและสีดำ ส้มและสลับสีเหลือง หางส่วนใหญ่มีสีแดง เมื่อเริ่มโตสีจะเริ่มจางกลายเป็นสีเขียวอมน้ำตาล อุปนิสัย ดุร้ายมากในช่วงฤดูกลาวางไข่และผสมพันธุ์ในเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน ปลาชะโดมีการเลี้ยงในกระชังตามแม่น้ำ อ่างเก็บน้ำและเขื่อน เป็นต้น นิยมใช้ในการผลิตอาหารจำพวกซูริมิ เช่น คามาโบโกะ (Kamaboko) เต้าหู้ปลา ลูกชิ้นปลา และปูอัด หรือนำมาเป็นปลาเค็ม ปลาดกแห้ง และปลาสามพัก ปลาชะโดจัดว่าเป็นปลาเศรษฐกิจที่มีราคาสูง มีเนื้อเยื่อรสชาติดี เป็นปลาที่มีโปรตีนที่ย่อยง่ายและมีประโยชน์ต่อร่างกาย นอกจากนี้ปลาชะโดมีความสามารถในการเกิดเจลที่ดี รวมถึงความยืดหยุ่นในสภาวะของการหมักเชื้อแบคทีเรียแลคติก จึงทำให้ปลาชะโดเหมาะแก่การนำมาเป็นวัตถุดิบที่มีคุณภาพสำหรับการผลิตซูริมิซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารแปรรูปต่อไป (Banlue et al. 2018)

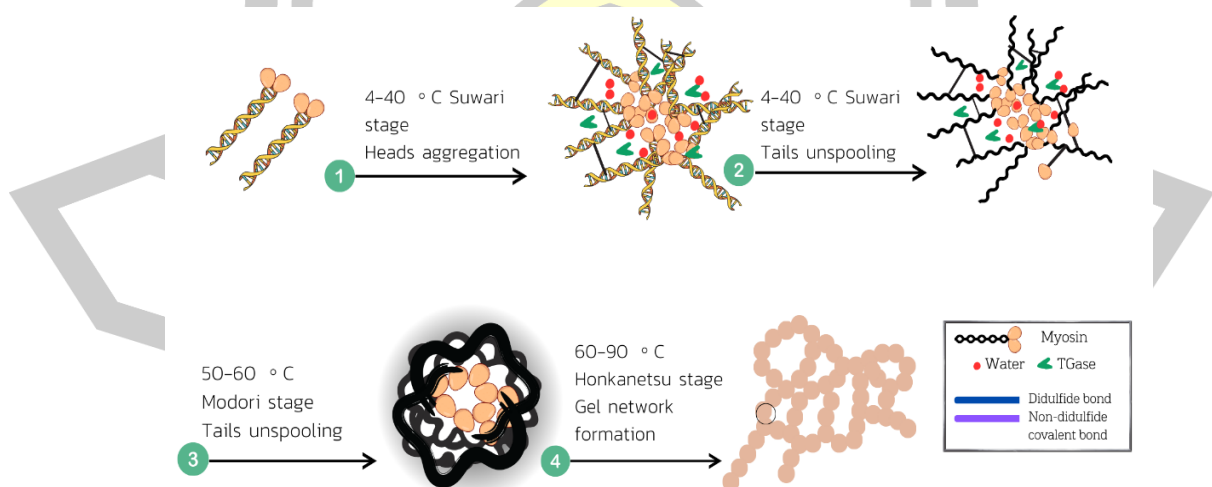


ภาพที่ 7 ปลาชะโด

## 2.5 กลไกการเกิดเจลของเนื้อปลา (Gelation mechanism of fish muscle protein)

### 2.5.1 กลไกการเกิดเจลของเนื้อปลา

การเกิดเจลของเนื้อปลาเป็นการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนเมื่อได้รับความร้อนทำให้เกิดความแข็งแรงของเจล (Gel strength) และความยืดหยุ่น (Elasticity) เริ่มจากการนำเนื้อปลาที่ผ่านการล้างน้ำ บดผสมกับเกลือแกงร้อยละ 2 ถึง 3 ของน้ำหนักเนื้อปลาในระหว่างการผสมโครงสร้างของเนื้อปลา เริ่มเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ได้แก่ ไมโอซิน (Myosin) และแอคติน (Actin) ที่ละลายได้ในสารละลายเกลือปริมาณร้อยละ 2.0 ถึง 3.0 ของน้ำหนักเนื้อปลาและจะเริ่มละลายเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการผสมไมโอซินและแอคตินจับตัวกันเป็นแอคโตไมโอซิน (Actomyosin) ทำให้เนื้อปลามีความหนืดซึ่งเรียกว่าไซล จากนั้นนำไปให้ความร้อนทำให้ไซล แปรสภาพเป็นเจลที่เหนียวและยืดหยุ่น กลไกการเกิดเจลสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 8 แบบจำลองการเกิดเจลของโปรตีนจากเนื้อปลาในระยะต่าง ๆ ขณะให้ความร้อน

ที่มา: (Han and Li 2024)

ซูวาริ (Suwari) หมายถึง การจัดเรียงของแอกโตไมโอซินในเนื้อปลา เกิดพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bond) ระหว่างโมเลกุลเป็นโครงร่างตาข่าย เมื่อได้รับความร้อนเกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างกรดอะมิโนที่ยื่นออกมาทางด้านข้างของโมเลกุลโปรตีนข้างเคียง การจับกันของพันธะไฮโดรเจนและพันธะไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic bond) เจลมีลักษณะใสและค่อนข้างยืดหยุ่น ขึ้นตอนซูวาริมี 2 ระดับตามระดับอุณหภูมิดังนี้

1. การเซตตัวที่อุณหภูมิต่ำ (Low temperature setting) คือการเก็บโซลต่ำกว่า 10 °C เวลาไม่เกิน 24 ชั่วโมง เกิดเป็นเจลใสและยืดหยุ่น เพราะสร้างพันธะไฮโดรเจนโปรตีนกับโมเลกุลน้ำภายในโครงร่างตาข่ายเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น

2. การเซตตัวที่อุณหภูมิสูง (High temperature setting) การให้ความร้อนโซลที่อุณหภูมิ 30 ถึง 50 °C นาน 30 ถึง 90 นาที ทำให้เกิดเป็นเจลค่อนข้างขุ่นมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการจัดเรียงตัวก่อนนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง เช่นการเรียงตัวที่ 28 ถึง 30 °C เป็นเวลา 2-3 ชั่วโมงหรือที่ 40 ถึง 45 °C เป็นเวลา 20 ถึง 30 นาที จะให้เจลที่มีความแข็งแรงมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่ผ่านการจัดเรียงตัว

โมโดริ (Modori) หมายถึง การแตกตัว (Disintegration) ของโครงสร้างเจลบางส่วนของโปรตีนทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลงจากการให้ความร้อนที่ระดับอุณหภูมิ 60-70 °C เป็นผลมาจากเอนไซม์อัลคาไลน์โปรตีเอส (Alkaline protease) โปรตีนไมโอซินเฮฟวี่เชน (Myosin heavy chain) ถูกย่อยสลายปริมาณการแตกตัวขึ้นกับชนิดปลา

คามาบโโกะ (Kamaboko) หรือ อาชิ (Ashi) หมายถึง การตรึง (Elasticity fixation) การให้ความร้อนอุณหภูมิ 90 °C เส้นใยโปรตีนเริ่มจับกันและรวมกลุ่มแบบการสุ่ม (Random network aggregation) พันธะที่เกิดขึ้นเป็นพันธะไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์เป็นส่วนใหญ่ทำให้โครงร่างตาข่ายมีความคงตัวมากขึ้นเจลมีลักษณะทึบเสถียรมากขึ้น

## 2.5.2 ส่วนที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสหรือลักษณะของเจล

### 2.5.2.1 ส่วนผสมการสกัดและโครงสร้างร่างแหโปรตีน

2.5.2.1.1 สารที่ช่วยเพิ่มความสามารถในการสกัดโปรตีน (Protein extraction enhancer)

1. เกลือแกง (NaCl) การผลิตคามาบโโกะคือ การสกัดไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถละลายในสารละลายเกลือ โดยอาศัยการสับผสมระหว่างเนื้อปลากับเกลือจะได้เนื้อปลาที่มีลักษณะข้นหนืด (Viscous batter) และเมื่อได้รับความร้อนจะให้เจลที่มีลักษณะยืดหยุ่นความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 2 ถึง 3 ของน้ำหนักซูริมิ โดยทั่วไปทางเชิงพาณิชย์ใช้ความเข้มข้นของเกลือร้อยละ 2.5 เป็นความเข้มข้นของเกลือต่ำสุดที่สกัดโปรตีนได้สูงสุด

2. ฟอสเฟต (Phosphate) ทำให้มีการละลายของโปรตีนเพิ่มขึ้นเพราะค่า pH และค่า Ionic strength ความสามารถในการละลายของโปรตีนจะมีค่าต่ำสุดในช่วง Isoelectric zone ที่ช่วง pH 5-6 โดยจะได้เจลที่มีความแข็งแรงต่ำที่สุดและเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นค่าความแข็งแรงเจลเพิ่มขึ้นและเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำของเจล ประสิทธิภาพของฟอสเฟตจะเห็นได้ชัดเจนในการใช้ฟอสเฟตร้อยละ 0.2 ถึง 0.3 ส่วนค่า pH ที่เหมาะสมคือช่วง pH 6.5 ถึง 7.5 Phosphate ที่นิยมได้แก่โซเดียมไพโรฟอสเฟต (Sodium pyrophosphate) โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต (Sodium tripolyphosphate) และเมื่อผสมโซเดียมไพโรฟอสเฟตและโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟตในอัตราส่วน 6:4 จะให้ประสิทธิภาพเพิ่มมากกว่าการใช้โพลีฟอสเฟตตัวใดตัวหนึ่งโดยการใช้สารทั้งสองตัวรวมกันในปริมาณร้อยละ 0.1 ถึง 0.3 จะทำให้ความแข็งแรงของเจลดีที่สุด

#### 2.5.2.1.2 ส่วนผสมที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเจล

1. ไข่ขาว (Egg white) ช่วยเพิ่มความชุ่มชื้น (Glossiness) ความแข็งแรงของเจลเช่น ช่วงแรกอุณหภูมิ 5 °C นาน 20 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาต้มที่อุณหภูมิ 90 °C

2. กลูเตน (Gluten) ประสิทธิภาพในการเพิ่มความแข็งแรงเจลจะขึ้นกับกรรมวิธีการทำแห้งด้วยวิธี Spray dry จะให้คุณสมบัติของกลูเตนดีกว่าแบบ Flash dry โดยนำมาใช้ในการผลิตควรผ่านกระบวนการคืนตัว (Rehydration) ก่อน มิเช่นนั้นจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะกระด้างและไม่ควรใช้เกินร้อยละ 4 ของน้ำหนักซูริมิ

3. แป้ง (Starch) ใช้เพื่อปรับปรุงเนื้อสัมผัสเป็นสารเพิ่มเนื้อเพื่อความคงตัวขณะแช่แข็งและละลาย (Freezed-thaw stability) และลดต้นทุนการผลิตโดยทั่วไปใช้แป้งสาลี แป้งข้าวโพดแป้งมันสำปะหลัง Waxy maize และแป้งตัดแปรรูป (Cross-linking) ในขั้นตอนการให้ความร้อนแป้ง มีการพองตัวเกิดเจลาตินในเซชันและปริมาณน้ำอิสระจะลดลงเม็ดแป้งจะฝังตัวในโปรตีนเมทริกซ์ของซูริมิเกิดการพองตัวของแป้งจึงเสริมสร้างความแข็งแรงของเจลมาก (Packing effect) แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (Amylose) เช่น แป้งข้าวโพดแป้งสาลีและแป้งมันฝรั่งจะให้เจลที่มีลักษณะชุ่มแตงง่ายและแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงเช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้ง Waxy maize จะให้เจลที่ใสเหนียวและเกาะติดกันดีส่วนการใช้แป้งตัดแปรรูป Cross-linking จะให้เจลที่ใสหรือไมใสแต่ไม่ทึบแสง (Translucent)

เอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส TGase (Proteinglutamine:amine  $\gamma$  glutamyltransferase) เป็นเอนไซม์ที่สามารถกระตุ้นให้เอมีนปฐมภูมิกับโปรตีนหรือโพลีเปปไทด์รวมตัวกันผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดพันธะโควาเลนต์  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl)-lysine ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีผลให้โมเลกุลโปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงและได้แอมโมเนียออกมาโดยเอนไซม์จะใช้หมู่  $\gamma$ -carboxylamide บน Glutamyl residues ของโปรตีนเป็นตัวให้หมู่เอซิล (Acyl) แก่สารที่เป็นตัวรับโดยมีสารหลาย

ชนิดที่สามารถเป็นตัวรับหมู่ดังกล่าวเช่น เอมีนปฏิกิริยาของกรดอะมิโนอิสระหรือกรดอะมิโนไลซีนของพันธะเปปไทด์ ทั้งนี้การแสดงกิจกรรมของเอนไซม์จำเป็นต้องมีอนุภาคแคลเซียมไอออน  $Ca^{2+}$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แหล่งเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) คือสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (ตัว) Lcrobialtransglutaminase หรือในจุลินทรีย์ (MTGase) Streptovercilliummobaranesหรือในกล้ามเนื้อและอวัยวะภายในปลาโดยปริมาณ MTGase ร้อยละ 0.03 จะเหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพเจล MTGase สามารถใช้ร่วมกับโปรตีนอื่น ๆ เพื่อให้เกิดการสร้างพันธะ Cross-linking ระหว่างโปรตีนเช่นเคซีนกับ Soybean globulin เคซีนกับไมโอซิน โปรตีนถั่วเหลืองกับไมโอซิน Whey protein กับเคซีนและระหว่างโปรตีนถั่วเหลืองกับโปรตีนอื่น

### 2.5.3 เจลของโปรตีนปลา

เจลจัดเป็นวัสดุภาคมีลักษณะระหว่างของแข็งและของเหลว โครงสร้างของเจลโปรตีนเกิดจากโมเลกุลของโปรตีนจับกันด้วยพันธะชนิดต่างๆเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ สามารถจับน้ำหรือน้ำหนักโมเลกุลต่ำไว้ภายในได้ อธิบายการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนแอคโตไมโอซินระหว่างการให้ความร้อนเพื่อเตรียมเจลจากซูริมิ โดยความร้อนที่ให้แกโซลจะมีผลให้โปรตีนแอคโตไมโอซินเริ่มคลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 30 °C และเมื่อระบบมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 30 ถึง 50 °C การคลายตัวของโปรตีนจะเกิดเพิ่มขึ้นตามลำดับ การคลายตัวดังกล่าวจะมีผลให้หมูที่ไม่ชอบน้ำและพันธะไดซัลไฟด์เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมินี้ ดังกล่าวและมีการจับตัวกันของโปรตีนเริ่มเกิดขึ้นอุณหภูมิประมาณ 30 °C เช่นกัน การรวมตัวของโปรตีนเกิดขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิ 40 ถึง 60 °C ในขณะเดียวกันเมื่ออุณหภูมิของระบบสูงกว่า 40 °C โปรตีนไมโอซินจะแยกตัวออกจากโปรตีนแอคโตไมโอซิน จึงประกอบด้วยโปรตีนไมโอซินและโปรตีนอื่น ๆ ที่แตกตัวออกมาจากโปรตีนแอคโตไมโอซิน โปรตีนสามารถจับตัวระหว่างกันได้โดยผลจากการจับตัว ดังกล่าวจะก่อให้เกิดพอลิเมอร์ของโปรตีนที่มีความสามารถละลายน้ำได้ต่ำ การจับตัวของของโปรตีนอุณหภูมิสูง พันธะไดซัลไฟด์เป็นพันธะที่มีบทบาท ขณะเกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างหมูที่ไม่ชอบน้ำมีความสำคัญรองลงสังเกตการรวมตัวกันของโปรตีนตกตะกอน

### 2.5.4 ชนิดของพันธะหลักที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลของโปรตีน

สารก่อเจลเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์สามารถจับกับน้ำหรือกระจายตัวในน้ำร้อนและให้ความหนืดหรือให้เนื้อสัมผัสเป็นเจลเมื่อปล่อยทิ้งไว้ ในอุตสาหกรรมอาหารมีการนำสารก่อเจลชนิดต่าง ๆ มาใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลาย เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น ความเข้มข้นหรือความหนืดและการคงตัวในอาหารของพันธะหลักเกี่ยวข้องกับการเกิดเจลของโปรตีน เริ่มจากโปรตีน ไมโอไฟบริลลาร์ที่เกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติจะมีส่วนของผิวหน้าที่มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลของโปรตีนที่อยู่ข้างเคียงกันสูงขึ้น เป็นผลให้เกิดพันธะขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีนเกิดโครงสร้างหรือร่างแหตาข่ายสามมิติของโปรตีนโมเลกุลขึ้น โครงสร้างตาข่ายสามมิติหรือโครงสร้างเจล

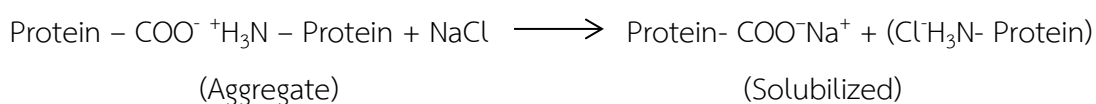
จะเกิดขึ้นต่อเมื่อเกิดพันธะระหว่างโมเลกุลของโปรตีนไม่น้อยกว่า 3 พันธะ สามารถเชื่อมต่อโมเลกุลของโปรตีนเข้าด้วยกันได้แก่

#### 2.5.4.1 พันธะไฮโดรเจน (Hydrogen bonds)

เป็นพันธะที่อ่อนแอกว่าพันธะชนิดอื่นๆ และเป็นพันธะที่ไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเกิดเจลของโปรตีนแต่เป็นพันธะที่มีความสำคัญที่ช่วยให้เกิดความคงตัวของ Bound water ภายในเจลโปรตีน โดยน้ำส่วนใหญ่จะจับกับกรดอะมิโนที่มีขั้วด้วยพันธะไฮโดรเจน ปริมาณ Bound water จะมีความสัมพันธ์กับความยืดหยุ่นของเจลและที่ระดับอุณหภูมิต่ำจะเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างชั้นโมเลกุลของโปรตีนมากกว่าที่อุณหภูมิสูง เจลที่เก็บไว้อุณหภูมิต่ำมีความคงตัวสูงกว่าเจลที่เก็บไว้ที่อุณหภูมิสูง เมื่อโปรตีนอยู่ในระบบของสารละลายที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย โมเลกุลของน้ำสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลได้จึงอาจเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ที่มีไฮโดรเจน เช่น N-H หรือหมู่ที่ได้รับไฮโดรเจน เช่น C=O ในสภาพปกติทั้งสองหมู่และเกิดพันธะเปปไทด์ระหว่างกัน ในกรณีการสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่อื่น ๆ เป็นผลให้ความคงตัวของโปรตีนลดลง

#### 2.5.4.2 พันธะไอออนิก (Ionic linkages)

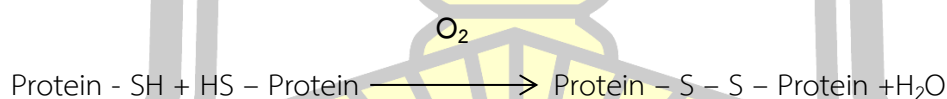
หมู่โซ่ข้างที่มีประจุบวก (+) กับหมู่โซ่ข้างที่มีประจุลบ (-) บนผิวหน้าของโปรตีนโดยจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลของโปรตีนเข้าใกล้กันมากพอจนสามารถสร้างพันธะระหว่างหมู่ที่มีประจุต่างกันและมีความแข็งแรงพอที่จะสร้างความสมดุลกับแรงผลักระหว่างโมเลกุลอันเนื่องมาจากความแตกต่างระหว่างประจุสุทธิบนโมเลกุลทั้งสองการเติมเกลือมีผลต่อการทำลายพันธะดังกล่าว อย่างไรก็ตาม แคลเซียมไอออน  $Ca^{2+}$  สามารถเชื่อมต่อกับโปรตีนที่มีประจุลบ 2 โมเลกุลที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ ดังนั้นการเติมแคลเซียมไอออน จึงทำให้เจลของซูริมีมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามพันธะไอออนิก ไม่สามารถทำให้เกิดเจลของซูริมีในโมเลกุลของโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ โปรตีนในซูริมีที่มีความเป็นกรดต่าง (pH) ใกล้เคียงกัน หรือมี pH ประมาณ 6.8 หมู่คาร์บอกซิล (COO) ของกรดกลูตามิก (Glutamic acid) และกรดแอสพาร์ติก (Aspartic acid) บนสายโซ่โปรตีนประจุสุทธิเป็นลบ ขณะที่หมู่อะมิโน ( $NH_2^+$ ) ของกรดอะมิโน 2 ตัวบนสายโซ่โปรตีนคือ ไลซีน (Lysine) และอาร์จินีน (Arginine) จะมีประจุสุทธิเป็นบวกเพราะฉะนั้นจะเกิดพันธะระหว่างหมู่ที่มีประจุต่างกันหรือเกิดการเชื่อมกันด้วยแรงไอออนคือ หมู่คาร์บอกซิลกับหมู่อะมิโน เป็นผลให้โมเลกุลของไมโอไฟบริลลาร์โปรตีนแต่ละโมเลกุลเชื่อมติดกันแน่นเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ ดังนั้นการเกิดโครงสร้างของเจลต้องเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ลงในซูริมีเพื่อให้ไอออนของเกลือคือ โซเดียมไอออน ( $Na^+$ ) และคลอไรด์ไอออน ( $Cl^-$ ) ไปจับหมู่ที่มีประจุตรงข้ามทำให้พันธะไอออนระหว่างโมเลกุลของไมโอไฟโบรลลาร์ขาดกัน มีผลให้ไมโอไฟโบรลลาร์โปรตีนละลายทำให้เกิดโครงสร้างเจลจากอุณหภูมิสูง



พันธะหรือปฏิกริยาระหว่างหมู่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic bound หรือ Hydrophobic Interactions) ภายในสายโซ่โปรตีนที่ยังไม่คลายตัวหรือยังม้วนพับอยู่ จะมีกรดอะมิโนที่มีคุณสมบัติเหมือนไขมัน (Fat) ซึ่งกรดอะมิโนเหล่านี้จะไม่รวมตัวกับน้ำหรือแยกหมู่ออกจากโมเลกุลของน้ำเหมือนลิปิด เรียกว่าหมู่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ส่วนของสายโซ่โปรตีนที่ยังไม่คลายตัวบนผิวหน้าของโปรตีนซึ่งสัมผัสกับน้ำก่อนที่จะเกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ กรดอะมิโนที่มีคุณสมบัติดูน้ำเรียกว่า หมู่ที่ชอบน้ำ สายโซ่โปรตีนคลายตัวออกแกนของหมู่ไม่ชอบน้ำที่อยู่ภายในโครงสร้างโมเลกุลจะปรากฏออกมาหรือเปิดผิวหน้าสัมผัสกับน้ำซึ่งทำให้เกิดระบบทางเคมีที่ไม่คงตัวซึ่งเหมือนกับหยดของไขมันหรือหยดน้ำมันในน้ำคือ ส่วนของหมู่ไม่ชอบน้ำของโปรตีนพยายามที่จะเชื่อมโมเลกุลกับโมเลกุลอื่น ๆ ที่ไม่ชอบน้ำเช่นกันเป็นผลให้เกิดการจับตัวของโปรตีนระหว่างหมู่ไม่ชอบน้ำด้วยกัน (Hydrophobic binding) ผ่านพันธะไฮโดรโปกความแข็งแรงของพันธะระหว่างหมู่ที่ไม่ชอบน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิ 60 °C ตรงข้ามเกิดแขนพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลที่อุณหภูมิต่ำมากกว่าอุณหภูมิสูงจึงทำให้เกิดพันธะระหว่างหมู่ไม่ชอบน้ำของโปรตีนเป็นกลไกเบื้องต้นในการเกิดเจลของโปรตีนกับพันธะไดซัลไฟด์หรือพันธะโควาเลนต์

#### 2.5.4.3 พันธะโควาเลนต์

เป็นพันธะที่แข็งแรงเชื่อมต่อระหว่างโพลีเมอร์พันธะโควาเลนต์ที่มีบทบาทต่อการเกิดเจลคือ พันธะไดซัลไฟด์เกิดในระหว่างการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง 80 ถึง 90 °C ทำให้เกิดการฟอร์มเจลในโปรตีนซึ่งในพันธะไดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นภายในโมเลกุลของโปรตีนเกิดจากการออกซิเดชันของหมู่ซัลฟ์ไฮดริล (Reactive SH groups) บนโมเลกุลของกรดอะมิโนซิสเตอีน 2 โมเลกุลที่อยู่บนสายโซ่โปรตีนที่อยู่เคียงข้างกัน ดังสมการ



ดังนั้นเจลของซูริมิจึงมีความแข็งแรงมากขึ้นเมื่อเติมสารเร่งการเกิดออกซิเดชัน เช่น โพแตสเซียมโบรเมต (Potassium bromate) ลงในซูริมิ

## 2.6 โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนน้ำหนักโมเลกุลสูง มีองค์ประกอบมากได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน และองค์ประกอบน้อยได้แก่ กำมะถัน ฟอสฟอรัส เหล็ก โปรตีนสามารถพบในธรรมชาติโครงสร้างของเซลล์ของสิ่งมีชีวิตที่เป็นเอนไซม์ทำหน้าที่เกี่ยวกับระบบการทำงานของเซลล์รวมทั้งเป็นระบบภูมิคุ้มกันของสิ่งมีชีวิตโปรตีนสามารถพบในเซลล์สิ่งมีชีวิตทุกชนิดสัตว์ต้องการใช้โปรตีนตลอดชีวิตเพื่อใช้การเจริญเติบโต และซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอและสัตว์ต้องการโปรตีนเพื่อใช้เป็นส่วนประกอบของเอนไซม์ (Enzyme) ภูมิคุ้มกัน (Immune) ฮอร์โมน

(Hormone) และนำไปสร้างผลผลิตเพื่อการสืบพันธุ์ซึ่งในสัตว์ต่างชนิดกัน โปรตีนจะมีความจำเพาะเจาะจงกับสิ่งมีชีวิตนั้น ๆ ซึ่งแบ่งเป็นโปรตีนดังนี้

### 2.6.1 โปรตีนปลา

โปรตีนของปลาสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดเช่นเดียวกับโปรตีนของเนื้อสัตว์ชนิดอื่น ๆ คือโปรตีน ไมโอไฟบริลลาร์ (Myofibrillar proteins) โปรตีนซาร์โคพลาสมิก (Sarcoplasmic proteins) และโปรตีนสโตรมา (Stroma proteins) โปรตีนในกลุ่มของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ ร้อยละ 40 ถึง 60 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด โปรตีนซาร์โคพลาสมิกพบมากได้แก่ อัลบูมิน (Albumin) ร้อยละ 30 ของโปรตีนทั้งหมด โดยโปรตีนซาร์โคพลาสมิกที่พบมากในกล้ามเนื้อแดงได้แก่ ฮีโมโปรตีน (Haemoproteins) และโปรตีนสโตรมาส่วนใหญ่มี คอลลาเจน (Collagen) และพบในกล้ามเนื้อปลาน้อยมาก โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่พบในปลา คือ ไมโอซิน มากที่สุดคือร้อยละ 50 ถึง 60 แอกตินพบรองลงมา มีปริมาณร้อยละ 20 หน่วยย่อยของแอกตินคือ จีแอกติน (G-actin) จับตัวกันในสารละลายเกลือที่มีความเป็นกลางเป็นเอฟแอกติน (F-actin) โทรโปไมโอซิน (Tropomyosin) และโทรโปนิน (Troponin) ชนิด CI และ T โปรตีนในกลุ่มนี้ละลายได้ในเกลือจึงสามารถแยกออกจากเนื้อปลาสดได้โดยการล้างเนื้อปลาสด สารละลายเกลือที่มีความเป็นกลางและมีแรงไอออนอยู่ในช่วง 0.3 ถึง 1.0 Debye สำหรับโปรตีนชนิดอื่น ๆ ในกลุ่มของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์คือ โทรโปไมโอซิน และโทรโปนินมีอยู่ในปริมาณร้อยละ 10 โปรตีนในกลุ่มของโปรตีนซาร์โคพลาสมิกได้แก่ ไมโอโกลบิน เอนไซม์ และ อัลบูมินชนิดต่าง ๆ การขจัดโปรตีนชนิดนี้ออกจากเนื้อปลาสดโดยการล้างน้ำหรือสารละลายเกลือที่มีความแรงของไอออนต่ำกว่า 0.5 Debye ปริมาณของโปรตีนซาร์โคพลาสมิกในปลา ผิวน้ำเช่น ปลาหู ปลาโอ โดยทั่วไปจะมีปริมาณสูงกว่าปลาหน้าดิน เช่น ปลาทรายแดง ปลาปากคม เป็นต้น โดยเฉพาะปริมาณของฮีโมโกลบินและไซโตโครมซีในกล้ามเนื้อแดงจึงทำให้ปลากลุ่มนี้ไม่เหมาะต่อการนำมาทำซูริมิ

### 2.6.2 โปรตีนไมโอซิน

ไมโอซินเป็นโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ  $5.0 \times 10^5$  ดาลตัน โมเลกุลประกอบด้วยสายโซ่โปรตีนขนาดใหญ่ (Myosin heavy chains) 2 เส้น มีน้ำหนักโมเลกุล 200 และ 240 กิโลดาลตัน (kDa) จับตัวกับโซ่โปรตีนขนาดเล็ก (Myosin light chains) 2 เส้น ที่มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 16 ถึง 18 kDa ไม่ใช่พันธะโควาเลนต์ ส่วนโซ่โพลีเปปไทด์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำแตกต่างกันไปตามชนิดปลาในเบื้องต้นอาจจำแนกโมเลกุลไมโอซินออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกทางปลายด้านไนโตรเจนเป็นโปรตีนทรงกลม ส่วนที่สองโมเลกุลไมโอซินมีรูปร่างทรงกลม เป็นส่วนหัวของโมเลกุล สำหรับทางด้านปลายคาร์บอน ส่วนหางของโมเลกุลไมโอซิน (Rod) ส่วนหางของโมเลกุลเกิดจากสายโพลีเปปไทด์รวมตัวกันเป็นโครงสร้างเกลียวแอลฟา โดยเอนไซม์ย่อยโปรตีน เช่น แอลฟาไคโมทริปซินและทริปซิน ส่วนหางสามารถย่อยได้ 2 ส่วนคือซัพแฟรกเมนต์ที่ 2 เมอร์โรไมโอซินที่มี

น้ำหนักรวมของเนื้อปลา หรือ LMM (Rodgers et al. 1987) รายงานว่า การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนไมโอซินจากสัตว์น้ำมีความคงตัวต่อความร้อนต่ำกว่าโปรตีนของกล้ามเนื้อสัตว์อื่น ๆ ปลาที่จับจากเขตอุณหภูมิต่ำ มีโปรตีนทนความร้อนต่ำกว่าเขตอุณหภูมิที่อุ่น พบว่า ความคงตัวต่อความร้อนจากโปรตีนปลามีผลให้แอกตินและไมโอซินช่วยเพิ่มความคงตัวในขณะที่โปรตีนไมโอซินละลายได้ในสารละลายเกลือและทนได้สูงกว่าโปรตีนแอกติน ช่วยป้องกันการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนแอกตินจากสารละลายเกลือ นอกจากนี้ความคงตัวของโปรตีนไมโอไฟบริลสามารถประยุกต์ใช้การเกิดเจลของโปรตีน เช่น เกลือในโปรตีนแอกโตไมโอซินแยกตัวเป็นโมเลกุลอิสระเมื่อไมโอซินแยกออกจากแอกตินมีการเซตความร้อนต่ำทำให้เกิดเจลอุณหภูมิต่ำลง

### 2.6.3 สมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไมโอซิน

1. อิมัลซิไฟเออร์ เป็นผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ที่มีการบดเนื้อจนละเอียดเนียนเป็นอิมัลชัน เช่น ซูริมิ ไส้กรอก แพรงค์เฟอร์เตอร์ โบโลนา เวียนนา มีการบดหรือสับ เนื้อสัตว์ให้ละเอียดจะทำให้โปรตีนไมโอซินในเส้นใยกล้ามเนื้อถูกสกัดละลายออกมารวมตัวกับโปรตีนแอกตินเป็นแอกโตไมโอซิน ช่วยทำให้เกิดความเหนียว ความยืดหยุ่น อุ่มน้ำได้ดีและทำหน้าที่เป็นอิมัลซิไฟเออร์ ช่วยให้ส่วนผสมของไขมันทำให้ไขมันกระจายตัวโดยไม่แยกชั้นไขมัน

2. การเกิดเจลผลิตภัณฑ์ซูริมิในเนื้อปลาคือ ไมโอซินรวมตัวกับแอกติน เกิดเป็นแอกโตไมโอซินจับตัวกับน้ำและเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของโปรตีน เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายมีการกักน้ำอยู่ในร่างแห ทำให้เนื้อปลาที่มีความหนืดซึ่งเรียกว่า โซล จากนั้นได้รับความร้อนทำให้เกิดเจลมีความแข็งของเจลและความยืดหยุ่น

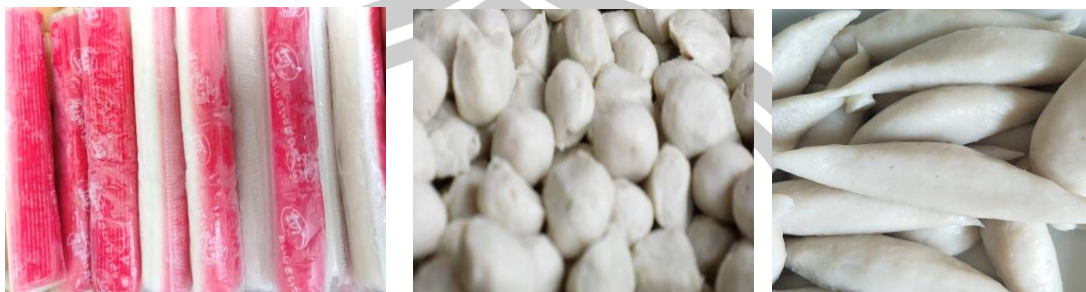
### 2.6.4 โปรตีนแอกติน

แอกติน (Actin) เป็นส่วนประกอบของกล้ามเนื้อไมโอไฟบริล (Myofibril) เป็นเส้นใยบางยาวประกอบด้วยเส้นใยโปรตีนทรงกลม (Globular protein) ต่อกันเป็นเส้น 2 เส้น อยู่ร่วมกับไมโอซิน มีหน้าที่หดและคลายตัวของกล้ามเนื้อ

## 2.7 ซูริมิและผลิตภัณฑ์เจลซูริมิ (Surimi and surimi gel products)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยคุณสมบัติที่สำคัญคือ มีความยืดหยุ่น สีและรสชาติ เป็นผลิตภัณฑ์จากซูริมิ (Surimi based products) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำซูริมิแช่เยือกแข็งหรือซูริมิสดสับผสมกับเกลือในปริมาณที่เหมาะสมเพื่อละลายโปรตีนไมโอไฟบริล (Myofibril) และเติมส่วนผสมอื่น ๆ ที่ต้องการ เช่น แป้ง ไข่ขาว ผงชูรส และสารให้กลิ่นรส นำมาขึ้นรูปด้วยการใช้ความดัน (Extruded) การทำให้เกิดลักษณะเส้นใย (Fiberized) หรือขึ้นรูปโดยขึ้นอยู่กับบลักษณะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย การให้ความร้อนเพื่อสร้างความคงทนของรูปร่าง สร้าง

เนื้อสัมผัส และลดปริมาณจุลินทรีย์ซูริมิเป็นวัตถุดิบสำหรับทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ปูอัด ทอดมัน ปลาเส้น เนื้อปูเทียม ลูกชิ้นปลาคามาโบโกะ (Kamaboko) ลูกชิ้นปลา (Chikuwa) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ผลิตภัณฑ์ซูริมิ

### 2.7.1 ความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมการผลิตซูริมิ

ความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมการผลิตซูริมิเป็นผลมาจากความสำเร็จของการวิจัยในด้านต่าง ๆ ซึ่งพัฒนาการมีผลต่อการขยายตัวของอุตสาหกรรมการผลิตซูริมิที่สำคัญ ได้แก่

1. ความเข้าใจต่อการเกิดเจลของโปรตีนปลาโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพของโปรตีนปลาในระหว่างการให้ความร้อนสามารถกำหนดวิธีการเตรียมเจลให้มีคุณภาพเหมาะสมกับผลิตภัณฑ์มีวิธีการเตรียมเจลที่สำคัญคือ การเก็บโซลของซูริมิ อุณหภูมิต่ำหรือการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำเป็นระยะเวลาหนึ่งตามด้วยให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงในระยะสุดท้าย ตลอดจนการเลือกใช้สารเติมแต่งอาหารเพื่อตัดแปลงคุณสมบัติของเจลให้เป็นไปตามที่ต้องการ
2. การยับยั้งการอ่อนตัวของเจลในช่วงอุณหภูมิ 50 ถึง 60 °C ของซูริมิจากปลาที่มีกิจกรรมของเอนไซม์ย่อยโปรตีนสูงหรือถูกปนเปื้อนโดยปรสิตโดยใช้สารเติมแต่งอาหารที่สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์หรือโดยการเปลี่ยนวิธีการให้ความร้อนแก่โซล
3. การเก็บรักษาซูริมิโดยการแช่เยือกแข็ง เป็นการเติมสารเติมแต่งอาหารที่สามารถป้องกันการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน
4. การล้างเนื้อปลาสดจากปลาที่มีไขมันสูงและเนื้อสีเข้มด้วยสารละลายต่างซึ่งช่วยปรับความเป็นกรด-ด่างของเนื้อปลาสดทำให้การผลิตซูริมิในระดับเชิงพาณิชย์
5. การพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เลียนแบบเนื้อปูจากการประสบความสำเร็จในการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ในปี ค.ศ. 1975 มีผลให้ผลิตภัณฑ์เจลจากซูริมิเข้าสู่ยุคใหม่ผลิตภัณฑ์ได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคชาวตะวันตกส่งผลให้ซูริมิกลายเป็นสินค้าของตลาดโลก

6. ความก้าวหน้าของอุตสาหกรรมการผลิตซูริมิ เครื่องจักรสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและอัตโนมัติ มีอัตราการทำงานสูงได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อทดแทนกระบวนการผลิตที่ดีกำลังการผลิตต่ำผลิตซูริมิคุณภาพไม่สม่ำเสมอและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย

### 2.7.2 ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพซูริมิ

2.7.2.1 วัตถุประสงค์ความสดของวัตถุดิบมีคุณภาพสม่ำเสมอ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของโปรตีนไม่ควรใช้วิธีการแช่เยือกแข็งเพราะจะทำให้เนื้อปลาบดไม่เหนียว ชนิดปลาที่ญี่ปุ่นนิยม Alaska Pollack นิวซีแลนด์นิยม Hoki ในประเทศไทยนิยมใช้ปลาทรายแดง ตาหวานตาเงินปากคมไหลโดยทั่วไปแล้วปลาเนื้อขาวจะให้ไขมันต่ำกลิ่นดีและให้เจลที่มีคุณภาพ

2.7.2.2 การตัดแต่ง ปลาขนาดเล็กและไม่สม่ำเสมอซึ่งจะต้องตัดหัวควักไส้ตัดเนื้อบริเวณท้องและตัดแต่งอย่างรวดเร็วที่สุดปลาขนาดใหญ่แล้วเป็น 2 ส่วนล้างทำความสะอาดโดยใช้น้ำผสมน้ำแข็งเพื่อช่วยรักษาอุณหภูมิเนื้อปลาให้ต่ำช่วยให้เนื้อปลามีคุณภาพดีและเป็นการขจัดสิ่งปนเปื้อน

2.7.2.3 การแยกเนื้อปลา ใช้ระบบสายพานและลูกกลิ้งแยกเนื้อปลาได้ร้อยละ 40 ถึง 70 เครื่องแยกเนื้อปลาสามารถปรับระดับแรงกดอัดถ้าเพิ่มแรงกดจะรีดเนื้อปลาจากก้างได้มาก แต่จะมีกระดูกและหนังปนมากซูริมิมีสีคล้ำเนื่องจากสีของพวกอวัยวะภายในติดออกมา

2.7.2.4 การล้างเนื้อปลา การล้างเพื่อกำจัดโปรตีนที่ละลาย ไขมัน หนัง เลือด เอนไซม์และสิ่งเจือปนอื่นๆช่วยปรับปรุงความสามารถในการเกิดเจลทำให้เนื้อปลามีความขาวขึ้นและช่วยกำจัดกลิ่นไม่พึงประสงค์นิยมใช้น้ำ 5 ถึง 10 °C หรือล้างน้ำเกลือเย็นความเข้มข้นร้อยละ 0.2 ถึง 0.3 โดยน้ำหนัก โดยใช้อัตราส่วนของเนื้อปลาต่อน้ำประมาณ 1:4 ล้าง 2 ถึง 3 ครั้ง ข้อเสียของการล้างคือมีการสูญเสียน้ำหนักถึงร้อยละ 30 ถึง 50 ทั้งนี้ขึ้นกับวิธีการและเครื่องมือในระหว่างการล้างแต่การล้างหลายครั้งจะทำให้คุณภาพซูริมิดีขึ้น

2.7.2.5 การกำจัดน้ำออก กำจัดน้ำออกให้เหลือความชื้นร้อยละ 80 ถึง 85 Hydraulic press, Screw press หรือ Centrifuge ที่ 1800 rpm เป็นเวลา 10 นาที

2.7.2.6 การแยกเกล็ดและกระดูก นำเนื้อปลาที่ได้ผ่านเครื่อง Strainer เพื่อกำจัดเกล็ดหนังและก้าง ในปัจจุบันนิยมทำขั้นตอนของการแยกเกล็ดและกระดูกหลังจากเนื้อปลาผ่านการล้างแล้วโดยนำเนื้อปลาผ่านเข้าเครื่องรีไฟน์เนอร์ (Refiner) เป็นเครื่องหมุนเหวี่ยงด้วยความเร็วสูง ผลักให้เนื้อผ่านตะแกรงที่มีรูเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 ถึง 3.2 มิลลิเมตร ส่วนที่เป็นเกล็ดหนังและกระดูกจะติดค้างไม่ผ่านรูดออกไป

2.7.2.7 การนวดผสม การป้องกันโปรตีนเสื่อมสภาพจากการแช่แข็ง ได้แก่ น้ำตาล ซูโครสร้อยละ 4 ถึง 5 ซอร์บิทอลร้อยละ 4 ถึง 5 โพลีฟอสเฟตร้อยละ 0 ถึง 0.3 ในระหว่างการนวด ควรรักษาอุณหภูมิไม่สูงเกิน 10 °C โดยโมเลกุลของ Cryoprotectants จะเป็นตัวสร้างพันธะกับ

โมเลกุลของโปรตีนและ Cryoprotectants สร้างพันธะจับกับน้ำช่วยเพิ่มความสามารถในการจับน้ำของโปรตีนและลดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนระหว่างการแช่เยือกแข็ง

2.7.2.8 การบรรจุและการแช่เยือกแข็ง โดยบรรจุเนื้อปลาที่นวดแล้วลงในถุง Polypropylene ขนาด 10 กิโลกรัม แล้วบรรจุใน Block นำไปแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  และให้อุณหภูมิถึงกลางลดลงถึง  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ภายใน 4-6 ชั่วโมงเพื่อป้องกันการสูญเสียการเกิดเจล

2.7.2.9 การเก็บรักษา มีการเก็บรักษาซูริมิในสภาพเคลือบไขที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  สามารถเก็บได้นานถึง 1 ปีขึ้นไปขึ้นอยู่กับสภาพการเก็บรักษา หากเก็บไม่สม่ำเสมอจะทำให้ความสามารถในการเกิดเจลลดลง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีโดยส่วนใหญ่จะเริ่มตั้งแต่วัตถุดิบ และมีการพิจารณาถึงความสด ฤดูกาล การควบคุมคุณภาพระหว่างการแปรรูป การแยกเนื้อปลา เทคนิคการบด วิธีการล้างน้ำการทำให้แห้งการเติมสาร Cryoprotectants และการควบคุมคุณภาพของซูริมิ ปัญหาที่เกิดจากการผลิตซูริมิจากปลาเช่น ฤดูกาลของปลา ขนาดปลาไม่สม่ำเสมอ ปริมาณไขมันสูง การเกิดเจลที่ไม่สม่ำเสมอ การเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วของเนื้อปลา และการได้ผลผลิตที่ต่ำ (Yield)

### 2.7.3 คุณสมบัติของเจลซูริมิที่ดี

บทบาทสำคัญในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะในอาหารประเภทแปรรูปจากเนื้อปลาหรือสัตว์น้ำ เช่น ปูอัด ลูกชิ้นปลา ฯลฯ คุณสมบัติของเจลซูริมิที่ดีมีผลต่อคุณภาพและความน่ารับประทานของผลิตภัณฑ์ในอุตสาหกรรมอาหารและเชิงพาณิชย์

2.7.3.1 ความแข็งแรงของเจลสูง (Gel Strength) เจลสามารถต้านแรงกดหรือแรงดึงได้ดีผลิตภัณฑ์อาหารมีความคงรูป ไม่ยุบตัวและแตกหักง่าย

2.7.3.2 ความยืดหยุ่นดี (Elasticity) เจลมีเนื้อสัมผัสที่คล้ายของจริง (เช่น imitation crab stick) ช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสดีและยืดหยุ่นคืนรูปได้ดี

2.7.3.3 ความขาวหรือสีเนื้อสม่ำเสมอ ไม่ควรมีสีเหลืองหรือเทา เนื้อไม่พรุน ไม่เป็นรูหรือมีฟองอากาศ เพราะบ่งชี้ถึงการเสื่อมสภาพของโปรตีน อาจทำให้เกิดการเน่าเสีย

2.7.3.4 ความสามารถในการขึ้นรูปและแต่งรส (Formability & Flavor Absorption) สามารถแต่งกลิ่น สี และรสชาติได้หลากหลาย (เช่น ปูอัด รสวาซาบิ ฯลฯ) ขึ้นรูปได้ดีเป็นรูปร่างต่าง ๆ โดยไม่แตกหรือเสียรูป

2.7.3.5 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water-Holding Capacity, WHC) ป้องกันการแยกน้ำออกในผลิตภัณฑ์ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ไม่แห้ง ไม่แข็งกระด้างหลังแช่เย็นหรือแช่แข็ง

2.7.3.6 เก็บได้นาน ไม่แยกชั้น เจลไม่แยกน้ำ ไม่เกิดซินเนอเรซิส (syneresis)

### 2.7.4 การเพิ่มคุณภาพเจลซูริมิ

การเพิ่มคุณภาพเจลซูริมิ (surimi gel) โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์แปรรูปจากเนื้อปลาที่ต้องการความแน่นและน่ารับประทาน คุณภาพของเจลขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ทั้งทางวัตถุดิบ กระบวนการผลิต และการใช้สารเสริมต่าง ๆ

2.7.4.1 การเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม ปลาที่มีโปรตีนไมโอไฟบริลสูง เช่น ปลาพอล ล็อค ปลาซูริมิแปซิฟิก หรือปลาไทยบางชนิดเช่น ปลายมหรือปลากุเลาปลาที่สดใหม่จะให้เจลที่ แข็งแรงและเนื้อสัมผัสดี

2.7.4.2 การล้างเนื้อปลา (Washing Process) เพื่อลดปริมาณไขมันและโปรตีนที่ ละลายน้ำได้ (sarcoplasmic proteins) ช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ของโปรตีนเจล (myofibrillar protein) ให้เจลที่แน่นและใสขึ้น

2.7.4.3 การเติมเกลือ (Salting) เติม NaCl 2-3% เพื่อช่วยสกัดโปรตีน ไมโอไฟบริลาร์เกิดเจลดีขึ้นถ้าเติมน้อยไปจะไม่เกิดเจล แต่มากเกินไปอาจทำให้เนื้อแข็งหรือเค็มจัด

2.7.4.4 การเติมสารเสริมเจล (Gel-enhancing Additives) เอนไซม์ Microbial Transglutaminase (MTGase) เชื่อมโยงโปรตีนให้แน่นขึ้น (เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่ง): เพิ่มความแน่นและลดต้นทุน โพลีฟินอล เช่น EGCG หรือสารจากเปลือกพืช: ต้านอนุมูลอิสระและ เสริมความแข็งของเจลไฮโดรคอลลอยด์ (Carrageenan, Alginate): ช่วยเพิ่ม WHC และเนื้อสัมผัส

2.7.4.5 การควบคุมอุณหภูมิในการให้ความร้อน (Setting & Cooking) การตั้งเจล (Setting) ที่อุณหภูมิ 40°C ก่อนการให้ความร้อนเต็มที่ ช่วยให้โครงสร้างเจลแน่นขึ้น การปรุงสุกที่ อุณหภูมิ 90°C จะทำให้เกิดเจลสมบูรณ์

2.7.4.6 การลดการแช่แข็งซ้ำหลายรอบ การแช่แข็งและละลายทำให้โครงสร้างเจลเสื่อม การใช้สารป้องกันโปรตีนเสีย (cryoprotectants) เช่น ซูโครส หรือโพลีออลช่วยคงสภาพเจล

2.7.4.7 การปรับค่า pH ใกล้เคียงค่าที่โปรตีนจับตัวดีที่สุด (ประมาณ pH 6.5-7.0) ช่วยให้โครงสร้างเจลแข็งแรงและสามารถอุ้มน้ำได้ดีขึ้น

### 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Chuakham et al. 2021) ศึกษาปูนขาวหรือแคลเซียมออกไซด์ได้รับความนิยมในฐานะวัสดุ ที่ยั่งยืนเพื่อใช้เป็นสารตัวเติมและตัวเร่งปฏิกิริยาในหลากหลายอุตสาหกรรม ปูนขาวที่ได้มาโดยมีการ รายงานการเผาของเสียจากเปลือกไข่ในเตาโรตารีระดับห้องปฏิบัติการในการศึกษาเปลือกไข่เตรียม โดยการล้างหลาย ๆ ครั้ง ตากแดด บดและกรองผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมโครเมตรการเผาของเสีย เปลือกไข่ที่ร้อนแล้วได้ดำเนินการในเตาเผาแบบท่อหมุนโซนเดียวที่อุณหภูมิ 800 °C มีความชัน 5 °C และที่ 1 รอบต่อนาทีทั้งทางกายภาพและคุณสมบัติทางเคมีของแคลเซียมออกไซด์ที่ได้จากการเผา

กากไข่คือตรวจสอบอย่างเป็นระบบด้วยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ต่างๆ ผลจากการเอกซเรย์แบบ Diffraction (PXRD) และ X-Ray Fluorescence: (XRF) พบว่าแคลเซียมคาร์บอเนตส่วนใหญ่ในของเสียจากเปลือกไข่ถูกเปลี่ยนความร้อนเป็นนาโนแคลเซียมออกไซด์ที่มีขนาดผลึกเฉลี่ยเท่ากับ 47.5 นาโนเมตร และมีควมบริสุทธิ์ร้อยละ 97.8 ผลจากการศึกษานี้ระบุสถานะที่เหมาะสมและความเป็นไปได้ในการผลิตนาโนแคลเซียมออกไซด์จำนวนมากผ่านเตาโรตารีและได้แสดงให้เห็นแล้วว่านาโนแคลเซียมออกไซด์ที่ได้นั้นเทียบได้กับสารเคมีทางการค้า

(Platon et al. 2020) ศึกษาการเตรียมขนมปังขาวด้วยผงเปลือกไข่ไก่แบบต่าง ๆ ด้วยการเติมการเติมเปลือกไข่แบ่งสำหรับการเตรียมขนมปังขาวมีมากถึงร้อยละ 2 และคุณภาพของขนมปังเพิ่มขึ้นความยืดหยุ่นและความชื้นเริ่มต้นด้วยการเติมผงเปลือกไข่ร้อยละ 0.5 การแก่ของขนมปังเกิดขึ้น 10 ถึง 12 ชั่วโมงหลังจากการอบหลังจาก 24 ชั่วโมง คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีทั้งหมดของเปลือกขนมปังในกรณีของขนมปังเสริมแคลเซียมมีผลในเชิงบวก

(Wang Yudong et al. 2024) ศึกษาความแข็งแรงของเจล ปฏิสัมพันธ์ทางเคมีการกระจายน้ำ โพรไฟล์โปรตีนด้วย SDS-PAGE และคุณสมบัติทางรีโอโลยีของซูริมิที่ผ่านการล้างด้วยค่า pH ที่แตกต่างกันและแคตไอออนประเภทโมโนวาเลนต์หรือไดวาเลนต์ พบว่าซูริมิที่ล้างด้วยแคตไอออนโมโนวาเลนต์ที่ pH 3.0 หรือ 7.0 และแคตไอออนไดวาเลนต์ที่ pH 3.0 หรือ 9.0 มีความแข็งแรงของเจลสูงขึ้น การมีแคตไอออนไดวาเลนต์ในกระบวนการล้างช่วยชะลอการเสถียรภาพของโปรตีนซูริมิ นอกจากนี้ พบว่าสายหนักของไมโอซินและแอกตินมีความเข้มข้นมากขึ้นในซูริมิที่ล้างด้วยโซเดียมไอออนร้อยละ 0.25 หรือแคตไอออนร้อยละ 0.5 ระยะเวลาการคลายตัวของเจลลดลงเมื่อซูริมิถูกล้างด้วยสารละลายที่มีความเข้มข้นไอออนสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณพันธะไดซัลไฟด์ของเจลลดลงในซูริมิที่ล้างที่ pH 3.0 หรือ 9.0 แต่ปฏิสัมพันธ์แบบไฮโดรโฟบิก พันธะไอออนิก และพันธะไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นในซูริมิที่ล้างที่ pH 5.0 หรือ 7.0 ดังนั้นการล้างซูริมิด้วยค่าพีเอชที่แตกต่างกันและแคตไอออนประเภทโมโนวาเลนต์หรือไดวาเลนต์ส่งผลต่อโครงสร้างเครือข่ายของเจลอย่างมีนัยสำคัญ

(Yin and Park 2014) ศึกษาคุณสมบัติการเกิดเจลของอะแลสกาพอลลิวคซูริมิที่ความแตกต่างในระดับร้อยละ (0, 0.1, 0.25, 0.5, 1 และ 2) ความแข็งแรงของเจลซูริมิมีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากความเข้มข้นของ NFB เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 1 จุดสูงสุดแรกอุณหภูมิและค่าของโมดูลัสการจับเก็บ ( $G_0$ ) และการรวมตัวของเมโรไมโอซินชนิดเบาเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NFB เพิ่มขึ้น ช่วยลดระดับ  $G_0$  หลังจากการเกิดเจลกิจกรรมของ Endogenous transglutaminase (TGase) ในอะแลสกาพอลลิวคซูริมิเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียม NFB เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของไมโอซินการเชื่อมโยงข้ามโซ่เพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ NFB เพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่ามีการก่อตัวของมากขึ้น  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl)-lysine พันธะโควาเลนต์ได้ขึ้นโดย TGase ภายในและแคลเซียมไอออนจาก NFB

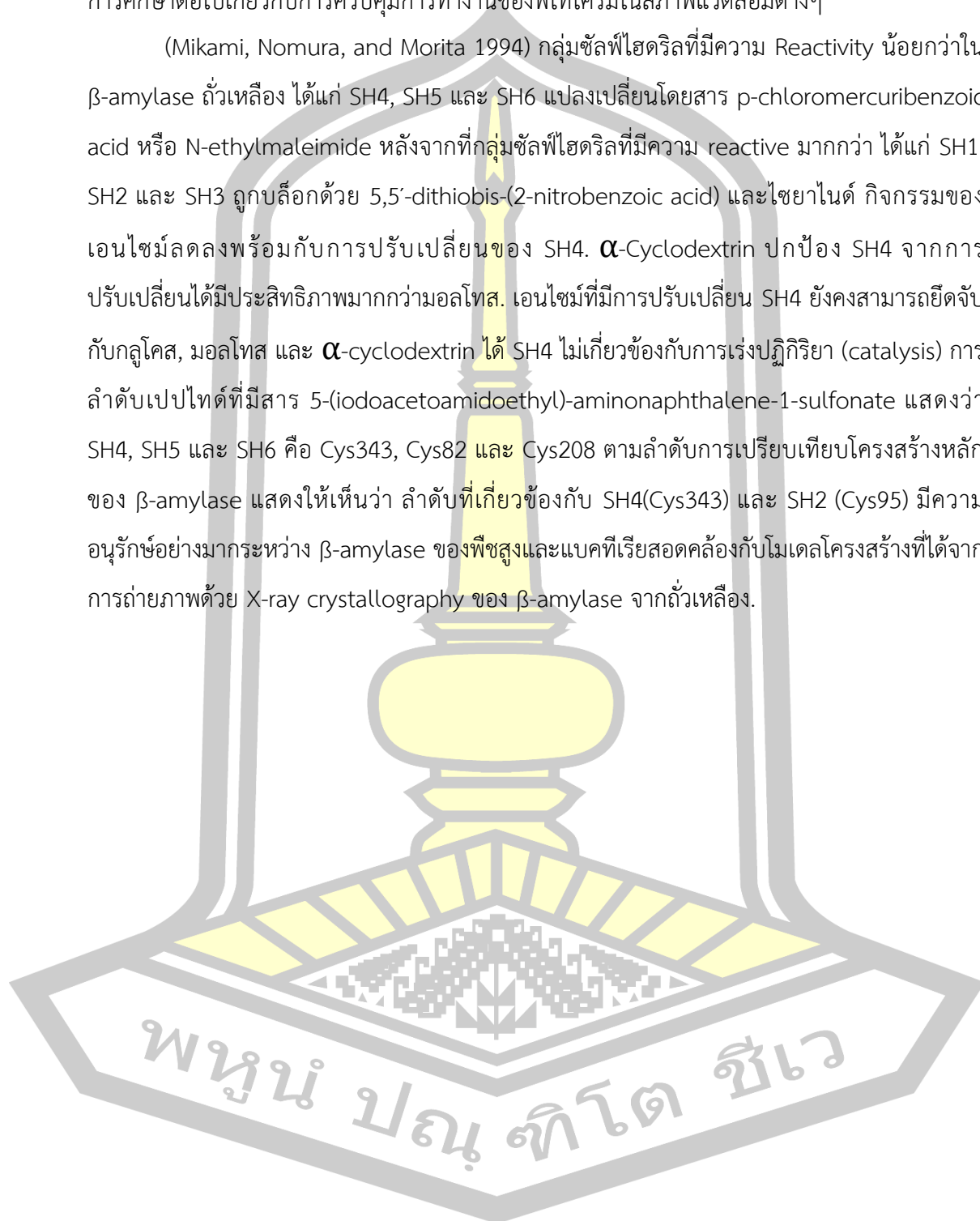
(Padtakenang and Promprom 2019) ศึกษาสารพฤกษเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดจากรากลำต้นและใบของตดหมุดตดหมาด้วยตัวทำละลาย 5 ชนิด คือ เฮกเซน อะซิโตน คลอโรฟอร์ม เมทานอล และเอทานอล พบว่า ตัวทำละลายที่สามารถพบสารพฤกษเคมีคือ เอทานอล เมทานอล คลอโรฟอร์ม อะซิโตน และเฮกเซน ตามลำดับ ทุกตัวทำละลายจะตรวจพบพฤกษเคมีคือ ฟลาโวนอยด์ และเทอร์ปีนอยด์ สารสกัดจากใบที่สกัดด้วยเอทานอลมีปริมาณฟีนอลิกรวม ( $174.42 \pm 15.43$ ) และปริมาณฟลาโวนอยด์รวม ( $41.32 \pm 1.94$ ) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับสารสกัดจากราก ลำต้นและราก ใบตดหมุดตดหมามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงที่สุด เมื่อทดสอบด้วยวิธี DPPH ( $40.73 \pm 6.68$ ) และวิธี FRAP assay ( $68.22 \pm 12.1$ ) เมื่อเทียบกับลำต้นและราก สารสกัดจากใบที่สกัดด้วยเอทานอลของตดหมุดตดหมาสามารถยับยั้งเอนไซม์แอลฟาไกลูโคซิเดสเมื่อเปรียบเทียบกับอะคาร์โบส (Acabose) ซึ่งเป็นสารมาตรฐาน จากการทดสอบรากกระพังโหมมีความเหมาะสมในการเป็นอาหารเสริมสุขภาพและต้านแก่ชราต่อไป

(ศิริลักษณ์ and สุวพัชร 2556) ศึกษาผลของสารสกัดจากกระพังโหมที่สกัดด้วยน้ำ (SV:Water extraction) และการสกัดด้วยการกลั่น (SV:Distillation) ที่เติมลงในเจลซูริมิจากปลาทรายแดงที่ระดับความเข้มข้นต่างกันร้อยละ 0, 0.05, 0.1 และ 0.2 ที่อุณหภูมิ  $40^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที ตามด้วย ความร้อนที่อุณหภูมิ  $80^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที พบว่าสารสกัดมีผลต่อการเพิ่มความแข็งของเจลซูริมิจากปลาทรายแดง โดยที่สารสกัดจากกระพังโหมทั้ง 2 ชนิด สามารถเพิ่มค่า Breaking force และ Deformation ของเจลปลาทรายแดงให้สูงขึ้นจากเจลควบคุมและสามารถลดปริมาณโปรตีนที่ละลายในสารละลายไตรคลอโรอะซิติก (TCA) อย่างไรก็ตาม การใช้สารสกัดจากกระพังโหมสามารถเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำและช่วยส่งเสริมให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในเจล และปลาทรายแดงมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดกระพังโหม

(Smith and Cyr 1988) ศึกษาเกี่ยวกับฟิโทโครมและกลุ่มซัลไฟไฮดริลการศึกษาฟิโทโครมที่สกัดจากยอดของข้าวไรย์และข้าวโอ๊ตพบว่าฟิโทโครมในรูปแบบ Pr (ดูดซับแสงสีแดง) สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัม (Blue shift) เมื่ออยู่ในสภาวะที่เอื้อต่อการออกซิเดชัน การเปลี่ยนแปลงไม่สามารถย้อนกลับได้ แต่สามารถป้องกันได้ด้วยการเติมสารเคมีบางชนิด เช่น diethyldithiocarbamate และ 2-mercaptoethanol. ผลการศึกษายังพบว่า Pfr (รูปแบบดูดซับแสงฟาร์เรด) มีซัลไฟไฮดริลที่ตอบสนองได้มากกว่ารูปแบบ Pr และความแตกต่างนี้สามารถคงอยู่ได้ถึง 2.5 ชั่วโมง ฟิโทโครมที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมแสดงการลดลงของการตอบสนองต่อสาร DTNB ในระยะสั้นการศึกษาเพิ่มเติมจากการยิดเกาะฟิโทโครมกับ Cibacron blue 3GA พบว่า Pfr มีความสนใจในสีย้อมดีกว่า Pr โดยการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของฟิโทโครมทำให้ความแตกต่างจากผลการศึกษานี้ สรุปได้ว่า ซัลไฟไฮดริลในฟิโทโครมมีบทบาทสำคัญ ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโปรตีนระหว่างการแปลงสภาพจาก Pr เป็น Pfr และจำเป็นต้องมีการปกป้องได้ดีเพื่อคงสภาพโปรตีน

ดั้งเดิมไว้ การค้นพบนี้ช่วยให้เราเข้าใจกลไกการทำงานของฟิโทโครมในพืชและสามารถนำไปพัฒนาการศึกษาต่อไปเกี่ยวกับการควบคุมการทำงานของฟิโทโครมในสภาพแวดล้อมต่างๆ

(Mikami, Nomura, and Morita 1994) กลุ่มซัลไฟไฮดริลที่มีความ Reactivity น้อยกว่าใน  $\beta$ -amylase ถั่วเหลือง ได้แก่ SH4, SH5 และ SH6 แปลงเปลี่ยนโดยสาร p-chloromercuribenzoic acid หรือ N-ethylmaleimide หลังจากที่ถูกกลุ่มซัลไฟไฮดริลที่มีความ reactive มากกว่า ได้แก่ SH1, SH2 และ SH3 ถูกบล็อกด้วย 5,5'-dithiobis-(2-nitrobenzoic acid) และไซยาไนด์ กิจกรรมของ เอนไซม์ลดลงพร้อมกับการปรับเปลี่ยนของ SH4.  $\alpha$ -Cyclodextrin ปกป้อง SH4 จากการปรับเปลี่ยนได้มีประสิทธิภาพมากกว่ามอลโทส. เอนไซม์ที่มีการปรับเปลี่ยน SH4 ยังคงสามารถยึดจับกับกลูโคส, มอลโทส และ  $\alpha$ -cyclodextrin ได้ SH4 ไม่เกี่ยวข้องกับการเร่งปฏิกิริยา (catalysis) การลำดับเปปไทด์ที่มีสาร 5-(iodoacetoamidoethyl)-aminonaphthalene-1-sulfonate แสดงว่า SH4, SH5 และ SH6 คือ Cys343, Cys82 และ Cys208 ตามลำดับการเปรียบเทียบโครงสร้างหลักของ  $\beta$ -amylase แสดงให้เห็นว่า ลำดับที่เกี่ยวข้องกับ SH4(Cys343) และ SH2 (Cys95) มีความอนุรักษ์อย่างมากระหว่าง  $\beta$ -amylase ของพืชสูงและแบคทีเรียสอดคล้องกับโมเดลโครงสร้างที่ได้จากการถ่ายภาพด้วย X-ray crystallography ของ  $\beta$ -amylase จากถั่วเหลือง.



## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) เพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณภาพและคุณสมบัติของเจลซูริมิโดยส่วนประกอบเชิงหน้าที่จากธรรมชาติ โดยดำเนินการวิจัยตามลำดับดังต่อไปนี้

- 3.1 แผนการวิจัย
- 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
- 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย
- 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล
- 3.5 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองดังนี้

3.1.1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่และความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพของเจลโปรตีนจากเนื้อปลาชะโด

3.1.1.1 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านกายภาพของเจลได้แก่ ค่า Breaking force, Deformation, Gel strength ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Expressible moisture contents) ความขาว (Whiteness) และโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) สมบัติการไหล (Rheology Properties)

3.1.1.2 ศึกษาคุณสมบัติทางด้านเคมีของเจลได้แก่ ค่า TCA-soluble protein, Total sulphhydryl groups, Protein sulphhydryl groups, Sodium dodecyl sulphate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS PAGE) ใช้แผนการทดลองแบบ CRD (Completely Random Design) มี 1 ปัจจัย 6 ระดับ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ดังนี้

3.1.2.2.1 ระดับความเข้มข้นของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่คือ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ( $\mu\text{mol}/100\text{g surimi}$ )

3.1.2.2.2 ระดับความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมคือ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ( $\mu\text{mol}/100\text{g surimi}$ )

### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

#### 3.2.1 วัสดุดิบ

- 3.2.1.1 ปลาชะโดโตเต็มวัยน้ำหนักต่อตัว 4 ถึง 5 กิโลกรัม
- 3.2.1.2 แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ไก่
- 3.2.1.3 รากกระพังโหมอายุประมาณ 3 ถึง 4 ปี (Ø ราก 1 ถึง 2 เซนติเมตร มีกลิ่น

เหม็นฉุน)

#### 3.2.2 วัสดุอุปกรณ์

- 3.2.2.1 วัสดุอุปกรณ์
- 3.2.2.2 เครื่องชั่ง (Balance)
- 3.2.2.3 ถาด (Salver)
- 3.2.2.4 มีด (Knife)
- 3.2.2.5 เครื่องบด (Grinder)
- 3.2.2.6 ปิเปตต์ (Pipette)
- 3.2.2.7 เครื่องปั่นผสม (Mixer)
- 3.2.2.8 เครื่อง Homogenizer
- 3.2.2.9 บีกเกอร์ (Beaker) กระบอกตวง (Cylinder)
- 3.2.2.10 แท่งสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5x2.5 เซนติเมตร
- 3.2.2.11 फिल्मโพลีเอธิลีน
- 3.2.2.12 ผ้าขาวบาง
- 3.2.2.13 ถุงพลาสติก (ถุงเย็น)
- 3.2.2.14 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 3.2.2.15 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer)
- 3.2.2.16 ถังสำหรับล้างเนื้อปลา
- 3.2.2.17 Moisture can
- 3.2.2.18 โถดูดความชื้น (Dessiccator)
- 3.2.2.19 เครื่อง Homogenizer
- 3.2.2.20 เตาอบลมร้อน ยี่ห้อ Binder
- 3.2.2.21 กระดาษกรองเบอร์ 1 (Whatman, USA)
- 3.2.2.22 น้ำแข็งบด
- 3.2.2.23 เกลีสและน้ำตาลทราย

- 3.2.2.24 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์
- 3.2.2.25 Texture analyzer TA-XT2i
- 3.2.2.26 เครื่องวัดค่าสี (MinoltaCR-400)
- 3.2.2.27 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Libla S12 BIC 114747)
- 3.2.2.28 เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)
- 3.2.2.29 เครื่องชั่งสาร 2 ตำแหน่ง (Balance matter) Mettler Toledo
- 3.2.2.30 เครื่อง Texture Analyser TA-XT plus
- 3.2.2.31 เครื่องปั่น Panasonic (MX-AC400)
- 3.2.2.32 เครื่องเตาเผาแบบโรตารีระดับห้องปฏิบัติการ rotary Kiln
- 3.2.2.33 Trichloroacetic acid
- 3.2.2.34  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (Sodium carbonate)
- 3.2.2.35 NaOH (Sodium hydroxide)
- 3.2.2.36  $\text{CuSO}_4$  (Copper sulphate)
- 3.2.2.37 Sodium citrate
- 3.2.2.38 Folin-Ciocalteu 'phenol reagent
- 3.2.2.39 Bovine serum albumin
- 3.2.2.40 Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)
- 3.2.2.41 8 M Urea
- 3.2.2.42  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  (Disodium Hydrogen phosphate)
- 3.2.2.43 Cysteine
- 3.2.2.44 Hydrochloric acid (HCl)
- 3.2.2.45 Sodium dodecyl sulfate (SDS)
- 3.2.2.46 Phosphate buffer
- 3.2.2.47 Sucrose
- 3.2.2.48 Polyphosphate

### 3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 วิธีการเตรียมซูริมิ

3.3.1.1 นำปลาซะโตมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเย็น ขอดเกล็ดตัดหัว ลอกหนัง และควักไส้ออก

3.3.1.2 ทำการแล้เอาเนื้อจากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำเย็นอีกหนึ่งรอบและนำเนื้อปลาเข้าเครื่องบดเนื้อ

3.3.1.3 นำมาล้างด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ร้อยละ 0.1 กรองและบีบน้ำออกด้วยผ้าขาวบาง (3 ชั้น) โดยให้เนื้อมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 80

3.3.1.4 ทำการปั่นผสมกับน้ำตาลซูโครสร้อยละ 4 ซอร์บิทอลร้อยละ 4 และโพสเฟตรี้อยละ 0.1 ผสมให้เข้ากัน เป็นเวลา 10 นาที

3.3.1.5 บรรจุในถุง Polyethylene เก็บรักษาในอุณหภูมิต่ำ (-18 °C ถึง -20 °C)

### 3.3.2 วิธีการเตรียมสารสกัดหมู่วัสดุไฮดรอลิกจากรากกระพังโหม

3.3.2.1 นำรากกระพังโหมมาล้างและหั่นเป็นชิ้นเล็กๆปริมาณ 100 กรัม ทำการบดละเอียด

3.3.2.2 นำมาปั่นผสมกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่อง Homogenizer ที่ 1100 rpm 2 นาที

3.3.2.3 บีบกรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกกากจากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1

3.3.2.4 ทำการเก็บสารสกัดในภาชนะแสงที่บและควบคุมอุณหภูมิการเก็บที่ 4 °C เพื่อรอการนำไปวิเคราะห์ต่อไป

3.3.2.5 นำไปวิเคราะห์ปริมาณหมู่วัสดุไฮดรอลิกเพื่อหาความเข้มข้นที่มีในสารสกัด

### 3.3.3 วิธีการเตรียมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่

ตามวิธีของ (Chuakham et al. 2021) (Imkum Putkham et al. 2022)

3.3.3.1 นำเศษเปลือกไข่ไก่ที่ได้จากอุตสาหกรรมอาหารหรือครัวเรือนที่มีเปลือกไข่ไก่และเยื่อหุ้มเปลือกไข่ไก่มาล้างด้วยน้ำประปา 3 ครั้ง เพื่อขจัดสิ่งสกปรกออกจากเปลือกไข่ไก่

3.3.3.2 นำมาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

3.3.3.3 จุ่มลงในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีสารละลายกรดอะซิติกและกวนเป็นเวลา 60 นาที

3.3.3.4 ล้างน้ำ 1 ครั้ง นำไปตากแดดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง บดด้วยเครื่องปั่น Panasonic (MX-AC400) และร่อนให้ได้ขนาดอนุภาค 250 ไมโครเมตร

3.3.2.5 นำเปลือกไข่ไก่ที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณ  $\text{CaCO}_3$  ด้วยวิธีการไทเทรต

3.3.2.6 นำใส่เตาเผาแบบท่อหมุนโซนเดียวที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงด้วยความเร็วในการหมุน 1 รอบต่อนาทีภายใต้บรรยากาศที่มีอากาศ

3.3.2.7 ได้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ ที่มีความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 98 เป็นผง นำมาเก็บไว้ใน Desiccator สำหรับการทดลองเผา

### 3.3.4 ศึกษาระดับความเข้มข้นของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด

3.3.4.1 นำซูริมิ 100 กรัม ปั่นผสมกับเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2.5 เป็นเวลา 1 นาที เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ที่ระดับความเข้มข้น 6 ระดับคือ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) และนำไปปั่นผสมให้เข้ากันปรับปริมาณความชื้นให้เป็นร้อยละ 80

3.3.4.2 อัดใส่ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $2.5 \times 2.5$  cm ทำการอัดให้แน่นโดยไม่ให้เกิดฟองอากาศ ห่อด้วยฟิล์มพอลิโพรพิลีน

3.3.4.3 นำไปแช่ต่อน้ำไปแช่ตัวที่อุณหภูมิ  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 30 นาที

3.3.4.4 นำไปแช่ตัวต่อที่อุณหภูมิ  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 20 นาที

3.3.4.5 นำมาพักทิ้งไว้ในน้ำเย็น 10 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพเจล

### 3.3.5 วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพของเจล

ได้แก่ ค่า Breaking force, Deformation, Gel strength ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Expressible moisture contents) ความขาว (Whiteness) และโครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) สมบัติการไหล (Rheology Properties)

#### 3.3.5.1 การวัดความแข็งแรงเจล (Gel Strength)

นำตัวอย่างซูริมิเจล วัดค่า Breaking force, Deformation, Gel strength โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture Analyzer TA-XT2i, Stable Micro Systems, Godalming, UK) ด้วยโปรแกรม Texture Profile Analyzer โดยใช้อัตราเร็วในการกด 60 มิลลิเมตรต่อนาที ในการวิเคราะห์จะใช้หัววัด Cylinder probe part (P/5S) เส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์ตัวแปรทางเนื้อสัมผัสดังนี้ แรง (Breaking force) เป็นแรงสูงที่สุดที่ใช้ในการเจาะทะลุ ตัวอย่างมีหน่วยเป็น กรัม (g) และ ระยะทาง (Deformation) มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm) ที่หัววัดเคลื่อนที่จากผิวหน้าตัวอย่างจนเจาะทะลุ มีหน่วยเป็นกรัมเซนติเมตร (g.cm)

#### 3.3.5.2 การวัดความขาวของเจล (Whiteness)

ค่าความขาวของเจลซูริมิตามวิธีของ (Kamath et al. 1992) ตัวอย่างเจลซูริมิจากปลาชะโดตรวจสอบด้วยเครื่องวัดค่าสี (Minolta CR-400) โดยใช้ระบบ CIE  $L^* a^* b^*$  อ่านค่าเป็น  $L^*$  (ความสว่าง)  $a^*$  (แดง/เขียว) และ  $b^*$  (เหลือง/น้ำเงิน) คำนวณความขาวด้วยสมการต่อไปนี้ 
$$\text{Whiteness} = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{0.5}$$

### 3.3.5.3 การวัดความสามารถในการอุ้มน้ำ (Expressible moisture content)

ความสามารถในการอุ้มน้ำ ตัดแปลงตามวิธีของ (Benjakul, Visessanguan, and Srivilai 2001) ตัดตัวอย่างให้มีความหนา 5 มิลลิเมตร ชั่งน้ำหนักตัวอย่างหนักบันทึกเป็นค่า (X) ใช้กระดาษกรองรองด้านล่างตัวอย่าง 3 ชั้น และด้านบนตัวอย่าง 2 ชั้น จากนั้นกดทับด้วยก้อนวัตถุมาตรฐานหนัก 5 กิโลกรัม เป็นเวลานาน 2 นาที จากนั้นนำตัวอย่างถูกกระดาษดูดน้ำออกแล้วไปชั่งน้ำหนัก(Y) คำนวณโดยใช้สมการดังต่อไปนี้  $Expressible\ moisture\ content\ (\%) = 100 [(X-Y)/X]$

### 3.3.5.4 การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning electron microscopy (SEM)

โครงสร้างจุลภาคของเจลซูริมิถูกวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ตัดแปลงตามวิธีของ (Huang et al. 2021) นำตัวอย่างซูริมิไป Freeze dry เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นตัดตัวอย่างเป็นแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร นำตัวอย่างไปเคลือบด้วยทองคำ และถ่ายภาพโครงสร้างโดยใช้เครื่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ยี่ห้อ HITACHI รุ่น TM4000Plus (กำลังขยาย 100X)

### 3.3.5.5 การวัดสมบัติการไหล (Rheology Properties)

สมบัติการไหลของเนื้อซูริมิ ตามวิธีของ (Yin and Park 2014) นำตัวอย่างซูริมิเจลรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร (ยาว 2.5 เซนติเมตร) ซึ่งบ่งบอกถึงการแตกหักและการเปลี่ยนรูปใช้วัดสมบัติการไหลด้วยรีโอมิเตอร์ Haake mars II thermo electron โดยใช้เซนเซอร์ (Sensor) แบบแผ่น (ชุดเงา C35/1T และช่องว่างของแผ่น 1 มิลลิเมตร) และปาดขอบซูริมิให้เรียบร้อย โดยตัวอย่างจะถูกนำไปเพิ่มอุณหภูมิ 20 ถึง 90°C ที่อัตราการให้ความร้อน 1 °C หรือนาที ความถี่คงที่ 0.1 Hz และแรงเฉือน ของ 100 Pa จากนั้นตัวอย่างจะถูกปรับอุณหภูมิเย็นลงที่ 4 °C ข้อมูลโมดูลัสการจัดเก็บ (G') โมดูลัสการสูญเสีย (G'') บันทึกทุก 1 นาที ลงในโปรแกรม

**3.3.6 วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมีของเจล ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณ TCA-soluble protein, Total sulfhydryl groups (TSH), Protein sulfhydryl (PSH), Sodium dodecyl sulphate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS PAGE)**

#### 3.3.6.1 ปริมาณโปรตีนที่ละลายในกรดไตรคลอโรอะซิติก (TCA-soluble protein)

นำตัวอย่างเจลซูริมิ 3 กรัม เติมกรดไตรคลอโรอะซิติกร้อยละ 5 (w/v) ปริมาตร 27 มิลลิลิตร จากนั้นนำไป Homogenize ที่ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 นาทีด้วยเครื่อง Ace Homogenizer (Nihon Seiki Kaisha Ltd., Tokyo, Japan) เก็บ ส่วนผสมไว้ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำส่วนใสที่กรองได้ไปวัดปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติกด้วยวิธี (Buamard, Singh, and Benjakul 2024) โดยใช้กรดอะมิ

โนโทโรซินเป็นสารมาตรฐาน ปริมาณของโปรตีน ได้แก่ กรดอะมิโนอิสระ และเปปไทด์ รายงานเป็น มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมตัวอย่าง

### 3.3.6.2 ปริมาณหมู่ซัลไฟไฮดริลทั้งหมด (Total sulfhydryl groups)

วิเคราะห์ตามวิธีของ (Ellman 1959) โดยใช้ 5-5'- Dithiobis 2-nitrobenzoic acid (DTNB) เตรียมตัวอย่างซูริมิเจล 0.1 กรัม ในสารละลาย (Buffer pH 8) (8 M urea, 2% SDS, 10mM EDTA, 0.1 M Phosphate (pH 7) Homogenization ด้วย Teflon homogenizer ที่ 1,000 rpm นาน 5 นาที เก็บไว้ในที่มืดนาน 40 °C นาน 15 นาที วัดค่าความดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 nm และปริมาณหมู่ซัลไฟไฮดริลคำนวณโดยใช้ค่าคงที่โมลาร์ของ DTNB ซึ่งเท่ากับ  $13,600 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

### 3.3.6.3 ปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริล (Protein sulfhydryl)

ตัวอย่างเจล 0.5 กรัม homogenize โดยใช้ Teflon homogenizer ที่ 1,200 rpm นาน 5 นาที โดยเติม Buffer 8 M urea, 2% SDS, 10 mM EDTA, 0.1 M Phosphate (pH 7) ตกตะกอนด้วย (Trichloroacetic acid) 15% (w/v) แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 5,000 xg นาน 10 นาที จากนั้นปรับค่าความเป็น pH ที่ 7.0 นำส่วนใส (Supernatant) ไปวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟไฮดริลโดยใช้สารละลายที่ได้ 4 มิลลิลิตร ผสมกันร้อยละ 0.1 ของสารละลาย DTNB ปริมาณ 0.4 มิลลิลิตร นำไปวิเคราะห์ปริมาณหมู่ซัลไฟไฮดริลแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 40 °C นาน 15 นาที (ที่มืด) วัดค่าการดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 412 นาโนเมตร ปริมาณหมู่ซัลไฟไฮดริลอิสระ (Free-sulfhydryl) คำนวณได้จากค่า molar extinction  $13612.5 \text{ M}^{-1} \text{ Cm}^{-1}$  ของ 2-nitro-5-triobenzoic acid ปริมาณโปรตีนหมู่ซัลไฟไฮดริล (Protein sulfhydryl) ได้ส่วนต่างของปริมาณหมู่ซัลไฟไฮดริลทั้งหมด (TSH) ลบด้วยปริมาณของหมู่ซัลไฟไฮดริลอิสระ (Free-sulfhydryl)

### 3.3.6.4 การวิเคราะห์ Sodium Dodecyl Sulfate Polyacrylamide Gel Electrophoresis (SDS PAGE)

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโปรตีนในเจลซูริมิถูกตรวจสอบโดยใช้เทคนิค SDS-PAGE ตามวิธีของ (Weber and Osborn 1969) นำตัวอย่าง (0.1 กรัม) ละลายได้ในสารละลาย SDS 5% (น้ำหนัก/ปริมาตร) 25 มิลลิลิตร ที่ให้ความร้อนที่ 85 °C ก่อนนำไปวิเคราะห์. จากนั้นผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันที่ 1,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที Homogenizer และความร้อนในอ่างน้ำ (85 °C) เป็นเวลา 60 นาที ละลายตัวอย่างไมโอซิน ตามด้วยตัวอย่างถูกปั่นแยกที่ 8000xg เป็นเวลา 20 นาที ส่วนลอยจะถูกผสมที่อัตราส่วน 1:1 (ปริมาตร/ปริมาตร) ด้วย buffer ตัวอย่าง (ประกอบด้วย SDS ร้อยละ 4, Tris-HCl 0.5 โมล/ลิตร, ร้อยละ 10 β-mercaptoethanol และกลีเซอรอลร้อยละ 20, pH 6.8) จากนั้นให้ความร้อนในต้มน้ำเดือดเป็นเวลา 5 นาที เพื่ออเล็กโตรโฟรีซิสครั้งต่อไป ส่วนผสม

ถูกไหลตกลงบนเจล SDS-PAGE (เจลแบบเรียงซ้อนร้อยละ 4 (w/v), ร้อยละ 10 (w/v) Running gel) ที่แรงดันไฟฟ้า 80 V และ 120 V ตามลำดับการแยกโปรตีน ต่อจากนั้นเจลอิเล็กโทรโพรเซสถูกย้อมด้วยร้อยละ 0.1 (w/v) Coomassie brilliant blue R-250 เป็นเวลา 45 นาที ตามด้วยกำหนดด้วยกรดอะซิติกร้อยละ 10 (v/v) และเอทานอลร้อยละ 40 (v/v) สองครั้ง 45 นาที จากนั้นจะถูกทำลายทุกๆ 60 นาที จนกระทั่งโปรตีนมองเห็นเป็นเส้นได้ชัดเจน น้ำหนักโมเลกุลของแถบโปรตีนคือกำหนดโดยมาตรฐานโปรตีน

### 3.3.7 ศึกษาผลความเข้มข้นของสารสกัดหุ้มเซลล์ไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ต่างกัน ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด

3.3.7.1 นำซูริมิ 100 กรัมปั่นผสมกับเกลือความเข้มข้นร้อยละ 2.5 เป็นเวลา 1 นาที เติมสารสกัดจากรากกระพังโหมที่มีความเข้มข้นของหุ้มเซลล์ไฮดริลทั้งหมด 6 ระดับคือ 0, 2, 4, 6, 8 และ 10 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) และนำไปปั่นผสมให้เข้ากันปรับปริมาณความชื้นให้เป็นร้อยละ 80

3.3.7.2 อัดใส่ท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.5×2.5 เซนติเมตร ทำการอัดให้แน่นโดยไม่ให้เกิดฟองอากาศห่อด้วยฟิล์มพอลิโพรพิลีน

3.3.7.3 นำไปแช่ต่อน้ำไปแช่ตัวที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.3.7.4 นำไปแช่ตัวต่อที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 20 นาที

3.3.7.5 นำมาพักทิ้งไว้ในน้ำเย็น 10 นาที แล้วนำไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 °C เป็นเวลา 1 คืน ก่อนนำไปวิเคราะห์คุณภาพเจล

3.3.8 วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านกายภาพของเจล ได้แก่ ค่า Breaking force, Deformation, Gel strength ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Expressible moisture contents) ความขาว (Whiteness) โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) สมบัติการไหล (Rheology Properties) รายละเอียดในการวิเคราะห์ในข้อ 3.3.5

3.3.9 วิเคราะห์คุณสมบัติทางด้านเคมีของเจล ได้แก่ วิเคราะห์ปริมาณ TCA-soluble protein, Total sulfhydryl groups, Protein sulfhydryl groups, Sodium dodecyl sulphate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS PAGE) ตามรายละเอียด ในการวิเคราะห์ในข้อ 3.3.6

## 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ทางสถิติใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (ANOVA) ตามด้วยการทดสอบ Duncan's multiple range test เพื่อตรวจสอบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มที่

ระดับนัยสำคัญ  $p < 0.05$  ข้อมูลถูกวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS for Windows (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) และนำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย  $\pm$  ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ดังนี้

3.4.1 นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.4.2 สรุปผลการวิเคราะห์และรายงานในรูปแบบตารางและกราฟ

### 3.5 สถิติที่ใช้ในการวิจัย

3.5.1 สถิติพื้นฐาน ได้แก่

3.5.1.1 ค่าเฉลี่ย

3.5.1.2 ร้อยละ

3.5.1.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

3.5.2 การวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



## บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล

### 4.1 ศึกษาผลของการเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด

คุณสมบัติของเจลจากซูริมิปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน (0, 2, 4, 6, 8 และ 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) พบว่า ค่า Breaking force, Deformation และ Gel strength เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 95 แสดงดังตารางที่ 4 โดยเจลซูริมิที่เติมความเข้มข้น 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดคือ 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 26 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของ CaO ที่สูงขึ้น (8–10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ( $p < 0.05$ )

ส่วนค่าของ Deformation นั้น จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากเจลควบคุมซึ่งเจลควบคุมจะมีค่า Deformation ที่ 0.77 เซนติเมตร ส่วนค่าของ Deformation ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน คือ 0.80, 0.81, 0.91, 0.86 และ 0.78 เซนติเมตร ตามลำดับ การที่เพิ่มความเข้มข้นในการแช่ตัวของเจลนั้น จะเห็นได้เจลซูริมิที่เติมความเข้มข้น 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดคือ 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม และจากนั้นค่ามีแนวโน้มลดลงพบในความเข้มข้น 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ค่าของ Deformation จะมีค่าที่คงที่และเริ่มมีความเสถียรขึ้น ถึงจะมีการเพิ่มความเข้มข้นในการแช่ตัวของเจลเพิ่มขึ้นอีกก็ไม่มีผลต่อค่าระยะทางที่ทำให้เจลแตกและเสียรูป

ค่าความแข็งแรงเจล (Gel strength) พบว่า มีค่าเพิ่มขึ้นจากเจลควบคุมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 95 ซึ่งเจลควบคุมจะมีค่า Gel strength ที่ 300.01 กรัมเซนติเมตร ส่วนค่าของ Gel strength ที่ระยะเวลาที่แตกต่างกัน คือ 337.08, 350.61, 444.65, 361.97 และ 327.84 กรัมเซนติเมตร ตามลำดับ จากค่าของการที่เพิ่มความเข้มข้นในการแช่ตัวของเจลนั้นบ่งบอกถึง

ความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงของเจลซูริมิจากปลาชะโด เมื่อเทียบกับเจลตัวอย่างควบคุมความเข้มข้น 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดคือ 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ซึ่งเพิ่มขึ้นร้อยละ 48 และเมื่อระดับความเข้มข้นของแคลเซียมออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น 8 ถึง 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่าค่าความแข็งแรงเจลมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

การเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของเจลหลังจากผ่านกระบวนการให้ความร้อนเป็นผลมาจากเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ซึ่งเร่งปฏิกิริยาการเกิดพันธะข้ามระหว่างโมเลกุลแอกโตไมโอซิน ทำให้โครงสร้างเจลแข็งแรงขึ้นและมีเนื้อสัมผัสดีขึ้น (Yongsawatdigul et al. 2002) นอกจากนี้ แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ช่วยเพิ่มการเกิดพันธะข้ามระหว่างโมโอซิน กระตุ้นการคลี่คลาย

โครงสร้าง และเสริมความแข็งแรงของเมทริกซ์เจล (Habte et al. 2019) สมบัติไม่ชอบน้ำของ แคลเซียมช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวไฮโดรเจนภายในโมเลกุล ทำให้โครงสร้างเจลมีเสถียรภาพมากขึ้น

อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้นของ CaO ที่สูงขึ้น (8–10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) คุณสมบัติการเกิดเจล ลดลงเล็กน้อยอาจเกิดจากการลดลงของการเชื่อมโยงข้ามสายโปรตีนไมโอซินเฮฟวีเชน (MHC) แคลเซียมไอออนที่มากเกินไปอาจรบกวนการสร้างโครงข่ายเจลที่เหมาะสมระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Zhao et al. 2023) โดย  $\text{Ca}^{2+}$  ในระดับสูงสามารถก่อให้เกิดพันธะเกลือระหว่าง  $\text{Ca}^{2+}$  กับหมู่คาร์บอกซิลของกรดอะมิโน ส่งผลให้เกิดการเสียสภาพโปรตีนมากเกินไปและการรวมตัวเป็น กลุ่มของโปรตีน (Yu et al. 2022) ซึ่งส่งผลให้ลดการเชื่อมโยง MHC และลดความสามารถในการ ละลายของโปรตีน ทำให้เจลแข็งขึ้นแต่ขาดความยืดหยุ่น (Liu et al. 2011)

**ตารางที่ 4** Breaking force, Deformation และ Gel strength ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติม แคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

CaO ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Breaking force (g)	Deformation(cm)	Gel strength (g.cm)
0	387.97 $\pm$ 18.22 <sup>b</sup>	0.77 $\pm$ 4.64 <sup>bc</sup>	300.01 $\pm$ 18.94 <sup>c</sup>
2	419.45 $\pm$ 46.69 <sup>b</sup>	0.80 $\pm$ 4.79 <sup>bc</sup>	337.08 $\pm$ 65.45 <sup>b</sup>
4	430.95 $\pm$ 40.37 <sup>b</sup>	0.81 $\pm$ 4.87 <sup>bc</sup>	350.61 $\pm$ 44.66 <sup>b</sup>
6	489.70 $\pm$ 43.37 <sup>a</sup>	0.91 $\pm$ 5.48 <sup>a</sup>	444.65 $\pm$ 17.90 <sup>a</sup>
8	418.73 $\pm$ 42.58 <sup>b</sup>	0.86 $\pm$ 5.16 <sup>ab</sup>	361.97 $\pm$ 59.75 <sup>b</sup>
10	418.50 $\pm$ 51.69 <sup>b</sup>	0.78 $\pm$ 4.67 <sup>c</sup>	327.84 $\pm$ 66.17 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่กำหนดในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ ความเชื่อมั่น 95%

จากตารางที่ 5 พบว่า เจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ ระดับความเข้มข้นต่างกัน ส่งผลให้ Expressible moisture content มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ( $p < 0.05$ ) โดยที่ระดับความเข้มข้น 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เป็นระดับที่มีปริมาณความชื้นได้ดี ที่สุดคือร้อยละ 7.12, 9.88, 10.13, 11.07, 12.13 ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าเจลนั้นมีความสามารถในการอุ้มน้ำที่ดี เมื่อเทียบกับเจลควบคุมคือร้อยละ 18.88 เนื่องจากเจลแข็งขึ้นเกิดจากการเรียงตัว ใหม่ในโครงสร้างที่แข็งแรงและมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นไปได้ว่าการเกิดเจลใน สภาวะที่เหมาะสมของการเซตตัวในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 40 °C (Suwari) และตามด้วยการให้ ความร้อนที่ 80 °C (Kamaboko) ที่ความเข้มข้นต่างกันและอุณหภูมิเหมือนกันทำให้เกิดการเรียงตัว กันและดูดซึมน้ำในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Benjakul, Visessanguan, and Tueksuban

2003) การสร้างพันธะระหว่างไอออน  $\text{Ca}^{2+}$  กับไมโอไฟบริลที่มีประจุลบช่วยเสริมโครงสร้างโปรตีนให้คงที่ขึ้น ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำดีขึ้น (Sang et al. 2022)

**ตารางที่ 5** Expressible moisture content ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

CaO ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Expressible moisture content (%)
0	16.88 $\pm$ 0.87 <sup>a</sup>
2	12.13 $\pm$ 0.42 <sup>b</sup>
4	9.88 $\pm$ 1.81 <sup>c</sup>
6	7.12 $\pm$ 1.31 <sup>d</sup>
8	10.13 $\pm$ 0.24 <sup>bc</sup>
10	11.07 $\pm$ 1.14 <sup>bc</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่กำหนดในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การเติม CaO มีผลต่อค่าความขาวของเจลซูริมิปลาอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยค่าความขาวเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ CaO และสูงสุดที่ 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  (71.49) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (68.14) การเพิ่มขึ้นนี้อาจเกิดจากโครงสร้างเจลที่แข็งแรงขึ้น การรวมตัวของโปรตีนที่สม่ำเสมอและการลดการเปลี่ยนสีระหว่างกระบวนการให้ความร้อน แสดงดังตารางที่ 6

**ตารางที่ 6** Whiteness ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

CaO ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Whiteness
0	68.14 $\pm$ 0.86 <sup>c</sup>
2	69.04 $\pm$ 0.63 <sup>b</sup>
4	69.27 $\pm$ 0.61 <sup>b</sup>
6	71.49 $\pm$ 0.20 <sup>a</sup>
8	71.01 $\pm$ 0.24 <sup>a</sup>
10	70.99 $\pm$ 0.74 <sup>a</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่กำหนดในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน ดังตารางที่ 7 ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในสารละลาย Trichoroacetic acid ของเจลซูริมิจากปลาชะโด ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ( $p < 0.05$ ) โดยที่ระดับความเข้มข้น 0 และ 10 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$  surimi) เป็นระดับที่มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นและรองลงมาคือ 4, 8, 2 และ 6 ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) ตามลำดับ จากปริมาณ TCA-soluble protein ของเจลที่เติม CaO ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นจากตัวอย่าง เจลควบคุมแสดงให้เห็นถึงการแตกตัวของโปรตีนจากกิจกรรมการย่อยสลายโปรตีนของเอนไซม์ โปรติเอส (Protease) ย่อยโปรตีนเส้นใย (Myofibrillar protein) ให้เป็นโปรตีนเปปไทด์ที่มีโมเลกุลที่ เล็กลงซึ่งสามารถละลายในสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติกได้สูง เมื่อมีการเติมที่เพิ่มมากขึ้นพบว่า ปริมาณโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการเติม CaO ส่งผลให้เจลมีโครงสร้างที่แข็งแรง จากการเกิดกิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส เหนี่ยวนำให้เกิด Cross-linking ของโปรตีนส่งผล ให้โครงสร้างของเจลแข็งแรงมีความแข็งแรงและความสามารถในการถูกย่อยสลายตัวจากกิจกรรมของ เอนไซม์ย่อยโปรตีน (Protease) (Quan and Benjakul 2017)

**ตารางที่ 7** ค่า TCA-soluble protein content ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

CaO ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	TCA-soluble protein content (mg/100g)
0	1.89 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>
2	1.26 $\pm$ 0.18 <sup>c</sup>
4	1.43 $\pm$ 0.12 <sup>c</sup>
6	1.25 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>
8	1.31 $\pm$ 0.17 <sup>c</sup>
10	1.62 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่กำหนดในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ เชื่อมั่น 95%

ปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 8 พบว่ามีปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริล ลดลงเมื่อเทียบกับเจลควบคุมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) ซึ่งค่าโปรตีน ซัลไฟไฮดริลของเจลควบคุมอยู่ที่ 13.12  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เมื่อเติมแคลเซียมออกไซด์ ในระดับความเข้มข้น ที่ต่างกันคือ 2-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่า ปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริลคือ 8.64, 7.95, 7.86, 7.74 และ 7.32  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของโปรตีนนั้นลดลงมีความคงที่และมีความ เสถียรถึงจะมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้น แคลเซียมออกไซด์ ของเจลเพิ่มมากขึ้น โดยกลุ่มที่เติม

CaO ในช่วง 2–6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีปริมาณโปรตีนที่ละลายใน TCA ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมและที่ 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  CaO ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการเชื่อมโยงของโปรตีนที่ดีขึ้น ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ระบุว่า  $\text{Ca}^{2+}$  ช่วยเสริมสร้างการเชื่อมโยง MHC และความแข็งแรงของเจล ขณะเดียวกันช่วยลดการย่อยสลายของโปรตีน (Yongsawatdigul et al. 2002) มีผลต่อปริมาณของปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริล แสดงให้เห็นว่าการเติมสารสกัดจากเปลือกไข่สามารถส่งเสริมให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ได้เมื่อใช้ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเซตตัวของเจลภายใต้การให้ความร้อน โดยปฏิกิริยาเคมีในการก่อตัวของเจลซูริมิส่วนใหญ่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจนพันธะไอออนิก ปฏิกิริยาที่ไม่ชอบน้ำและพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์หรือกิจกรรมของเอนไซม์ภายในซูริมิโดยการเซตตัวของโครงข่ายเจลเป็นผลมาจากความสมดุลของการดึงดูดและการผลักกันระหว่างโปรตีน (Xiong et al. 2024) ตารางที่ 8 เป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นแรงหลักในการก่อตัวของเจลซูริมิเนื่องจากในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนของโปรตีน กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำจะถูกเปิดเผยส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยที่หมู่ซัลไฟไฮดริลจะเหนี่ยวนำให้เป็นพันธะไดซัลไฟด์มากขึ้น (Li et al. 2019) เมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาของหมู่ที่ไม่ชอบน้ำอาจเกิดจากการเติมโปรตีนจากภายนอก ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของพันธะไดซัลไฟด์ยังบ่งชี้ว่าการเติมช่วยเพิ่มการเชื่อมโยงทางเคมีในเจลซูริมิที่มีการเติม แคลเซียมออกไซด์ (Lv et al. 2021)

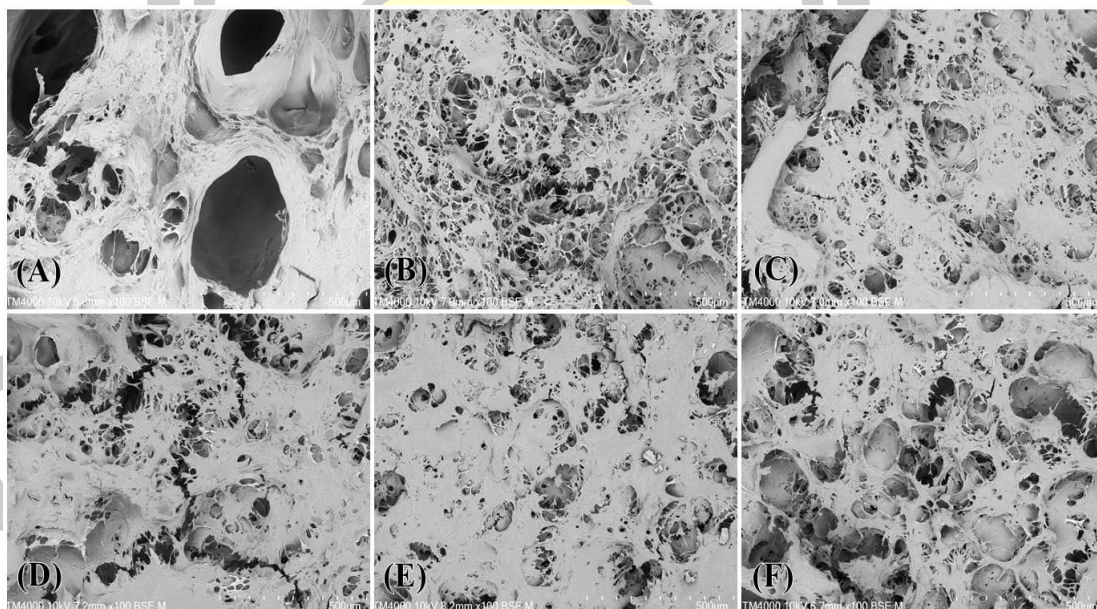
**ตารางที่ 8** ปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

CaO ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Total sulfhydryl content (TSH) ( $\mu\text{mol}/\text{g}$ )
0	13.12 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>
2	8.64 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>
4	7.74 $\pm$ 0.14 <sup>c</sup>
6	7.95 $\pm$ 0.10 <sup>c</sup>
8	7.86 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>
10	7.32 $\pm$ 0.13 <sup>d</sup>

<sup>a,b,c</sup> ตัวอักษรที่กำหนดในคอลัมน์เดียวกัน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

โครงสร้างจุลภาคของโปรตีนเจลเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดสมบัติการทำงานและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (Wang Xu, Xiong, and Sato 2017) การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของซูริมิที่เติม CaO ในความเข้มข้นต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของโครงสร้างภายในอย่างชัดเจน (ภาพที่ 10) เจลควบคุม (0  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างที่มีช่องอากาศขนาดใหญ่และโครงข่ายที่ไม่แข็งแรงและช่องว่างขนาดใหญ่ ซึ่งบ่งชี้ว่าการรวมตัวของ

โปรตีนไม่สมบูรณ์ (รูปที่ 10A) เมื่อเติม CaO ที่ 2–4  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่า โครงสร้างของเจลมีความหนาแน่นขึ้น มีรูพรุนที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น (รูปที่ 10B, 10C) การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้เป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของปฏิสัมพันธ์แบบไฮโดรโฟบิกและพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างการให้ความร้อน ซึ่งช่วยเสริมโครงสร้างของเจลและเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ (Li et al. 2021; Yingchutrakul et al. 2022; Yu et al. 2017) ความเข้มข้นของ CaO 6–8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  (รูปที่ 10D, 10E) โครงสร้างของเจลมีความแน่นและเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น มีรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งสะท้อนถึงการเชื่อมโยงข้ามของโปรตีนและการรวมตัวที่เหมาะสมที่สุด โครงสร้างที่หนาแน่นนี้ช่วยเพิ่มความแข็งแรงของเจลและการกักเก็บน้ำ (Mi et al. 2021; Xiong et al. 2021) เจลที่แข็งแรงขึ้นและมีโครงสร้างที่เป็นเนื้อเดียวกันยังสอดคล้องกับคุณสมบัติทางสายตาที่ดีขึ้นของผลิตภัณฑ์ (Htwe et al. 2023) อย่างไรก็ตาม ที่ความเข้มข้นของ CaO 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  (ภาพที่ 10F) พบว่า โครงข่ายของเจลเสื่อมสภาพมีรูพรุนขนาดใหญ่และเส้นใยโปรตีนที่หนาขึ้น โครงสร้างที่หลวมนี้เกิดจากการรวมตัวของโปรตีนมากเกินไป ส่งผลให้ความแข็งแรงและเสถียรภาพของเจลลดลง (Xiong et al. 2024) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ช่วยในการเพิ่มการเชื่อมโยงข้ามของโปรตีนและปรับปรุงโครงสร้างของเจลซึ่งนำไปสู่การทำงานที่ดีขึ้น การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจุลภาคพบว่า มีความสอดคล้องกับการเพิ่มความแข็งแรงของเจลและความสามารถในการอุ้มน้ำ สนับสนุน CaO เป็นสารเติมแต่งที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตซูริมิคุณภาพสูง

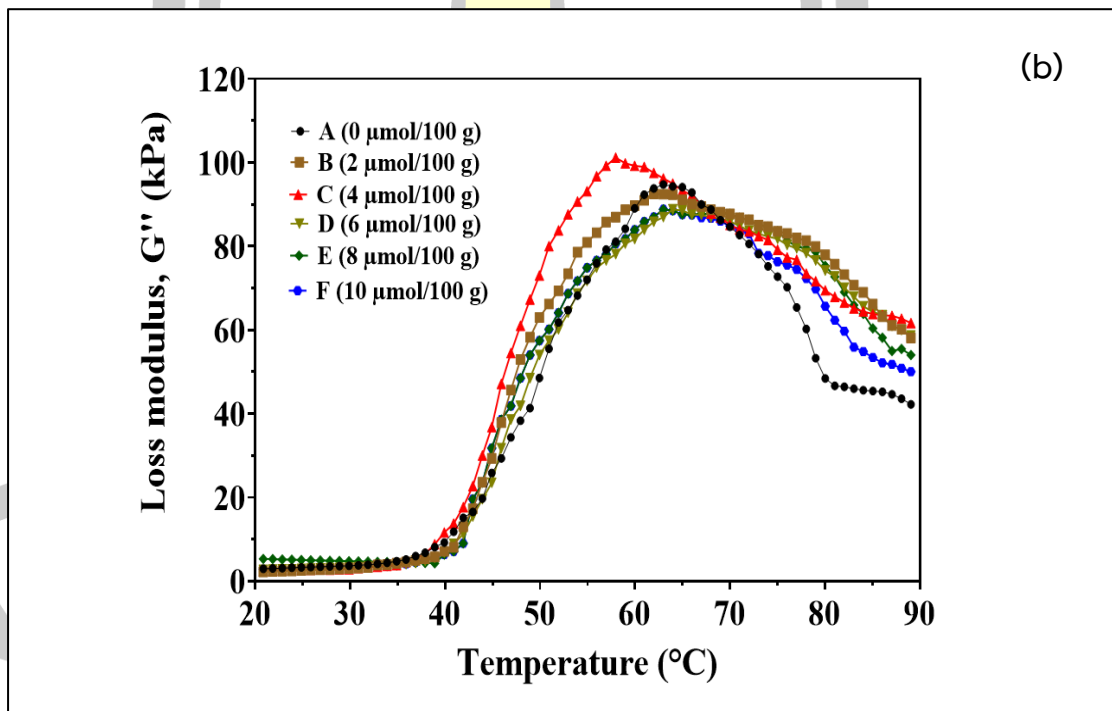
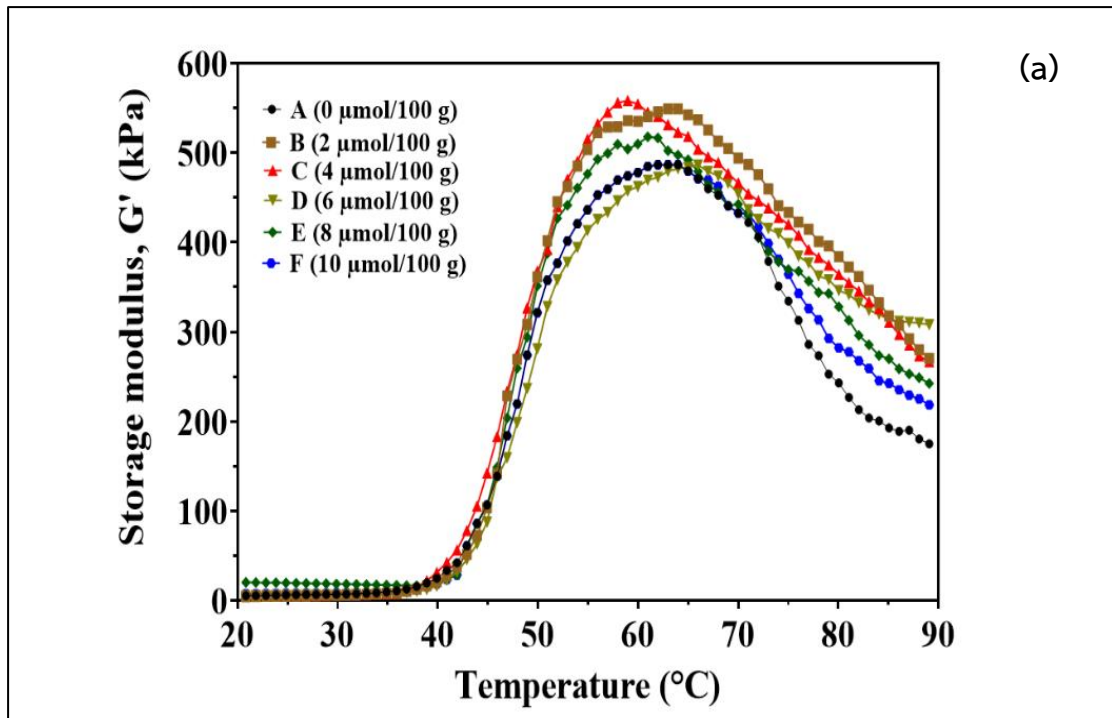


**ภาพที่ 10** โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน ; (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) (กำลังขยาย  $\times 100$ )

สมบัติการไหลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ แสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงที่มีนัยสำคัญในด้านความแข็งแรงของเจล ความยืดหยุ่น และความหนืด ซึ่งวิเคราะห์ผ่านโมดูลัสการเก็บพลังงาน ( $G'$ ) และโมดูลัสการสูญเสียพลังงาน ( $G''$ ) (ภาพที่ 11) โมดูลัสการเก็บพลังงาน ( $G'$ ) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความยืดหยุ่นของเจลและการเกิดโครงข่ายของโปรตีน เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ CaO ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการให้ความร้อนที่ 40 ถึง 65 °C (ภาพที่ 11a) ซูริมิที่เติม CaO ในช่วง 2–10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่า  $G'$  สูงกว่ากลุ่มควบคุม แสดงให้เห็นว่า CaO ช่วยเสริมกระบวนการเกิดเจลของไมโอซิน การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการเปิดเผยหมู่ไฮโดรโฟบิกของไมโอซินที่อุณหภูมิสูงขึ้น ส่งเสริมการเกิดพันธะไดซัลไฟด์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของโปรตีน (Liao et al. 2021; Walayat et al. 2020) ปฏิสัมพันธ์เหล่านี้นำไปสู่การรวมตัวของโปรตีนและการสร้างโครงข่ายแบบถาวรที่ช่วยเสริมโครงสร้างของเจลและเพิ่มความยืดหยุ่น (Lv et al. 2021; Visessanguan et al. 2000) นอกจากนี้ CaO ช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ Transglutaminase (TGase) ส่งเสริมการสร้างพันธะ  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl)-lysine ส่งผลให้การเชื่อมโยงข้ามของโปรตีนดีขึ้น และปรับปรุงสมบัติทางกลและความสามารถในการอุ้มน้ำ (Li et al. 2019)

โมดูลัสการสูญเสียพลังงาน ( $G''$ ) (ภาพที่ 11b) เป็นตัวบ่งชี้พฤติกรรมความหนืดของเจลระหว่างการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเช่นกันเมื่อเติม CaO โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 63 °C ค่า  $G''$  สูงสุดพบที่ความเข้มข้นของ CaO 4  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ซึ่งบ่งชี้ถึงการเกิดปฏิสัมพันธ์ของโปรตีนและการกักเก็บน้ำที่เหมาะสมที่สุดที่ความเข้มข้นนี้ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 65 °C ค่า  $G''$  ลดลงเนื่องจากเจลเปลี่ยนจากสภาพกึ่งของเหลวไปเป็นของแข็งและเมื่อเติม CaO ในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้ความหนืดลดลงเนื่องจากโครงข่ายโปรตีนมีความเสถียรมากขึ้นการเติม CaO ทำให้โครงสร้างและสมบัติการทำงานของเจลซูริมิดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยช่วยเสริมสร้างพันธะโควาเลนต์และกระตุ้นการเชื่อมโยงของไมโอซิน กระบวนการนี้ส่งผลให้เจลมีความแข็งแรง เสถียรภาพ และความสามารถในการอุ้มน้ำที่สูงขึ้น นอกจากนี้การปล่อยไอออน  $\text{Ca}^{2+}$  จาก CaO ยังช่วยเสริมสร้างโครงข่ายเจลโดยกระตุ้นการทำงานของ TGase และสนับสนุนการสร้างพันธะ  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl)-lysine ซึ่งช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นของเจล (Yongsawatdigul and Sinsuwan 2007)

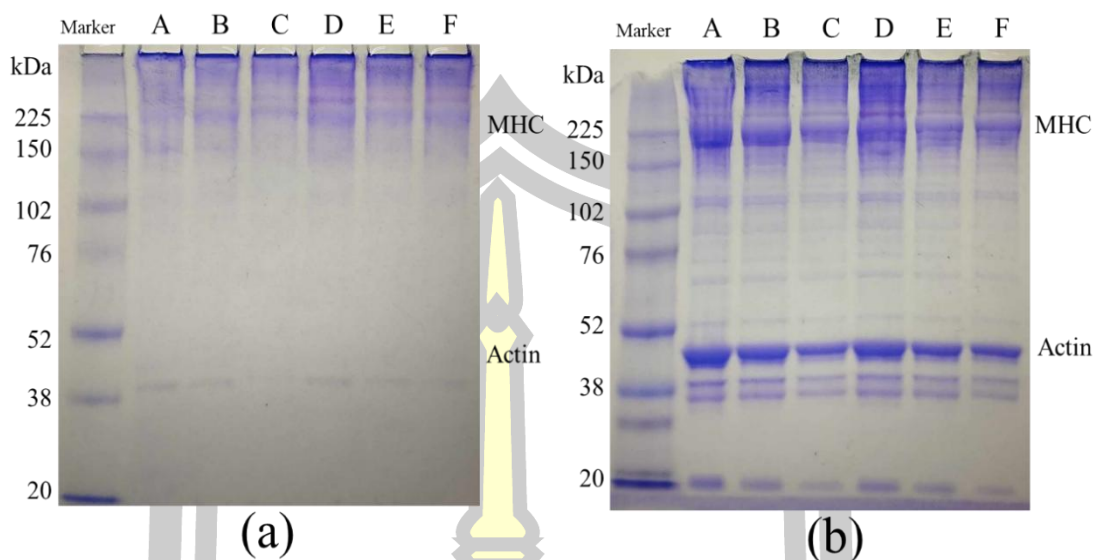
พูน ปณ ทิโต ชีเว



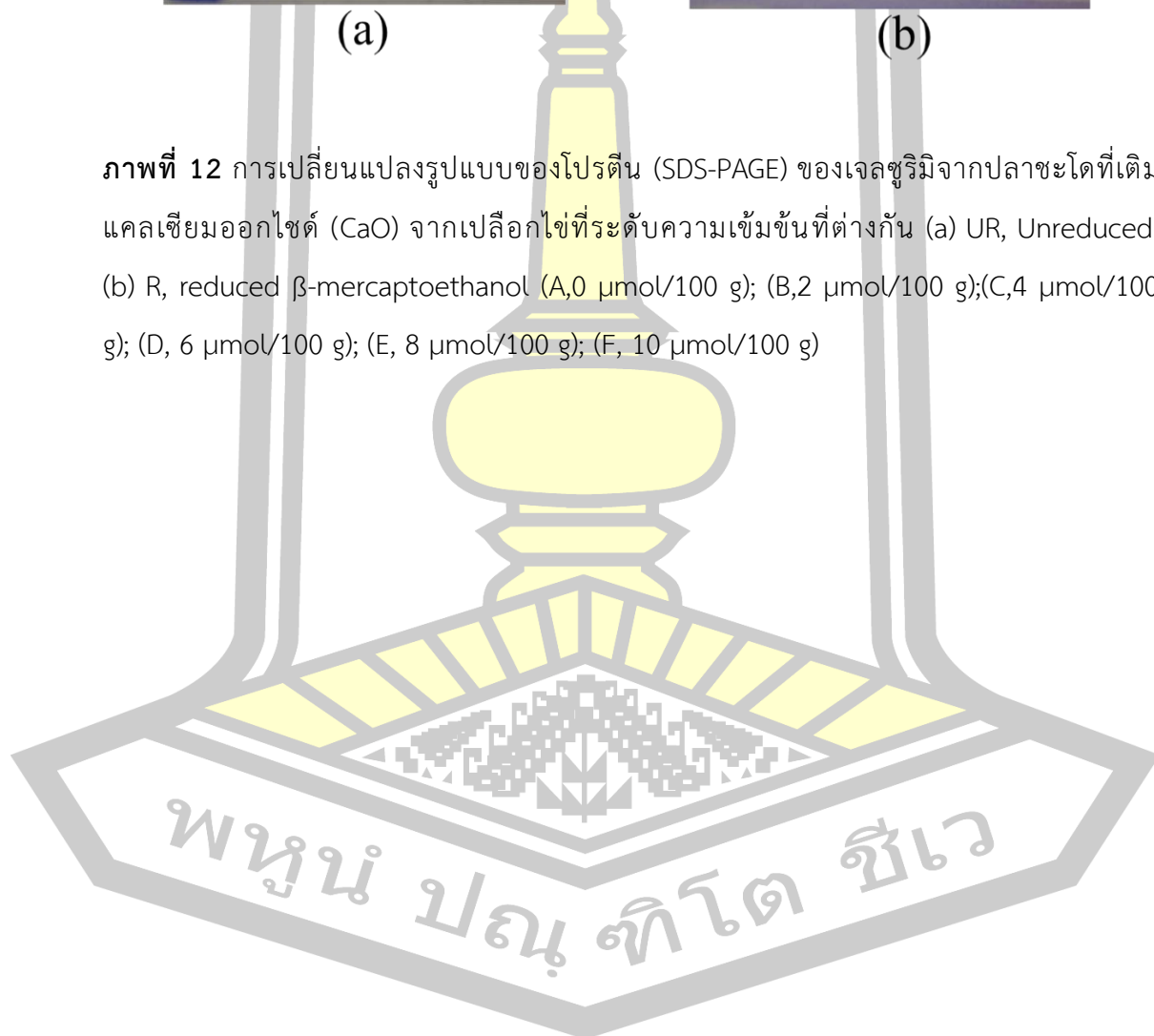
ภาพที่ 11 สมบัติการไหลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน;(a) Storage modulus  $G'$  ;(b) Loss modulus  $G''$  ;(A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ )

การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีน (SDS-PAGE) ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน จากการศึกษาโปรตีนของซูริมิเจลโดยการวิเคราะห์ SDS-PAGE ที่มีการเติมแคลเซียมออกไซด์ ที่ระดับความเข้มข้นแตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 12 พบว่า เจลซูริมิที่เติมแคลเซียมออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ความเข้มข้นของแถบไมโอซินเฮฟวีเชน (Myosin heavy chain ; MHC) และแอกติน (Actin) บนแผ่น SDS-PAGE ซึ่งจะปรากฏแถบที่ชัดเจน และพบความเข้มของแถบโปรตีน MHC และ Actin ที่ลดลง ตามปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมออกไซด์ ที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 2 ถึง 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  แสดงดังภาพที่ 12a และพบการเพิ่มขึ้นของแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นที่รวมตัวกันอยู่สูงกว่าแถบโปรตีนไมโอซินเฮฟวีเชน (MHC) เนื่องจากแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ สามารถกระตุ้นและส่งเสริมการทำกิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ในการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ของโปรตีนไมโอซินให้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งจะปรากฏในแถบโปรตีนที่อยู่ด้านบนของโปรตีนไมโอซินเฮฟวีเชน ซึ่งการลดลงของ Myosin heavy (MHC) มีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเพิ่มเนื้อสัมผัสของเจล (Yin et al. 2014) เนื่องจาก Myosin heavy (MHC) ถูกพอลิเมอร์ไรซ์ไปเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจะปรากฏแถบที่ชัดเจนบริเวณ SDS-PAGE (Balange and Benjakul 2009) ในขณะที่แถบโปรตีนที่มีขนาดเล็กกว่า Myosin heavy (MHC) และใหญ่กว่าแอกติน (Actin) ปรากฏเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าระหว่างที่มีการเซตตัวของเจล มีการแตกตัวของโมเลกุลมีขนาดเล็กลงสอดคล้องกับ TCA-soluble protein ลดลงจากเอนไซม์โปรตีนเอสในระหว่าง กระบวนการให้ความร้อนในการเซตตัวเจล ดังนั้นการเติมแคลเซียมออกไซด์ 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  จะช่วยละลายของโปรตีนไมโอไฟบริลลาร์จะลดปริมาณของ Actin และ MHC ซึ่งสอดคล้องกับผลการรายงานของ (He et al. 2022) มีรายงานว่าพันธะไดซัลไฟด์จะเชื่อมขวาง MHC ในเจลซูริมิโดยที่ไม่มี TGase

อย่างไรก็ตามแอกติน Actin ถูกเชื่อมขวางด้วยพันธะไดซัลไฟด์โดยไม่คำนึงถึง TGase (Fang et al. 2021) ไมโอซินและแอกตินเป็นองค์ประกอบที่มีบทบาทสำคัญในของสารละลายโปรตีนไมโอไฟบริลของสารละลายโปรตีนไมโอไฟบริล ทำให้เกิด Cross-linking ของ Myosin heavy (MHC) ชนิด Non-disulfide ของ Covalent bonds (Li et al. 2019) (Yongsawatdigul and Sinsuwan 2007) ซึ่งสังเกตได้จากภาพที่ 12b เมื่อผ่านการรีดิวซ์ด้วย  $\beta$ -mercaptoethanol เพื่อวัตถุประสงค์เพื่อทำลายพันธะไดซัลไฟด์จะพบการลดลงบนแถบ SDS-PAGE อีกครั้งเมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมออกไซด์ เพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลับมาตัวอย่างที่ผ่านการรีดิวซ์ (ภาพที่ 12b) ดังนั้น การพบแถบโปรตีนไมโอซินและแอกตินที่มีความเข้มที่ชัดเจนกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ไม่ผ่านการรีดิวซ์ (ภาพที่ 12a)



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีน (SDS-PAGE) ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์ (CaO) จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน (a) UR, Unreduced; (b) R, reduced  $\beta$ -mercaptoethanol (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ )



#### 4.2 ศึกษาผลความเข้มข้นของสารสกัดหุ้มเซลล์ไฮโดรลิกจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกันต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด

ศึกษาความเข้มข้นของสารสกัดหุ้มเซลล์ไฮโดรลิกจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน คือ 0, 2, 4, 6, 8, 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ต่อความสามารถในการเกิดเจล ส่งผลทำให้ค่า Breaking force, มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) แสดงในตารางที่ 9 พบว่า ค่า Breaking force ของเจลซูริมิที่เติม สารสกัดหุ้มเซลล์ไฮโดรลิกจากรากกระพังโหม ระดับความเข้มข้น 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดคือ 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุมเพิ่มขึ้นร้อยละ 59 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นหุ้มเซลล์ไฮโดรลิกสูงขึ้น (8–10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) และการเสียรูปสูงขึ้นร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ( $p < 0.05$ )

ค่าของ Deformation นั้น จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากเจลควบคุมซึ่งเจลควบคุมจะมีค่า Deformation ที่ 0.80 เซนติเมตร ส่วนค่าของ Deformation ที่ความเข้มข้นของหุ้มเซลล์ไฮโดรลิก 2, 4, 6, 8, 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  แตกต่างกันคือ 1.09, 1.08, 0.95, 0.91 และ 0.84 เซนติเมตร ตามลำดับ การที่เพิ่มความเข้มข้นในการเซตตัวของเจlnั้นจะเห็นได้ เจลซูริมิที่เติมความเข้มข้น 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงที่สุดคือ 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม หลังจากนั้นค่า Deformations จะลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  บ่งชี้ความสามารถในการเพิ่มของระยะทางที่ทำให้เจลแตกของเจลซูริมิจากปลาชะโด

ส่วนค่าของ Gel strength นั้น จะมีค่าที่เพิ่มขึ้นจากเจลควบคุม ซึ่งเจลควบคุมจะมีค่า Gel strength ที่ 354.14 กรัมเซนติเมตร ส่วนค่าของ Gel strength ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 647.68, 573.33, 445.58, 384.91 และ 384.91 กรัมเซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้จากค่าการเติมสารสกัดจากรากกระพังโหมที่มีปริมาณของหุ้มเซลล์ไฮโดรลิก ระดับความเข้มข้นต่างกันสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงของเจลซูริมิจากปลาชะโด เมื่อเทียบกับเจลควบคุมที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นตั้งแต่ 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ค่าเริ่มเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงที่สุดคือ 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  จากนั้นค่าจะเริ่มลดลง เนื่องจาก ระดับสารสกัดหุ้มเซลล์ไฮโดรลิกจากรากกระพังโหมในระดับความเข้มข้น 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าที่คล้ายกันกับ ค่า Breaking force และ Deformation

จากที่กล่าวข้างต้นเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมสารสกัดหุ้มเซลล์ไฮโดรลิกจากรากกระพังโหมในปริมาณที่ต่างกัน ค่า Breaking force, Deformation และ Gel strength การที่เจลมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหลังการแข็งตัวเมื่อนำไปผ่านอุณหภูมิสูง เอมไซม์ภายในเป็นปัจจัยทำให้เนื้อสัมผัสของเจลซูริมิมีการจับตัวกัน (Kamath et al., 1992) รวมถึงเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส

(TGase) มีหน้าที่เหนี่ยวนำทำให้เกิดการจับตัวในระหว่างการแข็งตัว TGase ภายในมีการเร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะ  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl) lysine cross-linking ระหว่างโมเลกุลแอกโตไมโอซิน ส่งผลให้เกิดการพัฒนาโครงสร้างของเส้นใยโปรตีนให้เนื้อสัมผัสของเจลที่มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงเพิ่มขึ้นในระหว่างการเซตตัว Yongsawatdigul et al. (2002) สอดคล้องงานวิจัยแคลเซียมจากเปลือกไข่ที่มีขนาดอนุภาคระดับนาโน แคลเซียมเชื่อมระหว่างโมเลกุลไมโอซินได้สร้างการเหนี่ยวนำทำให้เจลเกิดความเสถียร และมีการเหนี่ยวนำไมโอซินให้คลายตัว ส่งผลให้โปรตีนมีการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งแคลเซียมยังมีคุณสมบัติในการไม่ชอบน้ำบนผิวของโปรตีนทำให้พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลมีไฟฟ้าสถิตและไม่ชอบน้ำน้อยลง (Hemung et al., 2005) ในทางตรงกันข้ามแคลเซียมสามารถฝังตัวและสร้างความยืดหยุ่น ซึ่งแสดงถึงความสามารถของซูริมิเจลในการเปลี่ยนรูปและคืนรูปร่างและขนาดเดิมหลังจากการขจัดแรงภายนอก (Piao et al., 2022) ดังนั้นเจลซูริมิที่เติมสารสกัดหมู่วัสดุไฮดรอลิกรากกระดูกกระพังโหมความเข้มข้น 8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุด

**ตารางที่ 9** Breaking force, Deformation และ Gel strength ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมู่วัสดุไฮดรอลิกรากกระดูกกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

Sulphydryl content ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Breaking force (g)	Deformation (cm)	Gel strength (g.cm)
0	442.80 $\pm$ 46.06 <sup>c</sup>	0.80 $\pm$ 4.79 <sup>d</sup>	354.14 $\pm$ 49.31 <sup>c</sup>
2	465.30 $\pm$ 47.59 <sup>bc</sup>	0.91 $\pm$ 5.50 <sup>bc</sup>	428.44 $\pm$ 70.48 <sup>c</sup>
4	468.21 $\pm$ 55.28 <sup>bc</sup>	0.95 $\pm$ 5.69 <sup>b</sup>	445.58 $\pm$ 78.40 <sup>b</sup>
6	528.80 $\pm$ 57.66 <sup>ab</sup>	1.08 $\pm$ 6.49 <sup>a</sup>	573.33 $\pm$ 84.33 <sup>a</sup>
8	594.55 $\pm$ 72.34 <sup>a</sup>	1.09 $\pm$ 6.54 <sup>a</sup>	647.68 $\pm$ 90.28 <sup>a</sup>
10	428.76 $\pm$ 52.52 <sup>c</sup>	0.84 $\pm$ 5.07 <sup>cd</sup>	384.91 $\pm$ 57.65 <sup>c</sup>

<sup>a,b,c</sup> ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05)

พจนานุกรมศัพท์ชีว

จากตารางที่ 10 พบว่า ค่า Expressible moisture content ของเจลชูริมิที่เติมสารสกัดหุ้มซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมระดับความเข้มข้น 2-8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ( $p < 0.05$ ) ซึ่งพบว่ามีปริมาณความชื้นที่ได้จากการบีบตัวอย่างคือ 25.96, 25.89, 26.48, 27.74, ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การเติมสารสกัดหุ้มซัลไฟไฮดริลสามารถเพิ่มความสามารถในการจับตัวกับน้ำของโปรตีนชูริมิไว้ในโครงสร้างเจลเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับ เจลควบคุม คือ 38.91

**ตารางที่ 10** Expressible moisture content ของเจลชูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหุ้มซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

Sulphydryl content ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Expressible moisture content (%)
0	38.91 $\pm$ 17.31 <sup>a</sup>
2	25.89 $\pm$ 6.69 <sup>c</sup>
4	25.96 $\pm$ 6.92 <sup>c</sup>
6	26.48 $\pm$ 7.65 <sup>c</sup>
8	27.74 $\pm$ 7.28 <sup>c</sup>
10	35.46 $\pm$ 6.88 <sup>b</sup>

<sup>a,b,c</sup> ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

ค่าความขาวของเจลชูริมิ (Whiteness) แสดงในตารางที่ 11 พบว่า ค่าความขาวของเจล ตัวอย่างควบคุม มีค่าความขาว 76.53 และเมื่อเติมสารสกัดหุ้มซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมระดับความเข้มข้น 2-8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เจลมีค่าเพิ่มขึ้นดีที่สุดคือ 6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  (79.04) เมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุมเจลมีค่าเพิ่มขึ้น 2.51% แสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนทั้งในด้านแรงแตกหักและการเปลี่ยนรูปเมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ( $p < 0.05$ ) การเพิ่มขึ้นดังกล่าวเกี่ยวข้องกับปริมาณความชื้นที่แสดงออกได้ลดลง นอกจากนี้เมื่อเติมสารสกัดหุ้มซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมระดับความเข้มข้น 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  มีค่าลดลงเล็กน้อยแต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ( $p > 0.05$ )

ตารางที่ 11 Whiteness ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

Sulphydryl content ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Whiteness
0	76.53 $\pm$ 0.23 <sup>b</sup>
2	78.64 $\pm$ 1.11 <sup>ab</sup>
4	79.27 $\pm$ 0.56 <sup>a</sup>
6	79.04 $\pm$ 0.86 <sup>a</sup>
8	77.68 $\pm$ 1.06 <sup>b</sup>
10	73.46 $\pm$ 1.07 <sup>c</sup>

a,b,c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากตารางที่ 12 พบว่า เจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนในสารละลาย Trichoroacetic acid ของเจลซูริมิจากปลาชะโดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุมแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p > 0.05$ ) โดยที่ระดับความเข้มข้น 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เป็นระดับที่มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นที่สุดและรองลงมา และ 2, 6, 8 และ 4  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับเจลควบคุม ปริมาณ TCA-soluble protein ของเจลที่เติมสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริล จากรากกระพังโหมมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเจลควบคุม แสดงให้เห็นถึงความสามารถของความเข้มข้นในการเพิ่มการแตกตัวของโปรตีนจากกิจกรรมการย่อยสลายโปรตีนของเอนไซม์โปรตีเอส (Protease) ที่กระตุ้นด้วยความร้อนภายในจับกับโปรตีนของกล้ามเนื้ออย่างแน่นหนาจะออกฤทธิ์ในการไฮโดรไลซ์โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ ส่งผลให้เจลอ่อนลงและสารยับยั้งโปรตีเอสจากพืชและสัตว์อาจขัดขวางการทำงานของโปรตีเอส จึงทำให้โปรตีนไมโอไฟบริลลาร์ที่ทำหน้าที่ก่อให้เกิดเจลคงสภาพเดิม (Yongsawatdigul & Park, 1996)

พูน ปณ ทิโต ชีเว

**ตารางที่ 12** ค่า TCA-soluble protein content ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริล จาการากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

Sulphydryl content ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	TCA-soluble protein content <sup>ns</sup> ( $\text{mg}/100\text{g}$ )
0	1.36 $\pm$ 0.01
2	1.50 $\pm$ 0.06
4	1.36 $\pm$ 0.07
6	1.42 $\pm$ 0.16
8	1.42 $\pm$ 0.05
10	1.70 $\pm$ 0.04

<sup>ns</sup> ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p>0.05$ )

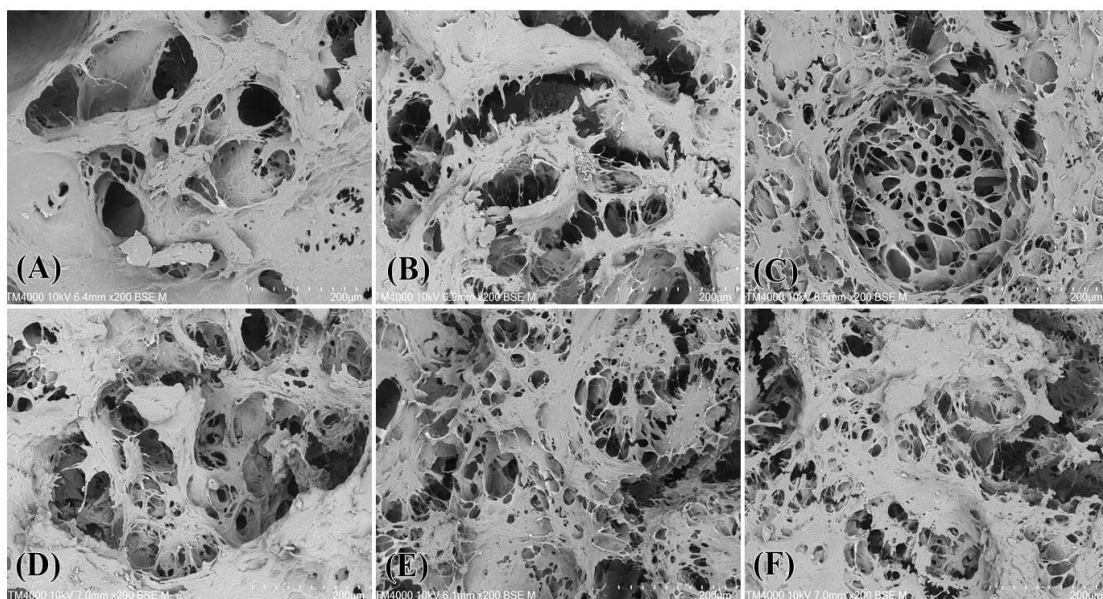
จากตารางที่ 13 พบว่าปริมาณ โปรตีนซัลฟิไฮดริลของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริล จาการากกระพังโหมที่ต่างกัน พบว่ามีปริมาณโปรตีนซัลฟิไฮดริล ลดลงเมื่อเทียบกับเจลควบคุมมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p<0.05$ ) ซึ่งค่าของเจลควบคุมอยู่ 8.99  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  เมื่อเติมสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริลจาการากกระพังโหมระดับความเข้มข้น 2-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  ส่งผลให้ปริมาณ Protein หมูซัลฟิไฮดริลลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ( $p<0.05$ ) เมื่อเติมสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริลจาการากกระพังโหมที่ความเข้มข้น 2  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่าโปรตีนหมูซัลฟิไฮดริลลดลง 4.04  $\mu\text{mol}/\text{g}$  และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริลจาการากกระพังโหมที่ความเข้มข้น 4-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  จะพบการลดลงของโปรตีนหมูซัลฟิไฮดริลร้อยละ 5.49 -5.92  $\mu\text{mol}/\text{g}$  ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของโปรตีนนั้นลดลงมีความคงที่และมีความเสถียรถึงจะมีการเพิ่มปริมาณความเข้มข้นสารสกัดจากรากกระพังโหมของเจลเพิ่มมากขึ้นก็ไม่มีผลต่อปริมาณของปริมาณการลดลงของโปรตีนซัลฟิไฮดริล แสดงให้เห็นว่าการเติมสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริล จาการากกระพังโหม เติมสารสกัดหมูซัลฟิไฮดริล จาการากกระพังโหมสามารถทำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ได้เมื่อใช้ความเข้มข้นในการเซตตัวภายใต้การให้ความร้อนโดยปฏิกิริยาเคมีในการก่อตัวของเจลซูริมิส่วนใหญ่ประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจนพันธะไอออนิก ปฏิกิริยาที่ไม่ชอบน้ำและพันธะไดซัลไฟด์ การเซตตัวของโครงข่ายเจลเป็นผลมาจากความสมดุลของการดึงดูดและการผลักกันระหว่างโปรตีน (Xiong et al. 2021) ตารางที่ 13 เป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นแรงหลักในการก่อตัวของเจลซูริมิเนื่องจากในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนของโปรตีน กลุ่มที่ไม่ชอบน้ำจะถูกเปิดเผย ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่ชอบน้ำเพิ่มขึ้น โดยที่หมูซัลฟิไฮดริล จะออกซิไดซ์โปรตีนซัลฟิไฮดริลให้เป็นพันธะไดซัลไฟด์ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน (Li et al. 2019)

**ตารางที่ 13** Protein sulfhydryl content ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน

Sulfhydryl content ( $\mu\text{mol}/100\text{g}$ )	Protein sulfhydryl content (PSH) ( $\mu\text{mol}/\text{g}$ )
0	8.99 $\pm$ 0.38 <sup>a</sup>
2	4.04 $\pm$ 0.13 <sup>b</sup>
4	5.92 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>
6	5.49 $\pm$ 0.01 <sup>c</sup>
8	3.48 $\pm$ 0.06 <sup>d</sup>
10	3.44 $\pm$ 0.08 <sup>d</sup>

a,b,c ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

จากภาพที่ 13 โครงสร้างจุลภาคของเจลโปรตีนเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติของเจล (Wang et al., 2019) โดยสังเกตโครงสร้างจุลภาคของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกันคือ 2-8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่า เจลควบคุมมีพื้นผิวที่เรียบเจลก่อตัวจับกันเป็นแผ่นเรียบมีปริมาณรูพรุนที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก ภายในโครงสร้างเจลควบคุมมีโพรงขนาดใหญ่และไม่สม่ำเสมอกระจายอยู่ในโครงสร้าง อาจเกิดจากการรวมตัวของโปรตีนจำนวนมากในระหว่างการเกิดเจลภายใต้การให้ความร้อนแสดง รูปภาพที่ 13A และเมื่อเติมสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมในความเข้มข้นที่สูงขึ้น ที่มีปริมาณของหมู่วัลฟไฮดริล 2-8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  สามารถสร้างเครือข่ายสามมิติที่มีรูพรุนค่อนข้างหนาแน่น กระจายตัวสม่ำเสมอและโครงสร้างทางจุลภาคมีความละเอียดมากขึ้น ขนาดของรูพรุนเล็กลง กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และนำไปสู่โครงสร้างเจลที่ดีขึ้น สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของค่าความแข็งแรงเจลที่เพิ่มขึ้น ความสามารถในการกักเก็บน้ำของเจลที่เพิ่มขึ้นและปริมาณการเกิดพันธะไดซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นโดยเป็นผลกระทบจากการเติมสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหม แสดงดังภาพที่ 13B, 13C, 13D และ 13E แต่เมื่อเติมสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมเพิ่มขึ้นเป็น 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  จะพบโครงสร้างจุลภาคของเจลที่มีการรวมตัวของโปรตีนเส้นใยเกาะตัวกันเป็นมัดขนาดใหญ่ เส้นใยโครงสร้างจะมีความหนาแน่นมากขึ้น โครงสร้างที่มีรูพรุนลดลงโดยไม่มีช่องว่างขนาดใหญ่ภายในเจลที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจนขึ้น แสดงภาพที่ 13F

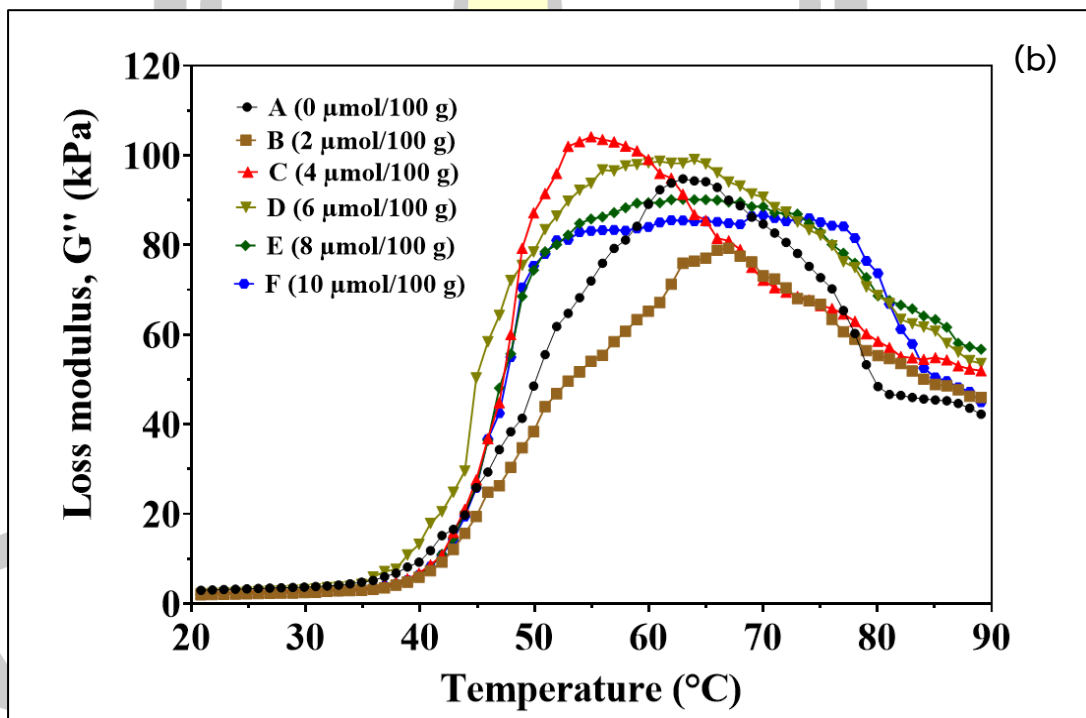
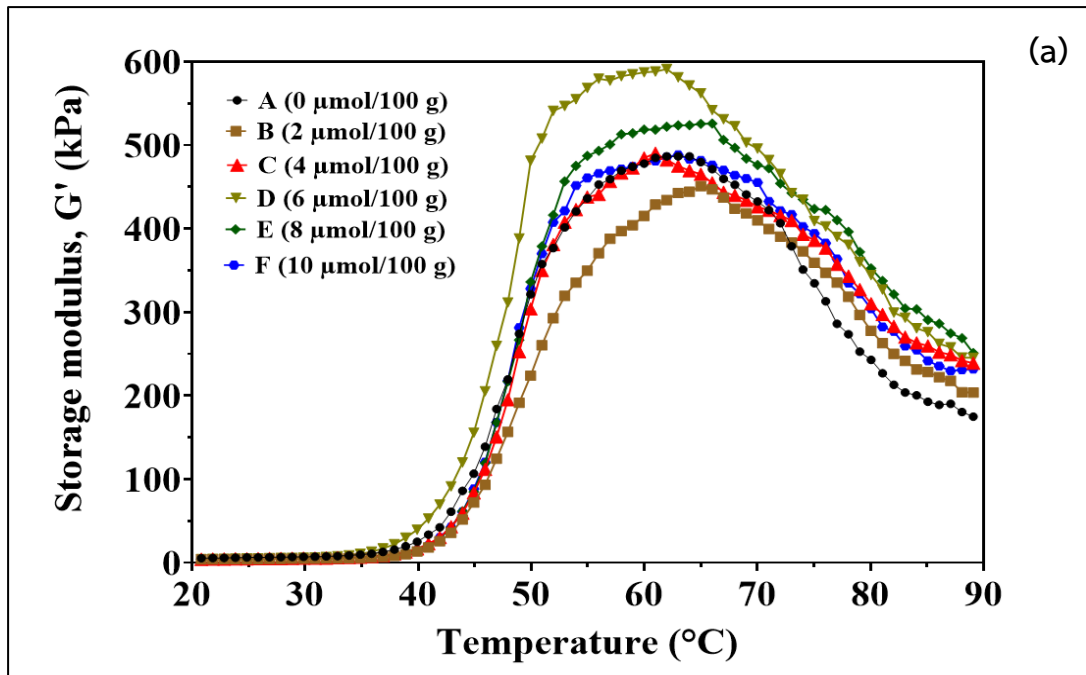


**ภาพที่ 13** โครงสร้างจุลภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน : (A) control (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ) (กำลังขยาย  $\times 100$ )

สมบัติการไหลของเจลซูริมิที่ได้รับผลกระทบจากเติมสารสกัดจากรากกระพังโหมที่มีปริมาณของหมู่วัลฟไฮดริลเพิ่มขึ้นเป็น 0-10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$  ที่แตกต่างกัน แสดงดังภาพที่ 14 สมบัติการไหลของเจลซูริมิ ได้แก่ โมดูลัสการจืดเก็บ (Storage modulus,  $G'$ ) โมดูลัสการสูญเสีย (loss modulus,  $G''$ ) วัดในช่วงอุณหภูมิ 20 $^{\circ}\text{C}$  ถึง 90 $^{\circ}\text{C}$  ซึ่งเกิดเสถียรภาพของเจลโมดูลัสการจืดเก็บ ( $G'$ ) โมดูลัสการจืดเก็บ ( $G''$ ) ที่สะท้อนพฤติกรรมความยืดหยุ่นของเจลภายใต้การให้ความร้อน ซูริมิทั้งหมดแทบไม่ก่อตัวเป็นเจลซูริมิได้รับความร้อนจนถึง 30  $^{\circ}\text{C}$  (Fukushima et al. 2007) ระดับสูงสุดของ ( $G'$ ) ที่ 20  $^{\circ}\text{C}$  และ 30  $^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิที่เหมาะสมในการขึ้นรูปคือ 20  $^{\circ}\text{C}$  ต่ำกว่า 25  $^{\circ}\text{C}$  และ 28  $^{\circ}\text{C}$  ตามลำดับการให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหล่านี้มีประสิทธิภาพมากกว่าในการเพิ่มความยืดหยุ่นสำหรับการขึ้นรูปซูริมิ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของโมดูลัสการจืดเก็บ ( $G'$ ) อย่างรวดเร็วระหว่าง 38 $^{\circ}\text{C}$  ถึง 40 $^{\circ}\text{C}$  บ่งชี้ถึงความแข็งแรงที่เพิ่มขึ้นของตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับการก่อตัวของโครงสร้างเจลยืดหยุ่นการเติมเกลือทางสรีรวิทยาสำหรับระบบไมโอไฟบรินทั้ง 2 ประเภทการเปลี่ยนแปลงของ  $G'$  ในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 60 $^{\circ}\text{C}$  มากที่สุด การเพิ่มขึ้นนี้เกิดจากการคลายตัวของโมเลกุลโปรตีนระหว่างการเตรียมเนื้อเจลซูริมิรวมถึงการเชื่อมโยงขวางของ Light meromyosin  $G'$  ยังคงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยถึงจุดสูงสุดระหว่าง 55 $^{\circ}\text{C}$  ถึง 60 $^{\circ}\text{C}$  พบว่า ค่า  $G'$  สูงสุดจะสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของหมู่วัลฟไฮดริลเพิ่มขึ้นจากซูริมิแช่แข็งจะมีความยืดหยุ่นและเสถียรต่อพลังงานมาก

ขึ้น โดยเฉพาะที่ 200 MPa แรงดันที่ใช้ในเจลที่กำหนดมาตรฐานที่เหนียวนำด้วยความร้อน (Moreno et al. 2015) โดยเฉพาะในเจลซูริมีที่มีความเข้มข้น 6 ถึง 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$  (DและE) การเพิ่มขึ้นนี้บ่งชี้ถึงการเกิด Cross-linking ของโปรตีนไมโอซิน และการสร้างเครือข่ายสามมิติของเส้นใยโปรตีนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้โครงสร้างเจลแข็งแรงขึ้น มีความยืดหยุ่น และเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ การให้ความร้อนที่อุณหภูมิเหล่านี้มีประสิทธิภาพมากกว่าในการเพิ่มความยืดหยุ่นสำหรับการขึ้นซึ่งจะเกิดกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นในระหว่างการให้ความร้อนและมีการส่งเสริมกิจกรรมด้วยหมู่ซัลฟไฮโดรล อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้น 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$  (F)  $G'$  ลดลงเหลือระดับที่เทียบได้กับระดับควบคุม 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$  ซึ่งบ่งชี้ว่าหมู่ซัลฟไฮโดรลมากอาจทำให้เกิดการเชื่อมโยงขวางส่งผลให้โครงสร้างเจลแน่นขึ้น มีช่องว่างขนาดใหญ่ขึ้น และความแข็งแรงของเจลโดยรวมลดลง

โมดูลัสการสูญเสีย ( $G''$ ) บ่งชี้ถึงความหนืดของเจลเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของหมู่ซัลฟไฮโดรล โปรตีนเริ่มก่อตัวเป็นเครือข่ายเจลโมดูลัสยืดหยุ่น  $G'$  ของซูริมีจะพันกันแน่นทำให้ซูริมีเนื้อปลามีความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้น เพิ่มความอุ้มน้ำและความขาวของซูริมีอย่างมีนัยสำคัญ แต่ชนิดและการเติมแป้งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Chen and Xue 2009) โดยสูงสุดในเจลซูริมีที่มีความเข้มข้นของกลุ่มหมู่ซัลฟไฮโดรล 6 ถึง 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$  (DและE) การเพิ่มขึ้นบ่งชี้ว่าความสามารถของเจลในการระบายพลังงานเมื่อได้รับความร้อนนั้นเพิ่มขึ้นเนื่องจากหมู่ซัลฟไฮโดรล สอดคล้องกับเจลไม่มีผลต่อการเกิดพอลิเมอร์เซชันของโซ่หนักไมโอซิน การเติมหมู่ซัลฟไฮโดรลสามารถเพิ่มการเชื่อมต่อระหว่างโซ่ระหว่างการให้ความร้อนได้ ซึ่งบ่งชี้ได้จากค่า  $G'$  ที่สูงขึ้นช่วยเพิ่มเนื้อสัมผัสและเจลเพิ่มขึ้น (Petcharat and Benjakul 2018) ส่งผลให้มีความหนืดมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของหมู่ซัลฟไฮโดรล สูงสุด (F)  $G''$  เริ่มลดลง บ่งชี้ว่าเครือข่ายของเจลอาจแข็งแรงเกินไป ทำให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยลงและพฤติกรรมความหนืดลดลง



ภาพที่ 14 สมบัติการไหลของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมู่วัลฟไฮดริลจากรากกระพังไหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน (a) Storage modulus  $G'$  ; (b) Loss modulus  $G''$  ;(A, 0  $\mu\text{mol}/100$  g); (B, 2  $\mu\text{mol}/100$  g); (C, 4  $\mu\text{mol}/100$  g); (D, 6  $\mu\text{mol}/100$  g); (E, 8  $\mu\text{mol}/100$  g); (F, 10  $\mu\text{mol}/100$  g)

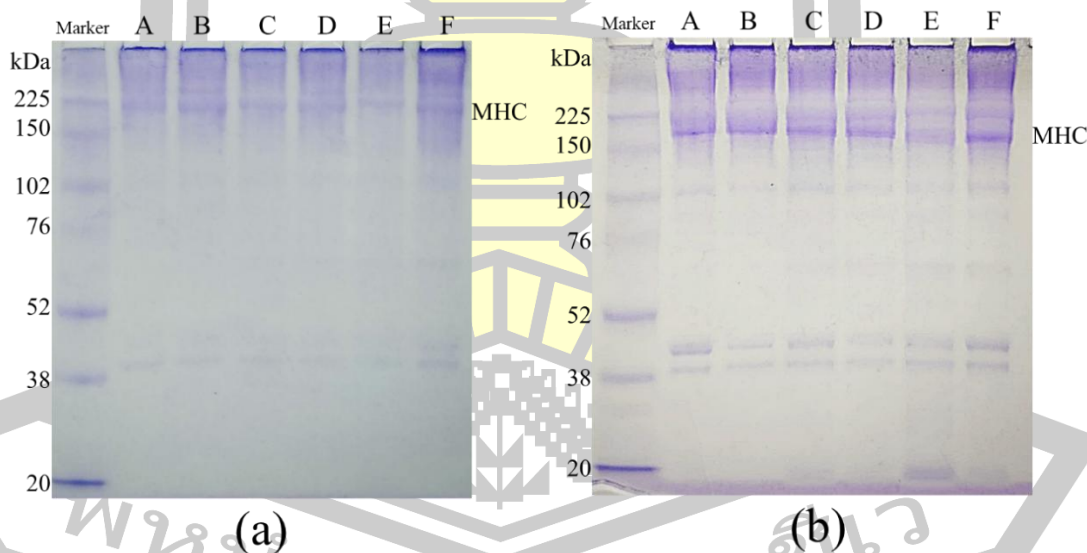
การวิเคราะห์รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนด้วยเทคนิค SDS-PAGE (Sodium Dodecyl Sulfate Polyacrylamide Gel Electrophoresis) ของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่ รากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นหมู่ซัลไฟไฮดริลที่แตกต่างกัน

พบว่า รูปแบบ SDS-PAGE ของเจลซูริมิที่ได้รับผลกระทบจากจากเติมสารสกัดหมู่ซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่มีปริมาณของหมู่ซัลไฟไฮดริล เพิ่มขึ้นเป็น 0-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  แสดง ภาพที่ 15 รูปแบบ SDS-PAGE ของเจลซูริมิที่ผ่านการเติมด้วยกลุ่มซัลไฟไฮดริล ในความเข้มข้นที่ แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบสภาวะ Unreduced (a) และสภาวะที่ถูกทำลายพันธะไดซัลไฟด์ด้วย  $\beta$ -mercaptoethanol (b) เพื่อการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของโมเลกุลในโครงสร้างโปรตีนอันเป็น ผลมาจากความเข้มข้นของหมู่ซัลไฟไฮดริลที่แตกต่างกัน มีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจกลไก การเชื่อมโยงแบบขวางและการก่อตัวของเครือข่ายเจลโดยรวม

รูปแบบของโปรตีนเจล SDS-PAGE ในตัวอย่างเจล Unreduced (ภาพที่ 15a) ตัวอย่าง ควบคุม (0  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ): เจลควบคุมไม่มีหมู่ซัลไฟไฮดริล แสดงแถบโปรตีนที่แตกต่างกันซึ่งจะปรากฏ แทบสีที่ชัดเจนบริเวณ SDS-PAGE (MHC, 225 kDa), แอกติน (Actin, 45 kDa) โทรโปไมโอซิน (TM, 41 kDa) และโทรโปนิน T (TN-T, 38 kDa) เป็นรูปแบบทั่วไปของโปรตีนจากปลา (Fang et al. 2021) โดยเฉพาะในบริเวณที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า รูปแบบนี้แสดงให้เห็นว่าโปรตีนส่วนใหญ่อยู่ใน รูปแบบดั้งเดิมหรือรวมตัวกันเล็กน้อย โดยมีการเชื่อมโยงแบบขวางจำกัดผ่านพันธะไดซัลไฟด์ เมื่อ ความเข้มข้นของหมู่ซัลไฟไฮดริล เพิ่มขึ้นเป็น 2 ถึง 10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  จะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลง ของรูปแบบแถบความเข้มของโปรตีน ไมโอซินเฮฟวีเชน (MHC) และ Actin จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจะพบการเพิ่มขึ้นของแถบโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงขึ้น (>225kDa) ปรากฏอยู่บนแถบ โปรตีน MHC บ่งชี้ถึงการเกิดโพลีเมอร์ของโปรตีน MHC และ Actin เชื่อมข้ามเครือข่ายโปรตีนที่ เกิดขึ้นเนื่องจากการก่อตัวของพันธะไดซัลไฟด์ที่ผ่านการส่งเสริมด้วยการเติมหมู่ซัลไฟไฮดริลจากสาร สกัดจากรากกระพังโหม ผลการศึกษาพบว่าหมู่ซัลไฟไฮดริล ส่งเสริมการเชื่อมโยงแบบ cross-linking ส่งผลให้โครงสร้างโปรตีนเชื่อมต่อกันมากขึ้น มากกว่านั้นที่ระดับการเติมหมู่ซัลไฟไฮดริลในระดับที่ สูงขึ้น ภายใต้เงื่อนไขที่ไม่เกิดการรีดิวซ์ด้วย  $\beta$ -mercaptoethanol (ภาพที่ 15b) จุดประสงค์ทำลาย พันธะไดซัลไฟด์ ทำให้มองเห็นหน่วยของโปรตีนแต่ละตัวได้ในตัวอย่างควบคุม (0  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ): การรีดิวซ์ทำให้แถบโปรตีน MHC และ Actin มีความเข้มที่ชัดเจนปรากฏขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการมีอยู่ ของหน่วยของโปรตีนแต่ละตัวที่เคยเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมขนาดใหญ่กว่าซึ่งยืนยันว่าจะ เหนี่ยวนำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์เกิดขึ้น ในระหว่างการให้ความร้อน การลดลงของ MHC มีความสัมพันธ์อย่างมากกับการเพิ่มเนื้อสัมผัสของเจล (Yin and Park 2014) เนื่องจาก Actin ถูกโพลี เมอร์ไรซ์ไปเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งจะปรากฏแทบสีที่ชัดเจนบริเวณ SDS-PAGE (Balange and

Benjakul 2009) และในขณะเดียวกันแถบโปรตีนที่มีขนาดเล็กกว่า MHC และใหญ่กว่า Actin ปรากฏเช่นเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าในระหว่างที่มีการเชื่อมต่อของเจลมีการแตกตัวของโมเลกุลมีขนาดเล็กลงสอดคล้องกับ TCA-soluble protein มีการลดลงจากเอมไซม์โปรตีนเอสในระหว่างกระบวนการให้ความร้อน

และเมื่อเติมหมู่ซัลไฟไฮดริลในระดับที่สูงขึ้น 2-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  (B-F) เจลที่รีดิวซ์ถึงแถบโปรตีน MHC และ Actin มีความชัดเจนมากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ได้ถูกรีดิวซ์ (ภาพที่ 15a) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโปรตีนที่เคยเป็นส่วนหนึ่งของมวลรวมที่เชื่อมโยงกับพันธะไดซัลไฟด์ ถูกแยกออกเป็นหน่วยย่อยที่ประกอบกันจากพันธะไดซัลไฟด์มากกว่า ความเข้มข้นของหมู่ซัลไฟไฮดริลสูงขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้น (6-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) พบแถบของโปรตีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า MHC ซึ่งบ่งชี้ว่าแม้จะรีดิวซ์ด้วย  $\beta$ -mercaptoethanol พันธะที่เกิดขึ้นทั้งหมดไม่สามารถรีดิวซ์ได้หรืออาจจะเป็นพันธะประเภทอื่น (เช่น พันธะโควาเลนต์ที่ไม่ใช่ไดซัลไฟด์) และผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นความชัดเจนถึงบทบาทของความเข้มข้นของหมู่ซัลไฟไฮดริล ในการปรับปรุงโครงสร้างโปรตีนผ่านกระบวนการเหนี่ยวนำให้เกิดโพลีเมอร์ไรซ์ของโปรตีน MHC และ Actin ให้เป็นพันธะไดซัลไฟด์ส่งผลให้เครือข่ายโปรตีนเชื่อมต่อกันมากขึ้น และสามารถปรับปรุงสมบัติทางเนื้อสัมผัสของเจลซูริมิจากปลาชะโด



ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของโปรตีน (SDS-PAGE) ของเจลซูริมิความเข้มข้นของสารสกัดหมู่ซัลไฟไฮดริล จากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน (a) UR, Unreduced; (b) R, reduced  $\beta$ -mercaptoethanol (A, 0  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (B, 2  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (C, 4  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (D, 6  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (E, 8  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ ); (F, 10  $\mu\text{mol}/100\text{ g}$ )

ตารางที่ 14 การเชื่อมโยงระหว่างการใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และหมู่ซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม

การใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	หมู่ซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม	การเชื่อมโยงกันระหว่างกัน
<p>1. นำไปเผาที่อุณหภูมิประมาณ 900°C จะได้แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซึ่งมีความเป็นด่างและสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ หนึ่งในกลุ่มคือสารที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริล (-SH) ซึ่งพบได้ในกรดอะมิโนหรือวัสดุชีวภาพบางชนิด</p> <p>2. คุณสมบัติทางเคมีเกิดปฏิกิริยาเร็วกับน้ำกลายเป็นแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)<sub>2</sub>) และให้ความร้อน:  <math display="block">\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{heat}</math>           เป็นเบสแก่ (strong base): ละลายในน้ำให้สารละลายที่มี pH ~12 ทำปฏิกิริยากับกรดและหมู่ฟังก์ชันบางชนิด เช่น -SH, -COOH</p> <p>3. คุณสมบัติพิเศษจากแหล่งชีวภาพ (เปลือกไข่) เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม: จากของเสียชีวภาพ (Bio-waste) มีรูพรุนสูง (Porous): หากเตรียมอย่างเหมาะสม ธาตุเสริม (Trace elements): เช่น Mg, Sr, P ซึ่งอาจเสริมสมบัติบางอย่างของวัสดุ</p>	<p>1. เป็นกลุ่มรีแอกทีฟสูง (Highly reactive) หมู่ -SH สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย</p> <p>2. เกิดเป็นพันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) ซึ่งมีความสำคัญในการสร้างโครงสร้างโปรตีน เช่น โปรตีนที่มีพันธะเชื่อมระหว่างสาย (Disulfide bridge)</p> <p>3. สามารถจับกับโลหะได้ดี (Metal-binding affinity) หมู่ -SH มีความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะหนัก เช่น Hg<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> เหมาะสำหรับใช้ในการดูดซับโลหะหรือพัฒนาเป็นวัสดุบำบัดมลพิษความเป็นกรดอ่อน (Weak acidity)</p> <p>4. -SH สามารถปล่อย H<sup>+</sup> ออกได้ภายใต้สภาวะที่มีค่า pH สูง กลายเป็นไอออน -S มีความเสถียรและจับกับโลหะหรือไอออนได้ดี</p>	<p>1. เปลือกไข่เป็นของเสียทางชีวภาพที่อุดมไปด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO<sub>3</sub>) สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ผ่านกระบวนการเผาไหม้ (Calcination) อุณหภูมิสูง นำ CaO มาใช้ประโยชน์ร่วมกับสารที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริล (-SH) มีความสำคัญในด้านการดูดซับโลหะหนักและการประยุกต์ใช้วัสดุทางสิ่งแวดล้อม</p> <p>2. มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับหรือตัวเร่งปฏิกิริยาในงานวิจัยด้านสิ่งแวดล้อม</p> <p>3. CaO ละลายน้ำเกิดการไฮโดรไลซิสเป็น Ca(OH)<sub>2</sub> มีค่า pH สูง ทำให้หมู่ซัลไฟไฮดริลมีแนวโน้มสูญเสียโปรตรอน กลายเป็น -S สามารถจับประสานกับไอออนแคลเซียม (Ca<sup>2+</sup>) เกิดเป็นพันธะเชิงซ้อน (Coordination bond)</p>

การใช้แคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่	หมู่ซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม	การเชื่อมโยงกันระหว่างกัน
<p>4. เปลือกไข่: มีแคลเซียมคาร์บอเนต (<math>\text{CaCO}_3</math>) เมื่อนำมาเผา (Calcination) จะได้ แคลเซียมออกไซด์ (<math>\text{CaO}</math>) ที่มีความเป็นด่างสูง</p>	<p>5. ละลายน้ำได้ปานกลาง เนื่องจากมีกัมมะถันมีขั้ว (Polar) ไม่มากเท่า <math>-\text{OH}</math></p> <p>6. การใช้ประโยชน์ของหมู่ซัลไฟไฮดริล <math>-\text{SH}</math> มีความสำคัญในโปรตีน เช่น การสร้างพันธะไดซัลไฟด์ในโปรตีนที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น เอนไซม์ใน สิ่งแวดล้อมเป็นกลุ่มดูดซับโลหะในวัสดุ เช่น วัสดุชีวภาพ หรือสารประกอบดัดแปรพื้นผิว Surface-modified materials) เกสัชกรรมใช้สารที่มีหมู่ <math>-\text{SH}</math> เป็นยาต้านพิษโลหะหนัก เช่น (Dimercaptosuccinic acid)</p> <p>7. รากกระพังโหม: พืชสมุนไพรที่อุดมด้วยสารประกอบฟีนอลิกและกัมมะถัน โดยเฉพาะสารที่มีหมู่ซัลไฟไฮดริล (<math>-\text{SH}</math>) สามารถเกิดพันธะกับโลหะหนักได้ดี</p>	<p>4. เกิดพันธะในการสร้างวัสดุผสมมีคุณสมบัติเฉพาะสามารถจับโลหะหนัก หรือใช้ในกระบวนการเร่งปฏิกิริยา</p> <p>5. การบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะในการดูดซับโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว พรอท หรือแคดเมียม ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ในกระบวนการทางเคมีที่ต้องการกลุ่มที่สามารถจับกับโลหะวัสดุคอมโพสิตทางชีวภาพ ที่มีสมบัติ</p> <p>6. <math>\text{CaO}</math> เมื่อสัมผัสน้ำจะเปลี่ยนเป็น <math>\text{Ca(OH)}_2</math> ซึ่งมีค่า pH สูงช่วยให้หมู่ <math>-\text{SH}</math> จากรากกระพังโหมเกิด การแตกตัว (deprotonation) เป็น <math>-\text{S}^-</math> ไอออน <math>\text{Ca}^{2+}</math> จาก <math>\text{Ca(OH)}_2</math> สามารถจับกับหมู่ <math>-\text{S}^-</math> เกิดเป็นพันธะเชิงซ้อน (<math>\text{Ca-SR}</math>) หรือพันธะพิเศษระหว่างแคลเซียมและซัลเฟอร์</p>

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินการวิจัย

การปรับปรุงคุณภาพและสมบัติของเจลซูริมิปลาชะโดส่วนประกอบเชิงหน้าที่จากธรรมชาติ ได้แก่ ผลของการเติมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่และสารสกัดหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหม ที่ระดับความเข้มข้นต่างกัน ต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของเจลซูริมิจากปลาชะโด การศึกษาผลของความเข้มข้นของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติมแคลเซียมออกไซด์จากเปลือกไข่ที่ระดับความเข้มข้นที่ต่างกัน 0-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่า การเติมแคลเซียมออกไซด์ในระดับที่เหมาะสม (6  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) สามารถปรับปรุงสมบัติด้านกายภาพและด้านเคมีเจลมีความแข็งแรงและยืดหยุ่นของเจล โดยสามารถเพิ่มค่า Breaking force, Deformation และ Gel strength ร้อยละ 26.22, 18.18 และ 48.21 ตามลำดับ มีความสามารถในการอุ้มน้ำการเพิ่มขึ้นของความแข็งแรงของเจลร้อยละ 48.20 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ( $p < 0.05$ ) นอกจากนี้ ปริมาณความชื้นที่ได้จากการบีบอัด ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจากร้อยละ 16.88 เป็น 7.12 ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนแคลเซียมออกไซด์ สามารถเหนี่ยวนำให้เกิดเจลที่มีโครงสร้างสามมิติของเส้นใยโปรตีนที่มีรูพรุนขนาดเล็กและมีความสม่ำเสมอ ส่งเสริมกิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) โดยการเกิดโพลีเมอร์ไรเซชันของโปรตีนไมโอซินเฮฟวีเชน (MHC) เป็นพันธะ  $\epsilon$ -( $\gamma$ -glutamyl)-lysine และเหนี่ยวนำให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ในระหว่างกระบวนการให้ความร้อนโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของเอนไซม์ย่อยโปรตีน (Protease) และค่าความขาวของเจล

การศึกษาผลของความเข้มข้นของเจลซูริมิจากปลาชะโดที่เติม กลุ่มซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมที่ระดับความเข้มข้น 0-10  $\mu\text{mol}/100\text{g}$  พบว่า การเติมหมูซัลไฟไฮดริลในระดับที่เหมาะสม (8  $\mu\text{mol}/100\text{g}$ ) สามารถเพิ่มค่า Breaking force, Deformation และ Gel strength ร้อยละ 34.27, 36.25 และ 82.88 ตามลำดับ ลดการสูญเสียน้ำได้ร้อยละ 33.46 และสามารถลดปริมาณโปรตีนซัลไฟไฮดริลได้ 5.51  $\mu\text{mol}/\text{g}$  โดยไม่ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของเอนไซม์ย่อยโปรตีน (Protease) ค่าความขาวของเจลและเมื่อวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) พบว่าเจลมีรูพรุนขนาดเล็กกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอซึ่งเป็นผลจากการเชื่อมโยงโปรตีนไมโอซินเข้าด้วยกันทำให้เกิดโครงสร้างโปรตีนสามมิติที่แข็งแรงขึ้น ผลรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SDS-PAGE พบว่าหมูซัลไฟไฮดริลจากรากกระพังโหมสามารถส่งเสริมการกิจกรรมของเอนไซม์ทรานส์กลูตามิเนส (TGase) ทำให้เกิด Closslinking ของไมโอซินเฮฟวีเชน (MHC) และแอกติน และสนับสนุนให้เกิดพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ยืดหยุ่นที่ผลิตจากซูริมิจากปลาชะโดได้

## บรรณานุกรม

- Balange, Amjad, and Soottawat Benjakul. 2009. "Enhancement of Gel Strength of Bigeye Snapper (*Priacanthus Tayenus*) Surimi Using Oxidised Phenolic Compounds." *Food Chemistry* 113(1):61–70. doi: 10.1016/j.foodchem.2008.07.039.
- Banlue, Kriangsak, Korawat Sarapoka, and Taweesak Wongpinij. 2018. "Effects of skunk-vine (*Paederia foetida* Linn.) roots extract on gelation of surimi from giant snakehead (*Channa micropeltes*)." *KHON KAEN AGR.* 46(1):1–5.
- Benjakul, Soottawat, Wonnop Visessanguan, and Jiravadee Tueksuban. 2003. "Changes in Physics-Chemical Properties and Gel-Forming Ability of Lizardfish (*Saurida Tumbil*) during Post-Mortem Storage in Ice." *Food Chemistry* 80(4):535–44. doi: 10.1016/S0308-8146(02)00339-4.
- Benjakul, Soottwat, Wonnop Visessanguan, and Chantira Srivilai. 2001. "GEL PROPERTIES OF BIGEYE SNAPPER ( *PRIACANTHUS TAYENUS* ) SURIMI AS AFFECTED BY SETTING AND PORCINE PLASMA PROTEINS." *Journal of Food Quality* 24(5):453–71. doi: 10.1111/j.1745-4557.2001.tb00622.x.
- Buamard, Natchaphol, Avtar Singh, and Soottawat Benjakul. 2024. "Improvement of Surimi Gel Quality Using Protein Cross-Linker, Hydrocolloids and Protease Inhibitor." *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 24(3). doi: 10.4194/TRJFAS24808.
- Chen, Haihua, and Changhu Xue. 2009. "Effects of Starch on Rheological and Gel Properties of Horse-Mackerel Surimi." *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* 25(5):293–98.
- Chuakham, Suwanan, Apipong Putkham, Ajchara Putkham, and Sukaranan Kanokwan. 2021. "Synthesis of Sustainable and High Purity of Quicklime Derived from Calcination of Eggshell Waste in a Laboratory-Scale Rotary Furnace."

*Key Engineering Materials* Volume 904:419–26.

doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.904.419.

Cree, Duncan, and Allison Rutter. 2015. “Sustainable Bio-Inspired Limestone Eggshell Powder for Potential Industrialized Applications.” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 3(5):941–49. doi: 10.1021/acssuschemeng.5b00035.

Ellman, George L. 1959. “Tissue Sulfhydryl Groups.” *Archives of Biochemistry and Biophysics* 82(1):70–77. doi: 10.1016/0003-9861(59)90090-6.

Fang, Qian, Linfan Shi, Zhongyan Ren, Gengxin Hao, Jun Chen, and Wuyin Weng. 2021. “Effects of Emulsified Lard and TGase on Gel Properties of Threadfin Bream (*Nemipterus Virgatus*) Surimi.” *LWT* 146:111513. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111513.

Feng, Xiao, Xi Yu, Yuling Yang, and Xiaozhi Tang. 2023. “Improving the Freeze-Thaw Stability of Fish Myofibrils and Myofibrillar Protein Gels: Current Methods and Future Perspectives.” *Food Hydrocolloids* 144:109041. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109041.

Fukushima, Hideto, Emiko Okazaki, Yutaka Fukuda, and Shugo Watabe. 2007. “Rheological Properties of Selected Fish Paste at Selected Temperature Pertaining to Shaping of Surimi-Based Products.” *Journal of Food Engineering* 81(2):492–99. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.11.029.

Habte, Lulit, Natnael Shiferaw, Dure Mulatu, Thriveni Thenepalli, Ramakrishna Chilakala, and Ji Ahn. 2019. “Synthesis of Nano-Calcium Oxide from Waste Eggshell by Sol-Gel Method.” *Sustainability* 11(11):3196. doi: 10.3390/su11113196.

Han, Guilian, and You Li. 2024. “A Review of Inhibition Mechanisms of Surimi Protein Hydrolysis by Different Exogenous Additives and Their Application in Improving Surimi Gel Quality.” *Food Chemistry* 456:140002.

doi: 10.1016/j.foodchem.2024.140002.

He, Xueli, Yanan Lv, Xuepeng Li, Shumin Yi, Honglei Zhao, Jianrong Li, and Yongxia Xu. 2022. "Improvement of Gelation Properties of Silver Carp Surimi through Ultrasound-Assisted Water Bath Heating." *Ultrasonics Sonochemistry* 83:105942.

doi: 10.1016/j.ultsonch.2022.105942.

Hsu, Kuo-Chiang, Jyh-Sheng Hwang, Chi-Cheng Yu, and Chia-Ling Jao. 2007. "Changes in Conformation and in Sulfhydryl Groups of Actomyosin of Tilapia (*Oreochromis Niloticus*) on Hydrostatic Pressure Treatment."

*Food Chemistry* 103(2):560–64. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.09.001.

Htwe, Kyi Kyi, Weiwen Duan, Shuai Wei, Qinxiu Sun, Zefu Wang, Zongyuan Han, Yang Liu, and Shucheng Liu. 2023. "Quantitative Analysis of the Correlation between Gel Strength and Microstructure of Shrimp Surimi Gel Induced by Dense Phase Carbon Dioxide." *Food Research International* 174:113623.

doi: 10.1016/j.foodres.2023.113623.

Huang, Qun, Xiang Huang, Lan Liu, Guoze Wang, Hongbo Song, Fang Geng, and Peng Luo. 2021. "Effect of Nano Eggshell Calcium on the Structure, Physicochemical, and Gel Properties of Threadfin Bream (*Nemipterus Virgatus*) Actomyosin." *LWT* 150:112047. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112047.

Imkum Putkham, Ajchara, Suwanan Chuakham, Yuwadee Chaiyachet, Tanapon Suwansopa, and Apipong Putkham. 2022. "Production of Bio-Calcium Oxide Derived from Hatchery Eggshell Waste Using an Industrial-Scale Car Bottom Furnace." *Journal of Renewable Materials* 10(4):1137–51.

doi: 10.32604/jrm.2022.018560.

Kamath, G. G., T. C. Lanier, E. A. Foegeding, and D. D. Hamann. 1992. "Nondisulfide Covalent Cross-Linking of Myosin Heavy Chain in 'Setting' of Alaska Pollock and Atlantic Croaker Surimi." *Journal of Food Biochemistry* 16(3):151–72.

doi: 10.1111/j.1745-4514.1992.tb00443.x.

Lertwittayanon, Kosol, Soottawat Benjakul, Sajid Maqsood, and Angel B. Encarnacion.

2013. "Effect of Different Salts on Dewatering and Properties of Yellowtail Barracuda Surimi." *International Aquatic Research* 5(1):10.

doi: 10.1186/2008-6970-5-10.

Li, De-Yang, Zhi-Feng Tan, Zi-Qiang Liu, Chao Wu, Hui-Lin Liu, Chao Guo, and Da-Yong

Zhou. 2021. "Effect of Hydroxyl Radical Induced Oxidation on the Physicochemical and Gelling Properties of Shrimp Myofibrillar Protein and Its Mechanism." *Food Chemistry* 351:129344.

doi: 10.1016/j.foodchem.2021.129344.

Li, Qiumin Wang, Liping Guo, Harvey Ho, Baowei Wang, Jingxin Sun, Xinglian Xu, and

Ming Huang. 2019. "Effects of Ultrafine Comminution Treatment on Gelling Properties of Myofibrillar Proteins from Chicken Breast."

*Food Hydrocolloids* 97:105199. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105199.

Liao, Bing, Meiqi Li, Yinan Liu, and Zhonghua Ning. 2021. "Study on the Crystal Structure

and Genetic Structure of Eggshell." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 714(3):032037.

doi: 10.1088/1755-1315/714/3/032037.

Liu, Ru, Si-ming Zhao, Hong Yang, Dan-dan Li, Shan-bai Xiong, and Bi-jun Xie. 2011.

"Comparative Study on the Stability of Fish Actomyosin and Pork Actomyosin."

*Meat Science* 88(2):234-40. doi: 10.1016/j.meatsci.2010.12.026.

Lv, Yuanqi, Lilan Xu, Yujie Su, Cuihua Chang, Luping Gu, Yanjun Yang, and Junhua Li.

2021. "Effect of Soybean Protein Isolate and Egg White Mixture on Gelation of Chicken Myofibrillar Proteins under Salt-/Free Conditions."

*LWT* 149:111871. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111871.

Mi, Hongbo, Yi Li, Cong Wang, Shumin Yi, Xuepeng Li, and Jianrong Li. 2021. "The

- Interaction of Starch-Gums and Their Effect on Gel Properties and Protein Conformation of Silver Carp Surimi.” *Food Hydrocolloids* 112:106290. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.106290.
- Mikami, Bunzo, Keiichi Nomura, and Yuhei Morita. 1994. “Two Sulfhydryl Groups Near the Active Site of Soybean  $\beta$ -Amylase.” *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* 58(1):126–32. doi: 10.1271/bbb.58.126.
- Moreno, H. M., V. Bargiela, C. A. Tovar, D. Cando, A. J. Borderias, and B. Herranz. 2015. “High Pressure Applied to Frozen Flying Fish (*Parexocoetus Brachyterus*) Surimi: Effect on Physicochemical and Rheological Properties of Gels.” *Food Hydrocolloids* 48:127–34. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.01.029.
- Nimalaratne, Chamila, and Jianping Wu. 2015. “Hen Egg as an Antioxidant Food Commodity: A Review.” *Nutrients* 7(10):8274–93. doi: 10.3390/nu7105394.
- Padtakenang, Phorntip, and Wilawan Promprom. 2019. “Phytochemical Screening and Biological Activity of *Paederia Linearis* Hook. f. Extracts.” *Maharakham University* (18):5–7.
- Petcharat, Tanyamon, and Soottawat Benjakul. 2018. “Effect of Gellan Incorporation on Gel Properties of Bigeye Snapper Surimi.” *Food Hydrocolloids* 77:746–53. doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.11.016.
- Platon, Nicoleta, Vasilica-Alisa Arus, Ana-Maria Georgescu, Ileana Denisa Nistor, and Narcis Barsan. 2020. “White Bread Fortified with Calcium from Eggshell Powder.” *Revista de Chimie* 71(7):299–306. doi: 10.37358/RC.20.7.8248.
- Pornchai, Teepakorn, Ajchara Imkum Putkham, and Apipong Putkham. 2016. “Effect of Calcination Time on Physical and Chemical Properties of CaO- Catalyst Derived from Industrial-Eggshell Wastes.” *J Sci Technol MSU* 35(6):1–5.
- Quan, Tran Hong, and Soottawat Benjakul. 2017. “Comparative Study on the Effect of Duck and Hen Egg Albumens on Proteolysis and Gel Property of Sardine Surimi.”

*International Journal of Food Properties* 20(sup3):S2786–97.

doi: 10.1080/10942912.2017.1374290.

Rodgers, M. E., T. Karr, K. Biedermann, H. Ueno, and W. F. Harrington. 1987. “Thermal Stability of Myosin Rod from Various Species.” *Biochemistry* 26(26):8703–8.

doi: 10.1021/bi00400a032.

Sang, Shangyuan, Xiaoyun Chen, Ying Qin, Li Tong, and Changrong Ou. 2022. “A Study on the Effects of Calcium Lactate on the Gelling Properties of Large Yellow Croaker (*Pseudosciaena Crocea*) Surimi by Low-Field Nuclear Magnetic Resonance and Raman Spectroscopy.” *Foods* 11(20):3197.

doi: 10.3390/foods11203197.

Sharif, Mian K., Makkia Saleem, and Komal Javed. 2018. “Food Materials Science in Egg Powder Industry.” Pp. 505–37 in *Role of Materials Science in Food Bioengineering*. Elsevier.

Smith, William O., and Karen L. Cyr. 1988. “Modifications of Sulfhydryl Groups on Phytochrome and Their Influence on Physicochemical Differences between the Red- and Far-Red-Absorbing Forms.” *Plant Physiology* 87(1):195–200.

doi: 10.1104/pp.87.1.195.

Subhajit, Ray, Kumar Barman Amit, Kumar Roy Pradip, and Kumar Singh Bipin. 2017.

“Chicken Eggshell Powder as Dietary Calcium Source in Chocolate Cake.”

*The Pharma Innovation* 6(9):01–04.

Visessanguan, Wonnop, Masahiro Ogawa, Shuryo Nakai, and Haejung An. 2000.

“Physicochemical Changes and Mechanism of Heat-Induced Gelation of Arrowtooth Flounder Myosin.” *Journal of Agricultural and Food Chemistry*

48(4):1016–23. doi: 10.1021/jf9900332.

Walayat, Noman, Zhouyi Xiong, Hanguo Xiong, Helena M. Moreno, Nadia Niaz,

Muhammad Nadeem Ahmad, Ali Hassan, Asad Nawaz, Ishtiaq Ahmad, and Peng-

- Kai Wang. 2020. "Cryoprotective Effect of Egg White Proteins and Xylooligosaccharides Mixture on Oxidative and Structural Changes in Myofibrillar Proteins of *Culter Alburnus* during Frozen Storage." *International Journal of Biological Macromolecules* 158:865–74.  
doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.093.
- Wang Xu, Youling L. Xiong, and Hiroaki Sato. 2017. "Rheological Enhancement of Pork Myofibrillar Protein–Lipid Emulsion Composite Gels via Glucose Oxidase Oxidation/Transglutaminase Cross-Linking Pathway." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 65(38):8451–58. doi: 10.1021/acs.jafc.7b03007.
- Wang Yudong, Yang Zhuang, Jingyan Zhang, Yu Chen, and Hong Yang. 2024. "Effects of Different pH Values and Monovalent/Divalent Cations in Washing on the Physicochemical Characteristics of Silver Carp Surimi Gel." *LWT* 196:115865. doi: 10.1016/j.lwt.2024.115865.
- Weber, K., and M. Osborn. 1969. "The Reliability of Molecular Weight Determinations by Dodecyl Sulfate-Polyacrylamide Gel Electrophoresis." *Journal of Biological Chemistry* 244(16):4406–12. doi: 10.1016/S0021-9258(18)94333-4.
- Xiong, Zhiyu, Tong Shi, Wengang Jin, Yulong Bao, Abdul Razak Monto, Li Yuan, and Ruichang Gao. 2024. "Gel Performance of Surimi Induced by Various Thermal Technologies: A Review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 64(10):3075–90. doi: 10.1080/10408398.2022.2130154.
- Xiong, Zhiyu, Tong Shi, Wei Zhang, Yunfei Kong, Li Yuan, and Ruichang Gao. 2021. "Improvement of Gel Properties of Low Salt Surimi Using Low-Dose L-Arginine Combined with Oxidized Caffeic Acid." *LWT* 145:111303.  
doi: 10.1016/j.lwt.2021.111303.
- Xu, Yongxia, Jiamei Zhao, Rui Wang, Xuepeng Li, Hongbo Mi, and Jianrong Li. 2019. "Effect of Heat Treatment on the Binding of Selected Flavor Compounds to

- Myofibrillar Proteins.” *Journal of the Science of Food and Agriculture* 99(11):5028–34. doi: 10.1002/jsfa.9744.
- Yin, Tao, and Jae W. Park. 2014. “Effects of Nano-Scaled Fish Bone on the Gelation Properties of Alaska Pollock Surimi.” *Food Chemistry* 150:463–68. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.11.041.
- Yin, Tao, Zachary H. Reed, and Jae W. Park. 2014. “Gelling Properties of Surimi as Affected by the Particle Size of Fish Bone.” *LWT - Food Science and Technology* 58(2):412–16. doi: 10.1016/j.lwt.2014.03.037.
- Yingchutrakul, Manatsada, Naphat Wasinnitwong, Soottawat Benjakul, Avtar Singh, Yanyan Zheng, Elliot Mubango, Yongkang Luo, Yuqing Tan, and Hui Hong. 2022. “Asian Carp, an Alternative Material for Surimi Production: Progress and Future.” *Foods* 11(9):1318. doi: 10.3390/foods11091318.
- Yongsawatdigul, J., A. Worratao, and J. W. Park. 2002. “Effect of Endogenous Transglutaminase on Threadfin Bream Surimi Gelation.” *Journal of Food Science* 67(9):3258–63. doi: 10.1111/j.1365-2621.2002.tb09575.x.
- Yongsawatdigul, Jirawat, and Sornchai Sinsuwan. 2007. “Aggregation and Conformational Changes of Tilapia Actomyosin as Affected by Calcium Ion during Setting.” *Food Hydrocolloids* 21(3):359–67. doi: 10.1016/j.foodhyd.2006.04.006.
- Yu, Nannan, Hao Gong, Heng Yuan, Yingjie Bao, and Weidong Wang. 2022. “Effects of Calcium Chloride as a Salt Substitute on Physicochemical and 3D Printing Properties of Silver Carp Surimi Gels.” *CyTA - Journal of Food* 20(1):1–12. doi: 10.1080/19476337.2021.2008510.
- Yu, Nannan, Yanshun Xu, Qixing Jiang, and Wenshui Xia. 2017. “Molecular Forces Involved in Heat-Induced Freshwater Surimi Gel: Effects of Various Bond Disrupting Agents on the Gel Properties and Protein Conformation Changes.”

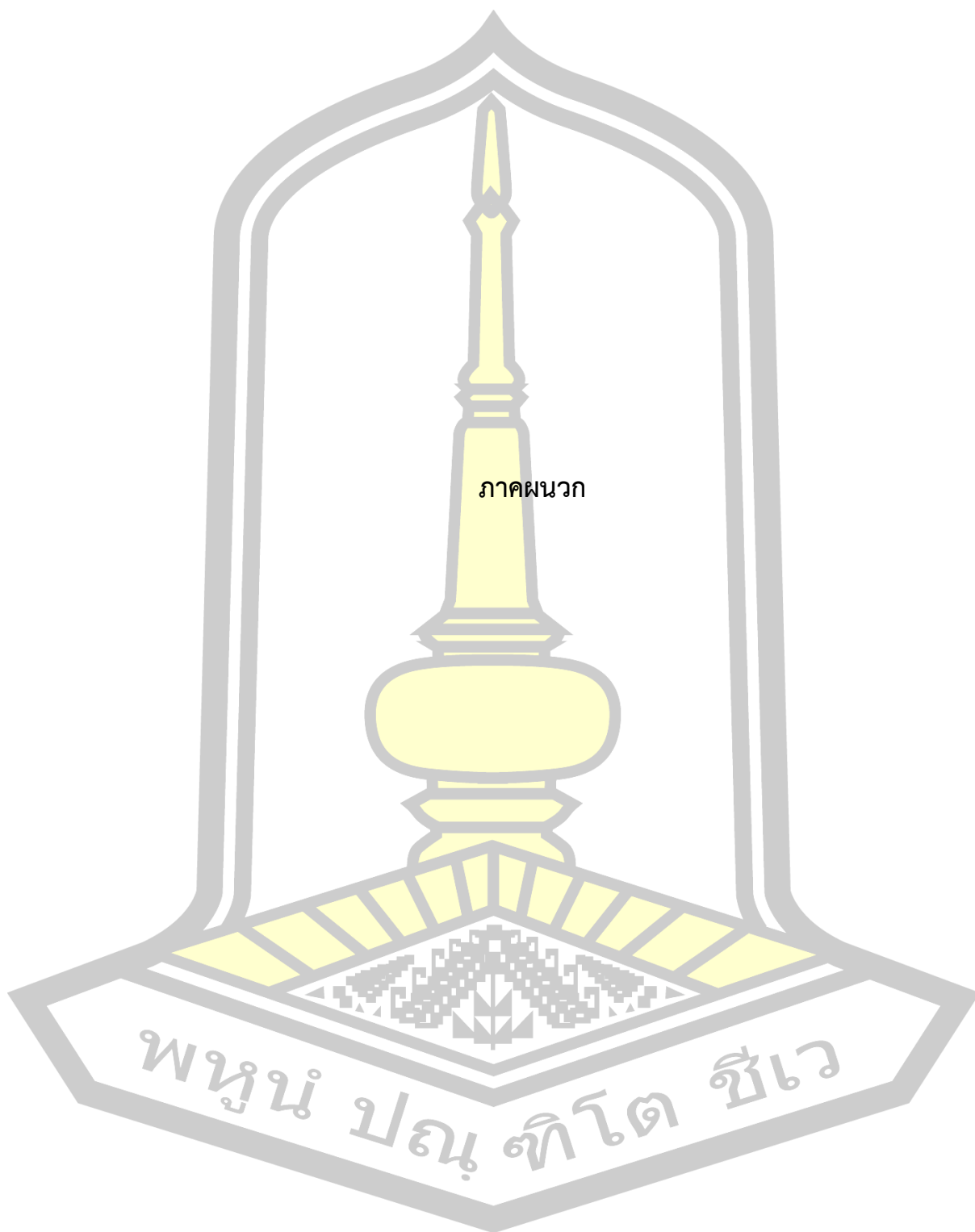
*Food Hydrocolloids* 69:193–201. doi: 10.1016/j.foodhyd.2017.02.003.

Zhao, Yadong, Jiajia Li, Ganping Wei, Xiaoguo Ying, Bin Zheng, Pingping Gao, and Rusen Zhou. 2023. “Fortification of Surimi Gels by Tuning the Synergetic Effect of Multiple Enzyme-Related Factors.” *Food Hydrocolloids* 143:108895. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.108895.

Zuraini, A., M. N. Somchit, M. H. Solihah, Y. M. Goh, A. K. Arifah, M. S. Zakaria, N. Somchit, M. A. Rajion, Z. A. Zakaria, and A. M. Mat Jais. 2006. “Fatty Acid and Amino Acid Composition of Three Local Malaysian *Channa* Spp. Fish.” *Food Chemistry* 97(4):674–78. doi: 10.1016/j.foodchem.2005.04.031.

ศิริลักษณ์, พวงจันทร์, and อินทร์เรืองศรี. สุวพัชร. 2556. “ผลของสารสกัดจากกระพังไหมต่อคุณสมบัติของเจลซูริมิจากปลาทรายแดง.” *ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*.





ภาคผนวก

พหุ ประทีป ชัยเว

**ภาคผนวกที่ 1 การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายของโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก (TCA-soluble peptide content)**

**สารเคมี**

1. สารละลาย A ได้จาก  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ชั่ง 14.3084 กรัม ผสมกับ NaOH 2.8598 กรัม ปรับปริมาตรเป็น 500 mL
2. สารละลาย B ได้จาก  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ชั่ง 1.4232 กรัม ปริมาตรเป็น 100 mL
3. สารละลาย C ได้จาก  $\text{Na}_2\text{Citrate}$  ชั่ง 2.85299 กรัม ปริมาตรเป็น 100 mL
4. สารละลาย D ได้จากนำสารละลาย A ผสมกับสารละลาย B และ C ในอัตราส่วน 98:1:1 (เตรียมแล้วใช้ใน 1 วัน)
5. สารละลาย E ได้จากนำ 5 mL 2 N Folin phenol reagent ละลายในน้ำกลั่น 6 mL (เตรียมแล้วใช้ทันที)

**วิธีทำ**

1. ชั่งตัวอย่าง 2 กรัม เติมสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก 5% 10 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปต้มให้เป็นเนื้อเดียว แล้วทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 2-3 นาที
2. กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ปรับปริมาตรด้วยสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก 5% ให้เป็น 10 มิลลิลิตร
3. ปิเปตตัวอย่างมา 2 มิลลิลิตร
4. เติมน้ำกลั่นลงไป 0.5 มิลลิลิตร และ reagent D ลงไป 0.7 มิลลิลิตร แล้วผสมเข้าด้วยกันด้วย vortex mixture ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที (มืด)
5. เติม reagent E ลงไป 0.1 มิลลิลิตร ผสมเข้าด้วยกันด้วย vortex ทันที ตั้งทิ้งไว้ 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง (มืด)
6. วัดค่า absorbance ที่ความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร หาปริมาณโปรตีน โดยเทียบกับ protein standard curve (standard curve เตรียมจาก bovine albumin (BSA) ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10, 15, 20, 25 mg / L)

พูน ปณ ทิโต ชเว

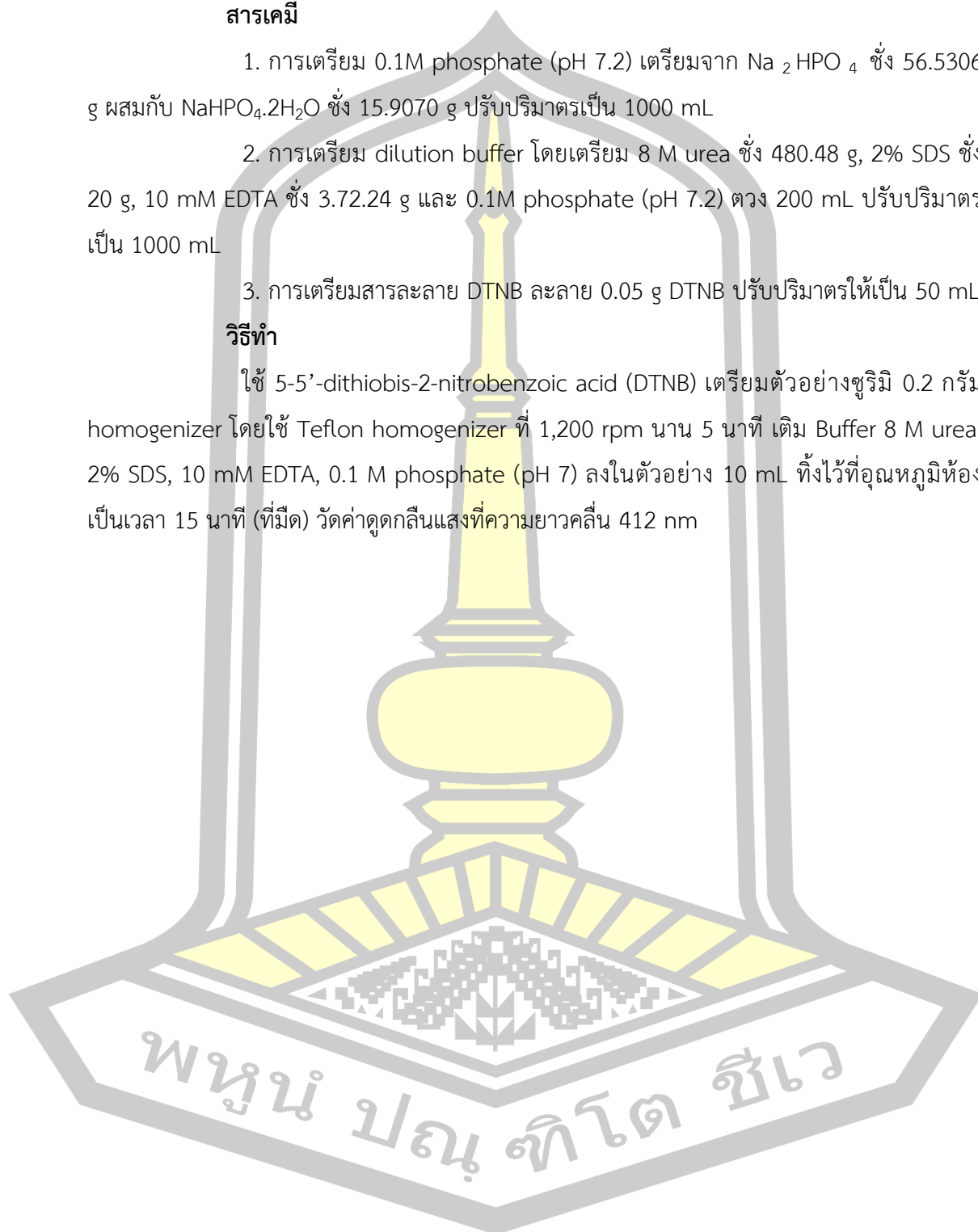
## ภาคผนวกที่ 2 วิธีวิเคราะห์ total sulfhydryl group โดยวิธีของ Ellman (1959)

### สารเคมี

1. การเตรียม 0.1M phosphate (pH 7.2) เตรียมจาก  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ชั่ง 56.5306 g ผสมกับ  $\text{NaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ชั่ง 15.9070 g ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL
2. การเตรียม dilution buffer โดยเตรียม 8 M urea ชั่ง 480.48 g, 2% SDS ชั่ง 20 g, 10 mM EDTA ชั่ง 3.72.24 g และ 0.1M phosphate (pH 7.2) ตวง 200 mL ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL
3. การเตรียมสารละลาย DTNB ละลาย 0.05 g DTNB ปรับปริมาตรให้เป็น 50 mL

### วิธีทำ

ใช้ 5-5'-dithiobis-2-nitrobenzoic acid (DTNB) เตรียมตัวอย่างซูริมิ 0.2 กรัม homogenizer โดยใช้ Teflon homogenizer ที่ 1,200 rpm นาน 5 นาที เติม Buffer 8 M urea, 2% SDS, 10 mM EDTA, 0.1 M phosphate (pH 7) ลงในตัวอย่าง 10 mL ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที (ที่มืด) วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 nm



### ภาคผนวกที่ 3 วิธีวิเคราะห์ Free-sulphydryl content ของสารสกัดจากรากกระพังโหม

#### สารเคมี

1. การเตรียม 0.1M Phosphate (pH 7.2) เตรียมจาก  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ชั่ง 56.530 ผสมกับ  $\text{NaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ชั่ง 15.9070 g ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL
2. การเตรียม Dilution buffer โดยเตรียม 8 M urea ชั่ง 480.48 g, 2% SDS ชั่ง 20 g, 10 mM EDTA ชั่ง 3.72.24 g และ 0.1M Phosphate (pH 7.2) ตวง 200 mL ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL
3. การเตรียมสารละลาย DTNB ละลาย 0.05 g DTNB ปรับปริมาตรให้เป็น 50 mL

#### วิธีทำ

1. เตรียมตัวอย่างซูริมิ 0.5 กรัม Homogenizer โดยใช้ Teflon homogenizer ที่ 1,200 rpm นาน 5 นาที เติม Buffer 8 M urea, 2% SDS, 10 mM EDTA, 0.1 M phosphate (pH 7) ลงในตัวอย่าง 10 ml จากนั้นบีบเพิ่ม 4 ml เติม 30% TCA 4 ml นำผสมเข้าด้วยกันด้วยเครื่อง vortex mix นาน 1 นาที ทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 10 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่อง centrifuge ที่ 3000 rpm 10 นาที แล้วนำส่วนน้ำไปปรับ pH 7.0 แล้วปรับปริมาตร 50 ml ด้วย buffer A นำบ่มที่ 40 °C นาน 15 นาที (ที่มีวัด) วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 nm
2. นำค่า Absorbance นำมาคำนวณหาปริมาณ Protein sulphydryl content (PSH)

$$\text{PSH} = \text{total sulphydryl} - \text{Free-sulphydryl}$$

พหุ ประถมศึกษา

ภาคผนวกที่ 4 วิธีวิเคราะห์ปริมาณ Methyl sulfide ในสารสกัดจากรากกระพังโหมดัดแปลง จากวิธีของ Ellman (1959)

สารเคมี

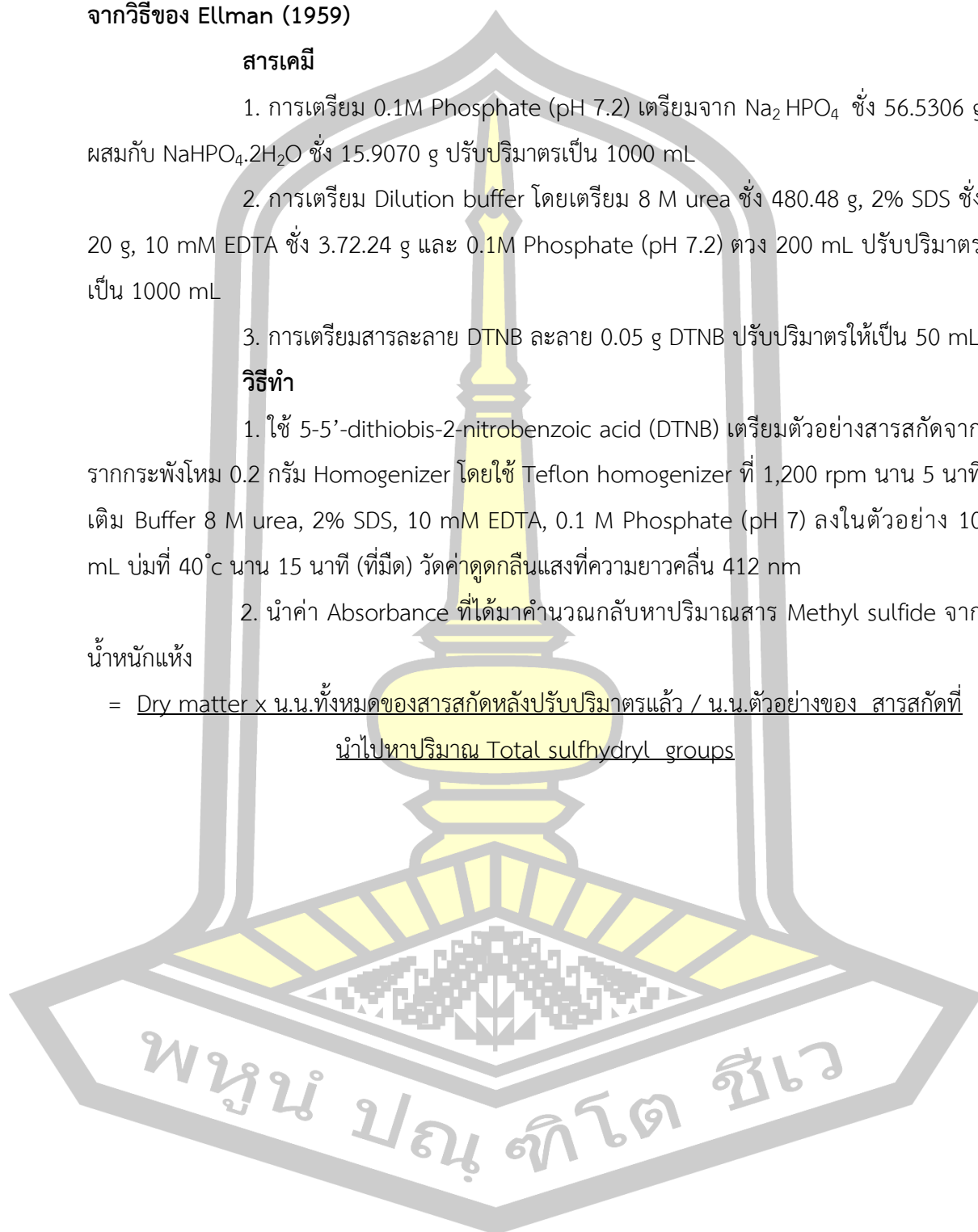
1. การเตรียม 0.1M Phosphate (pH 7.2) เตรียมจาก  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ชั่ง 56.5306 g ผสมกับ  $\text{NaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ชั่ง 15.9070 g ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL
2. การเตรียม Dilution buffer โดยเตรียม 8 M urea ชั่ง 480.48 g, 2% SDS ชั่ง 20 g, 10 mM EDTA ชั่ง 3.72.24 g และ 0.1M Phosphate (pH 7.2) ตวง 200 mL ปรับปริมาตรเป็น 1000 mL
3. การเตรียมสารละลาย DTNB ละลาย 0.05 g DTNB ปรับปริมาตรให้เป็น 50 mL

วิธีทำ

1. ใช้ 5-5'-dithiobis-2-nitrobenzoic acid (DTNB) เตรียมตัวอย่างสารสกัดจากรากกระพังโหม 0.2 กรัม Homogenizer โดยใช้ Teflon homogenizer ที่ 1,200 rpm นาน 5 นาที เติม Buffer 8 M urea, 2% SDS, 10 mM EDTA, 0.1 M Phosphate (pH 7) ลงในตัวอย่าง 10 mL บ่มที่  $40^\circ\text{C}$  นาน 15 นาที (ที่มืด) วัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 412 nm

2. นำค่า Absorbance ที่ได้มาคำนวณกลับหาปริมาณสาร Methyl sulfide จาก  
น้ำหนักแห้ง

$$= \frac{\text{Dry matter} \times \text{น.น.ทั้งหมดของสารสกัดหลังปรับปริมาตรแล้ว}}{\text{น.น.ตัวอย่างของ สารสกัดที่นำไปหาปริมาณ Total sulfhydryl groups}}$$



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวณัฐพร แสนบุญมี
วันเกิด	31 สิงหาคม 2535
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดร้อยเอ็ด
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีร้อยเอ็ด 235 หมู่ที่ 4 ตำบลนิเวศน์ อำเภอธวัชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด 45170
ตำแหน่งหน้าที่การงาน	ข้าราชการครู
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีร้อยเอ็ด
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2559 ปริญญาตรี ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต (คอบ.) สาขาอุตสาหกรรมเกษตร ภาควิชาครุศาสตร์เกษตร คณะครุศาสตร์ อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2565 ถึง ปัจจุบัน กำลังศึกษาปริญญาโท วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (วท.ม.) ภาควิชาเทคโนโลยีการอาหารและโภชนศาสตร์ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ทุนวิจัย	-
ผลงานวิจัย	-

พูนัน ปณุกิตโต ชีวะ