



การพัฒนาโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร



โดย

นายปณนกิจ นาคราช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีสำหรับบรรจุภัณฑ์
อาหาร



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF BIOFOAM FROM WHEAT GLUTEN AND WHEAT STARCH
BLEND FOR FOOD PACKAGING



A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)
Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2017
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

57402211 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : โฟมชีวภาพ, กลูเตนจากแป้งสาลี, แป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์

นาย ปุณณกิจ นาคราช: การพัฒนาโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. สุกศิริ เหมศรี

โฟมชีวภาพเตรียมได้จากกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ด้วยการขึ้นรูปแบบอัดโดยใช้ความร้อน โฟมชีวภาพที่เตรียมขึ้นนี้จะนำมาใช้เพื่อแทนที่โฟมพอลิเมอร์ที่เตรียมจากสารปิโตรเลียม โดยเฉพาะอย่างยิ่งโฟมพอลิสไตรีน ซึ่งใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหาร งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสารฟู (โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต) อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์ อัตราส่วนระหว่างน้ำตาลกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ และสารเชื่อมขวาง (บอแรกซ์) ที่มีต่อลักษณะเซลล์โฟม ความหนาแน่นรวม สมบัติแรงดัดงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพโดยเปรียบเทียบกับโฟมพอลิสไตรีนที่ใช้ในทางการค้า จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าโฟมชีวภาพมีโครงสร้างเป็นเซลล์เปิด เมื่อปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความหนาแน่นรวมของโฟมชีวภาพลดลง เนื่องจากสารฟูทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการเกิดเซลล์โฟมซึ่งเซลล์โฟมมีปริมาณมากจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมต่ำ แต่การเพิ่มปริมาณสารฟูไม่ส่งผลต่อสมบัติแรงดัดงอ เมื่ออัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์เพิ่มขึ้น (ปริมาณกลูเตนในพอลิเมอร์เมทริกซ์เพิ่มขึ้น) จะทำให้ความหนาแน่นรวมของโฟมลดลง และค่ามอดูลัสของการโค้งงอและการทนต่อการโค้งงอเพิ่มขึ้น ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลกลีเซอรอลนั้นพบว่าความหนาแน่นรวมลดลง และสมบัติแรงดัดงอสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลกลีเซอรอล (ปริมาณกลีเซอรอลน้อยลง) การเติมสารเชื่อมขวางลงในโฟมไม่ส่งผลต่อความหนาแน่นรวมและการเปลี่ยนแปลงของสีในโฟมชีวภาพ ในขณะที่สมบัติแรงดัดงอและความแข็งของโฟมเพิ่มขึ้นตามปริมาณของสารเชื่อมขวาง เมื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของโฟมชีวภาพและโฟมพอลิสไตรีน พบว่าโฟมชีวภาพมีสมบัติแรงดัดงอและความแข็งที่สูงกว่าโฟมพอลิสไตรีน อย่างไรก็ตามความหนาแน่นรวมและการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพสูงกว่าโฟมพอลิสไตรีน

57402211 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Keyword : Biofoam, Wheat gluten, Gelatinized wheat starch

MR. Punnakit NAKKHARAT: DEVELOPMENT OF BIOFOAM FROM WHEAT GLUTEN AND WHEAT STARCH BLEND FOR FOOD PACKAGING Thesis advisor : Sudsiri Hemsri, Ph.D.

Biofoams based on wheat gluten and wheat starch were fabricated by thermal compression molding to replace petroleum-based polymer foams, especially polystyrene paper foam (PSP foam) used as food packaging trays. This research aimed to study the effects of blowing agent (sodium hydrogen carbonate), ratios of wheat gluten and gelatinized wheat starch as polymer matrix, ratios of water and glycerol as plasticizers, and crosslinking agent (borax) on cell foam characteristics, bulk density, flexural properties, hardness, color and water absorption compared with those of commercial PSP foam. Scanning electron microscopy analysis revealed the biofoams had open-cell structure. Density of foams increased as the blowing agent concentration because the blowing agent acted as nuclei for foam cell formation while the amount of the blowing agent had no significant influence on flexural properties. Increasing wheat gluten/gelatinized wheat starch ratios (higher wheat gluten content in the polymer matrix) led to a decrease in bulk density but an increase in flexural modulus and strength. In the case of varying the water/glycerol ratios, lower density and higher flexural properties were observed when the water/glycerol ratios increased (lower glycerol content in the biofoams). Incorporation of the crosslinking agent did not affect bulk density as well as color of biofoams whereas flexural properties and hardness of biofoams improved as the crosslink agent concentration. It was found that biofoams provided superior flexural properties and hardness to the commercial PSP foam. However, bulk density and water absorption resistance of the biofoams were higher than those of the PSP foam.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการพัฒนาโคมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยคำปรึกษาและความช่วยเหลือของ อาจารย์ ดร. สุตศิริ เหมศรี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์ฉาย ทองปิ่น ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ได้ให้แนวคิด แนวทางการแก้ไขปัญหา ช่วยให้ความรู้ทางด้านวิชาแก่ผู้วิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์เรื่องนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรรการ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ญัฐกาญจน์ หงส์ศรีพันธ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้ข้อเสนอแนะ และสละเวลาสำหรับการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ได้ให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ เครื่องมือต่างๆ อบรมสั่งสอนแก่กระผมและคำแนะนำสำหรับงานวิจัย

ขอขอบคุณคุณพินิจ เจียนระลึก และคุณไพโรจน์ ตั้งศุภรวัช สำหรับการจัดหาอุปกรณ์สารเคมี แนะนำเทคนิคต่างๆ ตลอดจนอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือวิจัย

ขอขอบคุณคุณลูกกวาง อุ่นศิริ สำหรับการติดต่อและประสานงานระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับนักศึกษาระดับปริญญาโทมาบัณฑิตจากภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร

ขอบคุณ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษาและให้กำลังใจตลอดการศึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณพ่อ แม่ ป้า ลุง ยาย ตา น้องชายและน้องสาว ที่คอยเป็นกำลังใจให้ กระผมมาโดยตลอดจนงานวิจัยและวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จลุล่วงไปด้วยดี

ปุณณกิจ นาคราช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลงานวิจัย	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.3 พอลิเมอร์โฟม	20
2.4 สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent).....	34
2.5 กระบวนการเกิดโฟมชีวภาพ	35
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	49
3.1 แนวคิดของการวิจัย	49
3.2 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย.....	49

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	51
3.4 การศึกษาสมบัติของโฟมชีวภาพ	58
3.5 สัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย	63
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	67
4.1 การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์	68
4.2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟู (Blowing agent) ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ	74
4.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ.....	82
4.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ	89
4.5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ	98
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	122
5.1 สรุปผลการวิจัย	122
5.2 ข้อเสนอแนะ	124
รายการอ้างอิง	125
ภาคผนวก.....	131
ภาคผนวก ก ข้อมูลและผลการทดสอบสมบัติของโฟมชีวภาพ	132
ภาคผนวก ข การนำเสนอผลงานวิจัย	152
ประวัติผู้เขียน.....	158

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิด.....	6
ตารางที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด.....	10
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาติไนซ์ของแป้งแต่ละชนิด	13
ตารางที่ 2.4 ปริมาณกรดอะมิโนในกลูเตนจากข้าวสาลี	18
ตารางที่ 2.5 สมบัติของ gliadin และ glutenin.....	20
ตารางที่ 2.6 สมบัติของ PBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป	29
ตารางที่ 2.7 สมบัติ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป.....	31
ตารางที่ 2.8 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของโพนิกักระแทก.....	48
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
ตารางที่ 3.2 คำบรรยายและคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย	63
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของน้ำและกลีเซอรอลที่ใช้เป็นใช้พลาสติกไซเซออร์ของแป้งสาลีเพื่อเตรียมแป้งที่ถูกเจลลาติไนซ์.....	68
ตารางที่ 4.2 ร้อยละความเป็นของผงแป้งสาลีดิบ (NS) และผงแป้งสาลีที่ถูกเจลลาติไนซ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:30, 30:35 และ 30:40 (S 30:30, S 30:35 และ S 30:40).....	73
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโพนชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารฟู	75
ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโพนชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลลาติไนซ์	82
ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโพนชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล.....	90
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโพนชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง	99

ตารางที่ 4.7 เลขคลื่นของพันธะ B-O ของโฟมชีวภาพที่ใช้สารเชื่อมขวาง 8%โดยน้ำหนักของ พอลิเมอร์เมทริกซ์.....	103
ตารางที่ 4.21 ค่าสี (L^* , a^* , b^* และ ΔE) ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณเชื่อมขวาง ต่างๆ.....	115



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 โครงสร้างอะไมโลส.....	5
ภาพที่ 2.2 โครงสร้างอะมิโลเพกติน	7
ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเม็ดแป้ง (a) เม็ดแป้งประกอบไปด้วยวงแหวนซึ่งแสดงถึงบริเวณที่เป็น Amorphous และSemi-Crystalline (b) โครงสร้างบริเวณ Semi-Crystalline	8
ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงตัวกันของอะไมโลสและอะมิโลเพกตินที่มีลักษณะเป็นเกลียวม้วนคู่ (Double Helices) ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบผลึก และโครงสร้างแบบอสัณฐาน	9
ภาพที่ 2.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวม้วนคู่ (Double Helices) ที่ส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลึกแบบ A และโครงสร้างผลึกแบบ B	9
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างผลึกที่ต่างกันของเม็ดแป้งด้วยเทคนิค x-ray diffraction (A) แป้งที่มีผลึกแบบ A เช่น แป้งข้าวโพด, (B) แป้งที่มีผลึกแบบ B เช่น แป้งมันฝรั่ง และ(C) แป้งที่มีผลึกแบบ C เช่น แป้งถั่ว	10
ภาพที่ 2.7 เม็ดแป้ง a) ส่องผ่านแสงธรรมดา และ b) ส่องผ่านแสงโพลาไรซ์.....	11
ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในน้ำแป้งดิบขณะให้ความร้อนและการเกิดรีโทรไกลเดชัน.....	12
ภาพที่ 2.9 ระยะเวลาต่างๆ ในการเกิดเจลลาตีในเซชันของเม็ดแป้ง.....	14
ภาพที่ 2.10 การเกิดรีโทรไกลเดชัน.....	14
ภาพที่ 2.11 กลไกการคืนตัวของแป้ง.....	15
ภาพที่ 2.12 แสดงการยึดกันของโปรตีนไกลอะดิน และกลูเตนิน ด้วยพันธะไดซัลไฟท์ เกิดเป็นกลูเตนที่เหนียวและยืดหยุ่น.....	17
ภาพที่ 2.13 โครงสร้างแบบเปิด (Open cell) และเซลล์โพนที่มีโครงสร้างแบบปิด (Closed cell). 21	
ภาพที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของเซลล์ที่ขั้นตอนการขยายตัวของฟองแก๊ส.....	23

ภาพที่ 2.15 ผลขององค์ประกอบของวัสดุภาคพอลิเมอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมของโฟมที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 32 kg m^{-3} เมื่อได้รับแรงกดอัด (a) PS foam (b) PE foam และ (C) Latex rubber foam	26
ภาพที่ 2.16 กลไกการเปลี่ยนรูปร่างของโฟมเซลล์เปิดเมื่อได้แรงกดอัด	27
ภาพที่ 2.17 กลไกการเปลี่ยนรูปร่างของโฟมเซลล์ปิดเมื่อได้แรงกดอัด	27
ภาพที่ 2.18 Compression stress-strain curve ของ Flexible foam	28
ภาพที่ 2.19 Compression stress-strain curve ของ Rigid foam	28
ภาพที่ 2.20 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของ polyvinyl alcohol โดยใช้ Borax เป็นสารเชื่อมขวาง.....	35
ภาพที่ 2.21 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของ Guar gum (polysaccharide) โดยใช้ Borax เป็นสารเชื่อมขวาง.....	35
ภาพที่ 2.22 SEM ของ dough ที่ถูกนวดโดยการตึงยืด โดยมีเม็ดแป้งแทรกอยู่ระหว่าง network ของกลูเตน.....	36
ภาพที่ 2.23 กลไกการเกิด loop and train a) เมื่อเติมน้ำหรือกลีเซอรอลในปริมาณน้อยซึ่งสายโซ่จะเกิดอันตรกิริยากันแบบไม่เป็นระเบียบ b) เมื่อเติมน้ำหรือกลีเซอรอลในปริมาณปานกลางซึ่งสายโซ่จะมีอันตรกิริยาระหว่าง loop : train ที่ต่ำ และ c) เมื่อเติมน้ำหรือกลีเซอรอลในปริมาณมากซึ่งสายโซ่จะมีอันตรกิริยาระหว่าง loop : train ที่สูง.....	37
ภาพที่ 2.24 รูปแบบการเกิดเซลล์โฟมของโฟมชีวภาพ	37
ภาพที่ 2.25 รูปแบบการเกิดการเชื่อมขวางของ gliadin-glutenin ผ่านการเกิดอันตรกิริยาของหมู่ Thiol และหมู่ disulfide ระหว่างการให้ความร้อน.....	38
ภาพที่ 2.26 a-c เป็นภาพ SEM ของโฟมที่ได้และ d เป็นค่าการกระจายตัวของเซลล์.....	39
ภาพที่ 2.27 อัตราการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่างๆ	40
ภาพที่ 2.28 ค่า Elastic modulus และ Strain Recovery ที่ความหนาแน่นของโฟมต่างๆ.....	40
ภาพที่ 2.29 Scanning Electron Microscopy (SEM) ของโฟมกลูเตนที่เติมเส้นวุ้นมะพร้าว.....	41
ภาพที่ 2.30 ค่า Tensile strength at break (σ_{break}) เมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลสและโปรตีนจากดอกทานตะวันที่มีปริมาณต่างๆ [40].....	41

ภาพที่ 2.31 ค่าการดูดซึมน้ำของโฟมจากแป้งมันสำปะหลังในสูตรต่างๆ โดย F แทนปริมาณเส้นใยเซลลูโลส (%w/w) และ P แทนปริมาณโปรตีนจากดอกทานตะวัน (%w/w).....	42
ภาพที่ 2.32 ค่า a) Normalized Gel Mass (NGM) และ b) Normalized Swelling degree (NSD) ของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างสารละลายแป้งและpoly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้ cross-linking agent ได้แก่ zinc oxide (Z), formaldehyde (F), borax (B) และ epichlorohydrin (E) เทียบกับ ฟิล์มที่ไม่ได้เติม cross-linking agent (U).....	43
ภาพที่ 2.33 ค่า a) ค่า Tensile strength และ b) ค่า Tensile modulus ของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างสารละลายแป้งและpoly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้ cross-linking agent ได้แก่ zinc oxide (Z), formaldehyde (F), borax (B) และ epichlorohydrin (E) เทียบกับ ฟิล์มที่ไม่ได้เติม cross-linking agent (U).....	43
ภาพที่ 2.34 การเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้บอแรกซ์เป็น สารเชื่อมขวาง.....	44
ภาพที่ 2.35 เทคนิค FTIR ของ hydrogels จาก Guar gum และ Guar gum ที่ถูก cross-linked โดย borax.....	45
ภาพที่ 2.36 Water absorption ของ Guar gum และ Guar gum ที่ถูก cross-linked โดย borax ที่ปริมาณ 5% (GGB 5), 10% (GGB 10), 15% (GGB 15), 20% (GGB 20) และ 25% (GGB 25).....	45
ภาพที่ 2.37 เทคนิค FTIR ของ hydrogel ที่อัตราส่วนระหว่าง PVA:borax 3:1, 5:1 และ 10:1 โดยเติมเส้นใยเซลลูโลสระดับนาโน 40%w/w.....	46
ภาพที่ 2.38 a) กราฟ Stress-Strain และ b) กราฟ Creep-recovery ของ hydrogel ที่อัตราส่วนระหว่าง PVA:borax 3:1, 5:1 และ 10:1 โดยเติมเส้นใยเซลลูโลสระดับนาโน 40%w/w.....	46
ภาพที่ 2.39 ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุปิดแผลที่เติมบอแรกซ์ 10% (A) และ 40% (B)	47
ภาพที่ 2.40 การบวมตัวของผ้าพันแผลเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 10% เป็น 40%.....	47
ภาพที่ 2.41 ค่า Tensile strength (a) และ Elongation at break (b) ของผ้าพันแผลเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 10% เป็น 40%.....	48

ภาพที่ 3.1 การศึกษาสมบัติทางสัมฐานวิทยาของแป้งสาาลีเจลาคตินอซ (S) ที่ใช้เป็นสารตั้งต้น ในการผลิตโฟมชีวภาพ	52
ภาพที่ 3.2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟูที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ	53
ภาพที่ 3.3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาาลีและแป้งสาาลีเจลาคตินอซ ที่มีต่อสมบัติของโฟม	54
ภาพที่ 3.4 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอร์อลที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ.....	55
ภาพที่ 3.5 ศึกษาอิทธิพลของสารเชื่อมขวางที่มีต่อโฟมชีวภาพ.....	57
ภาพที่ 4.1 ภาพ SEM ของ (a,b) คือแป้งสาาลีดิบที่ยังไม่ผ่านการเจลาคตินอซ (NS), (c,d) คือผงแป้งที่ถูกเจลาคตินอซที่ได้จากการบดเส้นเอ็กซ์ทรูเดตที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอร์อล 30:30 (S 30:30), (e,f) คือผงแป้งที่ถูกเจลาคตินอซที่ได้จากการบดเส้นเอ็กซ์ทรูเดตที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอร์อล 30:35 (S 30:35), และ (g,h) คือผงแป้งที่ถูกเจลาคตินอซที่ได้จากการบดเส้นเอ็กซ์ทรูเดต ที่อัตราส่วน น้ำตอกลิเซอร์อล 30:40.....	69
ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM ของพื้นผิวรอยแตกหักชั้นงานเมื่อแชในไนโตรเจนเหลว (a,b) คือเอ็กซ์ทรูเดตแป้งสาาลีที่ถูกเจลาคตินอซ ที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอร์อล 30:30 (S 30:30), (c,d) คือเอ็กซ์ทรูเดตแป้งสาาลีที่ถูกเจลาคตินอซ ที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอร์อล 30:35 (S 30:35) และ (e,f) คือเอ็กซ์ทรูเดตแป้งสาาลีที่ถูกเจลาคตินอซ ที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอร์อล 30:40 (S 30:40)70	
ภาพที่ 4.3 XRD pattern ของผงแป้งสาาลี (NS), S 30:30, S 30:35 และ S 30:40 คือผงแป้งที่ถูกเจลาคตินอซที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอร์อล 30:30 (S 30:30), 30:35 (S 30:35) และ 30:40 (S 30:40) ตามลำดับ	73
ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของ a) Polystyrene Paper Foam (PSP foam), b) B0 c) B4 d) B8 e) B12 และ f) B16 คือโฟมชีวภาพที่มีการใช้สารฟูในปริมาณ 0, 4, 8, 12 และ 16 phr ตามลำดับ.....	76
ภาพที่ 4.5 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ.....	76
ภาพที่ 4.6 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ	78
ภาพที่ 4.7 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%	80

ภาพที่ 4.8 ค่า Flexural strength ของ PSP foam, และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%	80
ภาพที่ 4.9 ภาพ SEM ของ a) PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลี และแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ (b) G, c) G9S1, d) G8S2, e) G7S3, f) G6S4, g) G5S5, h) G4S6, i) G3S7 j) G2S8, k) G1S9 และ l) S).....	83
ภาพที่ 4.10 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตน จากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ	85
ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจาก แป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ.....	86
ภาพที่ 4.12 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่าง กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%.....	88
ภาพที่ 4.13 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่าง กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%.....	88
ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM ของ a) G-P21, b) G-P31, c) G-P41, d) G-P51, e) G9S1-P21, f) G9S1-P31, g) G9S1-P41 h) G9S1-P51, i) G8S2-P21, j) G8S2-P31, k) G8S2-P41, l) G8S2-P51 คือโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูก เจลาตินไนซ์ 100:0 90:10 และ 80:20 ตามลำดับ.....	91
ภาพที่ 4.15 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติก ไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ	92
ภาพที่ 4.16 ความหนาแน่นของ Polystyrene Paper Foam (PSP foam) และโฟมชีวภาพที่ใช้ อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ	93
ภาพที่ 4.17 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติก ไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%	96
ภาพที่ 4.18 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนของ พลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%	97

ภาพที่ 4.19 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อโฟมชีวภาพ ที่สภาวะความชื้น 75%.....	97
ภาพที่ 4.20 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อโฟมชีวภาพ ที่สภาวะความชื้น 75%.....	98
ภาพที่ 4.21 FTIR สเปกตรัมของโฟมชีวภาพที่ไม่มีสารเชื่อมขวาง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ 100:0 และ 90:10 และใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ 5:1 (G-W5C1 และ G9S1-W5C1 ตามลำดับ).....	100
ภาพที่ 4.22 FTIR สเปกตรัมของบอแรกซ์ (Borax) โฟมชีวภาพที่ไม่มีสารเชื่อมขวาง (G-P51 และ G9S1-P51) และโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางในปริมาณ 8% (G-P51-C8 และ G9S1-P51-C8).....	102
ภาพที่ 4.23 โครงสร้างบอแรกซ์ (Borax).....	102
ภาพที่ 4.24 ปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของโฟมชีวภาพจากกลูเตนที่มีการเติมสารเชื่อมขวาง.....	104
ภาพที่ 4.25 ปฏิกริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของโฟมชีวภาพจากกลูเตน/แป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ที่มีการเติมสารเชื่อมขวาง.....	104
ภาพที่ 4.26 ภาพ SEM ของ a) G-P51, b) G-P51-C6, c) G-P51-C8 d) G-P51-C10, e) G9S1-P51, f) G9S1-P51-C6, g) G9S1-P51-C8 และ h) G9S1-P51-C10 คือโฟมชีวภาพที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมขวาง 0%, 6%, 8% และ 10% โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ 100:0, 90:10 และใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล 5:1 ตามลำดับ.....	106
ภาพที่ 4.27 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ.....	107
ภาพที่ 4.28 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ.....	108
ภาพที่ 4.29 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%.....	110
ภาพที่ 4.30 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%.....	110

ภาพที่ 4.31 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวาง ต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 75%.....	111
ภาพที่ 4.32 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 75%.....	111
ภาพที่ 4.33 ความแข็งของ Polystyrene Paper Foam (PSP foam) และผลของปริมาณสารเชื่อม ขวางที่มีต่อโฟมชีวภาพ	113
ภาพที่ 4.34 การเกิดสาร Melanoidins จากปฏิกิริยา Maillard ที่สภาวะความเป็นกรดต่าง ต่างๆ	118
ภาพที่ 4.35 ค่าการดูดซึมน้ำของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณเชื่อมขวางต่างๆ.....	119
ภาพที่ 4.36 FTIR สเปกตรัมของบอแรกซ์ (Borax) และน้ำจากการแช่โฟมชีวภาพที่มีการเติมสาร เชื่อมขวางในปริมาณ 10% (G-P51-C10 และ G9S1-P51-C10)	120



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์โฟม อาทิ กล่องโฟม ถาดโฟม จานโฟม และถ้วยโฟม เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น โดยโฟมเหล่านี้ได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารมากขึ้น เนื่องจากวิถีชีวิตและพฤติกรรมการบริโภคของมนุษย์เปลี่ยนแปลงไปตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยี โดยโฟมบรรจุอาหารเหล่านี้ส่วนใหญ่ผลิตจาก Polystyrene Paper Foam (PSP foam) ซึ่งเป็นวัสดุไม่สามารถย่อยสลายได้ การรีไซเคิลทำได้ยาก และยังเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งในมนุษย์หากนำโฟม PSP มาบรรจุอาหารที่ร้อนจัดและมีน้ำมันเป็นส่วนประกอบ จะทำให้โฟมเหล่านี้เกิดการสลายตัวให้สารสไตรีนออกมาปนเปื้อนในอาหารที่บรรจุในภาชนะโฟม ซึ่งสารสไตรีนนี้เป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งได้ [1] จากผลกระทบต่างๆ ของการใช้โฟม PSP ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ดังที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการพัฒนาโฟมชีวภาพที่ย่อยสลายได้โดยผลิตจากทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถทดแทนได้ (Renewable resources) นั่นคือ กลูเตนจากแป้งสาลี (wheat gluten) และแป้งสาลี (wheat starch) ซึ่งมีราคาถูก ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์

งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีจากวิธีการทำขนมปัง ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากและราคาไม่แพง โดยสังเกตว่าขนมปังนั้นทำจากแป้งสาลีที่สามารถขึ้นฟูได้คล้ายกับลักษณะของโฟม การทำขนมปังนั้นต้องมีการทำแป้งโด (dough) ก่อน โดยผสมแป้งสาลีกับน้ำแล้วนวดให้เข้ากัน กลูเตนซึ่งเป็นองค์ประกอบในแป้งสาลีมีบทบาทสำคัญต่อโครงสร้างของแป้งโด ซึ่งในระหว่างการนวดแป้ง สายโซ่ของกลูเตนจะถูกดึงยืดออกและเกิดการเกี่ยวพันทางกายภาพเป็นร่างแห (Net work) ทำให้แป้งโดมีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่น และสามารถกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตขึ้นโดยยีสต์ (yeast), ผงฟู (baking powder) หรือเบกกิ้งโซดา (โซเดียมไบคาร์บอเนต) ซึ่งทำให้ขนมปังรักษารูปร่างได้ดีหลังจากการอบ [2] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและ

แป้งสาลี โดยทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี อัตราส่วนระหว่างน้ำ และกลีเซอรอล ปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตซึ่งทำหน้าที่เป็นสารฟู (Blowing agent) และ ปริมาณบอแรกซ์ (Borax) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) ที่มีต่อสัญญาณวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำของโพนีชีวภาพที่ เตรียมได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาโพนีชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้ง สาลีและแป้งสาลี เพื่อใช้เป็นโพนีบรรจุอาหารที่ใช้เพียงครั้งเดียว เช่น ถาดโพนี เป็นต้น ซึ่งสามารถ ย่อยสลายได้โดยธรรมชาติและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมโพนีชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและ แป้งสาลี
2. เพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี อัตราส่วนของ พลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล ปริมาณสารฟู และปริมาณสารเชื่อมขวาง ที่มีต่อสัญญาณ วิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำของโพนี ชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. สามารถเตรียมโพนีชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี
2. สามารถศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี อัตราส่วน ของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล ปริมาณสารฟู และปริมาณสารเชื่อมขวาง ที่มีต่อ สัญญาณวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำ ของโพนีชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี อัตราส่วนระหว่างน้ำและกลีเซอรอล ปริมาณสารฟู และปริมาณสารเชื่อมขวาง ที่มีต่อสัญญาณวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำของโพนีชีวภาพที่ เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีเพื่อใช้ในการหาสูตรในการขึ้นรูป และศึกษาสมบัติของโพนีจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลี

1. ทำการศึกษาการเจลาตินซ์แป้งสาลีโดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำตอกลีเซอร์อล 30:30 30:35 และ 30:40 ต่อน้ำหนักของแป้งสาลี 100 กรัม
2. ทำการศึกษาอิทธิพลของสารฟู โดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) ปริมาณ 0 4 8 12 และ 16 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์
3. ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์ ที่อัตราส่วน 0:100 10:90 20:80 30:70 40:60 50:50 60:40 70:30 80:20 90:10 และ 100:0 โดยน้ำหนัก
4. ทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลีเซอร์อล ที่อัตราส่วน 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 โดยน้ำหนักของปริมาณพลาสติกไซเซอร์เท่ากับ 70 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์
5. ทำการศึกษาอิทธิพลของสารเชื่อมขวางโดยใช้บอแรกซ์ ปริมาณ 6% 8% 10% และ 12% ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์

1.5 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเบื้องต้น
2. รวบรวมข้อมูลที่สำคัญและสอดคล้องกับงานวิจัย
3. ออกแบบและวางแผนการสำหรับงานวิจัย
4. เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
5. ดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ศึกษาการเจลาตินซ์แป้งสาลี ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยา

ตอนที่ 2 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟู ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยา ความหนาแน่น และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์

ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์ ที่มีผลต่อสัณฐานวิทยา ความหนาแน่น และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์

ตอนที่ 4 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอ์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล ที่มีผลต่อสัญญาณวิทยา ความหนาแน่น และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ของโฟมชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

ตอนที่ 5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง มีผลต่อสัญญาณวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

6. วิเคราะห์ผลการวิจัย
7. สรุปผลการวิจัย
8. นำเสนองานวิจัย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากผลงานวิจัย

1. ทราบความสัมพันธ์ของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบในการผลิตโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพได้แก่ สมบัติทางกายภาพ สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ และการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพ

2. สามารถเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ได้

3. สามารถเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรมได้

4. สามารถนำกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีมาใช้ทดแทนกล่องโฟมที่ผลิตจากพอลิสไตรีนได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แป้ง (Starch) [3]

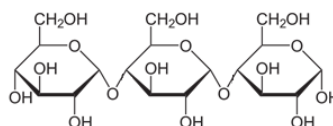
แป้งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบหลักคือคาร์บอน ไฮโดรเจน และ ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีสิ่งเจือปนอื่นเช่น ไขมัน โปรตีน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ใช้กันทั่วไปนั้นมักมีองค์ประกอบอื่นเจือปนมากซึ่งเรียกว่า ฟลาวัวร์ (flour) อาทิ แป้งข้าวโพด (corn flour), แป้งสาลี (wheat flour) และแป้งข้าวเจ้า (rice flour) ซึ่งฟลาวัวร์เหล่านี้มักมีปริมาณโปรตีนสูง แต่หากสกัดสิ่งเจือปนอันหมายถึง โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆ ออกไปจนเหลือแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงเรียกว่าแป้งสตาร์ช (starch) เช่น corn starch, wheat starch, cassava starch โดยแป้งสตาร์ช ซึ่งเป็นแป้งที่มีความบริสุทธิ์สูงและยังไม่ถูกทำการตัดแปรหรือแปรรูปมักเรียกว่า แป้งดิบ (raw starch หรือ native starch) ซึ่งแป้งที่ถูกตัดแปรแล้วจะเรียกว่าโมดิไฟด์สตาร์ช (modified starch)

2.1.1 องค์ประกอบภายในของเม็ดแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตซึ่งมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $(C_6H_{12}O_5)_n$ โดยแป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีกลูโคสเป็นหน่วยย่อยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) เชื่อมระหว่างกลูโคสบริเวณหมู่แอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่าปลายรีดิวซิง (reducing end group) ซึ่งแป้งมีองค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งประกอบด้วย อะไมโลส (amylose) และ อะไมโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินของแป้งแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกัน แสดงในตารางที่ 2.1

2.1.1.1 อะไมโลส (amylose)

อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก ชนิดแอลฟา-1,4 ($\alpha-1, 4$) ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างอะไมโลส [3]

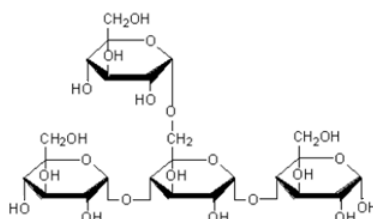
พืชแต่ละชนิดก็จะมีปริมาณอะไมโลสที่แตกต่างกันออกไป โดยแบ่งที่มาจากธัญพืช เช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวฟ่าง มีปริมาณอะไมโลสสูงประมาณ 28%โดยน้ำหนัก ส่วนแป้งที่ได้จากรากและหัวนั้นจะมีปริมาณอะไมโลสต่ำประมาณ 20%โดยน้ำหนัก เช่น แป้งมัน แป้งสาคุ และแป้งมันสำปะหลัง ส่วนแป้งข้าวเหนียว (waxy starch) นั้นจะไม่มีอะไมโลส น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 10^5 - 10^6 ดาลตัน โดยแป้งแต่ละชนิดจะมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ที่แตกต่างกันออกไป เช่น แป้งมันสำปะหลัง และแป้งมันฝรั่งนั้นมีน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 1,000–6,000 ดาลตัน ซึ่งสูงกว่าแป้งสาลี และแป้งข้าวโพด ที่มีน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสอยู่ในช่วง 200–1,200 ดาลตัน

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งแต่ละชนิด [3]

ชนิดของแป้ง	อะไมโลส (%น้ำหนักแห้ง)	อะไมโลเพกติน (%น้ำหนักแห้ง)	อัตราส่วนจำนวนโมเลกุล ของอะไมโลสต่ออะไมโล เพกติน
แป้งมันฝรั่ง	21	79	200
แป้งข้าวโพด	28	72	1,000
แป้งสาลี	28	72	1,000
แป้งมันสำปะหลัง	17	83	150
แป้งข้าวโพดเหนียว	0	100	0

2.1.1.2 อะไมโลเพกติน (amylopectin)

อะไมโลเพกติน เป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ซึ่งส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด α -1,6 ซึ่งมีลักษณะของสายโมเลกุลสั้นๆ และมีขนาดโมเลกุลอยู่ในช่วง 10–60 หน่วย โดยอะไมโลเพกติน มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะไมโลส หรือประมาณ 10^7 - 10^9 ดาลตัน และมีอัตราการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะไมโลเพกตินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างอะมิโลเพกติน [3]

2.1.1.3 ส่วนประกอบอื่นภายในเม็ดแป้ง

1. ไขมัน โดยส่วนใหญ่แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันน้อยกว่า 1%โดยน้ำหนัก ซึ่งไขมันภายในแป้งนั้นจะอยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้ง ประกอบไปด้วย ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) กลูโคลิพิด (glucolipids) ฟอสโฟลิพิด (phospholipids) และไขมันที่กระจายตัวอยู่ในเม็ดแป้ง ซึ่งไขมันที่รวมอยู่ในเม็ดแป้งนั้นจะส่งผลต่อสมบัติของเม็ดแป้ง เช่น ลดความสามารถในการพองตัว การละลาย และการจับตัวกับน้ำของเม็ดแป้ง นอกจากนี้ไขมันยังทำให้เกิดกลิ่นไม่พึงประสงค์เมื่อนำแป้งมาทำเป็นแป้งเปียก เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ซึ่งชนิดของไขมันนั้นส่งผลต่อคุณสมบัติของแป้ง และยังมีผลต่อความหนืดของแป้งอีกด้วย

2. ไนโตรเจน ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบของโปรตีน ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่า 1%โดยน้ำหนัก โดยโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณผิวของเม็ดแป้งทำให้อัตราการดูดซึมน้ำ การพองตัว และการเกิดเจลาคีโนสเปลี่ยนแปลงไป

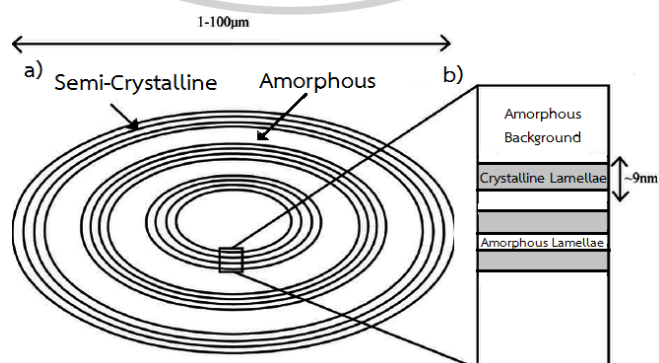
3. เถ้า โดยทั่วไปแป้งจะมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ต่างๆ เช่น โซเดียม โปแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ซึ่งเมื่อเผาแป้งที่อุณหภูมิสูงสารอนินทรีย์เหล่านี้จะเหลือเป็นเถ้าจากการเผาไหม้

4. ฟอสฟอรัส แป้งแต่ละชนิดจะมีฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ต่างกันออกไป โดยแป้งจากธัญพืชนั้นมีฟอสฟอรัสอยู่ในรูปฟอสโฟลิพิด ซึ่งมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.02-0.06% โดยน้ำหนัก ส่วนแป้งจากพืชหัวและรากนั้น ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของฟอสเฟต ซึ่งมีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่ในช่วง 0.3-0.4%โดยน้ำหนัก

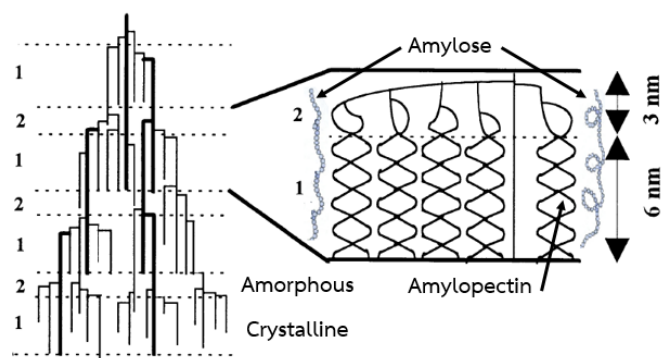
2.1.2 โครงสร้างของเม็ดแป้ง [4-6]

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยภายในเม็ดแป้งจะมีลักษณะที่เป็นวงแหวนแบ่งออกเป็นชั้นๆ ประกอบไปด้วย โครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) และโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semi-Crystalline) โดยโครงสร้างแบบกึ่งผลึกจะแบ่งเป็นชั้นย่อยๆ ได้แก่

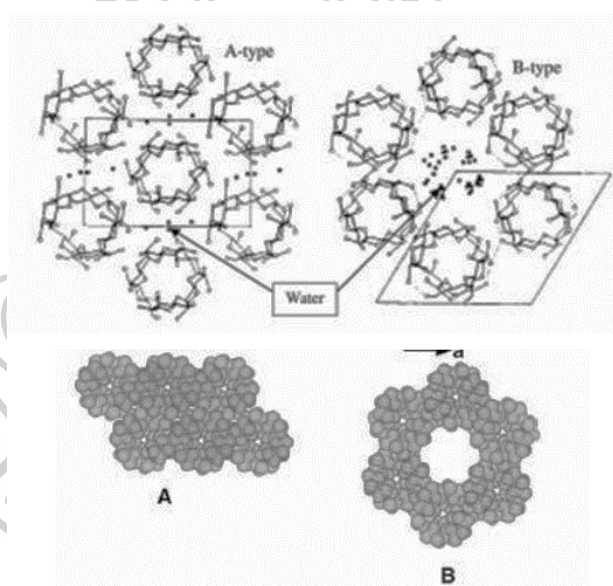
ชั้นโครงสร้างแบบผลึก (Crystalline), ชั้นโครงสร้างแบบอสัณฐาน และชั้นโครงสร้างแบบอสัณฐาน
 ชั้นในสุด (Amorphous Background) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.3 โดยโครงสร้างแบบผลึก และโครงสร้าง
 แบบอสัณฐาน เกิดจากการจัดเรียงตัวกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน โดยอะไมโลสจะอยู่
 อย่างอิสระกระจายตัวอยู่ในเม็ดแป้ง และอะไมโลเพกตินจะอยู่กันแบบร่างแห ซึ่งทั้งสายโซ่ของ
 อะไมโลสและอะไมโลเพกตินมีลักษณะเป็นเกลียวม้วนคู่ (Double Helices) แสดงดังภาพที่ 2.4
 จากโครงสร้างความเป็นผลึกที่กล่าวมานั้นสามารถแบ่งโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งเป็น 3 แบบ
 โดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวม้วนคู่ ถ้าเกิดการจัดเรียงตัวหนาแน่นมาก
 มีการจัดเรียงตัวของเกลียวม้วนคู่แบบโครงสร้างหกชั้น (six-fold structures) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.4a
 จะเกิดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ A พบในแป้งจากธัญพืชต่างๆ ถ้าเกิดการเรียงตัวของเกลียวม้วนคู่แบบ
 หลวมๆ มีการจัดเรียงตัวของเกลียวม้วนคู่แบบโครงสร้างหกเหลี่ยม (hexagonal) ซึ่งบริเวณกลาง
 หกเหลี่ยมเป็นที่อยู่ของโมเลกุลน้ำ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.5b โดยจะเกิดโครงสร้างผลึกแบบ B พบใน
 แป้งจากพืชหัว และถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นโครงสร้างผลึกแบบ C พบใน
 แป้งจากพืชตระกูลถั่ว เมื่อตรวจสอบชนิดโครงสร้างของเม็ดแป้งด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมกว้าง
 (Wide Angle X-ray Diffraction, WAXS) พบว่าแป้งที่มีโครงสร้างผลึกต่างกันจะให้รูปแบบของ
 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.6 โดยแป้งที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A
 จะปรากฏพิกที่มุม 2θ ที่ 17° และ 17.9° แต่จะไม่ปรากฏพิกที่มุม 2θ ที่ 5.6° แป้งที่มีโครงสร้างผลึก
 แบบ B จะปรากฏพิกที่มุม 2θ ที่ 5.6° และ 17.2° แต่ไม่พบพิกที่มุม 17.9° และสุดท้ายแป้งที่มี
 โครงสร้างผลึกแบบ C จะให้ลักษณะร่วมกันระหว่างผลึกแบบ A และ B ซึ่งจะปรากฏพิกที่มุม 2θ ที่
 5.6° และ 17.9° แต่พืชบางชนิดอาจมีลักษณะของผลึกมากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลัง
 ซึ่งสามารถตรวจพบลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเม็ดแป้ง (a) เม็ดแป้งประกอบไปด้วยวงแหวนซึ่งแสดงถึงบริเวณที่เป็น
 Amorphous และ Semi-Crystalline (b) โครงสร้างบริเวณ Semi-Crystalline [7]



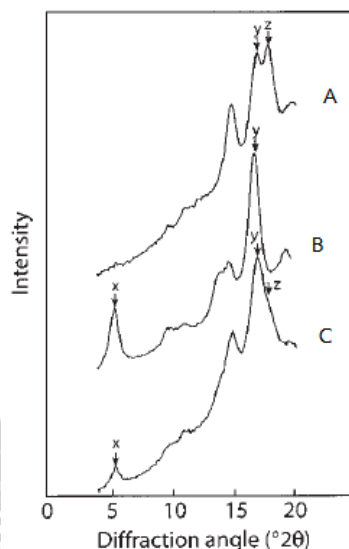
ภาพที่ 2.4 การจัดเรียงตัวกันของอะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่มีลักษณะเป็นเกลียวม้วนคู่ (Double Helices) ส่งผลให้เกิดโครงสร้างแบบผลึก และโครงสร้างแบบอสัณฐาน [8]



ภาพที่ 2.5 ลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวม้วนคู่ (Double Helices) ที่ส่งผลให้เกิดโครงสร้างผลึกแบบ A และโครงสร้างผลึกแบบ B [9]

นอกจากนี้แป้งแต่ละชนิดมีปริมาณผลึกที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยแป้งที่ได้จากส่วนของรากหรือหัวจะมีโครงสร้างแบบผลึกประมาณ 25-50% ของน้ำหนัก โดยอะไมโลเพกตินจะมีโครงสร้างบางส่วนเป็นผลึกและอะไมโลสจะอยู่ในส่วนของอสัณฐาน สำหรับแป้งจากธัญพืช อะไมโลเพกตินจะรวมตัวกันเป็นผลึก ในขณะที่อะไมโลสจะรวมตัวกับไขมันเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

ของอะไมโลสและไขมัน เกิดเป็นโครงสร้างผลึกอย่างอ่อนที่ไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งจากธัญพืชของตัวได้ซ้ำ



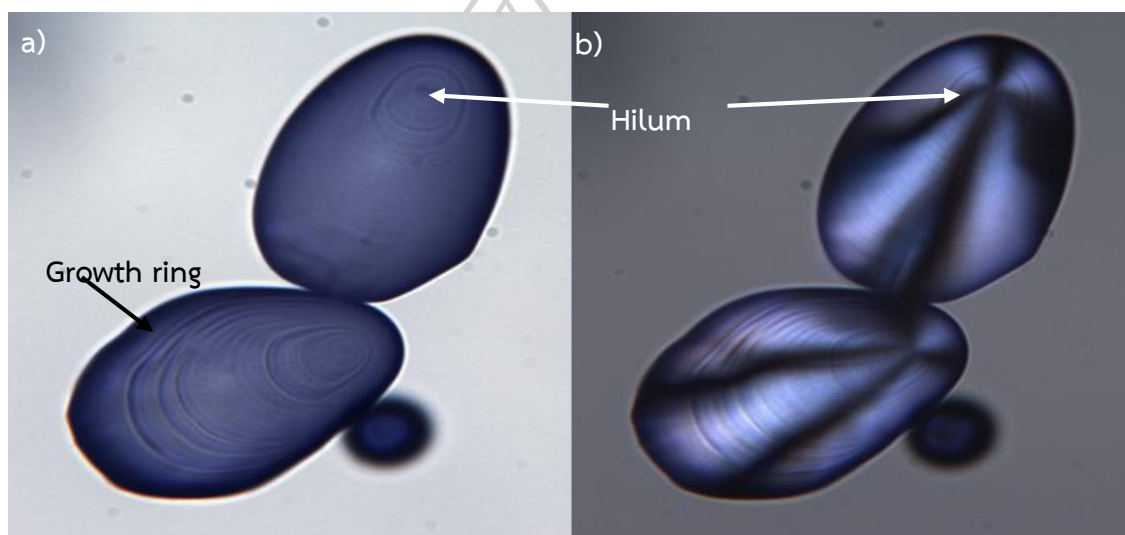
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างผลึกที่แตกต่างกันของเม็ดแป้งด้วยเทคนิค x-ray diffraction (A) แป้งที่มีผลึกแบบ A เช่น แป้งข้าวโพด, (B) แป้งที่มีผลึกแบบ B เช่น แป้งมันฝรั่ง และ (C) แป้งที่มีผลึกแบบ C เช่น แป้งถั่ว [10]

ตารางที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างและปริมาณผลึกของแป้งแต่ละชนิด [11]

ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)	ชนิดแป้ง	ความเป็นผลึก (%)
<u>โครงสร้างผลึกแบบ A</u>		<u>โครงสร้างผลึกแบบ B</u>	
ข้าวโอ๊ต	33	Amylomaize	15-22
ข้าวสาลี	36	สาคุ	26
ข้าวเหนียว	37	มันฝรั่ง	28
ข้าวฟ่าง	37	<u>โครงสร้างผลึกแบบ C</u>	
ข้าวเจ้า	38	มันเทศ	38
ข้าวโพด	40	มันสำปะหลัง	38

การศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของเม็ดแป้งจะใช้แสงที่มีระนาบเดียวเรียกว่าแสงโพลาไรซ์ ซึ่งโดยปกติแล้วแสงจะมีระนาบรอบทิศทาง จากนั้นจะใช้แสงโพลาไรซ์ส่องผ่านมายังเม็ดแป้ง ซึ่งโครงสร้างความเป็นผลึกของเม็ดแป้งจะส่งผลให้เม็ดแป้งมีสมบัติการเบี่ยงเบนระนาบแสง เกิดเงากาบาท เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) โดยจุดตัดของ

กากบาทคือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (Hilum) เม็ดแป้งซึ่งประกอบด้วยอะไมโลสและอะไมโลเพกตินจะเรียงตัวกันในแนวตั้งฉากกับผิวของเม็ดแป้ง โดยพื้นที่ที่มีตภายในเม็ดแป้งแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งเฉลี่ยของสายโซ่พอลิเมอร์ เนื่องจากโครงสร้างแบบผลึกซึ่งมีสายโซ่พอลิเมอร์อยู่กันอย่างเป็นระเบียบสามารถเบี่ยงเบนระนาบแสงได้ ดังนั้นเมื่อเม็ดแป้งอยู่ในลักษณะที่ตั้งฉากกับระนาบแสงโพลาไรซ์ แสงโพลาไรซ์ไม่สามารถทะลุผ่านมาได้จึงเกิดเป็นพื้นที่มืดภายในเม็ดแป้ง แต่เนื่องจากพื้นผิวของเม็ดแป้งเป็นเส้นโค้ง ดังนั้นจะมีสายพอลิเมอร์บางสายโซ่ที่ไม่อยู่ในลักษณะที่ตั้งฉากกับระนาบแสงโพลาไรซ์ ทำให้สามารถบิตระนาบแสงโพลาไรซ์และเห็นการส่องสว่างของแสงผ่านได้ดังแสดงในภาพที่ 2.7 หรือในบางครั้งอาจเกิดลักษณะคล้ายสีรุ้ง



ภาพที่ 2.7 เม็ดแป้ง a) ส่องผ่านแสงธรรมดา และ b) ส่องผ่านแสงโพลาไรซ์ [12]

2.1.3 คุณสมบัติของแป้ง

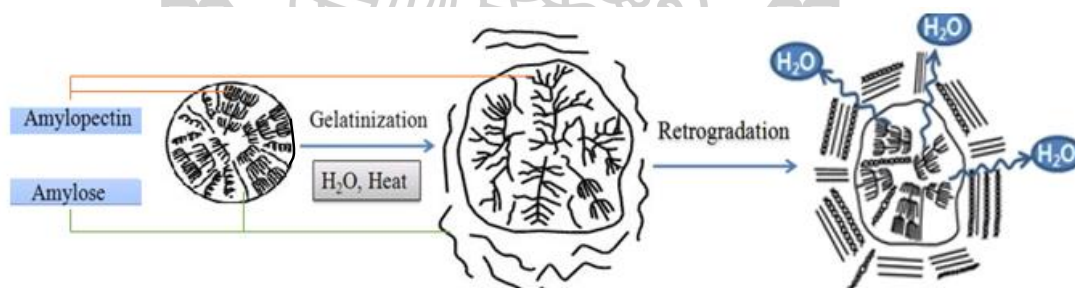
2.1.3.1 การดูดซึมน้ำ การพองตัวและการละลาย

แป้งดิบไม่สามารถละลายน้ำได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ เพราะแป้งดิบมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลนั้นทำให้เกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้เคียงกัน และเมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งดิบนั้น เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัวและบางส่วนจะละลายออกมา โดยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแป้งดิบให้สูงกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาติไนซ์ พันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลแป้งจะถูกทำลายลง จากนั้นโมเลกุลของน้ำซึ่งมีพันธะไฮโดรเจนจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้ง เม็ดแป้งจึงเกิดการพองตัว ทำให้แป้งละลายในน้ำ ให้ความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น คุณสมบัติของการบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ (birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป

เนื่องจากการให้อุณหภูมิของน้ำแป้งดิบสูงกว่าช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลลาคีไนซ์จะไปทำลายโครงสร้างความเป็นผลึก โดยปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัวของเม็ดแป้ง และความสามารถในการละลายคือ ชนิดของแป้ง ลักษณะความเป็นผลึกของเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง และการตัดแปรแป้งทางเคมี

2.1.3.2 การเกิดเจลลาคีไนเซชัน (Gelatinization)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งมีลักษณะความเป็นผลึก ดังนั้นการจัดเรียงตัวลักษณะนี้จะทำให้เม็ดแป้งละลายน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำแล้วพองตัว ดังแสดงในภาพที่ 2.8 ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การเกิดเจลลาคีไนเซชัน โดยอุณหภูมิที่สารละลายเริ่มมีความหนืดเพิ่มขึ้นเรียกว่า อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาคีไนซ์ หรืออาจเรียกได้อีกอย่างว่าอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด ซึ่งการเกิดเจลลาคีไนซ์ของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาคีไนซ์ที่แตกต่างกันซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3 ยกตัวอย่าง แป้งจากพืชหัว เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งมันฝรั่งจะมีอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาคีไนซ์ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลลาคีไนซ์จากแป้งธัญพืช



ภาพที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งในน้ำแป้งดิบขณะให้ความร้อนและการเกิดรีโทรเกรดชัน [13]

การเกิดเจลลาคีไนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะ แสดงดังภาพที่ 2.9 คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากอะไมโลเพกตินที่อยู่กันแบบร่างแหมีความยืดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่าง และเกิดการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ได้ (birefringence) เมื่อใส่สารเคมี

หรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65°C โดยอุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว อะไมโลเพกตินที่อยู่กันแบบร่างแหภายในเม็ดแป้งจะอยู่กันแบบหลวมๆ ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.8 เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามาก และเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้ เรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างและแสงโพลาไรซ์สามารถส่องผ่านได้เนื่องจากสูญเสียโครงสร้างแบบผลึก ความหนืดของสารละลายแป้งเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าแยกส่วนใส่ออกแล้วตรวจสอบแป้งในสารละลายส่วนใส โดยหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินขึ้น เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้นรวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

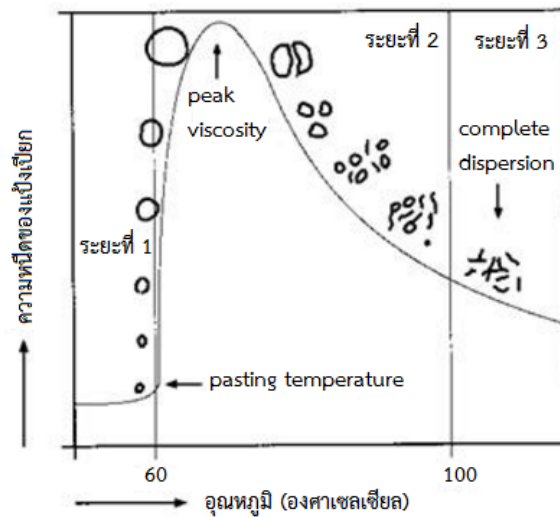
ตารางที่ 2.3 อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งแต่ละชนิด [11]

ชนิดแป้ง	อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ ($^{\circ}\text{C}$)	ชนิดแป้ง	อุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ ($^{\circ}\text{C}$)
<u>โครงสร้างผลึกแบบ A</u>		<u>โครงสร้างผลึกแบบ B</u>	
ข้าวโอ๊ต	60.7	Amylomaize	86
ข้าวสาลี	63.5	สาคุ	70.5
ข้าวเหนียว	64.5	มันฝรั่ง	67.3
ข้าวฟ่าง	72.2	<u>โครงสร้างผลึกแบบ C</u>	
ข้าวเจ้า	70.0	มันเทศ	70
ข้าวโพด	71.3	มันสำปะหลัง	66

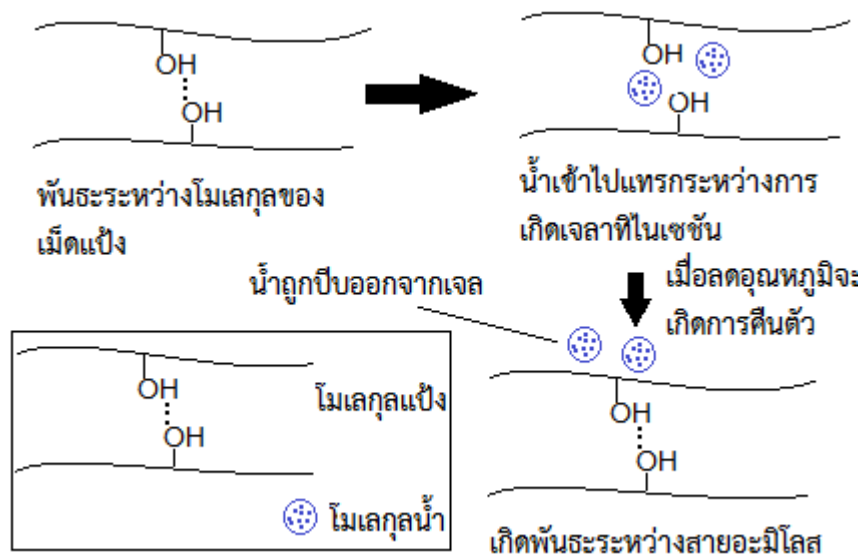
2.1.3.3 การเกิดรีโทรเกรดชัน (Retrogradation)

เมื่อให้ความร้อนแก่น้ำแป้งดิบจนเกิดเจลาติไนเซชันจากนั้นให้ความร้อนต่อไปเรื่อยๆ จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่พองตัวเต็มที่แล้วเม็ดแป้งจะแตกออก จากนั้นโมเลกุลของอะไมโลสขนาดเล็กจะกระจัดกระจายออกมาจึงทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของอะไมโลสที่กระจัดกระจายอยู่นั้นจะเกิดการจัดเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของโมเลกุลอะไมโลสที่อยู่ใกล้กัน โดยโครงสร้างใหม่สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำ

เข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรไกลเดชันหรือการคืนตัว [14] เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมาจนเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 2.8 และภาพที่ 2.10

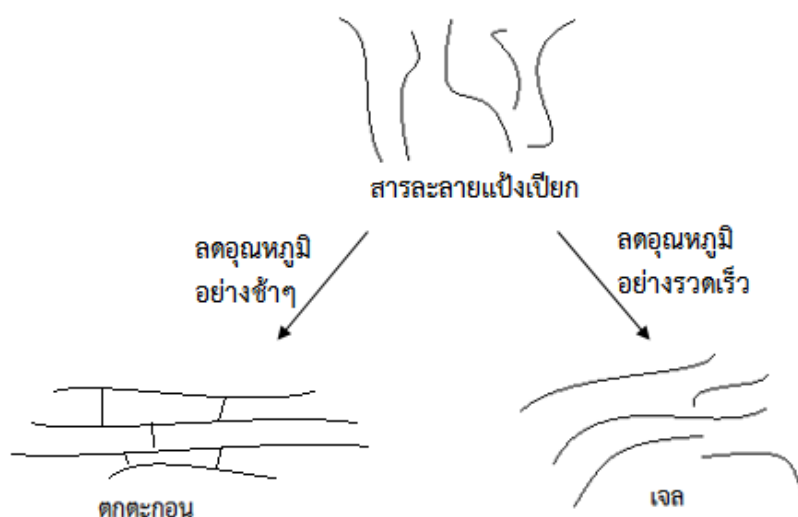


ภาพที่ 2.9 ระยะเวลาต่างๆ ในการเกิดเจลลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง [15]



ภาพที่ 2.10 การเกิดรีโทรไกลเดชัน [16]

การคืบตัวของน้ำแป้งเปียกจะทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น โดยการคืบตัวนั้นจะทำให้ น้ำแป้งเปียกมีลักษณะขาวขุ่นและทึบแสง ซึ่งการคืบตัวของโมเลกุลแป้งนั้น น้ำจะถูกบีบออกมาออก เจล โดยการคืบตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้าๆ จะเกิดการตกตะกอน หากเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขาวขุ่น กลไกการคืบตัวของแป้งแสดงดังภาพที่ 2.11



ภาพที่ 2.11 กลไกการคืบตัวของแป้ง

การคืบตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบสของ สารละลาย ปริมาณและขนาดของอะไมโลส อะไมโลเพกติน และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ ในแป้ง โดยสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืบตัวดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืบตัวได้เร็วสุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืบตัวได้ช้าลง ในการชะลอ การคืบแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก เช่น แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย [17]

แป้งที่มีปริมาณอะไมโลสสูงจะเกิดการคืบตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณ อะไมโลเพกตินสูง ซึ่งอัตราในการคืบตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำสุด) เมื่อขนาดของโมเลกุล (degree of polymerization) ของอะไมโลสเท่ากับ 100-200 โดยการทำให้อะไมโลสที่คืบตัว กลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิในช่วง 100-160°C ส่วนอะไมโลเพกติน จะมีผลทำให้เกิดการคืบตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืบตัวที่แตกต่างกัน โดยแป้งสาลีและ แป้งข้าวโพดจะมีอัตราการคืบตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในแป้งธัญพืชมี

ปริมาณอะไมโลสสูง (ประมาณ 28%) ในแป้งข้าวโพดเหนียวจะมีอัตราการคืนตัวของแป้งต่ำที่สุด เนื่องจากไม่มีอะไมโลสในแป้งข้าวโพดเหนียว

2.1.4 แป้งสาลี (Wheat starch)

2.1.4.1 ลักษณะของเม็ดแป้งสาลี

เม็ดแป้งสาลี มีลักษณะเม็ดแป้ง 2 แบบผสมกันอยู่คือ แบบ A มีขนาด 10-30 ไมครอน ลักษณะของเม็ดแป้งแบบ A จะมีรูปร่างโค้งงูนูน และแบบ B มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน ซึ่งลักษณะของเม็ดแป้งแบบ B จะมีรูปร่างกลม โดยเม็ดแป้งแบบ B มีจำนวนมากกว่าเม็ดแป้งแบบ A ประมาณ 95% ของจำนวนเม็ดแป้งทั้งหมด โดยลักษณะภายในของเม็ดแป้งนั้นประกอบด้วยวงแหวนที่เรียกว่า Growth ring ซึ่งสังเกตได้จากการส่องกล้องจุลทรรศน์ (Optical Microscopy (OM)) โดยเม็ดแป้งที่เปียกและสดจะสังเกตเห็น Growth ring ได้ง่าย ส่วนในแป้งที่แห้งจะไม่พบ Growth ring โดยโครงสร้างของ Growth ring นั้นแสดงถึงลักษณะ การเจริญของเม็ดแป้งโดยเนื้อเยื่อชั้นแรกเจริญมาจากศูนย์กลางของเม็ดแป้ง (hilum) [5] โดยถ้าส่องด้วยแสงโพลาไรซ์ จะมองเห็นวงแหวนและไฮลัม (hilum) เป็นเครื่องหมายกากบาทสีดำชัดเจน โดยจุดตัดของกากบาทจะเป็นตำแหน่งของไฮลัม ซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่าการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ และบริเวณอื่นจะเห็นเป็นแสงสว่างวาว ซึ่งเป็นสิ่งยืนยันถึงลักษณะที่โมเลกุลของแป้งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ [4] ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.7

2.1.4.2 ประเภทของแป้งสาลี [18]

1. แป้งขนมปัง (Bread Flour) มีความเหนียวสูง เป็นแป้งที่มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนสูง 12-14.5% ไม่จากข้าวสาลีชนิดเปลือกแข็ง (Dark Northern Spring หรือ Hard Red Winter) ถ้านำแป้งชนิดนี้มีปริมาณกลูเตนตั้งแต่ 36-42% แป้งชนิดนี้ดูดซึมน้ำได้มากกว่าแป้งชนิดอื่น แป้งชนิดนี้ใช้ทำพวกขนมปังทุกชนิด ขนมปังหวาน ขนมปังแซนวิช ขนมปังเปลือกแข็งและขนมที่ใช้ยีสต์ทุกชนิด โดยลักษณะของแป้งขนมปัง เนื้อแป้งจะหยาบเมื่อถูด้วยนิ้วมือทั้งสองนิ้วจะรู้สึกคล้ายกรวดเล็กๆ สีของแป้งจะออกเป็นสีครีม เมื่อใช้ฝ่ามือบีบจะไม่รวมกันเป็นก้อนง่าย ซึ่งจะใช้สารที่ทำให้เกิดการฟูของแป้ง คือยีสต์เท่านั้น

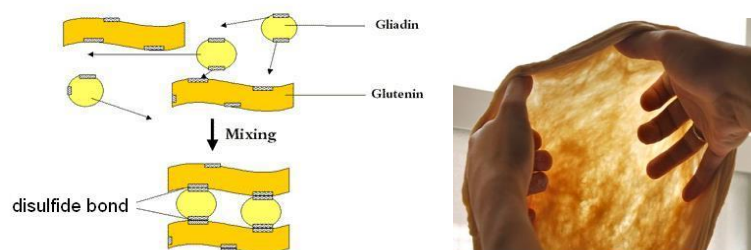
2. แป้งอเนกประสงค์ (All-purpose Flour) เป็นแป้งที่มีโปรตีนสูงปานกลาง อยู่ระหว่าง 9-11% เป็นแป้งที่ได้จากการผสมข้าวสาลีชนิดแข็งกับชนิดอ่อนเข้าด้วยกัน ในอัตราส่วนที่เหมาะสม แป้งชนิดนี้ใช้ในการทำขนมหลายๆ ชนิด เช่น ขนมปังจืด ขนมปังหวาน ขนมเค้กบางชนิด ปาท่องโก๋

บะหมี่ ถ้าใช้ทำขนมปังเวลาที่ใช้ในการนวดแป้งจะน้อยกว่าทำจากแป้งขนมปังโดยตรง นอกจากนี้ยังใช้ทำขนมไทยได้ เช่น ขนมอาลัว ขนมดอกจอก ครอบแครง กรอบเค็ม โดยลักษณะของแป้งชนิดนี้ มีคุณสมบัติทั้งของแป้งเค้กและแป้งขนมปังรวมกัน ซึ่งจะใช้สารที่ทำให้เกิดการฟูของแป้ง คือ ยีสต์หรือสารเคมีอื่นๆ เช่น ผงฟู หรือเบกกิ้งโซดา

3. แป้งเค้ก (Cake Flour) เป็นแป้งที่มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนต่ำ ประมาณ 7-8% ไม่จากข้าวสาลีชนิดเปลือกอ่อน คือ พวก U.S. Western White, Soft Red และ Winter White โดยแป้งเค้กแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ชนิดโลเรโซ (Low ratio) เป็นแป้งเค้กชนิดธรรมดา มีความขาวกว่า 2 ชนิดข้างต้น โดยแป้งชนิด Low ratio เหมาะสำหรับทำขนม ซาลาเปา สปันจ์เค้ก บิสกิตหรือขนมไทยเช่น สาลี ปุยฝ้าย กลีบลำตวน และขนมหน้าทวน ชนิดที่สองคือ แป้งเค้กชนิดไฮเรโซ (High ratio) เป็นแป้งชนิดพิเศษที่มีการปรับคุณภาพเพื่อให้ดูดซึมน้ำและน้ำตาล ได้มากกว่าปกติเพื่อให้ได้เนื้อเค้กที่ฟูเบา เนื้อละเอียด ไม่ยุบตัว เหมาะกับการทำเค้กชนิดที่มีปริมาณน้ำตาลในสูตรมากเช่น บัตเตอร์เค้ก ชิฟฟอนเค้ก ซึ่งลักษณะของแป้งชนิดนี้ เนื้อแป้งจะเนียนละเอียด เมื่อบีบแป้งเข้าด้วยกัน จะมีลักษณะเป็นก้อนได้ง่าย สีของแป้งจะขาวกว่าแป้งขนมปังและแป้งเอนกประสงค์ ตัวที่ช่วยให้ฟู ใช้ได้ทั้งผงฟูและเบกกิ้งโซดา

2.2 กลูเตน (Gluten) [19-24]

กลูเตน เป็นโปรตีนชนิดหนึ่งที่พบในเอนโดสเปิร์มของธัญพืช (Cereal grain) บางชนิด เช่น ข้าวสาลี (wheat) ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด โดยกลูเตนนั้นเกิดจากการรวมตัวกันของโปรตีนกลูเตนิน (glutenin) และไกลอะดลิน (gliadin) ในอัตราส่วนเท่าๆ กันซึ่งจะมี cysteine residues โดยมีหมู่ sulfhydryl (-SH) อิสระ ที่จะสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) เชื่อมระหว่างสายโซ่ peptide ทำให้กลูเตนมีลักษณะเหนียว ยืดหยุ่น และไม่ละลายน้ำ แสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงการยึดกันของโปรตีนไกลอะดลิน และกลูเตนิน ด้วยพันธะไดซัลไฟด์ เกิดเป็นกลูเตนที่เหนียวและยืดหยุ่น [21]

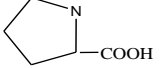
โปรตีนกลูเตนมีโครงสร้างแบบจตุรภูมิ (quaternary structure) ซึ่งประกอบด้วย monomeric gliadin ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 30,000-60,000 ดาลตัน และ Polymeric Glutenin ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลในช่วงประมาณ 80,000 ไปจนถึงหลายๆ ล้านดาลตัน ซึ่งกลูเตนมีสัดส่วนของ monomeric gliadin และ Polymeric Glutenin อย่างละครึ่ง

Gliadin จะมีโครงสร้างที่แตกต่างกัน คือ แบบ α/β -type, γ -type และ ω -type มีจำนวน cysteine residues อยู่ในโครงสร้างของ gliadin ซึ่งแบบ α -type (มี cysteine residues อยู่ 6 ตัว) และ γ -type (มี cysteine residues อยู่ 8 ตัว) ส่วน gliadin แบบ ω -type จะไม่มี cysteine residues อยู่และมีปริมาณของกรดอะมิโนชนิด methionine ที่ต่ำมาก ทำให้ gliadin สามารถแยกออกได้ง่ายโดยใช้สารละลายแอลกอฮอล์ โดย gliadin มีสมบัติที่ยึดออกได้ดี เนื่องจากมีพอลิเปปไทด์ตั้งแต่สองสายขึ้นไปมาเชื่อมกันด้วยพันธะ intramolecular disulfide bonds (S-S) ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างกรดอะมิโนชนิด cysteine สองตัวที่อยู่เชื่อมระหว่างสายโซ่ในโครงสร้าง

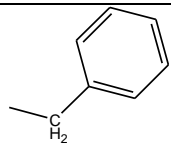
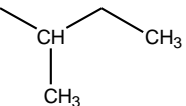
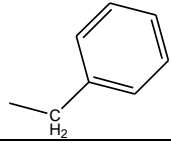
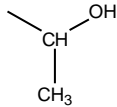
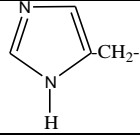
Glutenin (Glutenin subunits : GS) แบ่งออกเป็น 2 หน่วยย่อย คือ หน่วยย่อยของ Glutenin ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (High molecular weight Glutenin subunits : HMW-GS) และ หน่วยย่อยของ Glutenin ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (low molecular weight Glutenin subunits : LMW-GS) โดย Glutenin ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ไม่สามารถละลายได้ในสารละลาย alcohol 70% และมีสมบัติการยึดออกได้ยาก แต่สามารถหดรัดตัวได้ดีเนื่องจากมีพอลิเปปไทด์ตั้งแต่สองสายขึ้นไปมาเชื่อมกันด้วยพันธะ intermolecular disulfide bonds ซึ่งเกิดจากการสร้างพันธะระหว่างกรดอะมิโนชนิด cysteine สองตัวที่อยู่ในสายโซ่เดียวกันและมีพันธะ intramolecular disulfide bonds (S-S) เชื่อมระหว่างสายโซ่ในโครงสร้าง

โดยกลูเตนจากข้าวสาลีประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.4 และคุณสมบัติที่สำคัญของโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในกลูเตนได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ปริมาณกรดอะมิโนในกลูเตนจากข้าวสาลี [23]

Type of amino acid	Amino Acid	mol %	Side Chain
Non-polar	Proline	13.3%	
	Leucine	6.9%	$-\text{CH}_2-\text{CH}-(\text{CH}_3)_2$

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ปริมาณกรดอะมิโนในกลูเตนจากข้าวสาลี [23]

Type of amino acid	Amino Acid	mol %	Side Chain
Non-polar	Phenylalanine	3.7%	
	Valine	4.7%	-CH-(CH ₃) ₂
	Isoleucine	3.8%	
	Glycine	6.4%	-H
	Alanine	3.9%	-CH ₃
	Cysteine	2.7%	-CH ₂ -SH
	Methionine	2.2%	-(CH ₂) ₂ -S-CH ₃
	Phenylalanine	3.7%	
Polar	Serine	5.5%	-CH ₂ -OH
	Threonine	2.7%	
Basic residues	Arginine	2.3%	-(CH ₂) ₃ -NH-C(NH ₂) ₂
	Histidine	1.8%	
	Lysine	1.5%	-(CH ₂) ₄ -NH ₂
Acidic residues	Glutamine/Glutamic Acid	35.3%	- (CH ₂) ₂ -CONH ₂ - (CH ₂) ₂ -COOH
	Asparagine/Aspartic Acid	3.3%	-CH ₂ -CONH ₂ -CH ₂ -COOH

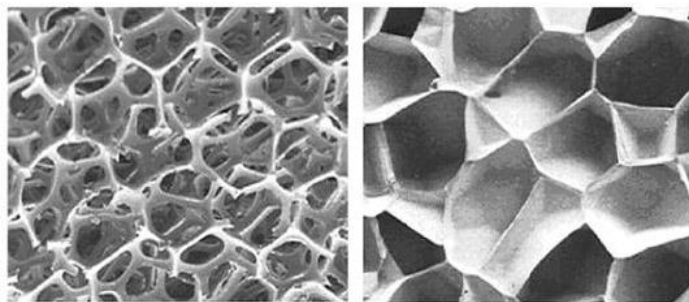
ตารางที่ 2.5 สมบัติของ gliadin และ glutenin [22]

Gliadin	Glutenin
Highly extensible	Less extensible
Less elastic	Highly elastic
Soluble in alcohols	Insoluble in alcohol
Low molecular weight (less than 100,000)	High molecular weight (greater than 100,000)
Intramolecular bonds	Intra and intermolecular bonds

2.3 พอลิเมอร์โฟม

พอลิเมอร์โฟม [25] เป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากพอลิเมอร์โฟมนั้นจะประกอบด้วย วัฏภาคของแก๊ส และวัฏภาคของพอลิเมอร์ ซึ่งวัฏภาคของแก๊สนั้นจะกระจายตัวอยู่ในวัฏภาคของพอลิเมอร์ โดยวัฏภาคของพอลิเมอร์จะเป็นวัฏภาคหลัก และมีวัฏภาคของแก๊สกระจายตัวอยู่ในทุกช่องว่าง ซึ่งช่องว่างเหล่านี้จะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าเซลล์โฟม นอกจากนี้จะมีวัฏภาคของแก๊ส และวัฏภาคของพอลิเมอร์แล้วอาจมีวัฏภาคของของแข็งอื่นในโฟมพอลิเมอร์ เพื่อช่วยเพิ่มคุณสมบัติแก่โฟมพอลิเมอร์ เช่น สารเติมแต่ง เส้นใย หรือสารอนินทรีย์ เป็นต้น

การแบ่งลักษณะของโฟมนั้นจะแบ่งตามโครงสร้างของเซลล์โฟมซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะนั้นคือ เซลล์โฟมที่มีโครงสร้างแบบเปิด (Open cell) และเซลล์โฟมที่มีโครงสร้างแบบปิด (Closed cell) แสดงในภาพที่ 2.13 ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าโครงสร้างแบบเปิดของโฟมนั้นในแต่ละเซลล์จะเชื่อมถึงกันหมด โดยวัฏภาคของแก๊สที่อยู่ภายในคืออากาศ ส่วนเซลล์โฟมที่มีโครงสร้างแบบปิดนั้นเซลล์โฟมแต่ละเซลล์จะแยกออกจากกันด้วยผนังเซลล์ (membrane) ที่เป็นเนื้อพอลิเมอร์ซึ่งชนิดของแก๊สที่อยู่ภายในเซลล์แต่ละเซลล์นั้นจะขึ้นกับสาร Blowing agent ที่ได้ทำการเติมขณะทำการผสม ซึ่งการนำไปใช้งานของโฟมนั้นจะเลือกโครงสร้างของเซลล์โฟม เนื่องจากโครงสร้างของเซลล์โฟมเป็นตัวกำหนดสมบัติต่างๆของโฟม



ภาพที่ 2.13 โครงสร้างแบบเปิด (Open cell) และเซลล์โฟมที่มีโครงสร้างแบบปิด (Closed cell) [26]

2.3.1 กระบวนการการเกิดโฟม [26]

กระบวนการเกิดโฟมพอลิเมอร์นั้นจะประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการเกิดแก๊สซึ่งขั้นตอนนี้ต้องอาศัยสาร Blowing agent เพื่อทำให้เกิดฟองแก๊สเกิดขึ้นในวัฏภาคพอลิเมอร์ หรือการอัดแก๊สเข้าไปในวัฏภาคพอลิเมอร์โดยตรง จากนั้นจะเป็นขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊สและสุดท้ายเป็นขั้นตอนการเสถียรของฟองแก๊ส ซึ่งขั้นตอนนี้วัฏภาคพอลิเมอร์จะเปลี่ยนสถานะจากของไหลเป็นของแข็งในระหว่างการขึ้นรูป

2.3.1.1 ขั้นตอนการเกิดฟองแก๊ส

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกที่ Blowing agent จะปลดปล่อยแก๊ส หรือเป็นขั้นตอนแรกที่อัดแก๊สเข้าไปในพอลิเมอร์ ในขณะที่พอลิเมอร์เป็นของไหลทำให้เกิดฟองแก๊สในวัฏภาคพอลิเมอร์ หลอมเหลว ในบางครั้งจะมีการเติม nucleating agent เช่น talc หรือ silica จะช่วยควบคุมจำนวนและขนาดของเซลล์ ซึ่งจะทำให้จำนวนเซลล์มากขึ้น และขนาดของเซลล์จะไม่ใหญ่เกินไปสำหรับโฟมพอลิเมอร์ที่มีความหนาแน่นต่ำ [26]

การเกิดฟองแก๊สนั้นจะมีค่าพลังงานค่าหนึ่ง (free energy หรือ ΔF) ของระบบ ซึ่งค่าของพลังงานนี้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยตามซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.1

$$\Delta F = \gamma A \quad (2.1)$$

เมื่อ γ คือค่าแรงตึงผิวและ A คือพื้นที่ผิวสัมผัสกับแก๊สทั้งหมด ซึ่งเมื่อสังเกตจากสมการพบว่าการลดค่าแรงตึงผิว ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อน หรือเติมสารลดแรงตึงผิว จะทำให้ค่า free energy เพิ่มขึ้น การกระจายตัวของแก๊สลดลง ส่งผลให้เกิดเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ขึ้น นั้นแสดงถึงค่า A ที่เพิ่มขึ้น

2.3.1.2 ขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊ส

ขั้นตอนการเติบโตของฟองแก๊สนั้นจะเกิดขึ้นหลังจากการเกิดฟองแก๊สเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นความดันของพอลิเมอร์หลอมเหลวลดลง โดยแก๊สที่อยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวจะแพร่ผ่านเข้าสู่ฟองแก๊สทำให้ฟองแก๊สเริ่มขยายตัว เริ่มแรกฟองแก๊สที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นทรงกลมจากนั้นฟองแก๊สจะขยายตัว เนื่องจากค่าความแตกต่างของความดัน (ΔP) ระหว่างภายนอกและภายในของฟองแก๊ส โดยที่สภาวะสมดุลนั้นค่าความแตกต่างของความดัน (ΔP) ระหว่างภายนอกและภายในของฟองแก๊ส ค่าแรงตึงผิว (γ) และรัศมีของฟองแก๊ส (r) ของฟองแก๊สจะมีความสัมพันธ์กันซึ่งแสดงดังสมการ 2.2

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (2.2)$$

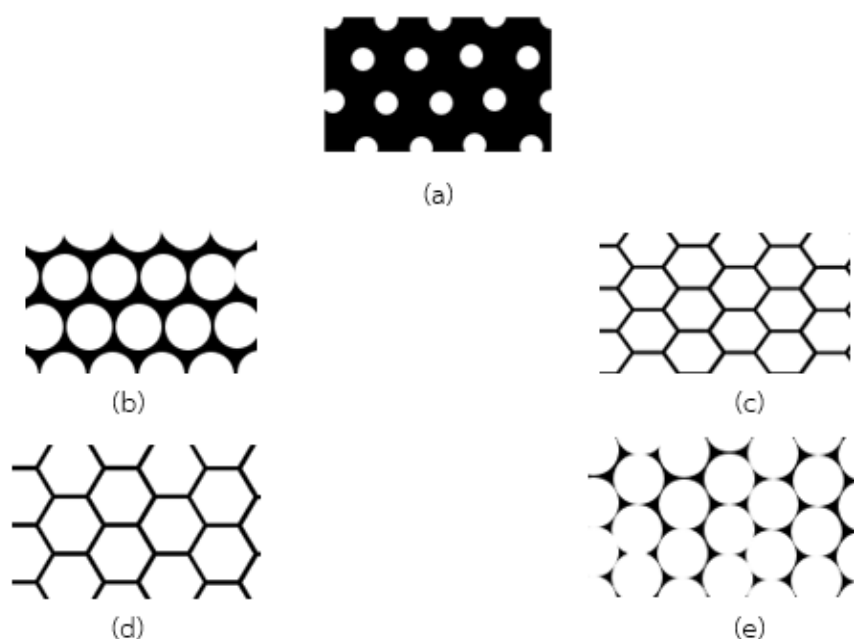
โดยค่าความแตกต่างของความดัน (ΔP) ของฟองแก๊สขนาดเล็กจะมีค่ามากกว่าฟองแก๊สขนาดใหญ่ที่ค่าแรงตึงผิวค่าหนึ่ง ดังนั้นฟองแก๊สขนาดเล็กจะมีแนวโน้มที่จะลดความแตกต่างของความดัน (ΔP) ได้มาก เนื่องจากการเติบโตของฟองแก๊สอย่างรวดเร็วรวมไปถึงการแตกออกของผนังฟองแก๊สอื่นๆ หรือแก๊สที่เกิดจาก Blowing agent แพร่เข้าสู่ฟองขนาดเล็กจนเป็นฟองแก๊สขนาดใหญ่ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.3

$$\Delta P_d = 2\gamma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.3)$$

เมื่อ ΔP_d คือค่าความแตกต่างของความดันระหว่างฟองแก๊สที่มีรัศมี r_1 และ r_2 โดยอัตราการเติบโตของฟองแก๊สขึ้นอยู่กับพฤติกรรม viscoelastic ของวัสดุพอลิเมอร์ ความดันภายในฟองแก๊ส ความดันภายนอกฟองแก๊ส ขนาดของฟองแก๊สและอัตราการแพร่ของ Blowing agent ที่แพร่ผ่านผนังเซลล์ของพอลิเมอร์

จากงานวิจัยของ Saunders [27] ได้กล่าวว่าฟองแก๊สที่เสถียร ในระบบที่มีความตึงผิวที่ต่ำ จะทำให้เกิดเซลล์โฟมขนาดเล็ก และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมใกล้เคียงกัน โดยภาพที่ 2.14 (a) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของฟองแก๊สอย่างสม่ำเสมอในพอลิเมอร์หลอมเหลว และถ้าโฟมพอลิเมอร์ถูกเปลี่ยนสถานะให้เป็นของแข็ง ในสภาวะเช่นนี้จะทำให้ค่าความหนาแน่นของโฟมพอลิเมอร์นั้นมีค่ามาก โดยเมื่อเพิ่มปริมาตรแก๊ส (ภาพที่ 2.14 (b)) ความหนาแน่นของโฟมจะลดลงและฟองแก๊สจะเข้ามาอยู่ชิดกันมากขึ้น เมื่อฟองแก๊สขยายตัวขึ้นจนกระทั่งฟองแก๊สสัมผัสกันและความดันภายในฟองแก๊สจะดันพอลิเมอร์หลอมเหลวให้ไปแทนที่ช่องว่างบริเวณใกล้เคียงจึงทำให้เซลล์โฟมเปลี่ยนรูปร่างไปเป็นรูปร่างแบบ Pentagonal dodecahedron โดยรูปร่างของผนังเซลล์

แต่ละด้านเป็นแบบ polyhedral ที่มีความหนาที่เท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาแบบ 2 มิติ ผนังเซลล์จะมีรูปร่างแบบ hexagonal honeycomb แสดงดังภาพที่ 2.14 (c) ซึ่งลักษณะโครงสร้างของโฟมนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์หลอมเหลว เช่น ความหนืด, พลังงานที่ผิวหน้า, แรงแม่ถ่วงและแรงอื่นๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นบริเวณรอยต่อของผนังเซลล์โฟม ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.14 (d) โดยลักษณะการเกิดโฟมแบบนี้จะทำให้โฟมมีความหนาแน่นที่ต่ำ และเซลล์โฟมมีลักษณะปิด อย่างไรก็ตามผนังเซลล์โฟมอาจเกิดการแตกออกได้ซึ่งทำให้ขนาดของเซลล์ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้เกิดเป็นลักษณะของเซลล์เปิดซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.14 (e)



ภาพที่ 2.14 แสดงโครงสร้างของเซลล์ที่ขั้นตอนการขยายตัวของฟองแก๊ส

ปัจจัยที่ส่งผลต่อความเสถียรระหว่างจากเติบโตของฟองแก๊สได้แก่ ชนิดและปริมาณของสารลดแรงตึงผิว อัตราการเติบโตของฟองแก๊ส ความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลว ความแตกต่างระหว่างความดันระหว่างภายนอกและภายในฟองแก๊ส การมีอยู่ของอนุภาค ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งส่งผลต่อการเติบโตของฟองแก๊ส

2.3.1.3 ขั้นตอนการเกิดฟองแก๊ส

ขั้นตอนการเสถียรของฟองแก๊สนั้น ฟองแก๊สจะถูกทำให้เสถียรได้หลายวิธี เช่น จากการเกิดปฏิกิริยาเคมีของพอลิเมอร์จนกลายเป็น Gelation และจากวิธีทางกายภาพ เช่น การหล่อเย็นเพื่อ

ทำให้พอลิเมอร์แข็งตัว เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งอย่างสมบูรณ์อาจทำให้ลักษณะของเซลล์โฟมอาจเกิดการบิดเบี้ยวก่อนเซลล์โฟมจะมีลักษณะเป็นทรงกลมเนื่องจากน้ำหนักของเนื้อพอลิเมอร์ ซึ่งมีผลต่อสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิเมอร์ ดังนั้นแก๊สที่อยู่ภายในเซลล์โฟมจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในระยะเวลาหนึ่งที่อุณหภูมิและความดันโดยรอบ ทำให้สมบัติต่างๆ ของโฟมเปลี่ยนไปตามเวลา เนื่องจากแก๊สซึ่งอยู่ในเซลล์โฟมที่เกิดจาก Blowing agent แพร่ออกจากเซลล์โฟม จากนั้นอากาศโดยรอบนั้นเข้าไปแทนที่แก๊สที่แพร่ออกจากเซลล์โฟม ซึ่งมีแนวโน้มทำให้โครงสร้างของโฟมเกิดการเสียรูปหลังการขึ้นรูปโฟมพอลิเมอร์ได้หากแก๊สที่แพร่ออกนอกเซลล์โฟมมากกว่าแก๊สที่แพร่เข้าสู่เซลล์โฟม เช่น แก๊สประเภทไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นหากใช้แก๊สที่มีสมบัติคล้ายอากาศ อาทิ แก๊สไนโตรเจน จะลดการแพร่ของแก๊สออกนอกเซลล์โฟมซึ่งจะลดการเสียรูปของเซลล์โฟมได้

2.3.2 สมบัติทั่วไปของโฟมพอลิเมอร์ [26]

สมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของโฟมพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์ได้แก่ เทคนิคและสภาวะการขึ้นรูป การจัดเรียงตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์ ความหนาแน่นของการเกิดการเชื่อมขวาง สารเติมแต่ง Blowing agent และอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของโฟมพอลิเมอร์นั้นคือ สมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์

อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของแก๊สต่อพอลิเมอร์ส่งผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติของโฟมพอลิเมอร์ เช่น ความหนาแน่น ซึ่งค่าความหนาแน่นนี้จะส่งผลต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของโฟมนั้นคือ ค่ามอดูลัส ค่าความแข็งแรง (ทดสอบการดึงและทดสอบการกดอัด) และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความร้อน โดยค่าความหนาแน่นสามารถนิยามได้จากสมการที่ 2.4

$$\text{ความหนาแน่นของโฟม} = \frac{\text{น้ำหนักของโฟม}}{\text{ปริมาตรของโฟม}} \quad (2.4)$$

ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของโฟมจากความหนาแน่นดังนี้

น้อยกว่า 600 kg/m^3 = ค่าความหนาแน่นสูง

$100 - 600 \text{ kg/m}^3$ = ค่าความหนาแน่นปานกลาง

มากกว่า 100 kg/m^3 = ความหนาแน่นต่ำ

ตัวแปรทางกายภาพที่สำคัญอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อโฟมคือ ความหนาแน่นสัมพัทธ์

(Relative density, RD) ซึ่งแสดงตามสมการที่ 2.5

$$RD = \frac{\rho_f}{\rho_p} \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ_f คือค่าความหนาแน่นของโฟม และ ρ_p คือค่าความหนาแน่นของพอลิเมอร์ โดยค่าความหนาแน่นสัมพันธ์นำมาใช้เปรียบเทียบโฟมที่ใช้พอลิเมอร์ต่างชนิดกัน

$$\text{อัตราส่วนปริมาตรของแก๊สในโฟม } \phi_g = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} = 1 - RD \quad (2.6)$$

$$\text{ปริมาตรการขยายตัว (Volume expansion factor, VEF)} = \frac{\rho_p}{\rho_f} = \frac{1}{RD} \quad (2.7)$$

$$\text{การขยายตัวเชิงเส้น (Linear expansion factor, LEF)} = \sqrt[3]{VEF} \quad (2.8)$$

เมื่อความหนาแน่นลดลงส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตลดลง ค่ามอดูลัสลดลง (ลดค่า stiffness และ เพิ่มค่า flexibility) ลดค่าความทนต่อแรงกดอัด (แต่ความสามารถในการดูดซับพลังงานเพิ่มขึ้น) และเพิ่มความเป็นฉนวนกันความร้อน

2.3.2.1 สมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์

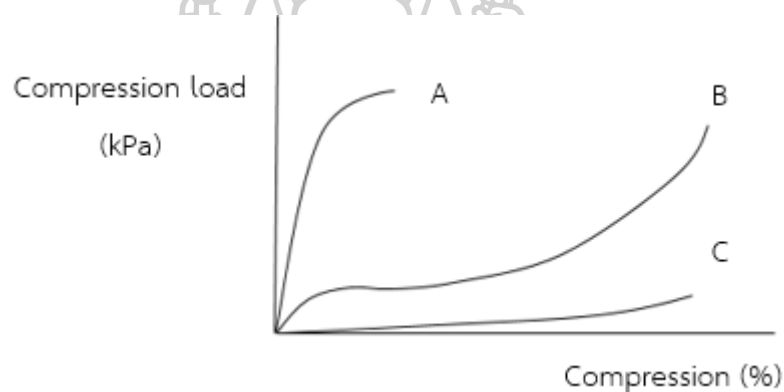
ประเภทของโฟมเมื่อแบ่งตามสมบัติเชิงกลของโฟมนั้นจะแบ่งโฟมได้ออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ Rigid cellular polymer, Structure foam และ Flexural cellular polymer

Rigid cellular polymer เป็นพอลิเมอร์โฟมที่มีสมบัติเป็นแบบ Rigid ซึ่งจะมีค่า Compressive strength ที่เกิดจากการ Deformation ประมาณ 5-10% โดยค่า Compressive modulus จะคำนวณจากการ Extrapolate เส้นกราฟไปที่ 0% ของการเกิด Deformation ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อค่า Compressive strength และ Compressive modulus ได้แก่ องค์ประกอบของวัสดุพอลิเมอร์ ความหนาแน่น โครงสร้างของเซลล์และองค์ประกอบของแก๊ส ตามลำดับ นอกจากนี้สมบัติเชิงกลอื่นๆของ Rigid cellular polymer เช่น Tensile strength, Tensile modulus, Flexural strength, Flexural modulus, Shear strength และ Shear modulus ยังเปลี่ยนแปลงตามความหนาแน่นของชิ้นงานอีกด้วย

Structure foam พอลิเมอร์โฟมชนิดนี้มักผ่านการขึ้นรูปด้วยกระบวนการ Injection molding หรือกระบวนการ Extrusion โดยปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของ Structure foam ได้แก่ องค์ประกอบของวัสดุพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ขนาดและรูปร่างของเซลล์ ซึ่งตามปกติ

Structure foam มักมีความหนาแน่นสูงและมีโครงสร้างของเซลล์ที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้สมบัติในแต่ละส่วนของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน

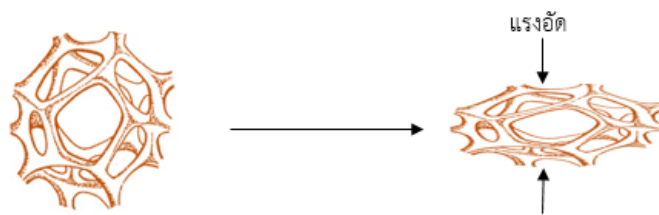
Flexural cellular polymer เมื่อได้รับแรงกดอัดที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-75% ของการเกิด Deformation จะเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ สำหรับ Flexible foam นั้นสมบัติทางด้านการกดอัดระหว่าง 0-75% ของการเกิด Deformation ทั้งภายใต้สภาวะที่เป็น Static และ Dynamic จะเป็นตัวกำหนดลักษณะการใช้งานของ Flexible foam โดยปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมของ Flexible foam เมื่อได้รับแรงกดอัดคือ องค์ประกอบของวัฏภาคพอลิเมอร์ ความหนาแน่น ขนาด และรูปร่างของเซลล์ โดยภาพที่ 2.15 จะแสดงถึงผลขององค์ประกอบของวัฏภาคของพอลิเมอร์ที่มีต่อพฤติกรรมของโฟมเมื่อได้รับแรงกดอัด



ภาพที่ 2.15 ผลขององค์ประกอบของวัฏภาคพอลิเมอร์ที่มีผลต่อพฤติกรรมของโฟมที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 32 kg m^{-3} เมื่อได้รับแรงกดอัด (a) PS foam (b) PE foam และ (c) Latex rubber foam

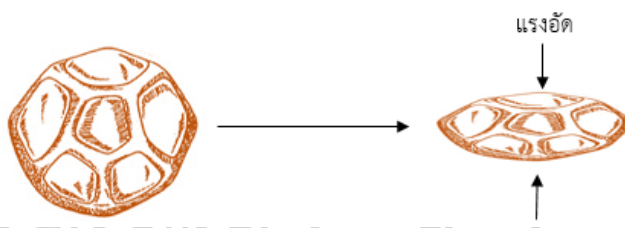
ในบางครั้งสมบัติการทนต่อแรงกดอัดของโฟมนั้นมีความสำคัญกับสมบัติเชิงกลของโฟมพอลิเมอร์ ซึ่งพลังงานการดูดซับจากแรงกดของโฟมและการเสียรูปของโฟมนั้นจะขึ้นกับความหนาแน่น ประเภทของพอลิเมอร์ที่ใช้และลักษณะของเซลล์โฟม

จากลักษณะของเซลล์โฟมแบบเปิดพบว่า เมื่อโฟมถูกกดอัดหรือได้รับแรงจนเกิดการโค้งงอนั้น ผนังเซลล์จะถูกบีบทำให้อากาศแพร่ออกจากโฟมยากขึ้น ส่งผลให้อากาศที่เหลืออยู่นั้นขัดขวางการเปลี่ยนรูปร่างของโฟมในขั้นตอนสุดท้ายของการกดอัด สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 กลไกการเปลี่ยนรูปร่างของโฟมเซลล์ปิดเมื่อได้แรงกดอัด

ในทางตรงกันข้ามอากาศไม่สามารถผ่านเข้าออกเซลล์โฟมแบบปิดได้ดังภาพที่ 2.17 ซึ่งในกรณีนี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์โฟมนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณการกดอัดของแก๊สในเซลล์ เมื่อเกิดการโค้งงอและการเสียรูปของผนังเซลล์ซึ่งเป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ ส่วนการเกิด Stretching และการเกิด Yielding ของผนังเซลล์นั้นเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ ซึ่งหากโฟมถูกแรงกดอัดมากๆ นั้นอาจทำให้เซลล์โฟมแตกออกได้ โดยเปลี่ยนแปลงของโฟมเซลล์ปิดแสดงดังภาพที่ 2.17

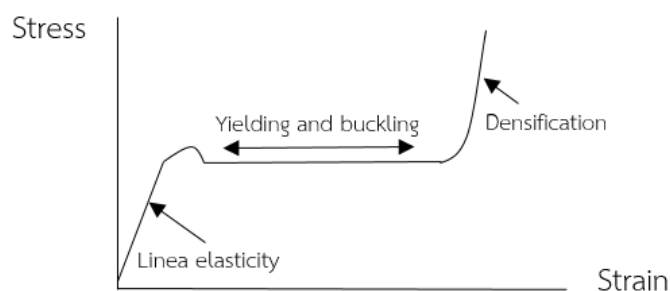


ภาพที่ 2.17 กลไกการเปลี่ยนรูปร่างของโฟมเซลล์ปิดเมื่อได้แรงกดอัด

Rigid foam ที่มีโครงสร้างแบบเซลล์ปิด เช่น พอลิสไตรีนโฟม และพอลิยูรีเทนโฟม ซึ่งจะมีค่า yielding ที่ต่ำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเชิงกลของ Rigid foam จึงขึ้นอยู่กับแรงกดอัดแก๊สที่อยู่ในเซลล์โฟมและเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งในบางครั้งเซลล์โฟมเกิดการแตกออก เนื่องจากแรงกดอัดมาก โดยการดูดซับพลังงานของโฟมนั้นสามารถแสดงได้อยู่ในรูปแบบของกราฟ Compression stress-strain curve ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.18

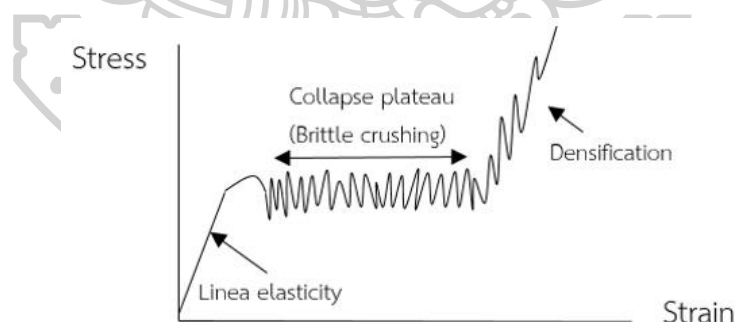
ในกรณีของ elastic/plastic foam เช่น Flexible foam ที่มีโครงสร้างเซลล์แบบเปิด ซึ่งจากภาพที่ 2.18 จะเห็นว่าในช่วงแรกของค่า strain นั้นจะมีลักษณะเป็น linear elasticity ซึ่งโฟมจะแสดงพฤติกรรมแบบ elastic เหมือนพอลิเมอร์โดยทั่วไปเนื่องจากการเกิด Stretching ของผนังเซลล์ เมื่อค่า strain สูงขึ้นแก๊สจะถูกกดอัดร่วมกับการเกิด yielding และการเกิดการโค้งงอของผนังเซลล์ จากนั้นเมื่อให้ค่า strain สูงขึ้นถึงจุดหนึ่ง เซลล์จะเกิดการแตกออกจนกระทั่งผนังเซลล์สัมผัสกันทำให้

ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มขึ้นซึ่งหากยังคงเพิ่ม strain ขึ้นเรื่อยๆ นั้นโฟมจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นของแข็ง ส่วนโฟมที่มีลักษณะโครงสร้างเซลล์แบบเปิดนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของกราฟ stress-strain curve จะต่ำกว่าในกรณีของโฟมที่มีโครงสร้างแบบปิดและพอลิเมอร์จะมีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นที่ค่า stain ต่ำกว่าโฟมที่มีโครงสร้างแบบปิด



ภาพที่ 2.18 Compression stress-strain curve ของ Flexible foam

สำหรับ Compressive stress-strain curve ของ Rigid foam แสดงดังภาพที่ 2.19 ในช่วงแรกกราฟจะแสดงพฤติกรรม linear elasticity ของพอลิเมอร์อยู่ จากนั้นเส้นกราฟจะมีลักษณะไม่คงที่ซึ่งแสดงลักษณะการแตกแบบเปราะซึ่งเกิดจากการแตกออกของผนังเซลล์ เมื่อเซลล์เกิดการแตกออกจนกระทั่งโฟมเกิดการยุบตัวจะทำให้ความหนาแน่นของโฟมเพิ่มมากขึ้น พอลิเมอร์โฟมจึงมีสมบัติเป็นของแข็งเพิ่มมากขึ้น



ภาพที่ 2.19 Compression stress-strain curve ของ Rigid foam

2.3.3 Blowing agents [26]

Blowing agent คือสารที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดฟองแก๊สแล้วมีโครงสร้างแบบโฟม โดย Blowing agent นั้นสามารถเป็นได้ทั้งแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง โดยจะเกิดการสลายตัวในพอลิเมอร์หลอมเหลวระหว่างการผสม ซึ่งจะเกิดแก๊สกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์หลอมเหลวภายใต้

ความดัน โดยเมื่อความดันลดลงแก๊สจะเกิดการขยายตัว ทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่เป็นเซลล์ขึ้นในเนื้อพลาสติกสามารถแบ่ง Blowing agent ได้เป็น 2 แบบคือ Physical blowing agent และ Chemical blowing agent

2.3.3.1 Physical blowing agent (PBAs)

Physical blowing agent คือของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำซึ่งกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ เพื่อทำให้เกิดโครงสร้างแบบโฟม PBAs มักเป็นของเหลวที่มีราคาถูก และมีข้อดี คือเมื่อกลายเป็นแก๊สจะไม่เหลือสารผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ซึ่งอาจมีผลต่อสีและสมบัติของพอลิเมอร์ได้ แต่ PBAs มีข้อเสียคือเก็บรักษายากจึงต้องมีอุปกรณ์ พิเศษเข้ามาช่วยเพื่อใช้ในการผลิตโฟม โดยการใช้ PBAs ในการผลิตโฟมนั้นมี 2 วิธี คือ

1. ฉีดแก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สไนโตรเจน (N_2) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เข้าไปในพอลิเมอร์ที่มีความดันสูง โดยแก๊สจะเกิดการขยายตัวเมื่อความดันของระบบลดลงเนื่องจากพอลิเมอร์หลอมเหลวไหลออกจากหัวตาย

2. เติมของเหลวที่มีจุดเดือดต่ำลงไปผสมในพอลิเมอร์ ซึ่งของเหลวที่ใช้กันมาก ได้แก่ ไฮโดรคาร์บอน ฮาโลจิเนตไฮโดรคาร์บอน (ประกอบด้วย Freons และ CFC) และอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยสมบัติของ PBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงได้ในตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 สมบัติของ PBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [26]

Physical Blowing agent	Molecular weight (g mol ⁻¹)	Density at 25 °C (g cm ⁻³)	Boiling point (°C)
Butanes	58.00	0.579	-0.5
Pentanes	72.15	0.613	30-38
Hexanes	86.17	0.658	65-70
Isohexanes	86.17	0.655	55-62
Heptanes	100.20	0.680	96-100
Benzenes	78.11	0.874	80-82
Toluene	92.13	0.862	110-112
Methyl chloride	50.49	0.952	-23.8
Methylene chloride	84.94	1.325	40.0

ตารางที่ 2.6 (ต่อ) สมบัติของ PBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [26]

Physical Blowing agent	Molecular weight (g mol ⁻¹)	Density at 25 °C (g cm ⁻³)	Boiling point (°C)
Trichloroethylene	134.40	1.466	87.2
Dichloroethylene	98.97	1.245	83.5
Trichlorofluoromethane (CCl ₃ F)-Freon 11	137.38	1.476	23.8
Dichlorodifluoromethane (CCl ₂ F ₂)-Freon 12	120.93	1.311	-29.8
Trifluorochloromethane (CClF ₃)-Freon 13	104.47	0.850	-81.4

2.3.3.2 Chemical blowing agents (CBAs)

Chemical blowing agents คือ สารประกอบที่เกิดปฏิกิริยาเคมี เนื่องจากอิทธิพลของความร้อนแล้วปลดปล่อยแก๊สออกมา ทั้งเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อน การเกิดปฏิกิริยากับ CBAs ด้วยกันเองหรือการเกิดปฏิกิริยากับส่วนประกอบอื่นๆ CBAs ที่ใช้กันอยู่ส่วนมากจะอยู่ในรูปของแข็ง โดยจะแบ่ง CBAs เป็น 2 ประเภทคือ

- Exothermic chemical blowing agents เป็น CBAs ที่จะคายความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยแก๊สที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นแก๊สไนโตรเจน

- Endothermic chemical blowing agents เป็น CBAs ที่จะดูดความร้อนออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยแก๊สที่ได้จากปฏิกิริยานี้ส่วนใหญ่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

โดย CBAs ทั้งสองแบบที่ใช้กันมากจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทได้แก่

1. สารประกอบที่ปล่อยแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับได้ CBAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ได้แก่สารประกอบจำพวก Ammonium salt ของ Inorganic และ Organic acids และ สารประกอบของ Bicarbonates และ Carbonates ของ Alkaline และ Alkaline earth metals โดยการสลายตัวของสารประกอบประเภทที่ปล่อยแก๊สออกมาแสดงดังสมการที่ 2.8



จากสมการที่ 2.8 G คือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนจากสมการปฏิกิริยาผันกลับได้ทำให้ปริมาณแก๊สในระบบลดลงซึ่งอาจส่งผลให้แรงดันภายในเซลล์ของโฟมลดลงทำให้โฟมเกิดการหดตัว

2. สารประกอบที่ปล่อยแก๊สออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนที่ผันกลับไม่ได้ CBAs ที่จัดอยู่ในชนิดนี้ได้แก่สารประกอบจำพวก Aromatic, Aliphatic-aromatic, Aliphatic-azo, Diazo และ Diazoamides และสารประกอบอินทรีย์อื่นๆจะเกิดการสลายตัวเมื่ออุณหภูมิสูงแสดงดังสมการที่ 2.9



ส่วนมากแก๊สที่ได้จะเป็น N_2 , CO_2 และ NH_3 โดยปฏิกิริยาการสลายตัวทางความร้อนตามสมการที่ 2.9 นั้นมักจะเป็นปฏิกิริยาแบบ First-order แบบผันกลับไม่ได้

3. CBAs ที่อยู่ในรูปของของผสมที่ปลดปล่อยแก๊สออกมาเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างแต่ละองค์ประกอบ โดยปฏิกิริยาการปลดปล่อยแก๊สของของผสมจะแสดงในสมการที่ 2.10



ตัวอย่างของ CBAs ชนิดนี้คือปฏิกิริยาระหว่าง Sodium nitrile กับ Ammonium chloride และปฏิกิริยาระหว่าง Acid ทั้งที่เป็นกรดอินทรีย์ เช่น Stearic และ Oleic เป็นต้น และทั้งที่เป็นกรดอนินทรีย์ เช่น Hydrochloric sulfuric และ Orthophosphoric เป็นต้น กับ Carbonates หรือกับโลหะหมู่ 2 และ 3 ในตารางธาตุ โดยสมบัติของ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไปแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [26]

Chemicalcal Blowing agent	Decomposition range in air (°C)	Gas Yield (cm ³ g ⁻¹)	Application in polymer
Azodicarbonamide	205-215	220	PVC, PE, PP, PS, ABS, PA
Modified azodicarbonamide	155-220	150-220	PVC, PE, PP, EVA, PS, ABS, PA
4,4'-Oxybis-(benzenesulfonyl hydrazine)	150-160	125	PVC, PE, EVA

ตารางที่ 2.7 (ต่อ) สมบัติ CBAs ที่นิยมใช้กันทั่วไป [26]

Chemicalcal Blowing agent	Decomposition range in air (°C)	Gas Yield (cm ³ g ⁻¹)	Application in polymer
Diphenylsulfone 3,3'-disulfohydrazide	155	110	PVC, PE, EVA
Diphenyleneoxide 4,4'-disulfohydrazide	175-180	120	PVC, PE, EVA
Trihydrazinotriazine	275	225	PE, PP, ABS, PA
p-Toluenesulfonyl semicarbazide	228-235	140	PE, PP, PS, ABS, PA
5-Phenyltrazole	240-250	190	ABS, PPO, PC, PA, PBT
Isatoic anhydride	210-225	115	PS, ABS, PA, PPO, PBT, PC

*หมายเหตุ : PVC - Poly(vinylchloride) PE - Poly(ethylene)

PP - Poly(propylene) PS - Poly(styrene)

PA - Poly(amide) PPO - Poly(phenylene oxide)

PC - Poly(carbonate) PBT - Poly(butylene terephthalate)

EVA - Poly(ethylene vinyl acetate)

ABS - Poly(acrylonitrile butadiene styrene)

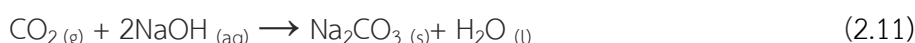
2.3.3.3 โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO₃) [28]

โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium hydrogen carbonate หรือ Sodium bicarbonate) เป็นสารประกอบที่มีสูตรทางเคมี NaHCO₃ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตมีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีโครงสร้างเป็นผลึก แต่ปรากฏในรูปผงละเอียด มีคุณสมบัติเป็นเบส โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตชื่อทางการค้าที่เรียกกันทั่วไปหลายชื่อด้วยกัน เช่น เบกกิ้งโซดา (baking soda) เบรดโซดา (bread soda) คูกกึ่งโซดา (cooking soda) และไบคาร์บอเนตโซดา (bicarbonate of soda)

กระบวนการผลิต (production)

NaHCO₃ เตรียมได้จากกระบวนการโซลเวย์ (Solvay process) โดยใช้มีปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. นำแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ (NaOH) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมคาร์บอเนตและน้ำ

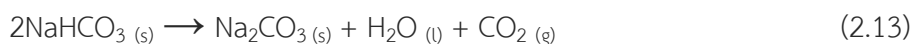


2. จากนั้นเติมคาร์บอนไดออกไซด์ให้ไปทำปฏิกิริยากับ โซเดียมคาร์บอเนต เมื่อได้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ตกตะกอนลงมาเมื่อมีความเข้มข้นมากเพียงพอ



การสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน (Thermal decomposition)

เมื่อโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตได้รับความร้อนมากกว่า 70°C จะค่อยๆ สลายตัวไปเป็นโซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ปฏิกิริยาการสลายตัวนี้จะเกิดขึ้นได้เร็วที่อุณหภูมิ 250°C



หากเผาโซเดียมคาร์บอเนตต่อที่อุณหภูมิ 1000°C ก็จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นโซเดียมออกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์



การนำไปใช้งาน (Applications)

โดยทั่วไปการนำไปใช้งานของ NaHCO₃คือ ใช้ในการประกอบอาหาร ทำเบเกอรี่ ซึ่งโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตนี้จะใช้เป็นแหล่งให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยการสลายตัวในขั้นตอนการอบเบเกอรี่ ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นภายใน ทั้งนี้สามารถผสมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นส่วนประกอบของเบเกอรี่ชนิดต่างๆ และสามารถทิ้งส่วนผสมนี้ไว้โดยที่ไม่เกิดแก๊ส CO₂ ก่อนขั้นตอนการอบได้ นอกจากนั้นยังใช้ปรับสภาพสระว่ายน้ำหรือตู้ปลาให้มีความเป็นกลาง เนื่องจากการเติมคลอรีนที่มากเกินไปทำให้สระว่ายน้ำมีความเป็นกรดมากเกินไป

2.4 สารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent)

สารเชื่อมขวางเป็นสารที่ทำหน้าที่เชื่อมสายพอลิเมอร์ ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่เชื่อมระหว่างกัน เกิดเป็นโครงสร้างร่างแห (network) ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติที่แข็งขึ้น และมีความทนทานมากขึ้น ซึ่งการเชื่อมขวางของสายโซ่พอลิเมอร์นั้นจำเป็นจะต้องเลือกสารเชื่อมขวางที่เหมาะสม โดยสังเกตได้จากโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ใช้ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยา สภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปพอลิเมอร์ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารเชื่อมขวางคือ บอแรกซ์ (Borax)

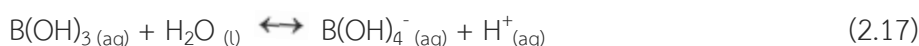
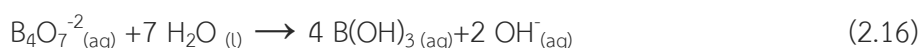
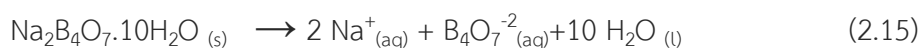
บอแรกซ์ (Borax) [29]

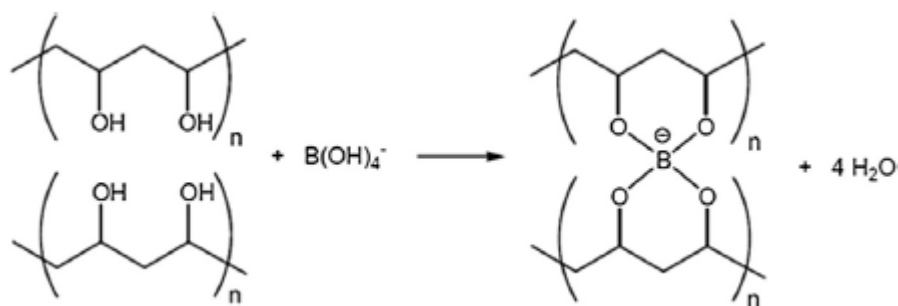
บอแรกซ์ (Borax) มีชื่อ IUPAC คือ Sodium tetraborate decahydrate (สูตรทางเคมีคือ $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) มีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีรสขมเล็กน้อย มีชื่อเรียกอื่น เช่น น้ำประสานทอง เฟ่งแซ ผงเนื้อนิ่ม เป็นต้น เป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรม เช่น ใช้ทำแก้วเพื่อทำให้ทนความร้อน เป็นตัวประสานในการเชื่อมทอง ใช้ชุบและเคลือบโลหะ ใช้ในการผลิตถ่านไฟฉาย ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราในแป้งทาตัว เป็นต้น โดยมีปริมาณความเป็นพิษต่อมนุษย์ ดังนี้

1. ปริมาณ Borax ที่ทำให้เกิดพิษต่อผู้ใหญ่เท่ากับ 5-10 g และขนาดที่ทำให้ตาย 15-30 g
2. ปริมาณ Borax ที่ทำให้เกิดพิษและตายต่อเด็กเท่ากับ 4-14 g

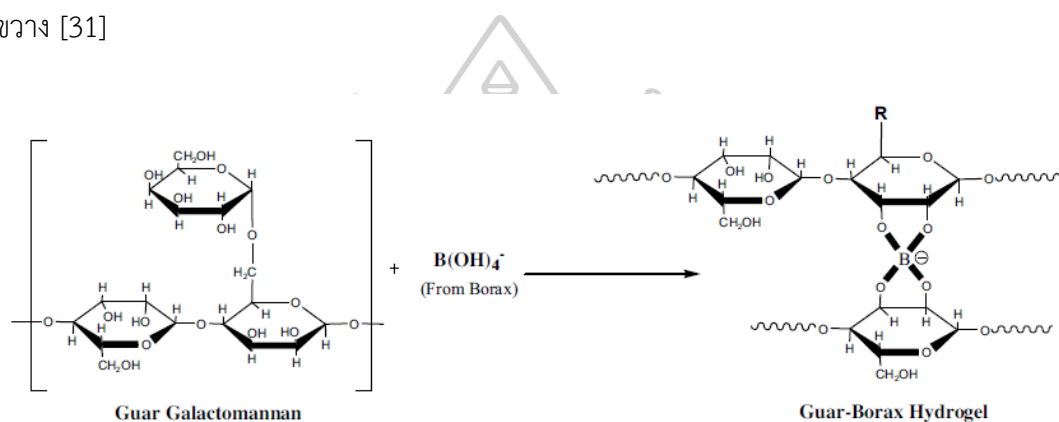
การใช้ บอแรกซ์ (Borax) เป็นสารเชื่อมขวางในพอลิเมอร์

การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางในแป้งโดยใช้ Borax เป็น cross-linking agent นั้น Sodium tetraborate decahydrate ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) เมื่อละลายน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็น Tetrahydroxyborate ($\text{B}(\text{OH})_4^-$) ดังสมการที่ 2.15-2.17 [30] จากนั้น Tetrahydroxyborate ($\text{B}(\text{OH})_4^-$) จะเป็นตัวเข้าทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับ หมู่ hydroxyl ($-\text{OH}$) ของพอลิเมอร์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly(vinyl alcohol)) พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) หรือ พอลิเปปไทด์ (Polypeptide) เนื่องจากในพอลิเมอร์เหล่านี้มีหมู่ hydroxyl ($-\text{OH}$) เป็นองค์ประกอบ แสดงดังภาพที่ 2.20 และภาพที่ 2.21





ภาพที่ 2.20 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของ polyvinyl alcohol โดยใช้ Borax เป็นสารเชื่อมขวาง [31]



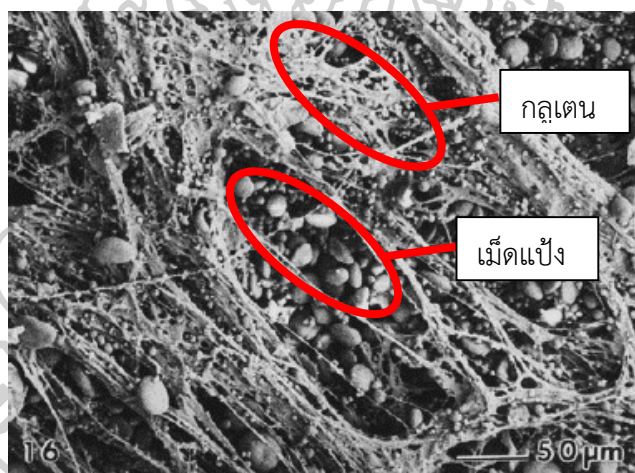
ภาพที่ 2.21 กลไกการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของ Guar gum (polysaccharide) โดยใช้ Borax เป็นสารเชื่อมขวาง [30]

2.5 กระบวนการเกิดโฟมชีวภาพ

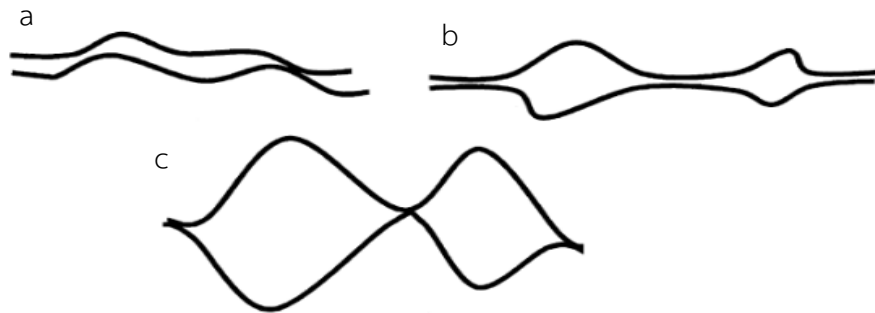
กระบวนการเกิดโฟมชีวภาพเกิดขึ้นได้โดยผ่าน 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการผสมและการนวด dough และขั้นตอนที่ 2 เป็นกระบวนการอบขึ้นรูป ซึ่งทั้งสองขั้นตอนนี้จะทำให้เกิดเป็นโฟมชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 1 การผสมและการนวด dough โดยการเตรียมแป้งสาลีผสมกับกลูเตนจากแป้งสาลี (ทำหน้าที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์) และโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (ทำหน้าที่เป็น Blowing agent) ผสมให้เข้ากันแล้วร่อนด้วยตะแกรงร่อนแป้ง จากนั้นทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ (น้ำผสมกับกลีเซอรอล) แล้วนำของผสมที่ได้มาด้วยเครื่อง two-roll-mill และดึงยืดระหว่างนวดอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดลักษณะของ network ภายใน dough ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.22 เนื่องจากกลูเตนประกอบไปด้วยกลูเตนิน (glutenin) และ ไกลอะดีน (gliadin) โดยไกลอะดีนจะแทรกตัวอยู่ระหว่างกลูเตนินแล้วเกิดอันตรกิริยา เช่น แรงดึงดูดระหว่างไอออน, disulfide bond และ

พันธะไฮโดรเจน กับสายโซ่กลูเตนิน ส่งผลให้เกิดสมบัติ viscoelastic สามารถกักเก็บฟองแก๊สได้ โดยสมบัติ viscoelastic ของกลูเตนจะเกิดผ่านกลไก “loop and train” ซึ่งกลไก “loop and train” กล่าวว่าสายโซ่กลูเตนินสองสายโซ่คู่ขนานกัน (train) โดยระหว่างสองสายโซ่จะมีไกลอะตินจะแทรกตัวแล้วเกิดอันตรกิริยากับกลูเตนิน และอีกกรณีหนึ่งที่สายโซ่กลูเตนินสามารถเกิดอันตรกิริยากันเองได้ด้วยแรงดึงดูดระหว่างซั้ว แรงดึงดูดระหว่างไอออน พันธะ disulfide และพันธะไฮโดรเจน โดยมีบางส่วนของกลูเตนินที่ไม่เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน แต่จะเกิดอันตรกิริยากับพลาสติกไซเซอร์ประเภทที่มีหมู่ไฮดรอกซิล เช่น น้ำหรือกลีเซอรอล ทำให้เกิดลักษณะคล้ายกับห่วง (loop) ขึ้น ซึ่งปริมาณ loop จะบ่งบอกถึงความเป็น viscoelastic ของกลูเตน โดยปัจจัยที่มีผลต่อการที่จะทำให้เกิดเป็น loop มากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับพลาสติกไซเซอร์ โดยสายโซ่กลูเตนินจะสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างพลาสติกไซเซอร์แทนการเกิดอันตรกิริยาระหว่างสายโซ่กลูเตนิน 2 สายโซ่ จึงนำไปสู่การเกิดเป็น loop ที่มากขึ้น [32] ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.23

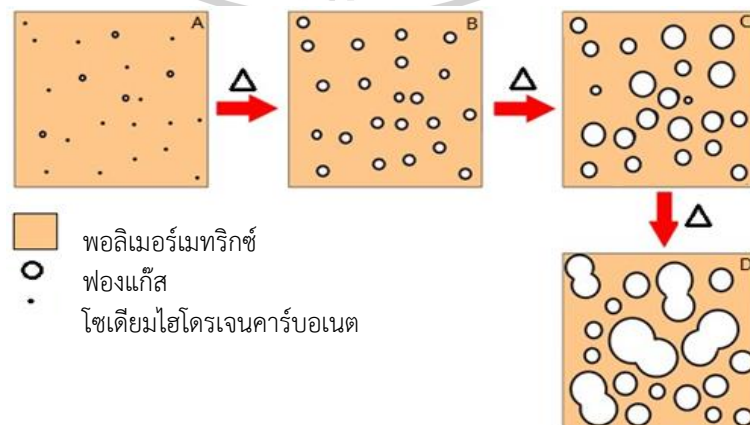


ภาพที่ 2.22 SEM ของ dough ที่ถูกกวนวดโดยการตั้งยัด โดยมีเม็ดแป้งแทรกอยู่ระหว่าง network ของกลูเตน [33]



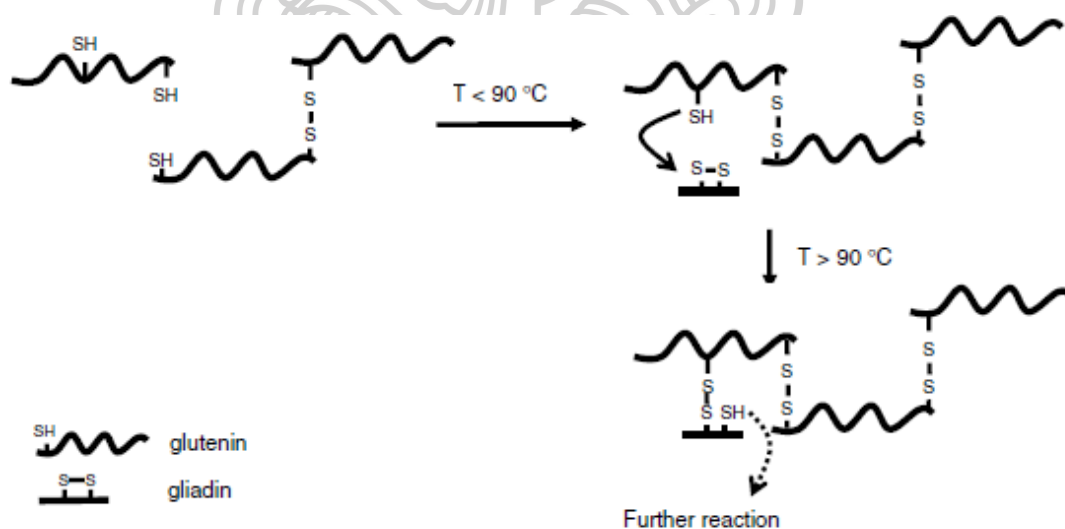
ภาพที่ 2.23 กลไกการเกิด loop and train a) เมื่อเติมน้ำหรือกลีเซอรอลในปริมาณน้อยซึ่งสายโซ่จะเกิดอันตรรกิริยากันแบบไม่เป็นระเบียบ b) เมื่อเติมน้ำหรือกลีเซอรอลในปริมาณปานกลางซึ่งสายโซ่จะมีอัตราส่วนระหว่าง loop : train ที่ต่ำ และ c) เมื่อเติมน้ำหรือกลีเซอรอลในปริมาณมากซึ่งสายโซ่จะมีอัตราส่วนระหว่าง loop : train ที่สูง [32]

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอบขึ้นรูป ในขณะที่นวด dough อากาศสามารถเข้าไปแทรกในเนื้อ dough เกิดเป็นฟองอากาศเล็กๆ ในเนื้อ dough ฟองอากาศและโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตซึ่งเป็น Blowing agent สามารถเป็นจุดเริ่มการเกิดฟองแก๊ส (nucleus) ดังภาพที่ 2.24 (A) จากนั้นเมื่อมีการให้ความร้อนแก่ dough โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเกิดการสลายตัวทางความร้อนกลายเป็นฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [34] และฟองไอน้ำดังภาพที่ 2.24 (B) จากนั้นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และฟองไอน้ำจะขยายตัวออกดังภาพที่ 2.24 (C) และสุดท้ายเมื่อฟองแก๊สที่ขยายตัวออกชนกันและมีแรงดันมากจนกระทั่งเซลล์โฟมเกิดการทะลุหากันหรือบางเซลล์โฟมเกิดการทะลุและรวมตัวกันของฟองแก๊สกลายเป็นเซลล์โฟมที่มีขนาดใหญ่ (coalescence) และมีการลดลงของจำนวนเซลล์โฟมดังแสดงในภาพที่ 2.24 (D)



ภาพที่ 2.24 รูปแบบการเกิดเซลล์โฟมของโฟมชีวภาพ

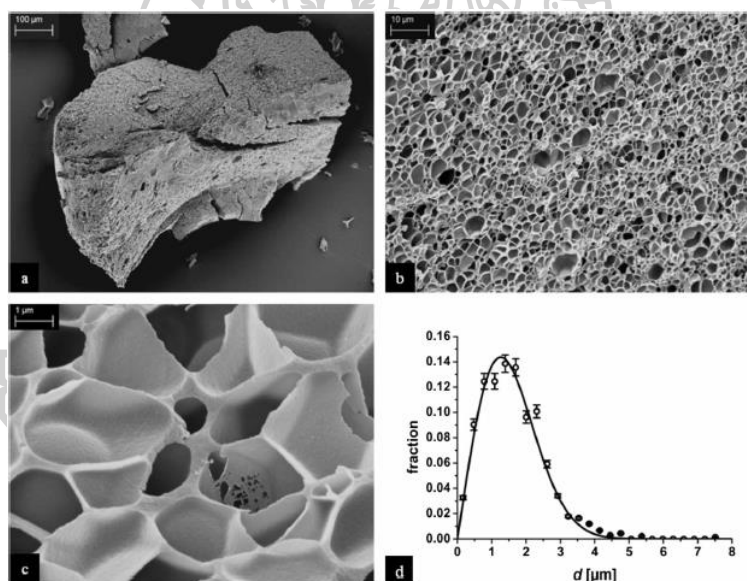
กลูเตนซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของพอลิเมอร์เมทริกซ์ เมื่อได้รับความร้อนจากกระบวนการขึ้นรูปจะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางของกลูเตนไปพร้อมๆ กับการขยายตัวของฟองแก๊ส โดยกลูเตนนั้นสามารถเกิดอันตรกิริยาการเชื่อมขวางภายในตัวเองเมื่อได้รับความร้อนสูง ซึ่งกลูเตนจากแป้งสาลีนั้นประกอบด้วยกลูเตนิน (glutenin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และไกลอะดีน (gliadin) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า ซึ่งกรดอะมิโนชนิดที่สำคัญต่อการเกิดอันตรกิริยาเชื่อมขวางเมื่อได้รับความร้อนคือ ซีสเทอีน (Cysteine) ซึ่งมีหมู่ side chain เป็นหมู่ไทออล (Thiol (-SH)) เมื่อได้รับความร้อนต่ำกว่า 90 องศาเซลเซียส หมู่ Thiol (-SH) ในสายโซ่กลูเตนิน 2 สายโซ่จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้พันธะ disulfide ระหว่างสายโซ่กลูเตนิน ซึ่งปฏิกิริยานี้เกิดได้เพียงเล็กน้อย [35, 36] เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียสจะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนพันธะระหว่าง -SH และ -SS- โดยหมู่ Thiol (-SH) ของสายโซ่กลูเตนิน แยกตัวเป็น mercaptide ($-S^-$), hydrogen ion (H^+) จากนั้น mercaptide ($-S^-$) จะเกิดปฏิกิริยาแทนที่บริเวณพันธะ disulfide ภายในสายโซ่ไกลอะดีน ส่งผลให้เกิดเป็นพันธะ disulfide ของสายโซ่กลูเตนินและไกลอะดีน และ mercaptide ($-S^-$) ของสายโซ่ไกลอะดีนจะเข้าไปจับกับ hydrogen ion (H^+) ที่หลุดออกมากลายเป็นหมู่ Thiol ของสายโซ่ไกลอะดีน จากนั้นหมู่ Thiol ของสายโซ่ไกลอะดีน จะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางต่อไป [24] ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 รูปแบบการเกิดการเชื่อมขวางของ gliadin-glutenin ผ่านการเกิดอันตรกิริยาของหมู่ Thiol และหมู่ disulfide ระหว่างการให้ความร้อน [37]

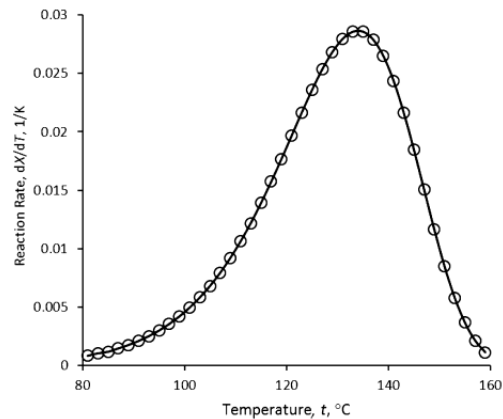
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ S. Quester และคณะ [38] ได้ทำการศึกษาโฟมที่ผลิตจาก gliadin (gliadin เป็นส่วนหนึ่งในโปรตีนจากข้าวสาลี) ซึ่งโปรตีนจากข้าวสาลีนี้นั้นมีความแข็งแรงและสามารถหาได้ง่าย โดยขั้นตอนการสกัด gliadin ออกจากกลูเตนต้องใช้ตัวทำละลายจากธรรมชาติ เช่น น้ำ และ เอทานอล เมื่อได้ gliadin แล้ว จากนั้นจะเตรียมโฟมโดยการนำ gliadin ที่ถูกแยกออกมาได้จะถูกไฮเดรตและอยู่ภายใต้สภาวะบรรยากาศคาร์บอนไดออกไซด์ หรือ ไนโตรเจนที่ความดัน 250 bar ภายหลังเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ (อุณหภูมิไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส) เซลล์จะเกิดการขยายตัวอย่างฉับพลันและในเวลาเดียวกันทำการหล่อเย็นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เซลล์โฟมมีโครงสร้างแบบปิด ซึ่งโฟมจาก gliadin เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM แสดงในภาพที่ 2.26 พบว่ามีขนาดของเซลล์โฟมประมาณ 1.2 μm



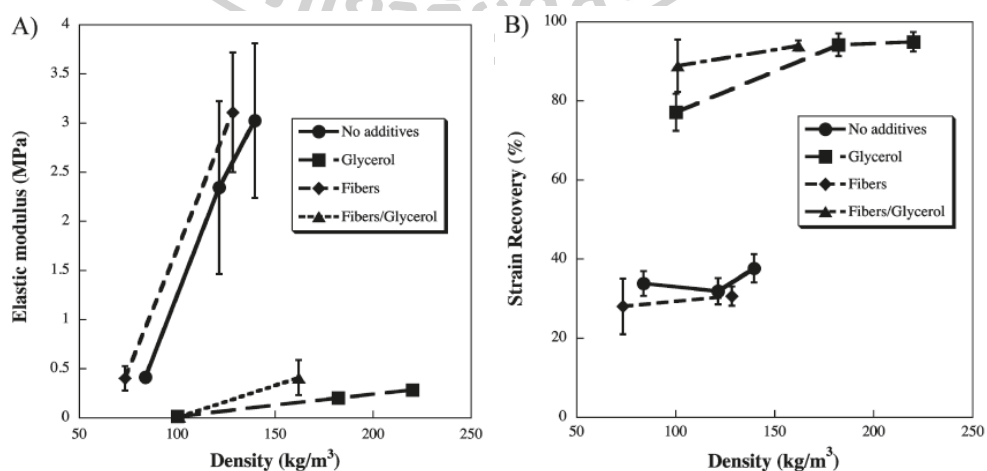
ภาพที่ 2.26 a-c เป็นภาพ SEM ของโฟมที่ได้และ d เป็นค่าการกระจายตัวของขนาดของเซลล์ [38]

งานวิจัยของ M. Hartman และคณะ [34] ได้ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต โดยใช้เทคนิค Thermo Gravimetric Analysis (TGA) เพื่อหาอัตราการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ซึ่งจะนำน้ำหนักที่หายไปในแต่ละอุณหภูมิมาคำนวณ ซึ่งจากภาพที่ 2.27 แสดงกราฟอัตราการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าอัตราการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส มีอัตราการสลายตัวสูงที่สุด

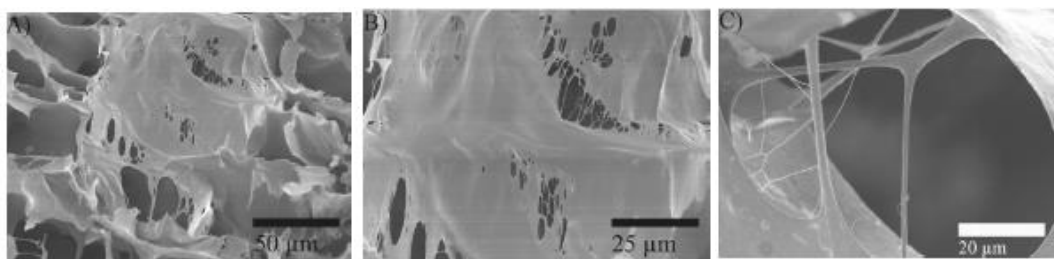


ภาพที่ 2.27 อัตราการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่อุณหภูมิต่างๆ

งานวิจัยของ O. Thomas และคณะ [39] ได้ศึกษาผลของโครงข่ายโปรตีน (protein network) ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของโฟมจากแป้งสาลีด้วยวิธี freeze-drying ซึ่งการทำโฟมได้มีการใช้กลูเตนที่ปริมาณต่างๆ โดยใช้น้ำกลั่นคงที่ที่ 120 mL ทั้งที่มีการเติมและไม่มีการเติมกลีเซอรอลในกลูเตน และทั้งที่มีการเติมและไม่เติมเส้นใยขุ่นมะพร้าว จากผลการทดลองพบว่าปริมาณกลีเซอรอล 20 wt% เพียงพอสำหรับการเป็นพลาสติกไซเซอร์ ทำให้ค่า modulus ต่ำ และค่า strain recovery สูง แต่เมื่อเติมเส้นใยขุ่นมะพร้าวลงในโฟม จากภาพที่ 2.28 โฟมจะมีค่า elastic modulus เพิ่มขึ้นเล็กน้อยและโครงสร้างโฟมมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น จากภาพที่ 2.29 ซึ่งให้เห็นว่าเส้นใยขุ่นมะพร้าวและเนื้อโฟมเข้ากันได้ดี โดยเส้นใยขุ่นมะพร้าวทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อม (bridge) ที่ผนังเซลล์โฟม

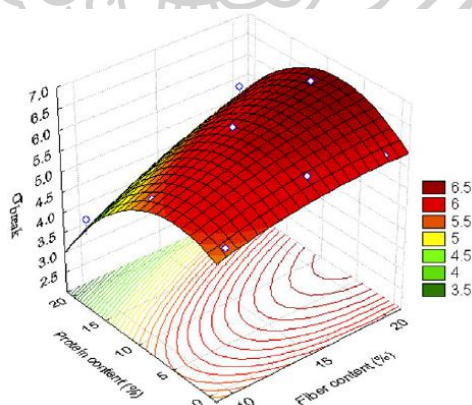


ภาพที่ 2.28 ค่า Elastic modulus และ Strain Recovery ที่ความหนาแน่นของโฟมต่างๆ [39]

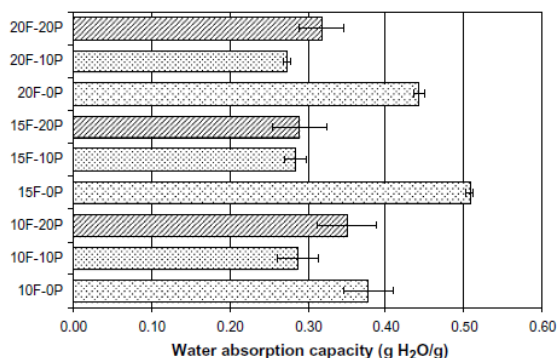


ภาพที่ 2.29 Scanning Electron Microscopy (SEM) ของโพลีแลกทอเดนที่เติมเส้นใยมะพร้าว [39]

จากงานวิจัยของ P.R. Salgado และคณะ [40] ศึกษาการผลิตถาดโพลีจากแป้งมันสำปะหลัง, โปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส ด้วยกระบวนการอบขึ้นรูป พบว่าจากการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของ แป้งมันสำปะหลัง, โปรตีนจากดอกทานตะวัน และเส้นใยเซลลูโลส ในทุกๆ อัตราส่วนมีค่าความหนาแน่นระหว่าง 1.55 ถึง 1.76 มิลลิเมตร และค่าความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.46 ถึง 0.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจาก 10%w/w ถึง 20%w/w พบว่าช่วยปรับปรุงสมบัติเชิงกลแต่ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น ส่วนการเติมโปรตีนจากดอกทานตะวันจะช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล ดังภาพที่ 2.30 และค่าการดูดซึมน้ำลดลง ดังภาพที่ 2.31 ซึ่งสูตรที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้คือการเติมเส้นใยเซลลูโลส 20%w/w และโปรตีนจากดอกทานตะวัน 10%w/w

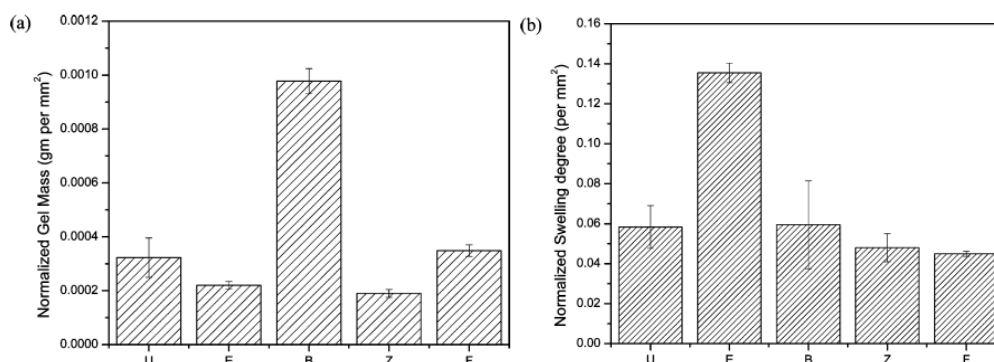


ภาพที่ 2.30 ค่า Tensile strength at break (σ_{break}) เมื่อเติมเส้นใยเซลลูโลสและโปรตีนจากดอกทานตะวันที่ปริมาณต่างๆ [40]

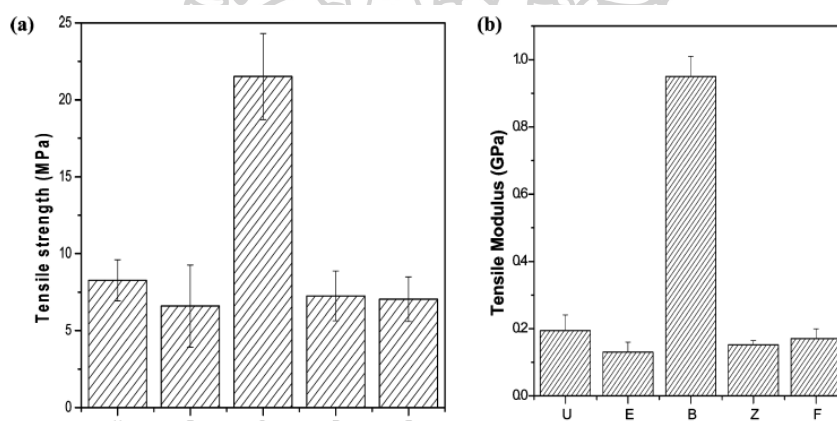


ภาพที่ 2.31 ค่าการดูดซึมน้ำของโพลีเมอร์จากแป้งมันสำปะหลังในสูตรต่างๆ โดย F แทนปริมาณเส้นใยเซลลูโลส (%w/w) และ P แทนปริมาณโปรตีนจากดอกทานตะวัน (%w/w) [40]

จากงานวิจัยของ K. Das และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มด้วยวิธี solution casting จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างสารละลายแป้งและ poly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้ cross-linking agent แต่ละชนิด (zinc oxide, formaldehyde, borax และ epichlorohydrin) ที่ปริมาณเท่ากัน โดยการหาระดับการเกิด cross-linking ของฟิล์มสามารถทดสอบได้จากระดับการบวมตัว (The normalized swelling degree (NSD)) และ พื้นที่ผิว (The surface area normalized gel mass (NGM)) ในตัวทำละลาย dimethyl sulfoxide (DMSO) พบว่า ฟิล์มที่ใช้ borax เป็นตัว cross-linking agent มีค่า NSD ที่ต่ำ และค่า NGM ที่สูง ดังภาพที่ 2.32 นั้นแสดงให้เห็นถึงระดับการเกิด cross-linking ในปริมาณมาก และจากการทดสอบสมบัติเชิงกลพบว่า ค่า Tensile strength และ ค่า Tensile modulus ของฟิล์มที่ใช้ borax เป็นตัว cross-linking agent มีค่าสูงที่สุดดังภาพที่ 2.33

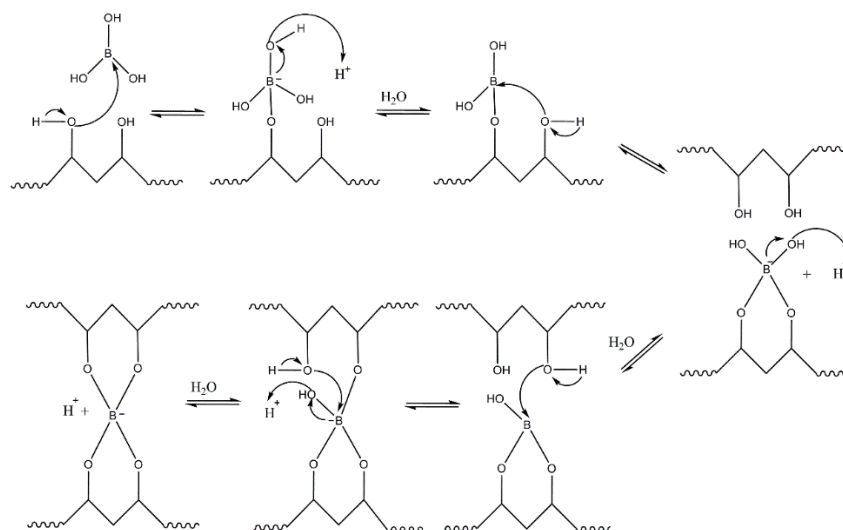


ภาพที่ 2.32 ค่า a) Normalized Gel Mass (NGM) และ b) Normalized Swelling degree (NSD) ของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างสารละลายแป้งและ poly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้ cross-linking agent ได้แก่ zinc oxide (Z), formaldehyde (F), borax (B) และ epichlorohydrin (E) เทียบกับ ฟิล์มที่ไม่ได้เติม cross-linking agent (U) [41]



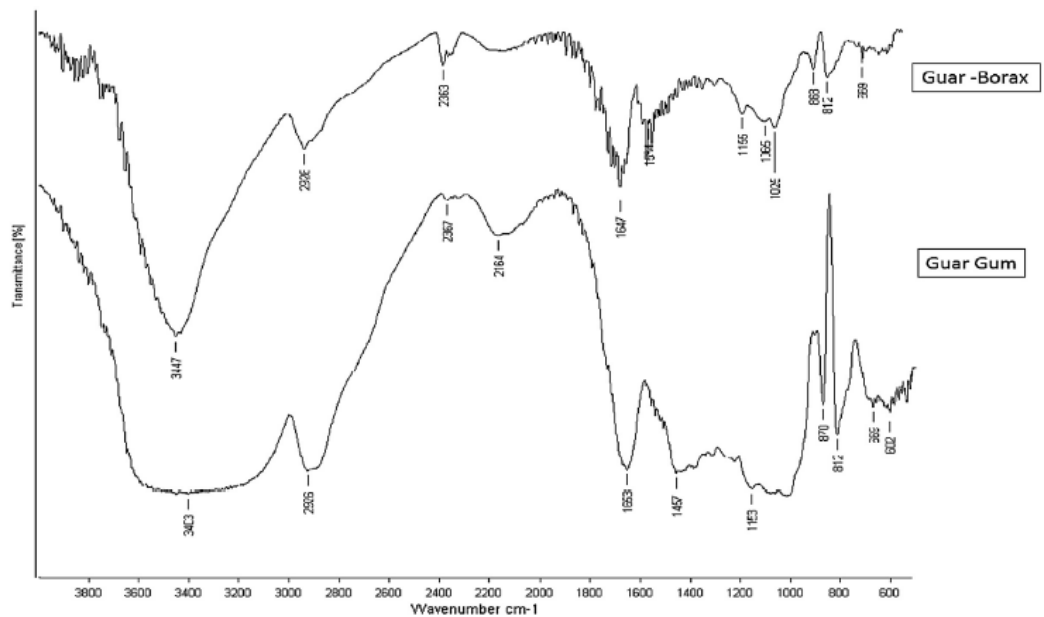
ภาพที่ 2.33 ค่า a) ค่า Tensile strength และ b) ค่า Tensile modulus ของฟิล์มจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างสารละลายแป้งและ poly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้ cross-linking agent ได้แก่ zinc oxide (Z), formaldehyde (F), borax (B) และ epichlorohydrin (E) เทียบกับ ฟิล์มที่ไม่ได้เติม cross-linking agent (U) [41]

จากงานวิจัยของ L.V. Angelova [42] ได้ทำการศึกษาเจลจากพอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้ Borax เป็นสารเชื่อมขวาง โดยพิสูจน์เอกลักษณ์ทางกายภาพและสมบัติทางเคมีเพื่อประยุกต์ใช้ในงานศิลปะ พบว่า Borate จะเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์สองสายโซ่บริเวณหมู่ไฮดรอกซิล ซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.34

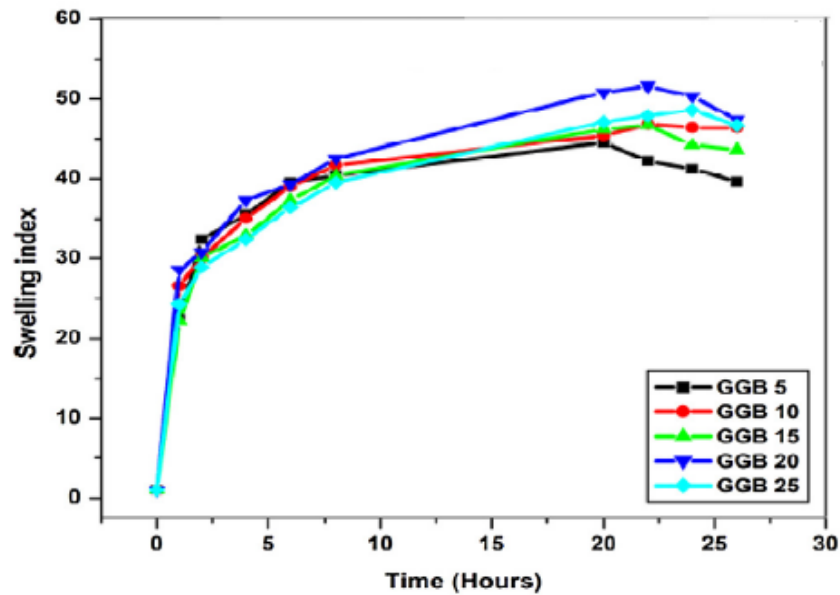


ภาพที่ 2.34 การเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิไวนิลแอลกอฮอล์โดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง

จากงานวิจัยของ N. Thombare [30] ได้ศึกษาวัสดุ hydrogels จาก Guar gum โดยใช้ borax เป็นตัว cross-linking agent ที่ปริมาณ 5-25% ของน้ำหนัก guar gum จากผลการทดลองจากเทคนิค FTIR (เพื่อเป็นการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง) พบว่า Wavenumber ที่ $3,403\text{ cm}^{-1}$ (เป็นการสั่นของหมู่ O-H แบบ stretching) มีลักษณะของพีคบางลงและแหลมขึ้นเมื่อเทียบกับ Guar gum ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยา cross-link ซึ่งเป็นผลมาจาก Borax ทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของ Guar gum ดังภาพที่ 2.35 เป็นผลให้ปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลของ Guar gum ลดลง และจากผล Water absorption พบว่าการเติมปริมาณ Borax 20% เกิดการบวมตัวมากที่สุด ส่วนเมื่อเติม ปริมาณ Borax 5% นั้นเกิดการบวมตัวน้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.36 โดยระดับการบวมตัวแปรผันตามการเชื่อมขวางของ Borax นอกจากนี้ เมื่อเติมปริมาณ Borax ที่ 25% สังเกตเห็นว่าระดับการบวมตัวลดลงอาจเนื่องมาจาก Borax ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาละลายออกมาจากวัสดุ จากนั้นตัวทำละลายที่ถูกดูดซึมเข้าไปในวัสดุจึงเกิดเป็น Hydrogel จึงเกิดการ Osmosis ของตัวทำละลายออกมาภายนอกวัสดุ Hydrogel เนื่องจากความเข้มข้นของของเหลวที่มากกว่า hydrogel

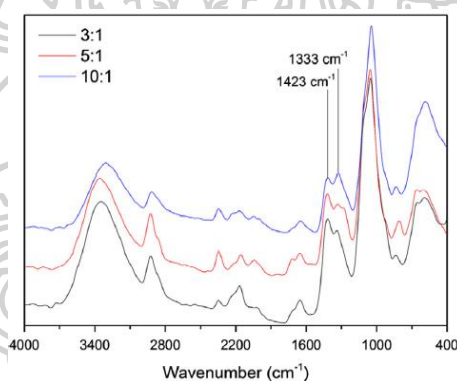


ภาพที่ 2.35 เทคนิค FTIR ของ hydrogels จาก Guar gum และ Guar gum ที่ถูก cross-linked โดย borax [30]

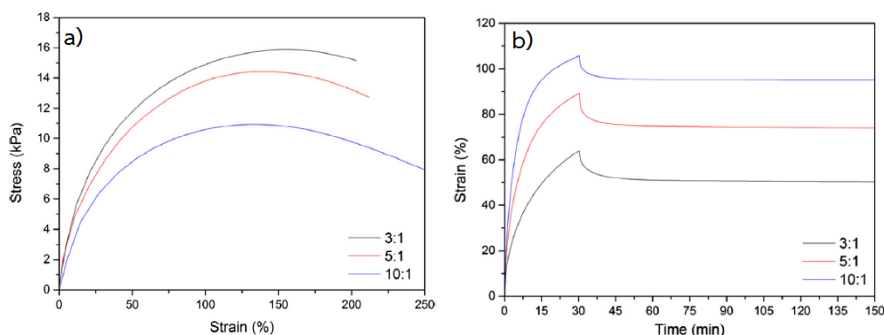


ภาพที่ 2.36 Water absorption ของ Guar gum และ Guar gum ที่ถูก cross-linked โดย borax ที่ปริมาณ 5% (GGB 5), 10% (GGB 10), 15% (GGB 15), 20% (GGB 20) และ 25% (GGB 25) [30]

จากงานวิจัยของ S. Spoljaric [31] ได้ทำการศึกษาการทำ hydrogels ที่เตรียมจากพอลิเมอร์สมระหว่าง เส้นใยเซลลูโลสระดับนาโน (NFC) และ poly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้ Borax เป็น cross-linking agent พบว่าจากเทคนิค FTIR ที่ Wavenumber 1,423 และ 1,333 cm^{-1} (เป็นการสั่นของ B-O-C แบบ asymmetric stretching), Wavenumber 828 cm^{-1} (เป็นการสั่นของ B-O แบบ stretching ที่เหลือจาก Borax) และ Wavenumber 650 cm^{-1} (เป็นการสั่นของ B-O-B แบบ bending ของ borate network) ดังภาพที่ 2.37 ในทุกๆอัตราส่วนของ PVA : borax แสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่าง PVA และการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่าง Borax ซึ่งจากสมบัติเชิงกลพบว่า เมื่อปริมาณ borax เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ stress เพิ่มขึ้น และช่วยป้องกันการเกิด creep ดังภาพที่ 2.38 เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางระหว่าง PVA โดยมี borax เป็น cross-linking agent ที่เพิ่มขึ้น

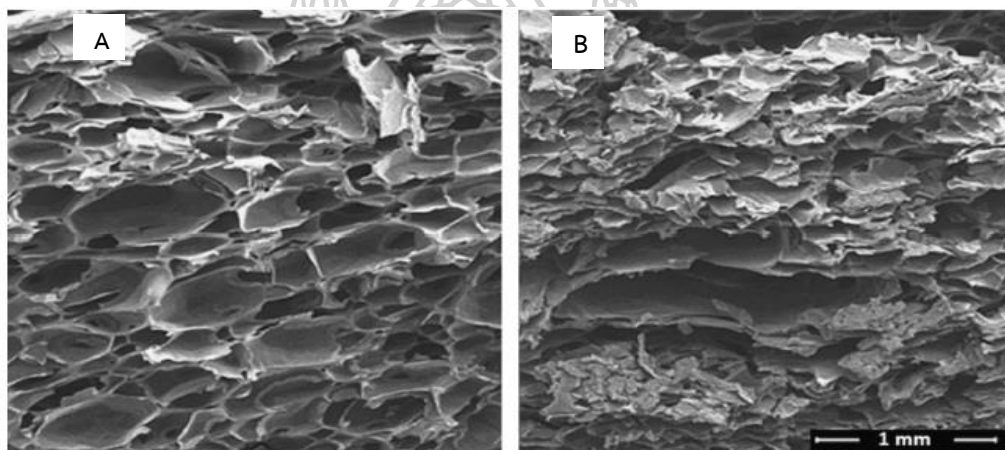


ภาพที่ 2.37 เทคนิค FTIR ของ hydrogel ที่อัตราส่วนระหว่าง PVA:borax 3:1, 5:1 และ 10:1 โดยเติมเส้นใยเซลลูโลสระดับนาโน 40%w/w [31]

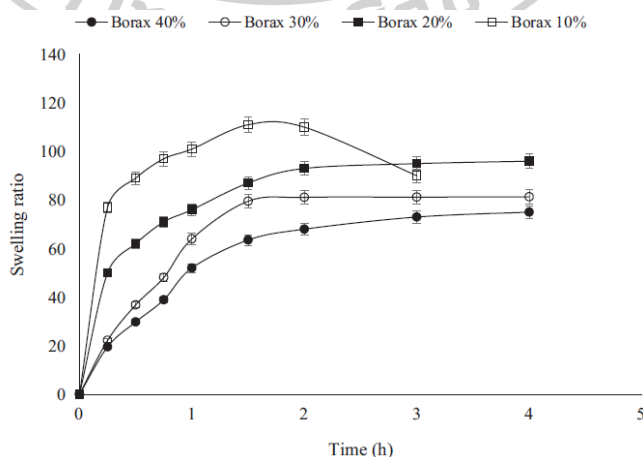


ภาพที่ 2.38 a) กราฟ Stress-Strain และ b) กราฟ Creep-recovery ของ hydrogel ที่อัตราส่วนระหว่าง PVA:borax 3:1, 5:1 และ 10:1 โดยเติมเส้นใยเซลลูโลสระดับนาโน 40%w/w [31]

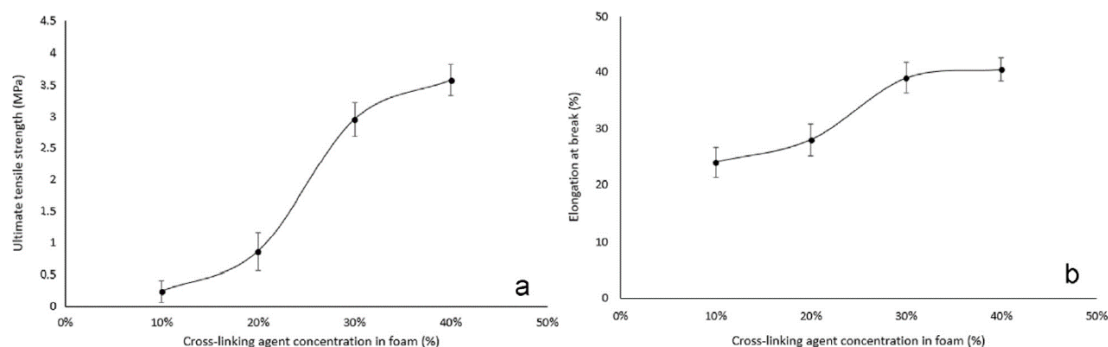
จากงานวิจัยของ J. Tavakoli [43] ได้ทำการศึกษาการเตรียมวัสดุปิดแผลซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนคล้ายโฟม โดยทำจากแป้งและเจลาตินด้วยวิธีการอบให้ความร้อน โดยทำให้แป้งและเจลาตินเป็นสารละลายจากนั้นอัดอากาศเข้าไปในสารละลาย โดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 10% เป็น 40% ขนาดเซลล์โฟมเล็กลง ค่าการบวมตัวลดลง และมีสมบัติเชิงกลที่แข็งแรงขึ้นซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.39, ภาพที่ 2.40 และภาพที่ 2.41 ตามลำดับ เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่แป้งและเจลาตินที่มากขึ้น โดยลักษณะของการเชื่อมขวางนั้น บอแรกซ์เมื่อละลายน้ำจะเปลี่ยนรูปเป็นบอเรตไอออน ($B(OH)_4^-$) จากนั้นบอเรตไอออนจะเกิดอันตรกิริยาเป็นพันธะไฮโดรเจนกับสายโซ่แป้งบริเวณหมู่ไฮดรอกซิล และ เจลาตินบริเวณหมู่เอมีน และหมู่คาร์บอนิลที่เป็น side chain ของสายโซ่เจลาติน



ภาพที่ 2.39 ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุปิดแผลที่เติมบอแรกซ์ 10% (A) และ 40% (B)



ภาพที่ 2.40 การบวมตัวของผ้าพันแผลเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 10% เป็น 40%



ภาพที่ 2.41 ค่า Tensile strength (a) และ Elongation at break (b) ของผ้าพันแผลเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 10% เป็น 40%

จากงานวิจัยของ G. Abinader และคณะ [44] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโฟมกันกระแทกจากแป้งสาลีผสมกับกลูเตน โดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็น Blowing agent โดยใช้เครื่อง Twin screw extruder ในการผสม โดยจากผลการทดลองพบว่าปริมาณเซลล์โฟม (C_d) มากขึ้นและขนาดเซลล์โฟม (C_s) เล็กลง เมื่อใช้ปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตมาก เนื่องจากเกิดปริมาณฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งถูกแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 สมบัติทางสัณฐานวิทยาของโฟมกันกระแทก

Foams	SB content	Glycerol content	Gluten content	ER	B_d (kg/m ³)	C_d (mm ²)	C_d (cell/cm ²)	C_{ck} (mm)
(A)	Low	Low	Low	5.37 ± 0.92	122.95 ± 8.28	3.37 ± 0.29	35.25 ± 2.85	0.14 ± 0.02
(B)	High	Low	Low	4.12 ± 0.55	139.45 ± 17.54	2.15 ± 0.24	50.84 ± 6.90	0.12 ± 0.02
(C)	Low	High	Low	6.43 ± 0.48	111.23 ± 13.78	7.53 ± 0.63	13.94 ± 1.75	0.16 ± 0.02
(D)	Low	Low	High	7.32 ± 0.50	86.69 ± 7.05	6.54 ± 1.24	14.97 ± 3.12	0.15 ± 0.02
(E)	High	High	Low	5.38 ± 0.55	112.37 ± 8.29	5.55 ± 0.79	17.86 ± 1.78	0.12 ± 0.01
(F)	High	Low	High	4.93 ± 0.62	110.93 ± 1.95	3.60 ± 0.65	28.00 ± 8.71	0.12 ± 0.01
(G)	Low	High	High	7.01 ± 0.62	98.68 ± 11.90	7.52 ± 1.01	15.96 ± 2.34	0.15 ± 0.02
(H)	High	High	High	5.48 ± 0.71	122.67 ± 14.46	4.01 ± 0.93	26.64 ± 4.05	0.14 ± 0.02
(EPE LD)	x	x	x	x	34.15 ± 0.09	2.38 ± 0.13	42.06 ± 0.39	0.14 ± 0.01
(EPE HD)	x	x	x	x	57.61 ± 0.48	1.38 ± 0.05	65.31 ± 0.51	0.12 ± 0.01

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แนวคิดของการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาโฟมชีวภาพ (biofoam) จากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตน (G) และแป้งสาลี (NS) เพื่อนำไปใช้ในการผลิตวัสดุที่ใช้ในการบรรจุอาหาร เช่น กล่องโฟม จานโฟม และถาดโฟม เป็นต้น โดยทำการศึกษาพื้นฐานวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ สี ความแข็ง และสมบัติการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟู่ที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 5 การศึกษาอิทธิพลของสารเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

3.2 ขอบเขตของการศึกษาและข้อจำกัดของงานวิจัย

3.2.1 วัสดุและสารเคมีที่ใช้

สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมโฟมชีวภาพแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	หน้าที่
1	Wheat gluten (G) บริษัท Anhui Ante Food Co., Ltd. ประเทศจีน	Polymer matrix
2	Wheat starch (NS) บริษัท Manildra Starches PTY Ltd. ประเทศออสเตรเลีย	Polymer matrix

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	หน้าที่
3	Sodium bicarbonate (NaHCO ₃) บริษัท Ajax Finechem PTY Ltd ประเทศออสเตรเลีย	Blowing agent
4	Reverse Osmosis water (RO)	Plasticizer
5	Glycerol บริษัท Ajax Finechem PTY Ltd ประเทศออสเตรเลีย	Plasticizer
6	Borax บริษัท Ajax Finechem PTY Ltd ประเทศออสเตรเลีย	Crosslinking agent

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องอัดรีดพลาสติกชนิดเกลียวหนอนคู่ ได้แก่ Twin screw extruder รุ่น CTW 100P Polylab-Rheomex บริษัท Haake ประเทศเยอรมัน
2. เครื่องมือศึกษาความเป็นผลึก ได้แก่ X-ray Diffraction (XRD) รุ่น XRD-6100 บริษัท SHIMADZU ประเทศญี่ปุ่น
3. เครื่องมือสำหรับผสมสารเคมี ได้แก่ Two-roll-mill รุ่น XK-06 บริษัท หงส์ยาวไทย จำกัด ประเทศไทย
4. เครื่องมือขึ้นรูปชิ้นงานแบบอัดความดัน ได้แก่ Compression molding machine บริษัท Labtech Engineering Co., Ltd. (Scientific) ประเทศไทย
5. เครื่องมือทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ได้แก่ Universal testing machine (UTM) Instron 3366 Instron Engineering corporation จากประเทศสหรัฐอเมริกา
6. เครื่องมือศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยา ได้แก่ Scanning electron microscope (SEM) รุ่น TM 3030 บริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น
7. เครื่องมือศึกษาความแข็งของโพลีเมอร์ ได้แก่ Hardness type O รุ่น GS-753G บริษัท Teclock ประเทศญี่ปุ่น
8. เครื่องมือศึกษาระดับสี ได้แก่ Color reader รุ่น CR-10 บริษัท Konica Minolta ประเทศไทย

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.3.1 ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเบื้องต้น

3.3.2 รวบรวมข้อมูลที่สำคัญและสอดคล้องกับงานวิจัย

3.3.3 ออกแบบและวางแผนการสำหรับงานวิจัย

3.3.4 เตรียมสารเคมีและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

3.3.5 ดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟลูที่มีต่อสมบัติของโพลีเมอร์ชีวภาพ

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่มีต่อสมบัติของโพลีเมอร์ชีวภาพ

ตอนที่ 4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติของโพลีเมอร์ชีวภาพ

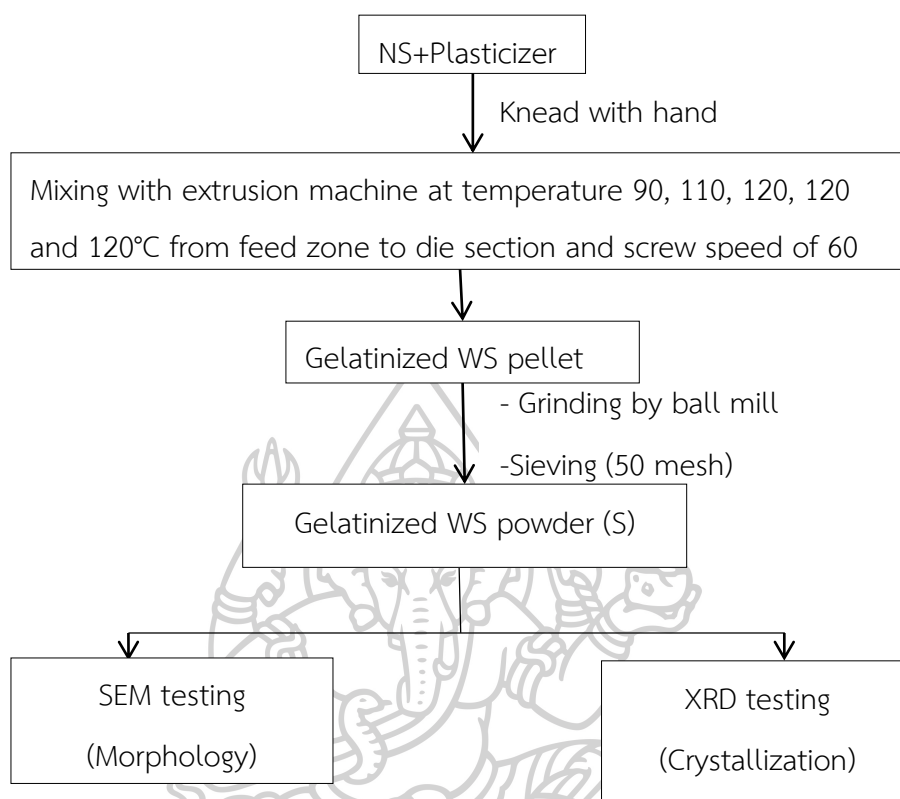
ตอนที่ 5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติของโพลีเมอร์ชีวภาพ

ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์

การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ (S) นั้นจำเป็นต่อการศึกษาโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาเพื่อเป็นการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ โดยการเตรียมและการพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์แสดงดังภาพที่ 3.1

องค์ประกอบในการแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์เป็นดังนี้

- ปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ (น้ำกลั่น) 30% ของแป้งสาลี
- ปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) 30%, 35% และ 40% ของแป้งสาลี



ภาพที่ 3.1 แผนภาพการศึกษาสมบัติทางสัณฐานวิทยาของแป้งสาลีเจลาตินไนซ์ (S) ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟลูที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

การศึกษาสมบัติของโฟมชีวภาพได้แก่ ความหนาแน่น ลักษณะรูปร่างของเซลล์โฟม การกระจายตัวของขนาดเซลล์ สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ เป็นต้น โดยจะเลือกแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์จากตอนที่ 1 ที่ใช้ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ที่เหมาะสมผสมกับกลูเตน เพื่อทดสอบสมบัติของโฟมชีวภาพ ตามขั้นตอนดังนี้โดยแสดงในภาพที่ 3.2

- ทำการร่อน G, S และ NaHCO_3 ตามสูตรที่ระบุไว้ในแต่ละตอน 3 ครั้ง โดยใช้ตะแกรกร่อนแป้งขนมปังขนาด 50 mesh

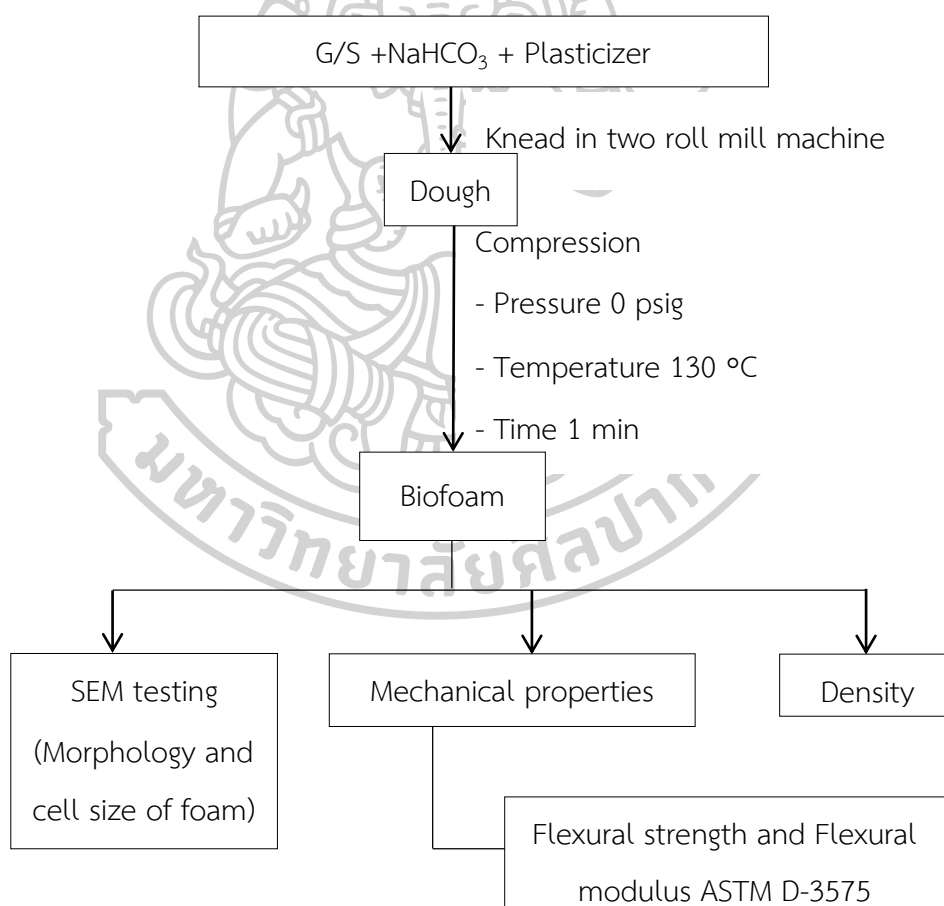
- ต่อมาทำการเติมพลาสติกไซเซอร์ (น้ำกลั่น/กลีเซอรอล) โดยผสมน้ำกลั่นและกลีเซอรอลให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกันก่อน ซึ่งใช้อัตราส่วนตามที่ระบุไว้ในแต่ละตอน ลงในของผสมที่ผ่านการร่อน

แล้วทำการนวดผสมด้วยมือจากนั้นจึงทำการนวดในเครื่องผสมแบบเปิด (two-roll mill machine) เป็นเวลา 10 นาที

- จากนั้นนำมาขึ้นรูปในเครื่อง compression molding ที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 1 นาที โดยไม่ใช้ความดันและการหล่อเย็น

องค์ประกอบในการเตรียมโฟมเป็นดังนี้

- อัตราส่วนโดยน้ำหนัก G และ S คงที่ที่อัตราส่วน 50:50
- ปริมาณ NaHCO_3 ที่ 0, 4, 8, 12 และ 16 phr
- ปริมาณพลาสติกไซเซอร์คงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักรวมของ G และ S
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์ (น้ำกลั่น/กลีเซอรอล) ที่อัตราส่วนคงที่ 3:1



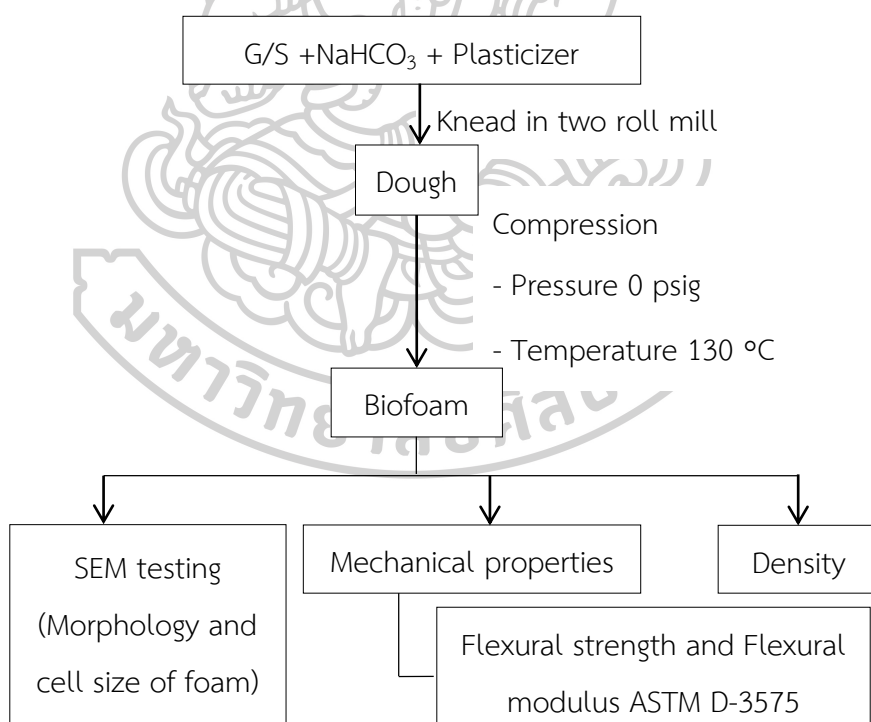
ภาพที่ 3.2 แผนภาพการศึกษาอิทธิพลของสารฟู่ที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

การศึกษาสมบัติของโฟมชีวภาพของตอนที่ 3 จะเลือกสูตรโฟมจากตอนที่ 2 ที่ศึกษามลของปริมาณสารฟูแล้วนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ลักษณะรูปร่างของเซลล์โฟม ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ตามขั้นตอนดังนี้โดยแสดงในภาพที่ 3.3

องค์ประกอบในการเตรียมโฟมเป็นดังนี้

- อัตราส่วนโดยน้ำหนัก G และ S ที่ 100/0 90/10 80/20 70/30 60/40 50/50 40/60 30/70 20/80 90/10 และ 0/100
- ปริมาณ NaHCO_3 คงที่ (เลือกจากการทดลองตอนที่ 2)
- ปริมาณพลาสติกไซเซอร์คงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักรวมของ G และ S
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์ (น้ำกลั่น/กลีเซอรอล) คงที่อัตราส่วน 3:1



ภาพที่ 3.3 แผนภาพการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ที่มีต่อสมบัติของโฟม

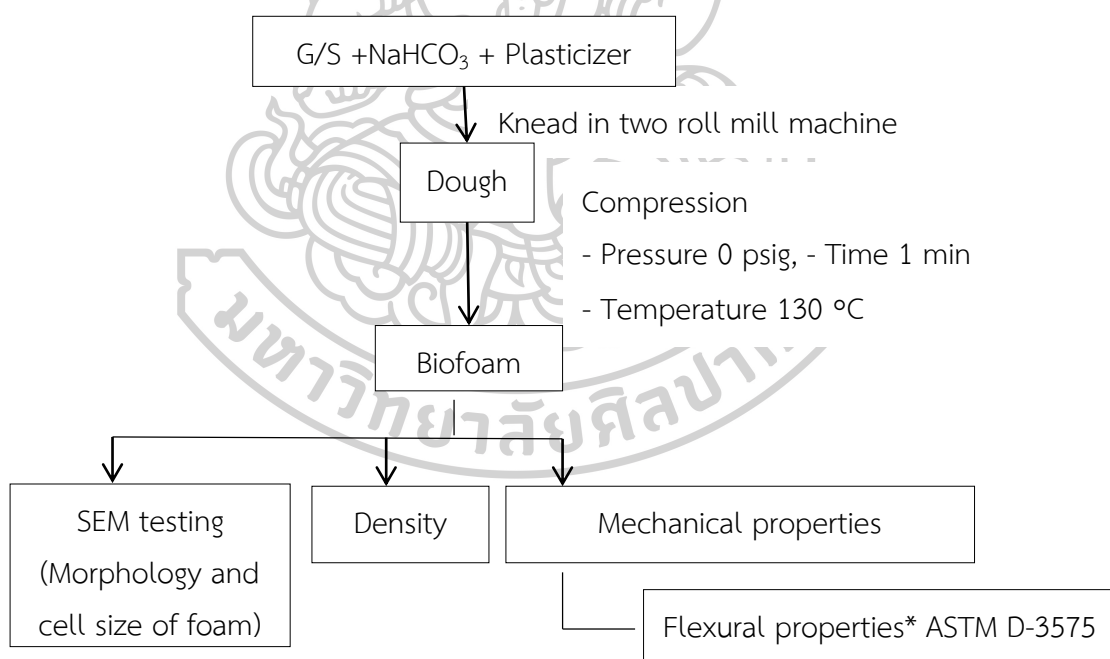
ตอนที่ 4 ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

การศึกษาโฟมชีวภาพในตอนที่ 4 เป็นการศึกษาผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งจะเลือกสูตรโฟมจากตอนที่ 3 (ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีเจลาตีไนซ์) แล้วนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความหนาแน่น ลักษณะรูปร่างของเซลล์โฟม ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ตามขั้นตอนดังนี้โดยแสดงในภาพที่ 3.4

โดยองค์ประกอบในการเตรียมโฟมเป็นดังนี้

- อัตราส่วนโดยน้ำหนัก G และ S คงที่ (เลือกจากการทดลองตอนที่ 3)
- ปริมาณ NaHCO_3 คงที่ (เลือกจากการทดลองตอนที่ 2)
- ปริมาณพลาสติกไซเซอร์คงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักรวมของ G และ S
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพลาสติกไซเซอร์ (น้ำกลั่น/กลีเซอรอล) ที่อัตราส่วน 2:1 3:1 4:1

และ 5:1



*ทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75%RH

ภาพที่ 3.4 แผนภาพการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 5 ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติของโพลีเอทิลีน

การศึกษาโพลีเอทิลีนในตอนที่ 5 เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง ซึ่งจะเลือกสูตรโพลีเอทิลีนจากตอนที่ 4 (ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างพลาสติกไซเซอรอล) แล้วนำมาทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การเชื่อมขวางของพอลิเมอร์เมทริกซ์กับสารเชื่อมขวางโดยใช้เทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ความหนาแน่น ลักษณะรูปร่างของเซลล์โพลีเอทิลีน ขนาดเซลล์โพลีเอทิลีน สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง (Hardness) สี (Color) และสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ตามขั้นตอนดังนี้โดยแสดงในภาพที่ 3.5

- ทำการร่อน G, S และ NaHCO_3 ตามสูตรที่ระบุไว้ในแต่ละตอน 3 ครั้ง โดยใช้ตะแกรงร่อนแปรงขนมปิ้ง

- ต่อมาทำการเติมพลาสติกไซเซอรอลที่ผสมกับ Borax โดยนำ Borax ละลายในกลีเซอรอล ก่อนจากนั้นจึงเติมน้ำกลั่นลงไปตามองค์ประกอบในการเตรียมโพลีเอทิลีน ลงในของผสมที่ผ่านการร่อนแล้วทำการนวดผสมด้วยมือจากนั้นจึงทำการนวดในเครื่องผสมแบบเปิด (two-roll mill machine) เป็นเวลา 10 นาที

- จากนั้นนำมาขึ้นรูปในเครื่อง compression molding ที่อุณหภูมิ 130 °C เป็นเวลา 1 นาที

โดยองค์ประกอบในการเตรียมโพลีเอทิลีนเป็นดังนี้

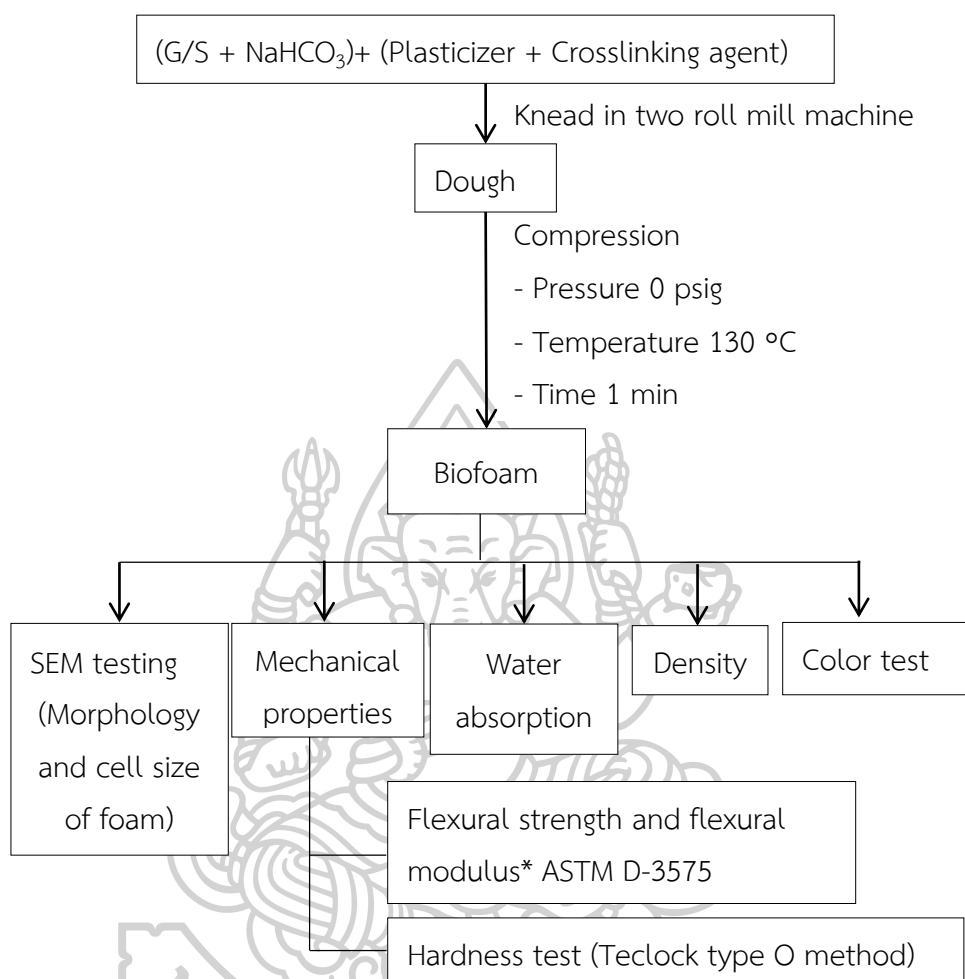
- อัตราส่วนโดยน้ำหนัก G และ S คงที่ที่อัตราส่วน (จากการทดลองตอนที่ 3)

- ปริมาณ NaHCO_3 คงที่ (จากการทดลองตอนที่ 2)

- ปริมาณพลาสติกไซเซอรอลคงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักรวมของ G และ S

- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพลาสติกไซเซอรอล (น้ำกลั่น/กลีเซอรอล) คงที่ (จากการทดลองตอนที่ 4)

- ปริมาณ Borax (Crosslinking agent) ที่ 6% 8% 10% และ 12% ของน้ำหนักรวมของ G และ S



*ทดสอบที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75%RH

ภาพที่ 3.5 แผนภาพการศึกษาอิทธิพลของสารเชื่อมขวางที่มีต่อโฟมชีวภาพ

3.3.6 วิเคราะห์และสรุปผลงานวิจัย

3.3.7 นำเสนองานวิจัย

3.4 การศึกษาสมบัติของโพลีเมอร์ชีวภาพ

3.4.1 ลักษณะการเป็นผลึกของแป้งสาลีดิบและแป้งสาลีเจลาตินไนซ์

1. นำแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกละลายในซึบดเป็นผงแล้ว อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 12 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้น

2. นำตัวอย่างที่เตรียมวิเคราะห์ด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD) โดยใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้า 30 kV กระแสไฟฟ้า 20 mA ความเร็วของการสแกน 5 deg/min และช่วงมุมการสแกน ตัวอย่าง 3° - 35°

3.4.2 ร้อยละความเป็นผลึกของแป้งสาลีดิบและแป้งสาลีที่ถูกละลายในซึบ

1. นำข้อมูลดิบจากเครื่อง X-ray diffraction (XRD) มาพล็อตกราฟด้วยโปรแกรม OriginPro 2015

2. หาพื้นที่ใต้กราฟของ peak และพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดแล้วนำมาคำนวณดังสมการที่ 3.1 เพื่อหาร้อยละความเป็นผลึก

$$\text{Crystallinity (\%)} = \left(\frac{\text{Area under crystalline peaks}}{\text{Area under over all}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

- Area under crystalline peaks คือ พื้นที่ใต้ peak

- Area under over all คือ พื้นที่ใต้กราฟทั้งหมด

- Crystalline (%) คือ ร้อยละความเป็นผลึก

3.4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยา การกระจายตัวและขนาดของเซลล์โพลี

1. นำโพลีชีวภาพที่เตรียมได้ทำตัดเพื่อดูพื้นผิวภายในเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3.0 มิลลิเมตร x 12.7 มิลลิเมตร

2. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ทำการเคลือบด้วย Au/Pd

3. นำตัวอย่างวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope ที่กำลังขยาย 100 เท่า

4. นำภาพที่ได้จากการวิเคราะห์มาหาขนาดเซลล์และการกระจายตัวของขนาดเซลล์

3.4.4 การหาความหนาแน่น (Density, g/cm³)

1. นำโพลีเมอร์ที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3.0 เซนติเมตร x 12.7 เซนติเมตร x 63.5 เซนติเมตร
2. วัดขนาดโพลีเมอร์ทั้ง 3 ด้าน คือ กว้าง ยาว และสูง ด้านละ 3 ครั้งหาค่าเฉลี่ยจากนั้นนำไปคำนวณเพื่อหาปริมาตรดังสมการที่ 3.2

$$\text{ปริมาตร} = \text{กว้าง} \times \text{ยาว} \times \text{สูง} \quad (3.2)$$

3. นำโพลีเมอร์เข้าสู่กล่อง Super lock ปริมาตร 2,900 มิลลิลิตร ที่มี Silica gel น้ำหนัก 155±5 กรัม ระยะเวลา 5 วัน จากนั้น ชั่งน้ำหนัก และทำการบันทึกค่า
4. หาความหนาแน่นปรากฏ (apparent density) ของโพลีเมอร์ดังสมการที่ 3.3

$$\text{ความหนาแน่นของโพลีเมอร์} = \frac{\text{น้ำหนักของโพลีเมอร์}}{\text{ปริมาตรของโพลีเมอร์}} \quad (3.3)$$

3.4.5 ความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural testing)

1. นำโพลีเมอร์ที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3.0 มิลลิเมตร x 12.7 มิลลิเมตร x 63.5 มิลลิเมตร
2. ทำการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM D790 ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสและความดันบรรยากาศ โดยใช้อัตราเร็วในการกดขึ้นงานคือ 1.33 มิลลิเมตร/นาที
3. นำชิ้นงานเข้าสู่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% โดยใช้ความชื้นอิ่มตัวของสารละลาย Magnesium Nitrate Hexahydrate ที่อิ่มตัวในภาชนะปิด และ 75%RH ใช้ความชื้นอิ่มตัวของสารละลาย Sodium Chloride ที่อิ่มตัวในภาชนะปิด เป็นเวลา 5 วันก่อนทำการทดสอบชิ้นงาน
4. หาค่าเฉลี่ย จากการทดสอบจะได้ค่าความต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural strength) และ โมดูลัสการโค้งงอ (Flexural modulus) ซึ่ง โมดูลัสการโค้งงอ (Tensile modulus) หาได้จากสมการ 3.4

$$E = \frac{\frac{dF}{dL} \times c^3}{4 \times b^3 \times a^3} \quad (3.4)$$

เมื่อ $\frac{dF}{dL}$ คือ ความชันของกราฟ stress-strain, c คือ support span (49.0 มิลลิเมตร),

b คือ ความกว้างของชิ้นงาน และ a คือ ความหนาของชิ้นงาน

3.4.5 ความแข็ง (Hardness testing)

1. นำโฟมชีวภาพที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60.0 มิลลิเมตร x 60.0 มิลลิเมตร x 6.0 มิลลิเมตร
2. ทำการทดสอบโดยใช้มาตรฐาน ASTM D2240 Durometer type O ภายใต้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส, ความดันบรรยากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ 50%
3. ทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นวัด 3 ตำแหน่ง จากนั้นหาค่าเฉลี่ย จากการทดสอบจะได้ค่าความแข็ง (Hardness)

3.4.6 ค่าสีของโฟมชีวภาพ (Color reader)

1. นำโฟมชีวภาพที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 60.0 มิลลิเมตร x 60.0 มิลลิเมตร x 6.0 มิลลิเมตร
2. ทดสอบชิ้นงานทั้งหมด 5 ชิ้น โดยแต่ละชิ้นวัด 3 ตำแหน่ง การวัดค่าสีใช้ระบบ CIE Laboratory system Lab เป็นระบบการบรรยายสีแบบ 3 มิติ โดยที่ แกน L^* จะแสดงถึงความสว่าง (Lightness) จากค่า $L^*=0$ จะแสดงค่าความมืด และ $L^*=100$ จะแสดงค่าความสว่างที่สุด แกน a^* จะแสดงถึงเฉดสีจากสีเขียว ($-a^*$) ไปจนถึงสีแดง ($+a^*$) แกน b^* จะแสดงถึงเฉดสีน้ำเงิน ($-b^*$) ไปจนถึงสีเหลือง ($+b^*$) โดยจะวางโฟมชีวภาพที่วัดค่าสีในตู้ที่มีการฉายแสง Daylight และรายงานค่าสีของโฟมเป็นค่า L^* , a^* , b^* ซึ่งแผนภาพค่าสีระบบ Lab แสดงดังภาพที่ 3.6 และค่าความแตกต่างรวมของสี (Total color difference, ΔE) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.4)$$

เมื่อ ΔE คือ ค่าความแตกต่างรวมของสี

ΔL^* คือ ค่าความแตกต่างของค่าความสว่างระหว่างโฟมชีวภาพกับโฟมมาตรฐาน

Δa^* คือ ค่าเฉดสีเขียวถึงสีแดงระหว่างโฟมชีวภาพกับโฟมมาตรฐาน

Δb^* คือ ค่าเฉดสีน้ำเงินถึงสีเหลืองระหว่างโฟมชีวภาพกับโฟมมาตรฐาน

โดยโฟมมาตรฐานที่ใช้คือ Polystyrene Paper Foam (PSP foam)

3. จากนั้นนำค่า L^* , a^* และ b^* มาคำนวณค่าสีระบบ CIE Laboratory system LCh ซึ่งเป็นระบบวัดสีโดยใช้แผนภาพวงกลม โดยแกน L^* จะแสดงถึงความสว่าง (Lightness) แกน C^* (chroma) จะแสดงถึงความเข้มของสี โดยค่า C^* มีค่ามากแสดงถึงสีมีความเข้มมาก และค่า h^* (hue angle) จะแสดงถึงค่าที่บอกสีนั้นๆ โดยกำหนดเป็นตัวเลขแสดงมุมของวงกลมซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-359 องศา ซึ่งแสดงตำแหน่งของสีเส้นที่อยู่ล้อมรอบแกนกลาง ค่า $h^*=0$ แสดงถึงเฉดสีแดง, $h^*=90$ แสดงถึงเฉดสีเหลือง, $h^*=180$ แสดงถึงเฉดสีเขียว และ $h^*=270$ แสดงถึงเฉดสีน้ำเงิน ซึ่งการคำนวณค่า L , C^* และ h^* จากระบบการวัดสี Lab แสดงดังสมการที่ 3.5-3.9

$$L^* (\text{ของระบบการวัดค่าสี LCh}) = L^* (\text{ของระบบการวัดค่าสี Lab}) \quad (3.5)$$

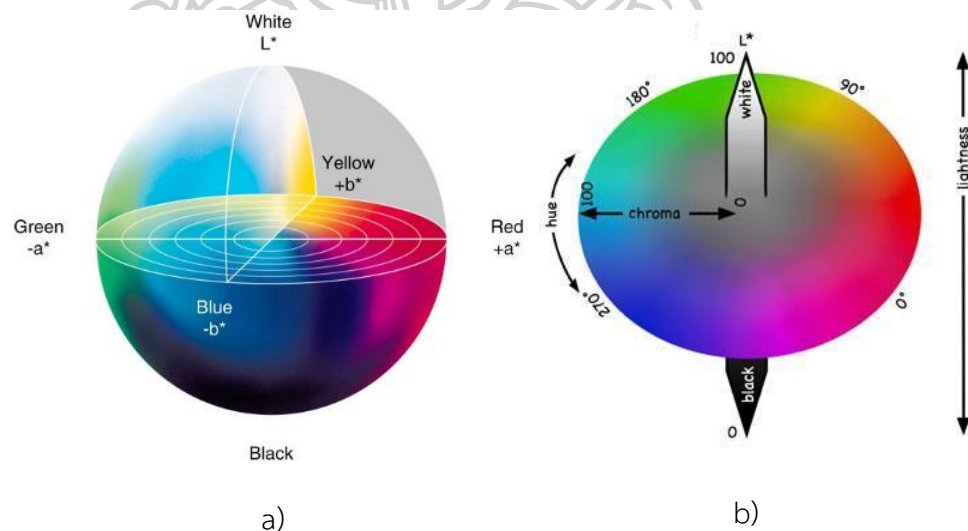
$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3.6)$$

$$\text{ถ้า ค่า } a^* > 0; h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (3.7)$$

$$\text{ค่า } a^* < 0; h^* = \left(\tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \times \frac{180}{\pi} \right) + 180 \quad (3.8)$$

เมื่อ คำนวณค่า h^* แล้วค่า $h^* < 0$ ค่า h^* จะต้องคำนวณใหม่ดังสมการที่ 3.9

$$h^* (\text{ค่าใหม่}) = 360 - |h^* (\text{ค่าเก่า})| \quad (3.9)$$



ภาพที่ 3.6 a) แผนภาพค่าสีในระบบ Lab [45] และ b) แผนภาพค่าสีในระบบ LCh [46]

3.4.7 ค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption)

1. นำโคมชีวะภาพที่เตรียมได้จากการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ที่เป็นทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 3.0 มิลลิเมตร x 12.7 มิลลิเมตร x 63.5 มิลลิเมตร
2. ทำการทดสอบชิ้นงานซึ่งตัดแปลงจากมาตรฐาน ASTM D3575
3. นำชิ้นงานวางเป็นแนวราบไว้ในตะกร้าขนาดเล็ก แล้วจึงนำตะกร้าที่มีชิ้นงานแช่ในน้ำกลั่น (Reverse osmosis, RO) เวลา 60 วินาที โดยความสูงจากระดับน้ำถึงชิ้นงานชิ้นงานเท่ากับ 1 เซนติเมตร จากนั้นนำกระดาษ tissue เช็ดที่พื้นผิว แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
4. การหาค่าการดูดซึมน้ำ (Water absorption, WA.) สามารถหาได้จากสมการที่ 3.5

$$WA. = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad (3.5)$$

เมื่อ WA. คือค่าการดูดซึมน้ำ

W_1 คือน้ำหนักชิ้นงานหลังแช่น้ำ

W_0 คือน้ำหนักชิ้นงานก่อนแช่น้ำ

3.4.8 การใช้สถิติเพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของผลการทดสอบ

ค่าจากการทดสอบจะนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติ ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab 16 โดยใช้ Tukey's ในการวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างของผลการทดลอง โดยมีความเชื่อมั่น 95%

3.5 สัญลักษณ์และคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.2 คำบรรยายและคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	คำบรรยาย
NS	แป้งสาลีดิบ
B	สารฟู (โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต)
P	พลาสติกไซเซอร์ (น้ำและกลีเซอรอล)
C	สารเชื่อมขวาง (บอแรกซ์)
PSP foam	โฟมพอลิสไตรีนสำหรับบรรจุอาหาร
S 30:30	แป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ โดยใช้พลาสติกไซเซอร์น้ำและกลีเซอรอล 30:30
S 30:35	แป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ โดยใช้พลาสติกไซเซอร์น้ำและกลีเซอรอล 30:35
S 30:40	แป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ โดยใช้พลาสติกไซเซอร์น้ำและกลีเซอรอล 30:35
B0	โฟมชีวภาพที่สกัดจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ 50:50 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล 3:1
B4	โฟมชีวภาพที่สกัดจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ 50:50 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล 3:1 และใช้สารฟู 4 phr
B8	โฟมชีวภาพที่สกัดจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ 50:50 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล 3:1 และใช้สารฟู 8 phr
B12	โฟมชีวภาพที่สกัดจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ 50:50 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล 3:1 และใช้สารฟู 12 phr
B16	โฟมชีวภาพที่สกัดจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ 50:50 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล 3:1 และใช้สารฟู 16 phr

ตารางที่ 3.2 (ต่อ) คำบรรยายและคำย่อที่ใช้ในงานวิจัย

สัญลักษณ์	คำบรรยาย
G-P51-C6	โพนชีวภาพที่ใช้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 100:0 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1, ใช้สารฟู 12 phr และใช้สารเชื่อมขวาง 6%
G-P51-C8	โพนชีวภาพที่ใช้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 100:0 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1, ใช้สารฟู 12 phr และใช้สารเชื่อมขวาง 8%
G-P51-C10	โพนชีวภาพที่ใช้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 100:0 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1, ใช้สารฟู 12 phr และใช้สารเชื่อมขวาง 10%
G9S1-P51-C6	โพนชีวภาพที่ใช้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 90:10 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1, ใช้สารฟู 12 phr และใช้สารเชื่อมขวาง 6%
G9S1-P51-C8	โพนชีวภาพที่ใช้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 90:10 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1, ใช้สารฟู 12 phr และใช้สารเชื่อมขวาง 8%
G9S1-P51-C10	โพนชีวภาพที่ใช้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 90:10 โดยใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1, ใช้สารฟู 12 phr และใช้สารเชื่อมขวาง 10%

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลี (G) และแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ (S) ซึ่งในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์จากโฟมได้รับการนิยมนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร ส่วนใหญ่ผลิตจาก Polystyrene Paper foam (PSP foam) ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ การรีไซเคิลทำได้ยาก และยังเป็นสาเหตุของการเกิดโรคมะเร็งในมนุษย์ [1] จากผลกระทบต่างๆ ของการใช้ PSP foam ที่มีต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ดังกล่าวมา การใช้โฟมชีวภาพเพื่อทดแทนการใช้ PSP foam จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง ในการผลิตโฟมเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

ดังนั้นในการงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการเตรียมโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ อิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกไข่เชอร์อล อิทธิพลของปริมาณสารฟู (Blowing agent) และอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง (Crosslinking agent) ที่มีต่อลักษณะรูปร่าง (Morphology) ความหนาแน่น (Density) สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ (Mechanical properties) ความแข็ง (Hardness) สี (Color) และสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโฟมชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ โดยงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 5 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์

ตอนที่ 2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟูที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกไข่เชอร์อลที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

ตอนที่ 5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติของโฟมชีวภาพ

4.1 การศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

แป้งสาลีเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกที่ประกอบไปด้วยอะไมโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์แบบเส้นตรง และอะไมโลเพกตินซึ่งเป็นพอลิเมอร์กิ่งอยู่ในเม็ดแป้ง ดังนั้นก่อนที่จะนำแป้งสาลีมาผสมกับกลูเตนเพื่อเตรียมเป็นโพนชีวภาพนั้นจำเป็นต้องลดความเป็นผลึกของแป้ง โดยการทำให้เม็ดแป้งแตกตัวด้วยการทำเจลาตีไนซ์แป้งสาลีซึ่งใช้พลาสติกไซเซอร์ เช่น น้ำหรือกลีเซอรอล ภายใต้สภาวะความร้อน ซึ่งพลาสติกไซเซอร์จะไปลดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ในอะไมโลสและอะไมโลเพกตินภายในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งแตกตัวออกและความเป็นผลึกลดลง การเจลาตีไนซ์แป้งนั้นอาจทำได้หลากหลายวิธี เช่น การทำแป้งเจลาตีไนซ์ด้วยวิธีการทำเป็นสารละลายแป้งแล้วให้ความร้อน หรือการทำแป้งเจลาตีไนซ์โดยเติมพลาสติกไซเซอร์แล้วให้ความร้อนและแรงเฉือนด้วยเครื่อง Twin screw extruder ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ด้วยเครื่อง Twin screw extruder ใช้อุณหภูมิในแต่ละโซนของเครื่อง extruder 90, 110, 120 และ 120 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำและกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งปริมาณพลาสติกไซเซอร์แสดงดังตารางที่ 4.1

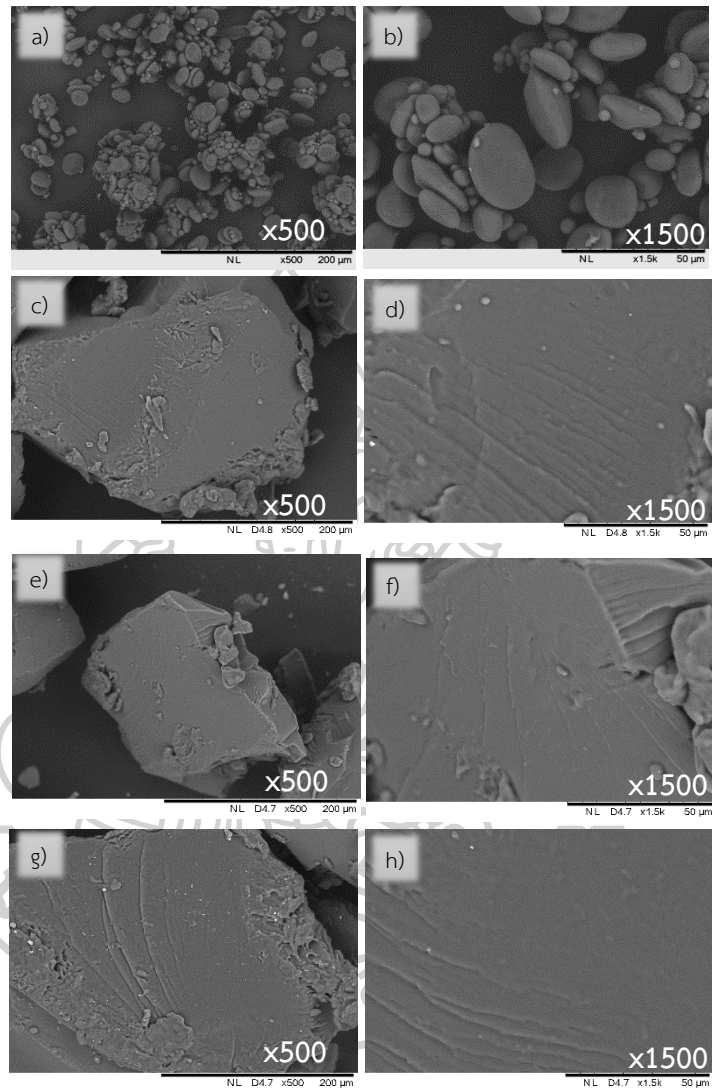
ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนของน้ำและกลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไซเซอร์ของแป้งสาลีเพื่อเตรียมแป้งที่ถูกเจลาตีไนซ์

อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล	แป้งสาลี (กรัม)	น้ำ (กรัม)	กลีเซอรอล (กรัม)
S 30:30	100	30	30
S 30:35	100	30	35
S 30:40	100	30	40

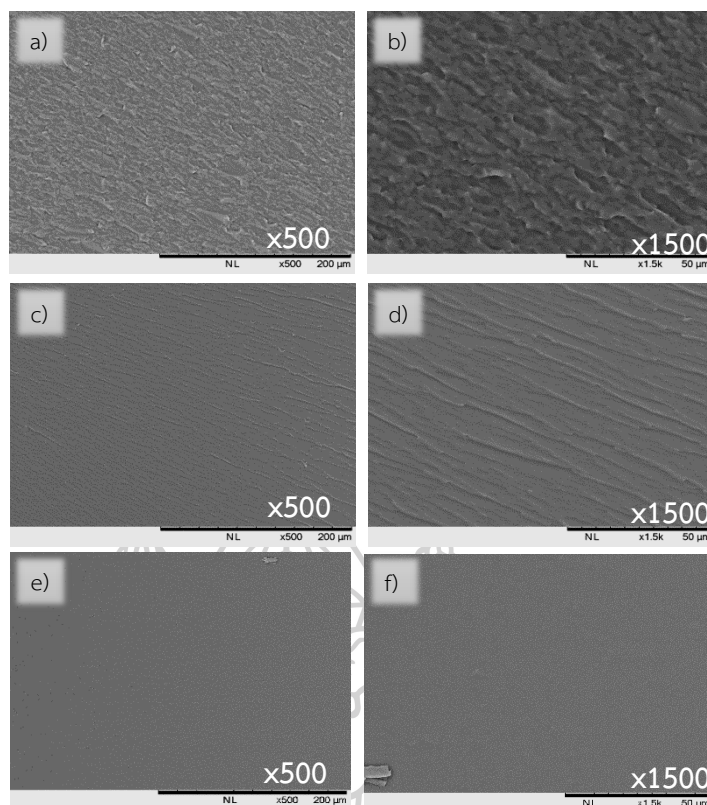
4.1.1 การศึกษาสัณฐานวิทยาของแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

สัณฐานวิทยาของแป้งสาลีก่อนและหลังการทำเจลาตีไนซ์ตรวจสอบโดยใช้เครื่อง Scanning electron microscope (SEM) ภาพที่ 4.1 แสดงภาพถ่าย SEM ของผงแป้งสาลีดิบ (wheat starch, NS) และผงแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ (S) ด้วยน้ำและกลีเซอรอลที่อัตราส่วนต่างๆ โดยผงแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ได้มาจากการนำเอ็กซ์ทรูเดต (extrudate) แป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์มาบดให้ละเอียด ด้วย

เครื่อง ball mill และภาพที่ 4.2 แสดงภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวรอยแตกหักหลังจากนำเอ็กซ์ทราคต์ แป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ ด้วยน้ำและกลีเซอรอลที่อัตราส่วนต่างๆ มาหักในไนโตรเจนเหลว



ภาพที่ 4.1 ภาพ SEM ของ (a,b) คือแป้งสาลีดิบที่ยังไม่ผ่านการเจลาติไนซ์ (NS), (c,d) คือผงแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์ที่ได้จากการบดเส้นเอ็กซ์ทราคต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:30 (S 30:30), (e,f) คือผงแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์ที่ได้จากการบดเส้นเอ็กซ์ทราคต์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:35 (S 30:35), และ (g,h) คือผงแป้งที่ถูกเจลาติไนซ์ที่ได้จากการบดเส้นเอ็กซ์ทราคต์ ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:40



ภาพที่ 4.2 ภาพ SEM ของพื้นผิวรอยแตกหักชิ้นงานเมื่อแช่ในไนโตรเจนเหลว (a,b) คือเอ็กซ์ทรูเดตแป่งสาลิที่ถูกเจลาติไนซ์ ที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอรอล 30:30 (S 30:30), (c,d) คือเอ็กซ์ทรูเดตแป่งสาลิที่ถูกเจลาติไนซ์ ที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอรอล 30:35 (S 30:35) และ (e,f) คือเอ็กซ์ทรูเดตแป่งสาลิที่ถูกเจลาติไนซ์ ที่อัตราส่วนน้ำตอกลิเซอรอล 30:40 (S 30:40)

จากภาพที่ 4.1 a-b ซึ่งเป็นภาพ SEM ของผงแป่งสาลิดิบที่ยังไม่ผ่านการเจลาติไนซ์ (NS) พบว่าแป่งสาลิดิบอยู่ในรูปของเม็ดแป่งขนาด 2-3 ไมครอน โดยเม็ดแป่งสาลิมีรูปร่างลักษณะ 2 แบบ คือรูปร่างกลมแบน และรูปรีคล้ายไข่ ส่วนภาพที่ 4.1 c-h และภาพที่ 4.2 a-f เป็นรูปผงแป่งสาลิดิบที่ผ่านการเจลาติไนซ์และพื้นผิวรอยแตกหักของเอ็กซ์ทรูเดตแป่งสาลิที่ถูกเจลาติไนซ์ตามลำดับ พบว่าแป่งสาลิที่ถูกเจลาติไนซ์โดยน้ำและกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 30:30, 30:35 และ 30:40 ไม่ปรากฏเม็ดแป่งสาลิหลงเหลืออยู่ แสดงว่าเม็ดแป่งเกิดการแตกออก ซึ่งภายในเม็ดแป่งประกอบไปด้วยโมเลกุลของแป่ง 2 ชนิด และมีการจัดเรียงตัวต่างกันคือ 1) อะไมโลสที่มีสายโซ่โมเลกุลขนาดเล็กและมีกิ่งก้าน (branch) เล็กน้อย และ 2) อะไมโลเพคตินมีสายโซ่โมเลกุลขนาดใหญ่และมีกิ่งก้านมากภายในเม็ดแป่งมีการจัดเรียงตัวกันระหว่างสายโซ่โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินด้วยกัน 2 ส่วนคือส่วนที่เป็น Crystallite ซึ่งสายโซ่โมเลกุลจะมีการจัดเรียงตัวกันหนาแน่นและเป็นระเบียบ

โดยหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่อะไมโลสและอะไมโลเพคตินเกิดพันธะไฮโดรเจนกันระหว่างสายโซ่ และ ส่วนที่เป็น Amorphous ซึ่งเป็นส่วนที่สายโซ่โมเลกุลจัดเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ไม่เป็นระเบียบ และ หมู่ไฮดรอกซิลในอะไมโลสและอะไมโลเพคตินอยู่กันอย่างอิสระ (Free hydroxyl group) ในปริมาณ มาก โดยหมู่ไฮดรอกซิลเหล่านี้ไม่เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกัน เมื่อนำแป้งสาลีดิบมาผสมกับน้ำและ กลีเซอรอล น้ำกับกลีเซอรอลจะเข้าไปแทรกในระหว่างสายโซ่ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินใน ส่วน ของ Crystallite โดยน้ำและกลีเซอรอลจะเข้าไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ทำให้โมเลกุล ของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินใน ส่วน Crystallite ที่จับตัวกันอย่างหนาแน่นและแข็งแรงเริ่มคลาย ตัวออกจากกัน ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มมากขึ้น ต่อมาเมื่อนำแป้งที่มีน้ำและกลีเซอรอลเข้าไปผสมใน เครื่อง twin screw extruder เม็ดแป้งที่พองตัวนี้เมื่อได้รับความร้อนและแรงเฉือนจะไปทำลาย โครงสร้างของอะไมโลเพคตินที่มีการจัดเรียงตัวกันแบบเกลียวคู่ (double helical structure) ซึ่งมีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ทำให้สายโซ่โมเลกุลเกิดการกระจายตัวห่างออกจากกัน ส่งผลให้ เม็ดแป้งแตกตัวออกและความเป็นผลึกของแป้งลดลงในที่สุด [16] ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ V. Sessini และคณะ [47] ที่ได้ทำการเตรียมฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีการเจลาตินไนซ์ แป้งมันสำปะหลัง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งจากลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ แป้งมันสำปะหลังที่ถูกเจลาตินไนซ์ พบว่าไม่ปรากฏให้เห็นเม็ดแป้งมันสำปะหลังบริเวณฟิล์มเช่นกัน และเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มจากแป้งมันสำปะหลังไม่ แตกต่างกัน นั้นแสดงให้เห็นถึงปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยา

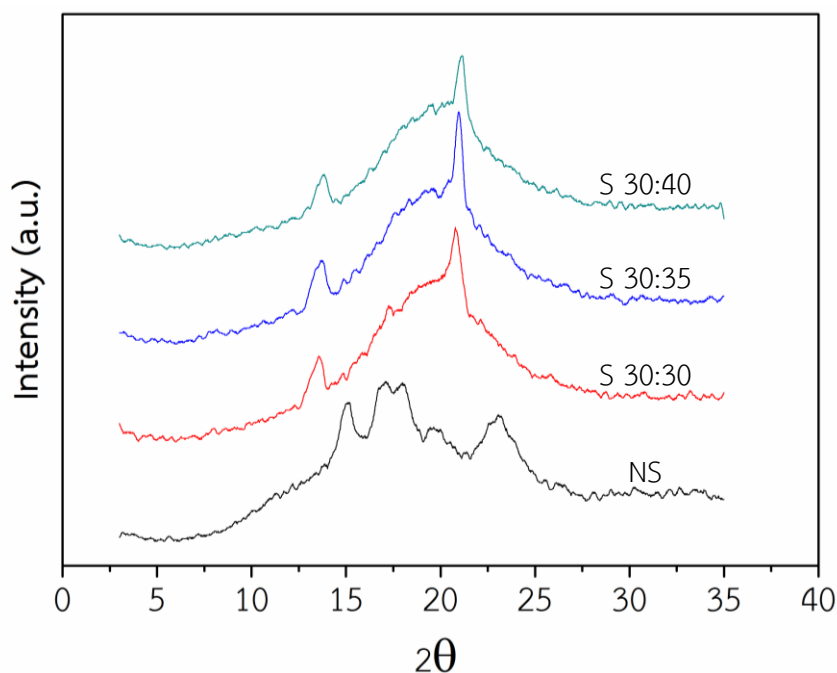
4.1.2 การศึกษาความเป็นผลึกของแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์

เม็ดแป้งดิบมีโครงสร้างกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยความเป็นผลึกของแป้งเป็นผลมาจากการจัดเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของอะไมโลเพคตินแบบเกลียวคู่ที่มีการจัดเรียงตัวกันอย่างเป็น ระเบียบ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาความเป็นผลึกของผงแป้งสาลีก่อนและหลังการเจลาตินไนซ์แป้งสาลี โดยใช้เทคนิค X-ray diffraction analysis (XRD) ซึ่งภาพที่ 4.3 แสดงรูปแบบพีคของเทคนิค XRD (XRD pattern) ของผงแป้งสาลีที่ไม่ผ่านการทำเจลาตินไนซ์ (NS) และผงแป้งสาลีหลังผ่านการทำ เจลาตินไนซ์ (S) โดยใช้น้ำตอกกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่อัตราส่วน 30:30, 30:35 และ 30:40 ตามลำดับ

จากภาพที่ 4.3 พบว่า XRD pattern ของผงแป้งสาลี (NS) ปรากฏพีคที่มุม 2θ คือ 15.14° , 17.12° , 18.03° , 20.01° และ 23.08° แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างผลึกของเม็ดแป้งสาลีเป็นแบบ A-type crystallinity ซึ่งมักพบในแป้งจากธัญพืช โดยสอดคล้องกับจากงานวิจัยของ E. de M. Teixeira

และคณะ [48] ที่ได้ทำการศึกษาการทำโพลีจาก Poly lactic acid (PLA) ที่มีการเติมแป้งสาลีและเส้นใย พบว่า XRD pattern ของแป้งสาลีดิบนั้นจะพบพีคที่มุม 2θ อย่างเด่นชัดคือ 14.8° , 17.0° , 18.0° , 19.9° และ 23.5° ซึ่งเป็น XRD pattern ของผงแป้งสาลีที่มีโครงสร้างผลึกแบบ A-type crystallinity เมื่อพิจารณา XRD pattern ของผงแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:30, 30:35 และ 30:40 พบว่า XRD pattern ของแป้งที่ถูกเจลาตินไนซ์ไม่ปรากฏพีคที่มุม 2θ เหมือนใน XRD pattern ของแป้งสาลีดิบ (NS) ซึ่งแสดงว่าโครงสร้างของเม็ดแป้งที่เกิดจากการจัดเรียงตัวกันที่เป็นระเบียบของ double helical structure ถูกทำลายไปเมื่อแป้งถูกเจลาตินไนซ์ นอกจากนี้ XRD pattern ของแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ปรากฏพีคขึ้นมาใหม่ที่มุม 2θ อย่างเด่นชัดคือที่ 13.58° และ 20.78° ซึ่งพีคที่ปรากฏนี้แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างแบบ V_A (anhydrous)-type crystallinity โดยโครงสร้างแบบ V_A (anhydrous)-type crystallinity บ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยากันระหว่างอะไมโลสกับกลีเซอรอล [49] โดยสามารถพบได้ในแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ในเครื่อง twin screw extruder ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวนี้สอดคล้องกับผลการทดลองจากงานวิจัยของ J.J.G. van Soest และคณะ [50] ที่ได้ทำการศึกษาโครงสร้างความเป็นผลึกของแป้งชนิดต่างๆ พบว่าแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ด้วยกระบวนการ extrusion นั้นจะมีโครงสร้างแบบ V_A (anhydrous)-type crystallinity เช่นกัน

ตารางที่ 4.2 แสดงร้อยละความเป็นผลึกของผงแป้งสาลีดิบ (NS) และผงแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:30, 30:35 และ 30:40 (S 30:30, S 30:35 และ S 30:40) โดยใช้วิธีการหาพื้นที่ใต้กราฟของ XRD pattern พบว่า ผงแป้งสาลีดิบ (NS) มีร้อยละความเป็นผลึกคือ 32.02% ซึ่งมีปริมาณผลึกสูงกว่าแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ในทุกๆ อัตราส่วน ซึ่งมีปริมาณผลึก 9-10% แสดงให้เห็นว่าแป้งสาลีดิบที่ถูกเจลาตินไนซ์ในเครื่อง twin screw extruder โดยใช้น้ำและกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่อัตราส่วน 30:30, 30:35 และ 30:40 ในงานวิจัยนี้สามารถทำให้ความเป็นผลึกของแป้งลดลง แต่ยังไม่สามารถเปลี่ยนให้แป้งมีโครงสร้างแบบออสัญฐานได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ M. Majzoobi [51] ซึ่งได้ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของแป้งสาลีพรีเจลาตินไนซ์ (Pre-gelatinized Wheat Starch) ด้วยเครื่อง Twin drum Drier พบว่าผงแป้งสาลีดิบมีร้อยละความเป็นผลึกเท่ากับ 40.08% เมื่อแป้งสาลีดิบผ่านการเจลาตินไนซ์ร้อยละความเป็นผลึกลดลงเหลือเพียง 2.22% ดังนั้นแป้งที่ถูกเจลาตินไนซ์จะมีสมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยเม็ดแป้งแตกออกและไม่สามารถกลับคืนตัวเป็นเม็ดแป้งได้อีก ทำให้ความเป็นผลึกของเม็ดแป้งลดลง



ภาพที่ 4.3 XRD pattern ของผงแป้งสาลิ (NS), S 30:30, S 30:35 และ S 30:40 คือผงแป้งที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:30 (S 30:30), 30:35 (S 30:35) และ 30:40 (S 30:40) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 ร้อยละความเป็นของผงแป้งสาลิดิบ (NS) และผงแป้งสาลิที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล 30:30, 30:35 และ 30:40 (S 30:30, S 30:35 และ S 30:40)

ตัวอย่าง	ความเป็นผลึก (%)
NS	32.02
S 30:30	10.18
S 30:35	9.53
S 30:40	9.48

จากผลการทดสอบ XRD และค่าร้อยละความเป็นผลึกของผงแป้งสาลิดิบและผงแป้งสาลิที่ถูกเจลาตินไนซ์ พบว่าแป้งสาลิที่ถูกเจลาตินไนซ์โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 30:30, 30:35 และ 30:40 มีค่าร้อยละความเป็นผลึกที่ลดลงไม่แตกต่างกัน ดังนั้นสูตรแป้งสาลิที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่นำไปใช้ในการเตรียมโพรซึมชีวภาพ ในการศึกษาในตอนที่ 2 (ในหัวข้อ 4.2) ต่อไปจะเลือกใช้อัตราส่วน

น้ำตอกลิเซอรอลที่ 30:30 (S 30:30) ในการเจลาติไนซ์แป้งสาธิตบ ซึ่งเป็นสูตรที่มีการเติมกลีเซอรอลน้อยที่สุด เนื่องจากกลีเซอรอลมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวน 3 หมู่ ในโมเลกุลกลีเซอรอลจึงมีสมบัติที่ดูดความชื้นจากอากาศได้ดี ซึ่งอาจส่งผลให้เมื่อนำแป้งสาธิตที่ถูกเจลาติไนซ์มาผสมกับกลูเตนเพื่อทำการขึ้นรูปเป็นโฟมจะทำให้โฟมนั้นมีสมบัติในการดูดความชื้นสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอที่ต่ำลง

4.2 การศึกษาอิทธิพลของสารฟู (Blowing agent) ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ

สารฟู (Blowing agent) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวที่อุณหภูมิ 80-160 องศาเซลเซียสได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), น้ำ (H_2O) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ซึ่งปฏิกิริยาการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตแสดงดังสมการที่ 4.1 โดยอัตราการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่มีอัตราการสลายตัวสูงที่สุด [34] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปโฟมชีวภาพที่ 130 องศาเซลเซียส โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำที่ได้จากการสลายตัวทางความร้อนของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต จะขยายตัวภายใน dough ทำให้เกิดเป็นลักษณะเซลล์โฟมขึ้นภายหลังจากการขึ้นรูป งานวิจัยในตอนี่ 2 นี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (NaHCO_3) ต่อสัณฐานวิทยา (Morphology) ขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ย (Average pore size) ความหนาแน่น (Density) และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ (Mechanical properties) ของโฟมชีวภาพ โดยการศึกษาอิทธิพลของสารฟู จะใช้ปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต 0, 4, 8, 12 และ 16 phr ของน้ำหนักรวมของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (กลูเตนจากแป้งสาธิตแล้วแป้งสาธิตที่ถูกเจลาติไนซ์) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาธิตและแป้งสาธิตที่ถูกเจลาติไนซ์คงที่ที่ 50:50 ซึ่งใช้ปริมาณพลาสติกไซเซอร์ (น้ำและกลีเซอรอล) คงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ และใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลคงที่ที่ 3:1 โดยน้ำหนัก โดยตารางที่ 4.3 แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพในแต่ละสูตร



ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของสารฟู

สูตรโฟมชีวภาพที่มีปริมาณ NaHCO_3 แตกต่างกัน	ปริมาณ NaHCO_3 (phr) ^a	อัตราส่วนระหว่างกลูเตนและแป้งสาลี ^b	พลาสติกไซเซออร์ (phr) ^c	อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกไข่เซอร์อล ^d
B0	0	50:50	70	3:1
B4	4			
B8	8			
B12	12			
B16	16			

^a phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

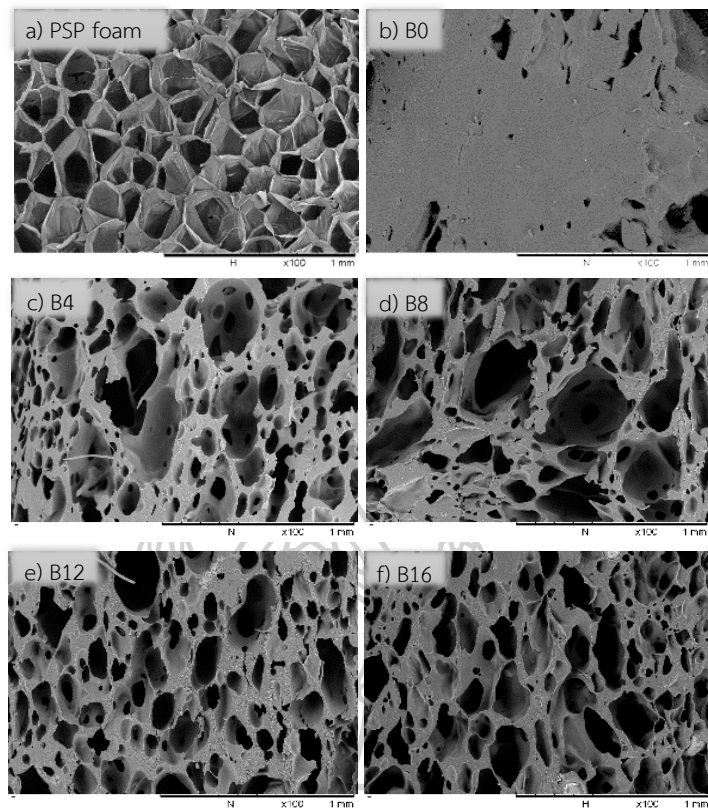
^b อัตราส่วนโดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

^c phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์

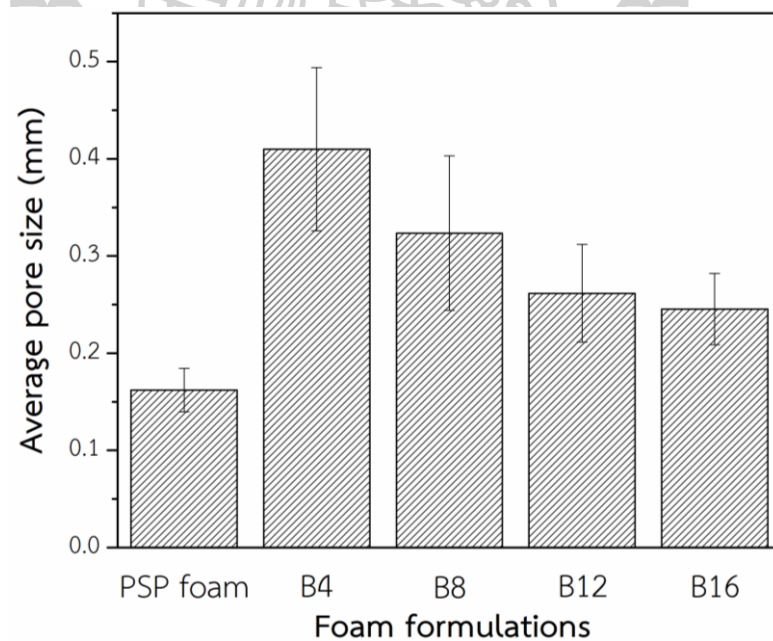
^d อัตราส่วนโดยน้ำหนักพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกไข่เซอร์อล

4.2.1 อิทธิพลของสารฟูที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพ

การศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟม ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM) ซึ่งการศึกษาสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพนั้น จะเปรียบเทียบกับสัณฐานวิทยาของโฟมที่ใช้บรรจุอาหารตามท้องตลาดนั้นคือ Polystyrene Paper Foam (PSP foam) โดยภาพที่ 4.4 แสดงภาพ SEM ของ PSP foam และโฟมชีวภาพของกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ที่มีปริมาณสารฟูที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ภาพ SEM สามารถหาขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ยได้โดยใช้โปรแกรม Image J โดยขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารฟูที่แตกต่างกันแสดงดังภาคผนวก ก.1 ภาคผนวก ก.2 และภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.4 ภาพ SEM ของ a) Polystyrene Paper Foam (PSP foam), b) B0 c) B4 d) B8 e) B12 และ f) B16 คือโฟมชีวภาพที่มีการใช้สารฟูในปริมาณ 0, 4, 8, 12 และ 16 phr ตามลำดับ



ภาพที่ 4.5 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ

จากภาพสัณฐานวิทยาของ PSP foam ดังแสดงในภาพที่ 4.4 a) พบว่า PSP foam มีลักษณะเป็นรูปร่างที่มีหลายเหลี่ยม (polyhedral) ที่มีผนังเซลล์บางมาก โดยมีขนาดเซลล์โฟมประมาณ 0.16 มิลลิเมตร และมีการกระจายตัวของเซลล์โฟมสม่ำเสมอแสดงในภาพที่ 4.5 และภาคผนวก ก.1 ทั้งนี้เนื่องจากการขึ้นรูป PSP foam นั้นจะใช้กระบวนการ extrusion โดยขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนการหลอมเหลวพอลิสไตรีนในเครื่อง single screw tandem extrusion ต่อมาในขั้นที่ 2 จะอัดแก๊สเพนเทนซึ่งทำหน้าที่เป็น Physical Blowing Agents (PBAs) ซึ่งมีสถานะเป็นแก๊สสามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิสไตรีนหลอมเหลวและความหนืดที่เหมาะสมของพอลิสไตรีนหลอมเหลวที่สามารถทำให้ขึ้นรูปโฟมได้ เมื่อพอลิเมอร์หลอมเหลวที่มีฟองแก๊สเพนเทนกระจายตัวอยู่ทั่วพอลิเมอร์หลอมเหลว เคลื่อนออกจากหัว die ฟองแก๊สขนาดเล็กจะขยายตัวใหญ่ขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์หลอมเหลวฟูอย่างรวดเร็ว ซึ่งฟองแก๊สที่เกิดการขยายตัวจนผนังเกิดการชนกันกลายเป็นเซลล์โฟมที่มีลักษณะเป็นรูป polyhedral ในขณะที่เมื่อพิจารณาสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพที่เติมสารฟูในปริมาณต่างๆ (ภาพที่ 4.4 b-f) พบว่าเซลล์โฟมเป็นแบบเปิดที่มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนผนังเซลล์หนา เซลล์โฟมมีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดเซลล์โฟมของ PSP foam และการกระจายตัวของเซลล์โฟมไม่สม่ำเสมอแสดงในภาพที่ 4.5 ภาคผนวก ก.1 และภาคผนวก ก.2 ทั้งนี้เนื่องจากการเกิดเซลล์โฟมของโฟมชีวภาพนั้นเกิดขึ้นจากโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตซึ่งทำหน้าที่เป็นสารฟู ซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งจึงกระจายตัวไม่ดีในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และความหนืดของกลูเตนและแป้งนั้นไม่เหมือนกับพอลิสไตรีนหลอมเหลว ส่งผลให้เซลล์โฟมมีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมไม่สม่ำเสมอ

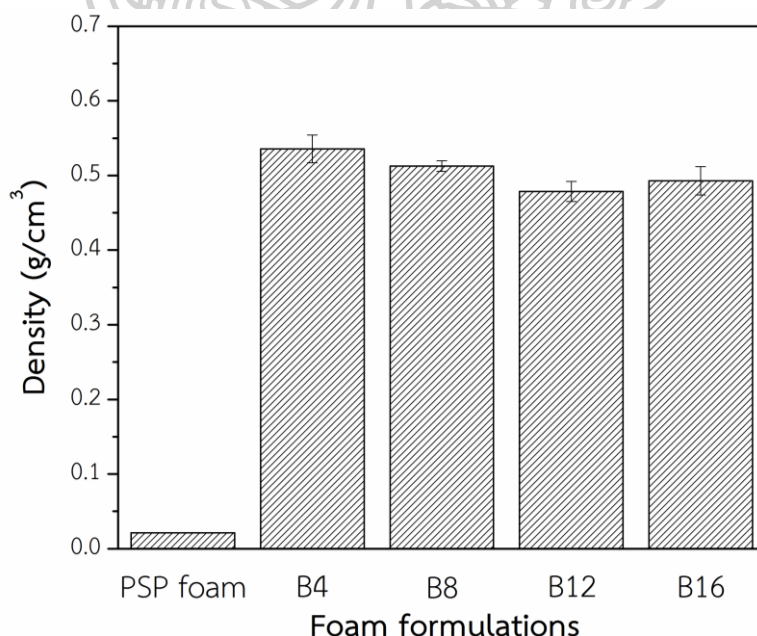
เมื่อเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาของโฟมชีวภาพที่เติมสารฟูในปริมาณต่างๆ พบว่าโฟมชีวภาพที่ไม่ได้เติมโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (B0) ปรากฏรูพรุนน้อยมาก โดยพบรูพรุนบริเวณขอบชิ้นงานแสดงในดังภาพที่ 4.4 b) ดังนั้นโฟมชีวภาพสูตร B0 จึงไม่ทำการหาขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย ความหนาแน่น และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ภาพที่ 4.4 c-f) แสดงสัณฐานวิทยาของโฟม B4-B16 ที่มีการเติมสารฟูในปริมาณต่างๆ พบว่าเซลล์โฟมเป็นแบบเปิดที่มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอน มีผนังเซลล์หนา และเซลล์โฟมกระจายตัวทั่วบริเวณพื้นผิว โดยเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่และหลากหลายขนาดซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.5 ภาคผนวก ก.1 และภาคผนวก ก.2 เนื่องจากขณะให้ความร้อนแก่ dough จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการสลายตัวของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต และฟองแก๊สเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้นจนกระทั่งฟองแก๊สที่อยู่ใกล้กันขยายตัวมาชนกันโดยฟองแก๊สแต่ละ

ฟองจะมีแรงดันมากจนทำให้ผนังเซลล์โฟมที่อยู่ติดกันทะลุหากันส่งผลให้เซลล์โฟมเป็นแบบเปิดและมีขนาดใหญ่

สำหรับการเพิ่มปริมาณสารฟูจาก 4 phr ถึง 16 phr (B4-B16) นั้นพบว่าผนังเซลล์โฟมบางลง และขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ยเล็กลงจาก 0.41 มิลลิเมตร เป็น 0.26 มิลลิเมตร เนื่องจากการใช้ปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มากขึ้นนั้นมีการกระจายตัวในพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ G. Abinader และคณะ [44] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโฟมกันกระแทกจากแป้งสาลีผสมกับกลูเตน โดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็น Blowing agent โดยใช้เครื่อง twin screw extruder ในการผสม โดยจากผลการทดลองพบว่าปริมาณเซลล์โฟมมากขึ้นและขนาดเซลล์โฟมเล็กลง เมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต

4.2.2 อิทธิพลของสารฟูที่มีต่อความหนาแน่นของโฟมชีวภาพ

ความหนาแน่นของโฟมชีวภาพนั้นมีความสำคัญต่อน้ำหนักของโฟมและต้นทุนการผลิตวัสดุโฟมที่มีความหนาแน่นต่ำจะมีปริมาณเนื้อวัสดุน้อยและโฟมมีน้ำหนักเบา โดยค่าความหนาแน่นของโฟมชีวภาพที่รายงานผลในงานวิจัยนี้เป็นความหนาแน่นรวม (Bulk density) ซึ่งคำนวณจากมวลของวัสดุที่รวมกับช่องว่าง (pore) ระหว่างวัสดุหารด้วยปริมาตรของวัสดุ โดยภาพที่ 4.6 และภาคผนวก ก.3 แสดงค่าความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่เติมสารฟูในปริมาณต่างๆ

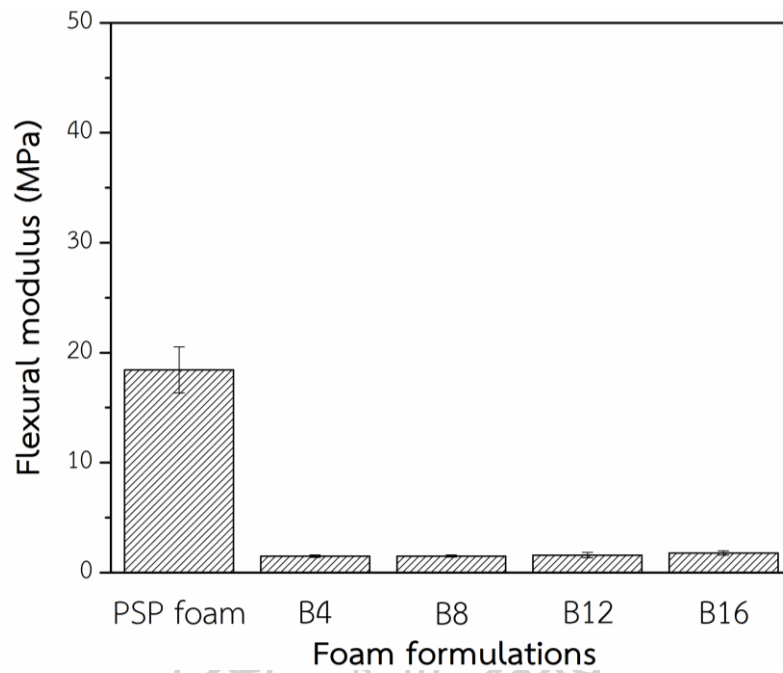


ภาพที่ 4.6 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ

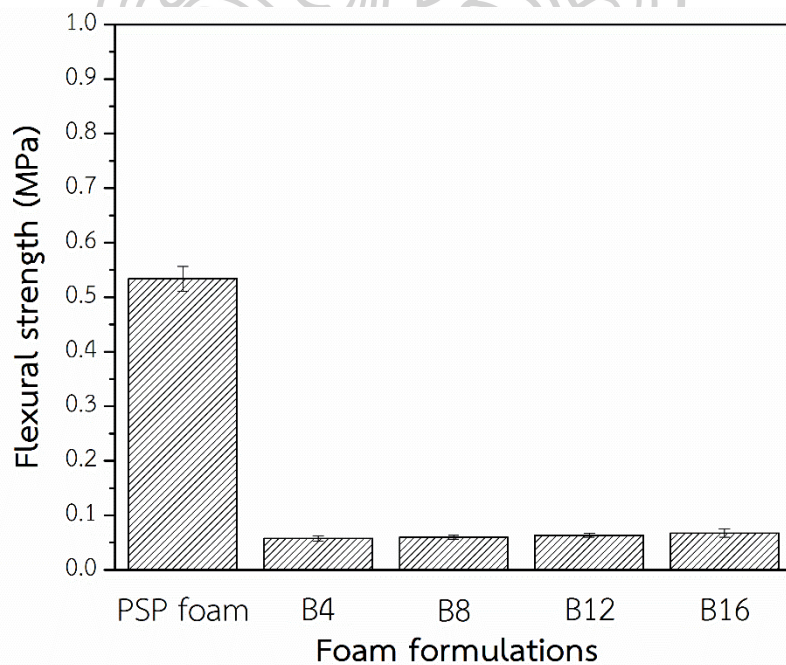
จากภาพที่ 4.6 และภาคผนวก ก.3 พบว่าความหนาแน่นของ PSP foam มีค่าต่ำมากคือ 0.02 g/cm^3 เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมชีวภาพ เนื่องจากภาพสัณฐานวิทยาแสดงให้เห็นว่า PSP foam มีเซลล์โฟมขนาดเล็ก ผนังเซลล์บางมาก และการกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมสม่ำเสมอ ดังนั้น PSP foam จึงมีความหนาแน่นจึงต่ำกว่าโฟมชีวภาพมาก ในกรณีของโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูในปริมาณต่างๆ พบว่าโฟมชีวภาพมีความหนาแน่นมากกว่า PSP foam คืออยู่ในช่วง $0.49\text{-}0.54 \text{ g/cm}^3$ เนื่องจากเซลล์โฟมมีขนาดใหญ่และผนังเซลล์โฟมหนาซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.4 c)-f) ส่งผลให้โฟมชีวภาพมีความหนาแน่นมาก เมื่อพิจารณาปริมาณสารฟูที่เติมลงไปโนโฟมชีวภาพ (สูตร B4-B16) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารฟูค่าความหนาแน่นลดลง โดยโฟมชีวภาพสูตร B12 และ B16 มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุดโดยมีค่าความหนาแน่นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณสารฟูในโฟมชีวภาพมากขึ้นจะส่งผลให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สลายตัวเมื่อให้ความร้อนมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณแก๊สในโฟมชีวภาพมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของโฟมลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ N.N. Najib และคณะ [52] ที่ศึกษาอิทธิพลของปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตที่มีผลต่อสมบัติของโฟมจากยางธรรมชาติผสมในเครื่อง Two roll mill และขึ้นรูปด้วยวิธีการ compression molding พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตจาก 4 phr–12 phr ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น

4.2.3 อิทธิพลของของสารฟูที่มีต่อการต้านทานต่อการโค้งงอของของโฟมชีวภาพ

โดยทั่วไปแล้วกล่องโฟมหรือลาดโฟมได้รับแรงกดในแนวตั้งจากอาหารมากกว่าที่จะได้รับแรงดึงยึด ดังนั้นการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพในงานวิจัยนี้จึงทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural properties) โดยใช้การทดสอบแบบ Three point bending test ตามมาตรฐาน ASTM D790-03 ซึ่งจะวัดค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength ในการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพจะทำการทดสอบชิ้นงานที่มีการเก็บไว้ในภาชนะปิดที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity, RH) ที่ 50% ตามมาตรฐานการทดสอบ โดยภาพที่ 4.7 ภาพที่ 4.8 และภาคผนวก ก.4 แสดงผลการทดสอบการต้านทานต่อการโค้งงอของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50%



ภาพที่ 4.7 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟลูปริมาณต่างๆ ที่สถานะความชื้น 50%



ภาพที่ 4.8 ค่า Flexural strength ของ PSP foam, และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟลูปริมาณต่างๆ ที่สถานะความชื้น 50%

ภาพที่ 4.7 ภาพที่ 4.8 และภาคผนวก ก.4 พบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของ PSP foam มีค่า 18.43 และ 0.53 MPa ตามลำดับ ในขณะที่โฟมชีวภาพที่มีการเติมสารฟูในปริมาณต่างๆ มีค่า Flexural modulus อยู่ในช่วง 1.5-1.78 MPa และมีค่า Flexural strength อยู่ในช่วง 0.06-0.07 MPa ซึ่งสมบัติการต้านทานการโค้งงอของโฟมชีวภาพมีค่าต่ำกว่า PSP foam มาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโฟมชีวภาพประกอบไปด้วยกลูเตนซึ่งเป็นโปรตีนและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ โดยกลูเตนนั่นประกอบไปด้วยหน่วยย่อยที่เป็นหมู่อะมิโน (-CONH-) ส่วนแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ มีหน่วยย่อยเป็นกลูโคส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นองค์ประกอบทั้งหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลนี้เป็นหมู่มีขั้วจึงทำให้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์มีสมบัติดูดความชื้นได้ดี ดังนั้นเมื่อนำโฟมชีวภาพมาเก็บไว้ในภาชนะปิดที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% ความชื้นที่อยู่ในอากาศจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ และไปทำลายพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ ทำให้สายโซ่กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์เกิดพันธะไฮโดรเจนกับความชื้นที่เข้าไปแทรกแทน ส่งผลให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลงจึงทำให้สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอต่ำลงนั่นเอง ซึ่งแตกต่างจาก PSP foam เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่มีขั้วจึงทำให้มีการดูดความชื้นจากอากาศได้น้อยมากเมื่อเทียบกับโฟมชีวภาพ ส่งผลให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของ PSP foam มีค่าสูงกว่าโฟมชีวภาพ

เมื่อพิจารณาสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural modulus และ Flexural strength) ของโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ คือ 4, 8, 12 และ 16 phr (โฟมชีวภาพสูตร B4 B8 B12 และ B16) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% พบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพสูตร B4, B8, B12 และ B16 มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอิทธิพลของความชื้นที่เข้าไปแทรกระหว่างพอลิเมอร์เมทริกซ์จึงทำให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength มีค่าใกล้เคียงกัน

จากผลการทดสอบสมบัติโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ ผู้วิจัยจะเลือกใช้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12 phr เพื่อใช้ในการศึกษาในหัวข้อที่ 4.3 ต่อไป เนื่องจากโฟมชีวภาพที่มีการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ปริมาณ 12 phr นี้มีเซลล์โฟมเฉลี่ยขนาดเล็ก และมีความหนาแน่นของโฟมต่ำ

4.3 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ

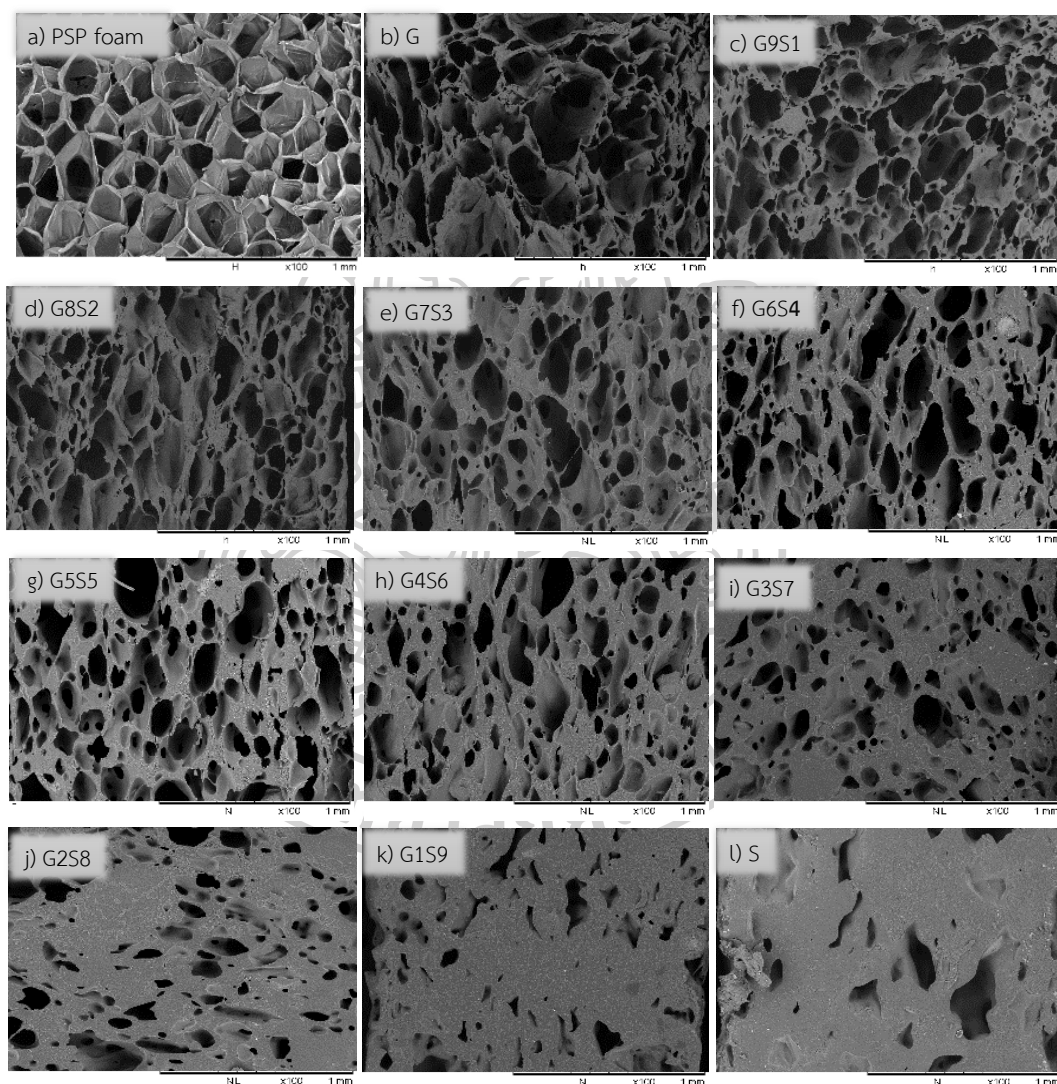
งานวิจัยในส่วนนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่มีต่อ สัณฐานวิทยา (Morphology) ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (Average pore size) ความหนาแน่น (Density) และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural properties) ของโฟมชีวภาพ โดยจะศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เมทริกซ์ระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ ดังต่อไปนี้คือ 100:0 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และ 0:100 โดยใช้ปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตคงที่ที่ 12 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ และอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์น้ำต่อกลีเซอรอลคงที่ที่ 3:1 โดยใช้ปริมาณพลาสติกไซเซออร์น้ำและกลีเซอรอลคงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งตารางที่ 4.4 แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตร

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์

สูตรโฟมชีวภาพที่มีอัตราส่วนระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีแตกต่างกัน	อัตราส่วนระหว่างกลูเตนและแป้งสาลี	พลาสติกไซเซออร์ (phr)	อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล	ปริมาณ NaHCO ₃ (phr)
G	100:0	70	3:1	12
G9S1	90:10			
G8S2	80:20			
G7S3	70:30			
G6S4	60:40			
G5S5	50:50			
G4S6	40:60			
G3S7	30:70			
G2S8	20:80			
G1S9	10:90			
S	0:100			

4.3.1 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่มีผลต่อลักษณะวิทยาของโฟมชีวภาพ

ภาพที่ 4.9 แสดงภาพ SEM ของ PSP foam และโฟมชีวภาพใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ นอกจากนี้ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.10 ภาคผนวก ก.6 และภาคผนวก ก.7

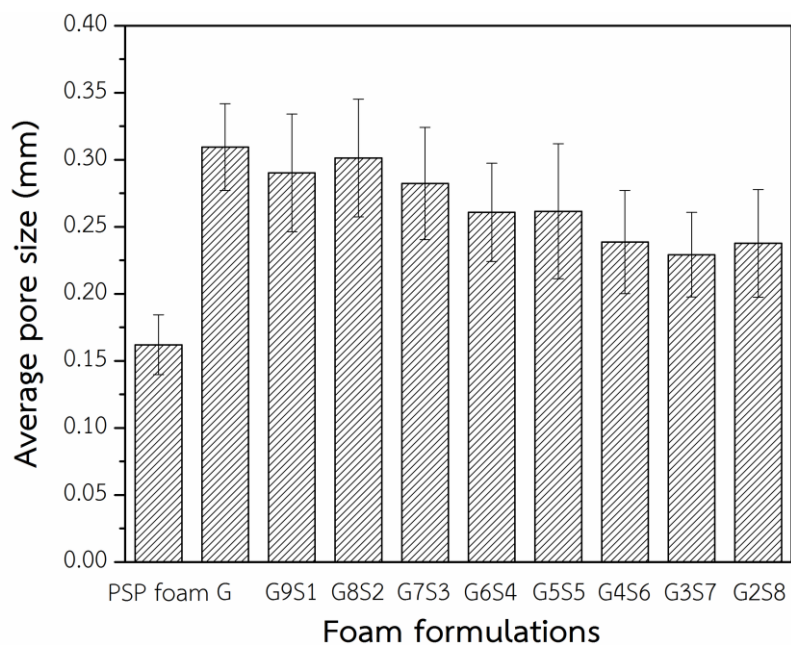


ภาพที่ 4.9 ภาพ SEM ของ a) PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ (b) G, c) G9S1, d) G8S2, e) G7S3, f) G6S4, g) G5S5, h) G4S6, i) G3S7 j) G2S8, k) G1S9 และ l) S)

เมื่อพิจารณาลักษณะสัญญาณวิทยาของโพลีเมอร์ชีวภาพที่อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลี และแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ จะเห็นว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ลดลงจาก 100:0 ถึง 0:100 (G, G9S1, G8S2, G7S3, G6S4, G5S5, G4S6, G3S7, G2S8, G1S9 และ S) กล่าวคือเมื่อปริมาณกลูเตนในโพลีเมอร์ชีวภาพลดลง พบว่าการเกิดเป็นรูพรุนของเซลล์โพลีเมอร์เกิดน้อยลงและขนาดของเซลล์โพลีเมอร์มีแนวโน้มลดลงอีกด้วย ดังแสดงภาพที่ 4.9 b)-l) เนื่องจากในระหว่างที่มีการนวด dough ที่ประกอบด้วยกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ในเครื่อง two roll mill กลูเตนจากแป้งสาลีที่มีน้ำผสมอยู่จะมีสมบัติความเป็น viscoelastic [32] กล่าวคือกลูเตนสามารถดึงยืดและหดกลับได้ดี ในขณะที่นวด dough กลูเตนถูกดึงยืดออกอย่างต่อเนื่องจะมีลักษณะเป็นเส้นร่างแหอยู่ภายใน dough ซึ่งลักษณะที่กลูเตนเป็นเส้นร่างแหนี้จะทำให้กลูเตนสามารถกักเก็บฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการสลายตัวของ NaHCO_3 ในระหว่างการขึ้นรูปโพลีเมอร์โดยฟองแก๊สที่อยู่ในชิ้นงานนี้จะทำให้เกิดเป็นเซลล์โพลีเมอร์หลังจากการขึ้นรูปต่อไป ดังนั้นในสูตรโพลีเมอร์ที่มีปริมาณกลูเตนมากจะทำให้มีฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกกักเก็บอยู่ใน dough ได้มากและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สามารถขยายตัวใหญ่ขึ้นในระหว่างการให้ความร้อน ทำให้โพลีเมอร์ที่เตรียมได้มีเซลล์โพลีเมอร์มากและมีขนาดใหญ่ ในขณะที่สูตรโพลีเมอร์ที่มีปริมาณกลูเตนน้อย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่สามารถถูกกักเก็บอยู่ใน dough ได้ดีนัก โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหล่านี้จะมีการแพร่ออกจาก dough ได้มาก ส่งผลให้โพลีเมอร์ที่เตรียมได้มีเซลล์โพลีเมอร์น้อยลงและขนาดเซลล์โพลีเมอร์เล็กลง ดังแสดงในภาพที่ 4.10 และภาคผนวก ก.7 ซึ่งผลการทดลองนี้คล้ายคลึงกับผลการทดลองของ G. Abinader และคณะ [44] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาโพลีเมอร์กันกระแทกจากแป้งสาลีผสมกับกลูเตน โดยใช้โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็น Blowing agent พบว่าเมื่อปริมาณกลูเตนเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดเซลล์โพลีเมอร์เฉลี่ยใหญ่ขึ้น

เมื่อพิจารณาโพลีเมอร์ชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่ 10:90 และ 0:100 (G1S9 และ S) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.9 k)-l) ปรากฏเซลล์โพลีเมอร์เป็นบางบริเวณของพื้นผิวเซลล์โพลีเมอร์มีขนาดเล็กและขนาดเซลล์โพลีเมอร์ไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากโพลีเมอร์ทั้งสองสูตรนี้มีปริมาณกลูเตนซึ่งเป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์น้อยมาก ในขณะที่มีแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์เป็นองค์ประกอบหลักในโพลีเมอร์ชีวภาพ กลูเตนซึ่งมีสมบัติ viscoelastic และทำหน้าที่ในการกักเก็บฟองแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำเกิดขึ้นในระหว่างการขึ้นรูป ฟองแก๊สที่อยู่ในชิ้นงานนี้จะทำให้เกิดเป็นเซลล์โพลีเมอร์หลังจากการขึ้นรูป ดังนั้นโพลีเมอร์ที่มีปริมาณกลูเตนน้อย อย่างเช่นโพลีเมอร์สูตร G1S9 และ S สามารถกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำที่เกิดขึ้นได้น้อยมากในขั้นตอนการขึ้นรูป จึงทำให้

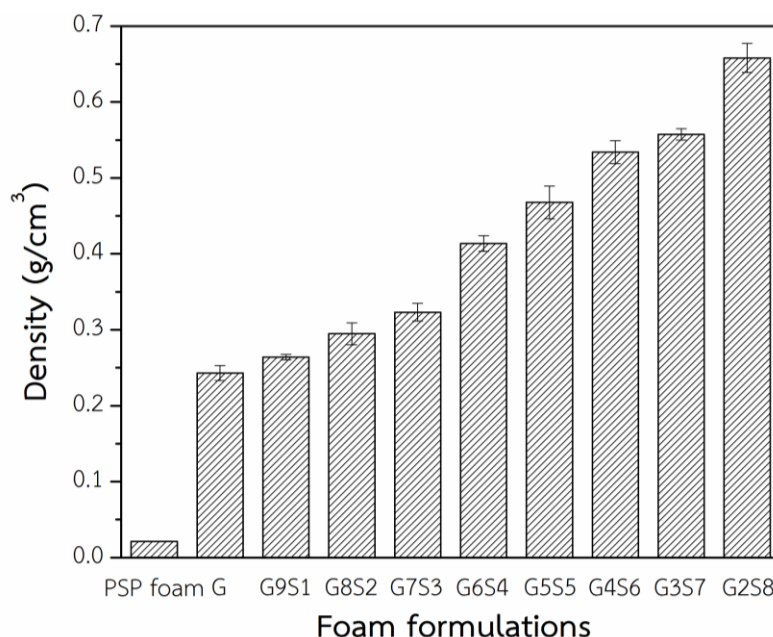
มีปริมาณฟองแก๊สในโฟมน้อย ส่งผลให้เกิดเซลล์โฟมในชิ้นงานต่ำ ดังนั้นในโฟมสูตร G1S9 และ S จะไม่ทำการหาขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย ความหนาแน่น และทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอต่อไป



ภาพที่ 4.10 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ต่างๆ

4.3.2 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ที่มีผลต่อความหนาแน่นของโฟมชีวภาพ

จากภาพทางสัมพัทธ์ของโฟมชีวภาพที่อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ ที่อัตราส่วน 10:90 และ 0:100 (สูตรโฟม G1S9 และ S) ดังแสดงภาพที่ 4.9 k)-l) พบว่ามีเซลล์โฟมขนาดเล็ก การกระจายตัวของเซลล์โฟมไม่สม่ำเสมอ เนื้อโฟมมีลักษณะแน่น และปริมาณเซลล์โฟมน้อย ดังนั้นผู้วิจัยจึงไม่ทำการวัดค่าความหนาแน่นของสูตรโฟม G1S9 และ S โดยค่าความหนาแน่นโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.11 และภาคผนวก ก.8



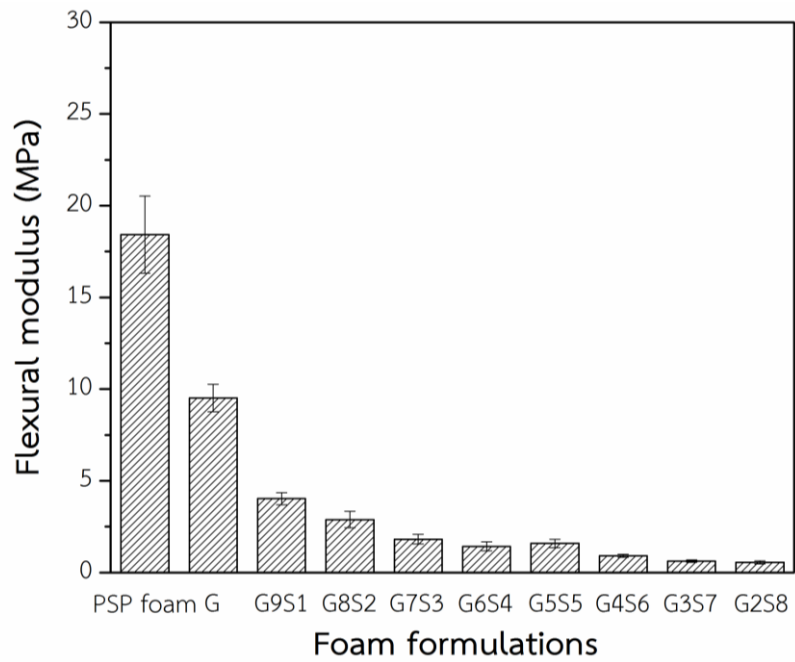
ภาพที่ 4.11 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ

เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของโฟมสูตรต่างๆ พบว่า PSP foam มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับโฟมชีวภาพและสำหรับโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่าโฟมชีวภาพที่มีอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ลดลง (โฟมชีวภาพที่มีปริมาณกลูเตนน้อยลง) มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนาแน่นของโฟมนั้นสัมพันธ์กับขนาดของเซลล์โฟม และความหนาของผนังเซลล์โฟม โดยโฟมที่มีขนาดเซลล์โฟมใหญ่ และมีผนังเซลล์โฟมบางจะมีความหนาแน่นต่ำ เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ของ PSP foam ภาพที่ 4.9 a) และภาคผนวก ก.7 พบว่า PSP foam มีผนังเซลล์บางมากเมื่อเปรียบเทียบกับโฟมชีวภาพ ถึงแม้ว่าจะมีขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยที่เล็ก ส่งผลให้ PSP foam มีค่าความหนาแน่นต่ำที่สุด และเมื่อพิจารณาโฟมชีวภาพ พบว่าโฟมชีวภาพสูตร G ซึ่งมีปริมาณกลูเตนสูงที่สุดมีความหนาแน่นต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมชีวภาพสูตรอื่นๆ เนื่องจากโฟมชีวภาพสูตร G มีผนังเซลล์โฟมที่บาง และมีขนาดเซลล์โฟมใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 4.9 b)

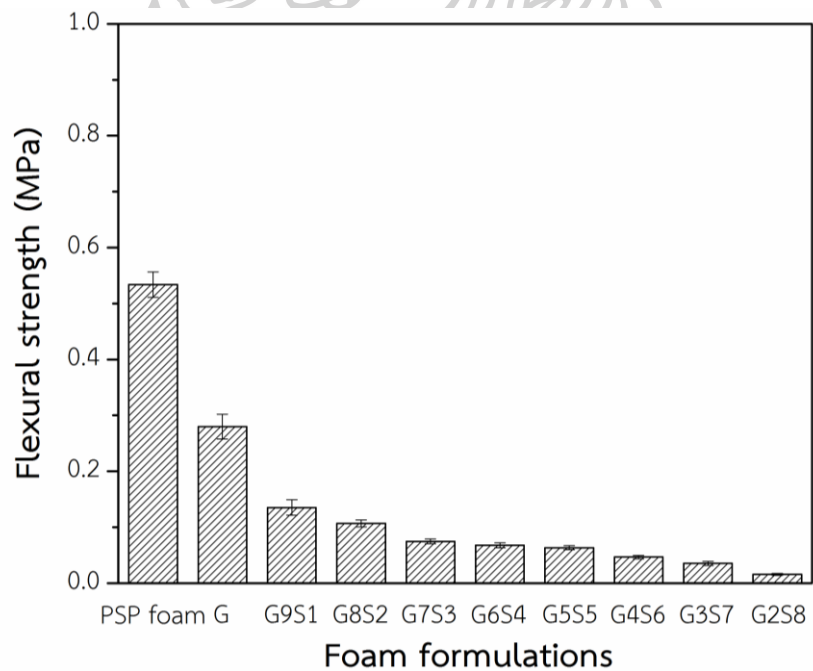
4.3.3 อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่มีผลต่อการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพจากภาพที่ 4.12 ภาพที่ 4.13 และภาคผนวก ก.9 แสดงผลการทดสอบสมบัติการต้านทานการโค้งงอของโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ โดยขึ้นงานโฟมถูกเก็บไว้ในภาชนะที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 50% ก่อนการทดสอบ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับ PSP foam

เมื่อพิจารณาค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ พบว่าเมื่อโฟมที่มีอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ลดลง (ปริมาณกลูเตนในโฟมลดลง) ค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength มีค่าต่ำลงด้วย เนื่องจากกลูเตนจะสามารถเกิดการเชื่อมขวางของหมู่ Thiol (-SH) ระหว่างสายโซ่ของกลูเตนินและไกลอะติน เกิดเป็นพันธะ disulfide (-S-S-) ระหว่างสายโซ่ของกลูเตนินและไกลอะติน [37] ส่งผลให้โฟมชีวภาพที่มีปริมาณกลูเตนมากมีความแข็งแรงสูง และมีสมบัติการต้านทานการโค้งงอสูงกว่าโฟมชีวภาพที่มีปริมาณกลูเตนอยู่น้อย (โฟมสูตร G2S8) โดยงานวิจัยของ N. Kaisangsri และคณะ [53] นี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณกลูเตนที่มีต่อสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของพอลิเมอร์ผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังกับโปรตีนจากธัญพืชต่างๆ โดยมีการเติมเส้นใยธรรมชาติและน้ำมันปาล์ม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลูเตน ส่งผลให้ค่า Flexural strength เพิ่มขึ้น

จากผลการทดสอบสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ พบว่าอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการศึกษาต่อในตอนที่ 4 (หัวข้อที่ 4.4) ต่อไป คืออัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 100:0, 90:10 และ 80:20 (โฟมสูตร G, G9S1 และ G8S2) เนื่องจากโฟมมีความหนาแน่นน้อยและมีค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength ที่สูง เมื่อเทียบกับโฟมชีวภาพสูตรอื่นๆ อย่างไรก็ตามโฟมสูตร G, G9S1 และ G8S2 ค่า Flexural properties ต่ำกว่า PSP foam ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาต่อในหัวข้อที่ 4.4 ถัดไป เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพให้มีความใกล้เคียงกับ PSP foam



ภาพที่ 4.12 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%



ภาพที่ 4.13 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%

4.4 การศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ

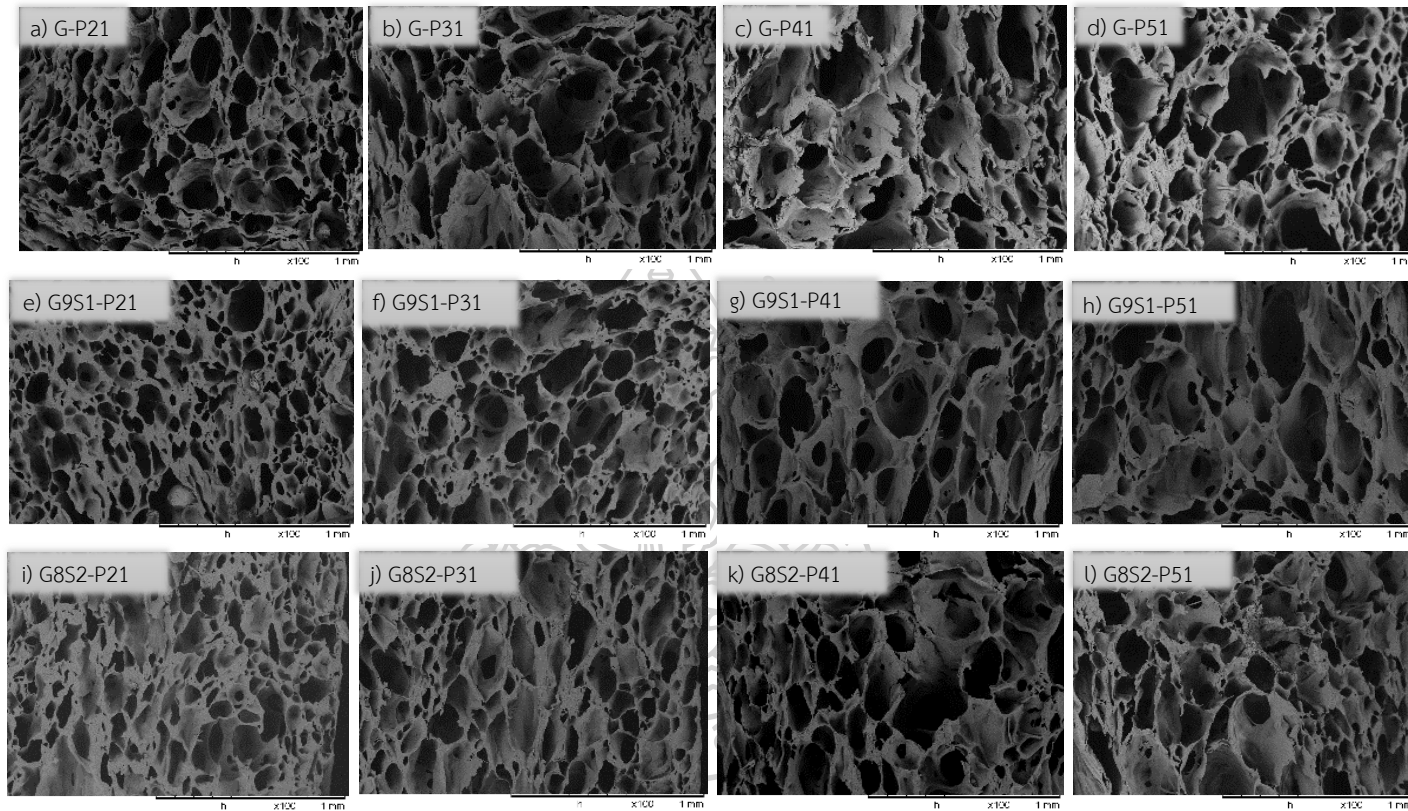
พลาสติกไซเซออร์มีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อกระบวนการผสมและขึ้นรูปพอลิเมอร์ โดยหน้าที่ของพลาสติกไซเซออร์นั้นจะเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีเจลาติไนซ์และทำให้อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของโปรตีนและแป้งลดลง ส่งผลให้ความสามารถในการไหลของกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีเจลาติไนซ์เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงและแรงกดอัดในระหว่างการขึ้นรูป ซึ่งพลาสติกไซเซออร์ที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้คือน้ำและกลีเซอรอล เนื่องจากน้ำและกลีเซอรอล มีราคาถูก ไม่เป็นพิษ และมีความเป็นขี้ผึ้ง โดยกลีเซอรอลนั้นจะช่วยให้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีเจลาติไนซ์มีความยืดหยุ่น ส่วนน้ำจะช่วยให้กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ซึ่งเป็นวัตถุดิบของโฟมชีวภาพเข้ากันได้ดีระหว่างการนวด และเมื่อขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยออกไปจากโฟมจึงเหลือแต่กลีเซอรอลที่เป็นพลาสติกไซเซออร์หลังจากการขึ้นรูป ดังนั้นในงานวิจัยในตอนนี้จึงทำการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่มีต่อสมบัติพื้นฐานวิทยา ขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ย ความหนาแน่น และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพ โดยศึกษาอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 โดยน้ำหนักของพลาสติกไซเซออร์รวมคงที่ที่ 70 phr ของน้ำหนักกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ที่ 100:0 90:10 และ 80:20 โดยใช้ปริมาณไซเตียมไฮโดรเจนคาร์บอนเนตคงที่ที่ 12 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ ซึ่งตารางที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตร

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล

สูตรโฟมชีวภาพที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลแตกต่างกัน	อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล	พลาสติกไซเซออร์ (phr)	อัตราส่วนระหว่างกลูเตนและแป้งสาลี	ปริมาณ NaHCO_3 (phr)
G-P21	2:1	70	100:0	12
G-P31	3:1			
G-P41	4:1			
G-P51	5:1			
G9S1-P21	2:1	70	90:10	12
G9S1-P31	3:1			
G9S1-P41	4:1			
G9S1-P51	5:1			
G8S2-P21	2:1	70	80:20	12
G8S2-P31	3:1			
G8S2-P41	4:1			
G8S2-P51	5:1			

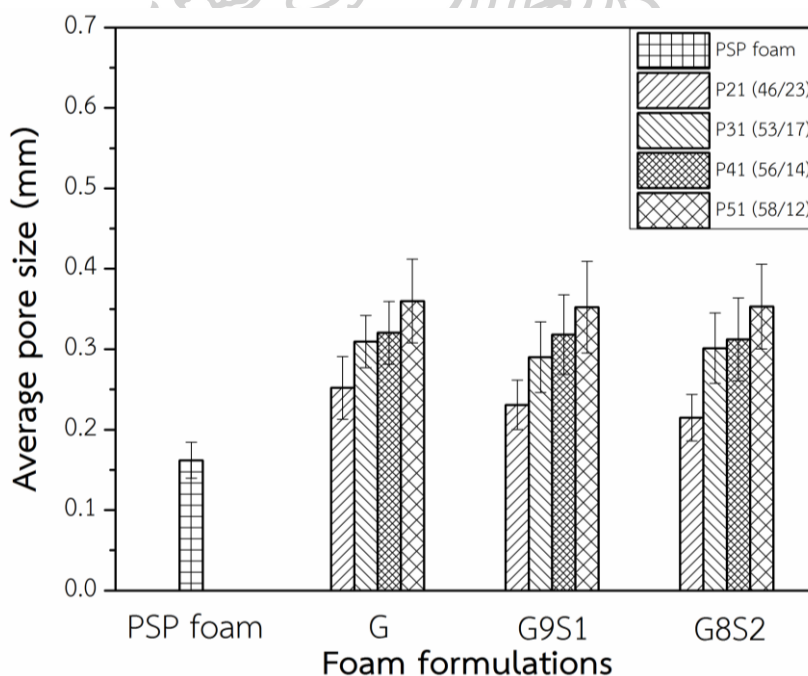
4.4.1 อิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่มีผลต่อลักษณะวิทยาของโฟมชีวภาพ

ภาพที่ 4.14 แสดงภาพ SEM ของโฟมชีวภาพใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ และภาพที่ 4.15 แสดงกราฟการเปรียบเทียบขนาดเซลล์โฟมของ PSP foam และโฟมชีวภาพในสูตรต่างๆ และภาคผนวก ก.12 แสดงเซลล์โฟมเฉลี่ยของโฟมชีวภาพสูตรต่างๆ



ภาพที่ 4.14 ภาพ SEM ของ a) G-P21, b) G-P31, c) G-P41, d) G-P51, e) G9S1-P21, f) G9S1-P31, g) G9S1-P41 h) G9S1-P51, i) G8S2-P21, j) G8S2-P31, k) G8S2-P41, l) G8S2-P51 คือโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกละลายในน้ำ 100:0 90:10 และ 80:20 ตามลำดับ

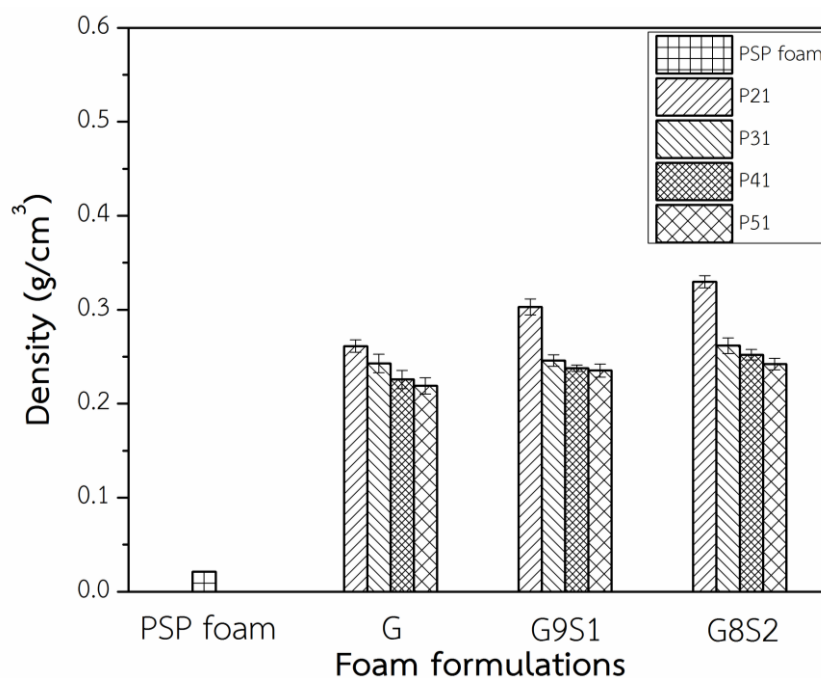
เมื่อพิจารณาภาพ SEM ของโฟมชีวภาพสูตรต่างๆ และขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของโฟมชีวภาพสูตร G, G9S1 และ G8S2 ที่อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล ที่อัตราส่วน 2:1 3:1 4:1 และ 5:1 ในภาพที่ 4.15 และภาคผนวก ก.12 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลจาก 2:1 เป็น 5:1 เซลล์โฟมเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากในสูตรโฟมที่มีอัตราส่วนระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 5:1 มีปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบในพลาสติกไซเซอรมากที่สุด ซึ่งขณะขึ้นรูปด้วยวิธีการ compression molding ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส น้ำจะระเหยออกกลายเป็นฟองแก๊สของไอน้ำจำนวนมาก เมื่อฟองแก๊สเหล่านี้ขยายตัวใหญ่ขึ้นจนผนังเซลล์ของฟองแก๊สเกิดการชนกัน และภายในฟองแก๊สเหล่านี้มีแรงดันมากจนกระทั่งดันให้ผนังเซลล์ทะลุเชื่อมหากัน เกิดเป็นเซลล์โฟมขนาดใหญ่ ส่วนกลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอรมีจุดเดือดที่ 290 องศาเซลเซียส จะไม่ระเหยกลายเป็นไอระหว่างการขึ้นรูป ดังนั้นสูตรโฟมที่มีอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 5:1 ซึ่งมีปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบในพลาสติกไซเซอรมากที่สุด จึงมีเซลล์โฟมขนาดใหญ่กว่าสูตรโฟมที่ใช้น้ำเป็นพลาสติกไซเซอรปริมาณน้อย เช่น โฟมสูตรที่มีอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 2:1



ภาพที่ 4.15 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอรระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ

4.4.2 อิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมชีวภาพ

อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลนั้นมีอิทธิพลต่อค่าความหนาแน่นของโฟม โดยความหนาแน่นของโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล แสดงดังภาพที่ 4.16 และภาคผนวก ก.13



ภาพที่ 4.16 ความหนาแน่นของ Polystyrene Paper Foam (PSP foam) และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ

ความหนาแน่นของโฟมชีวภาพมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลเพิ่มจาก 2:1 ไปจนถึง 5:1 โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนาแน่นของโฟมชีวภาพ คือขนาดของเซลล์โฟมและความหนาของผนังเซลล์โฟม กล่าวคือโฟมชีวภาพที่ขนาดเซลล์ใหญ่และมีความหนาของผนังเซลล์โฟมบางจะมีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งถ้าพิจารณาจากภาพถ่าย SEM ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.14 และภาคผนวก ก.12 จะพบว่าโฟมที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 5:1 มีขนาดเซลล์โฟมใหญ่ที่สุดและมีผนังเซลล์โฟมบาง จึงทำให้ความหนาแน่นต่ำที่สุด ในขณะที่โฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 2:1 มีขนาดเซลล์โฟมเล็กที่สุด และผนังเซลล์โฟมหนา จึงทำให้ความหนาแน่นมีค่าสูงที่สุด

4.4.3 อิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่มีผลต่อการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพ

ผลการทดสอบการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพสูตร G, G9S1 และ G8S2 ที่มีการใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล ที่อัตราส่วน 2:1, 3:1, 4:1 และ 5:1 แสดงในภาพที่ 4.17 ภาพที่ 4.18 และภาคผนวก ก.14 ซึ่งแสดงค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength ของชิ้นงานโฟมที่เก็บไว้ในภาชนะปิดที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ 50% ก่อนการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D790-03 อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์ในประเทศไทยโดยเฉลี่ยนั้นอยู่ที่ประมาณ 74-80% ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดสอบการต้านทานต่อการโค้งงอของ โฟมชีวภาพเพิ่มเติม โดยทำการเก็บโฟมไว้ในปิดที่มีการควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ก่อนการทดสอบ เพื่อให้ทราบถึงสมบัติเชิงกลของโฟมชีวภาพในสภาวะใกล้เคียงกับการใช้งานจริงในสภาพอากาศของประเทศไทยที่มีความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ค่อนข้างสูงเกือบตลอดทั้งปี ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังภาพที่ 4.19 ภาพที่ 4.20 และภาคผนวก ก.14

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลในโฟมชีวภาพทุกสูตรคือ G, G9S1 และ G8S2 พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล จากอัตราส่วน 2:1 ไปเป็น 5:1 ทำให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากในโฟมชีวภาพที่มีอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลมาก (อัตราส่วนที่ 5:1) จะมีปริมาณกลีเซอรอลที่อยู่ในโฟมชีวภาพน้อยที่สุด ในขณะที่โฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลน้อย (อัตราส่วนที่ 2:1) จะมีปริมาณกลีเซอรอลที่อยู่ในโฟมมากที่สุด ซึ่งในระหว่างการขึ้นรูปโฟมชีวภาพที่ 130 องศาเซลเซียส พลาสติกไซเซออร์ที่เป็นน้ำจะระเหยออกจากโฟมชีวภาพ ในขณะที่พลาสติกไซเซออร์ที่เป็นกลีเซอรอลไม่ระเหยออกไปจากโฟมจะไปลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ในโฟมชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคือพันธะไฮโดรเจน ทำให้โฟมชีวภาพไม่แข็งเปราะและมีความนิ่มมากขึ้น ดังนั้นโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล ที่อัตราส่วน 5:1 (มีปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่เป็นกลีเซอรอลน้อย) จะแข็งและมีความยืดหยุ่นต่ำกว่าโฟมที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล ที่อัตราส่วน 2:1 จึงทำให้โฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล ที่อัตราส่วน 5:1 มีค่า Flexural modulus และ Flexural strength สูง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Y. Pan และคณะ [54] ที่ได้ศึกษาการใช้กลีเซอรอลซึ่งทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ในกลุ่ม พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกลีเซอรอล ค่า Tensile strength ลดลง

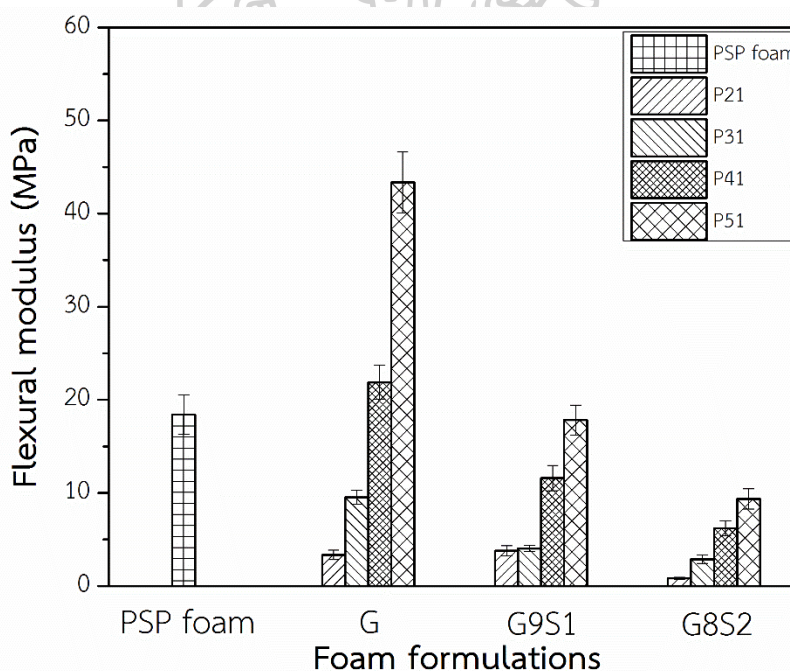
แต่ Elongation at break เพิ่มขึ้น ซึ่งกลีเซอรอลที่เติมลงไปจะไปช่วยลดความแข็งเปราะและเพิ่มความยืดหยุ่นของกลูเตนมากขึ้น และงานวิจัยของ F. Zubeldia และคณะ [55] ที่ได้ทำการศึกษาฟิล์มจากกลูเตนโดยใช้น้ำและกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ซึ่งขึ้นรูปด้วยวิธีการ compression molding พบว่าฟิล์มกลูเตนที่มีปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นจาก 15 wt% เป็น 25 wt% ส่งผลให้ค่า Tensile strength และ Modulus ลดลง และ ค่า Elongation at break เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างโมเลกุลของกลูเตน ส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของกลูเตน เช่นพันธะไฮโดรเจนลดลง

เมื่อพิจารณาโพลีเมอร์ชีวภาพสูตร G, G9S1 และ G8S2 ที่มีการใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลเดียวกัน พบว่าโพลีเมอร์ชีวภาพสูตร G มีค่า Flexural modulus และ Flexural strength สูงที่สุด ในขณะที่โพลีเมอร์ชีวภาพสูตร G8S2 มีค่า Flexural properties ต่ำที่สุด กล่าวคือโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณกลูเตนจากแป้งสาลีอยู่ในองค์ประกอบของโพลีเมอร์ชีวภาพมากจะทำให้ค่า Flexural properties ที่สูงขึ้น เนื่องจากกลูเตนจากแป้งสาลีที่อยู่ในโพลีเมอร์ชีวภาพเมื่อได้รับความร้อนในขณะขึ้นรูป กลูเตนสามารถเกิดการเชื่อมขวางกันระหว่างสายโซ่โปรตีนที่บริเวณหมู่ Thiol (-SH) ในกรดอะมิโนชนิด Cysteine เกิดเป็นพันธะ disulfide (-S-S-) ระหว่างสายโซ่ทำให้กลูเตนมีลักษณะเป็นร่างแห ซึ่งการเกิดการเชื่อมขวางในกลูเตนนี้ส่งผลให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโพลีเมอร์ชีวภาพที่มีปริมาณกลูเตนอยู่มากมีค่าสูง

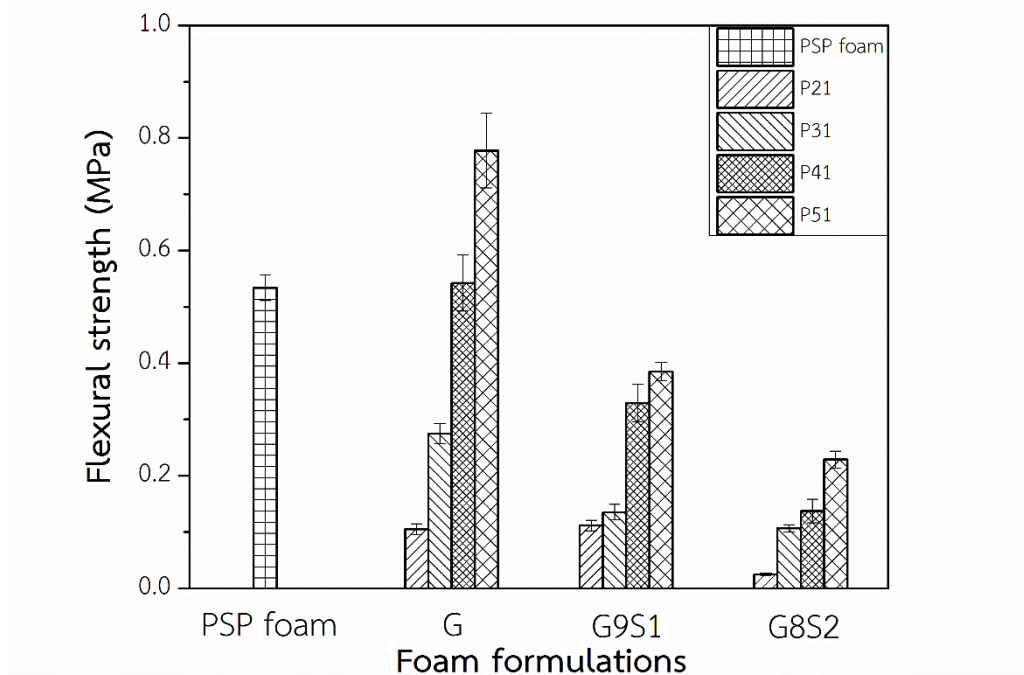
เมื่อพิจารณาค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโพลีเมอร์ชีวภาพ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล ทำให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength เพิ่มขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มเดียวกันกับการทดสอบ Flexural properties ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% อย่างไรก็ตามค่า Flexural properties ของโพลีเมอร์ชีวภาพทุกสูตร ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีค่าน้อยกว่าค่า Flexural properties ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เนื่องจากในชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 75% นั้น น้ำในบรรยากาศสามารถเข้าไปแทรกกระหว่างสายโซ่ของโปรตีนและแป้งได้ในปริมาณมาก ทำให้อันตรกิริยาระหว่างสายโซ่ของโปรตีนและแป้งลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50% ส่งผลให้ชิ้นงานที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% มีค่า Flexural properties ต่ำกว่าโพลีเมอร์ชีวภาพที่ถูกเก็บไว้ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 50% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ R. L. Shogren และคณะ [56] ที่ได้ศึกษาโพลีเมอร์จากแป้งประเภทต่างๆ และจากการทดสอบค่าการต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural properties) ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 85%RH

พบว่า เมื่อเพิ่มเพิ่มสภาวะความชื้นสัมพัทธ์เป็น 50% เป็น 85% โฟมจากแป้งจะดูดซึมน้ำจากอากาศปริมาณมากขึ้น ทำให้โฟมจากแป้งจึงมีความนิ่มและยืดหยุ่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ลดลง

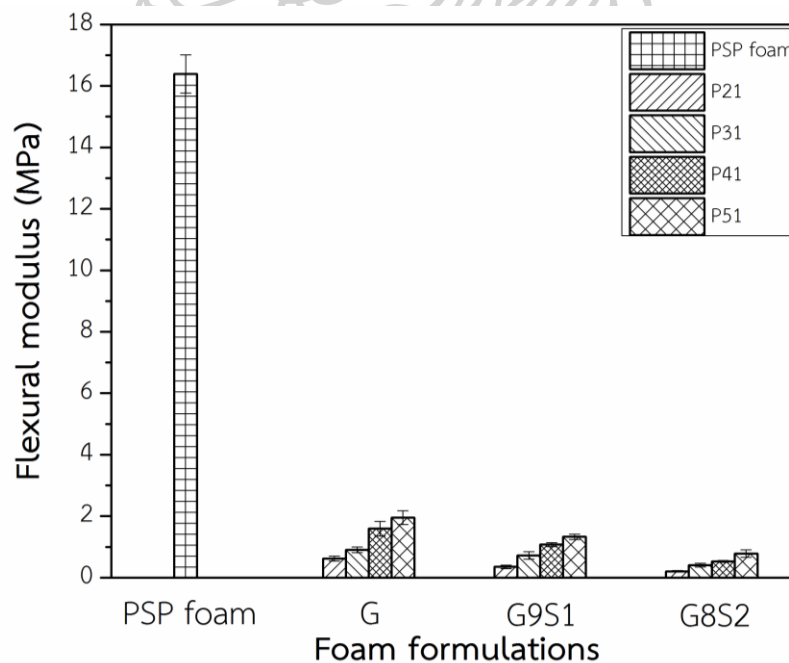
จากผลการศึกษาผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่เหมาะสมต่อการผลิตเป็นโฟมชีวภาพเพื่อใช้ในการศึกษาต่อในตอนถัดไปจะพิจารณาจากสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอและความหนาแน่น โดยพบว่าโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 5:1 ของโฟมสูตร G, G9S1 และ G8S2 มีค่า Flexural modulus และ Flexural strength สูง และมีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 2:1, 3:1 และ 4:1 และเมื่อเรียงลำดับสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมที่ชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลที่ 5:1 จากมากไปหาน้อยจะได้ดังนี้ G-P51 > G9S1-P5 > G8S2-P51 ดังนั้นสูตรที่จะเลือกนำไปใช้ในการศึกษาในตอนต่อไปคือโฟมชีวภาพสูตร G-P51 และ G9S1-P51



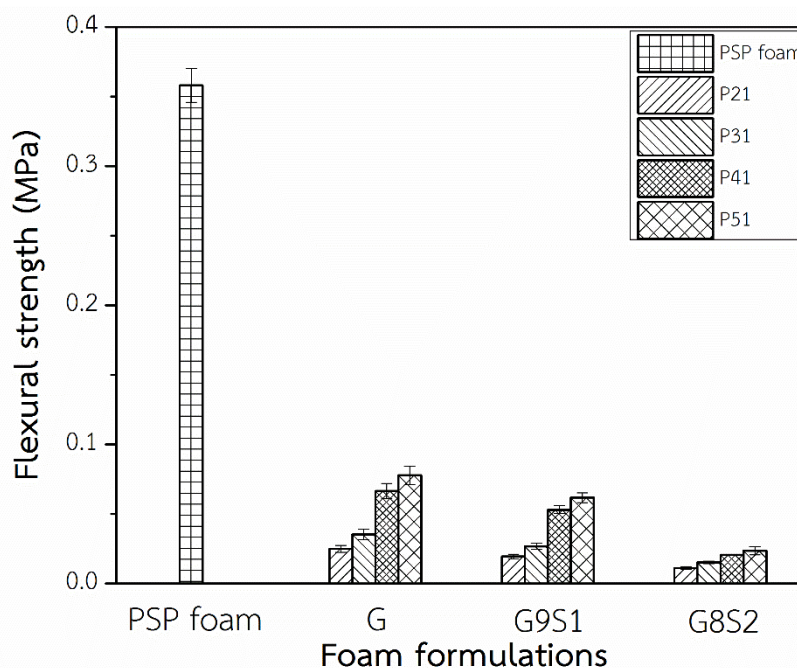
ภาพที่ 4.17 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%



ภาพที่ 4.18 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%



ภาพที่ 4.19 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ที่มีต่อโฟมชีวภาพ ที่สภาวะความชื้น 75%



ภาพที่ 4.20 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และผลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อโฟมชีวภาพ ที่สภาวะความชื้น 75%

4.5 การศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อสมบัติต่างๆ ของโฟมชีวภาพ

สารเชื่อมขวางนั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่โฟมชีวภาพ ซึ่งจากการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพในหัวข้อที่ 4.4 ก่อนหน้านี้ พบว่าโฟมชีวภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอต่ำกว่า PSP foam มาก ดังนั้นการเติมสารเชื่อมขวางน่าจะช่วยให้โฟมชีวภาพมีความแข็งแรงขึ้น และทำให้โฟมชีวภาพสามารถใช้งานที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงได้ดีขึ้น โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกบอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวาง เนื่องจากบอแรกซ์นั้นสามารถเชื่อมขวางกับหมู่ไฮดรอกซิล และหมู่อะมิโนในแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์และกลูเตนจากแป้งสาลี ข้อดีของการใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางคือ อุณหภูมิของการเกิดการเชื่อมขวางนั้นอยู่ที่ในช่วง 45-50 องศาเซลเซียส [30, 31] ดังนั้นเมื่อผสมสารละลายบอแรกซ์ลงในพอลิเมอร์เมทริกซ์จะไม่เกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางในระหว่างการผสมที่อุณหภูมิห้อง โดยหากเกิดการเชื่อมขวางขึ้นก่อนในระหว่างการผสมจะทำให้การนวด dough บนเครื่อง Two roll mill ทำได้ยาก

ในงานวิจัยตอนนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อ สัณฐานวิทยา ขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ย ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง (Hardness) สี (Color) และสมบัติการดูดซึมน้ำ (Water absorption) ของโฟมชีวภาพ โดยปริมาณสารเชื่อมขวางที่

ทำการศึกษา คือ 6, 8, 10 และ 12% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์คือ 100:0 และ 90:10 ปริมาณโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตคือ 12 phr ของน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ และอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลคือ 5:1 โดยน้ำหนักรวมของพลาสติกไซเซออร์ที่ 70 phr ของน้ำหนักกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ ซึ่งตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตร

ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของสารต่างๆ สำหรับเตรียมโฟมชีวภาพแต่ละสูตรเพื่อศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวาง

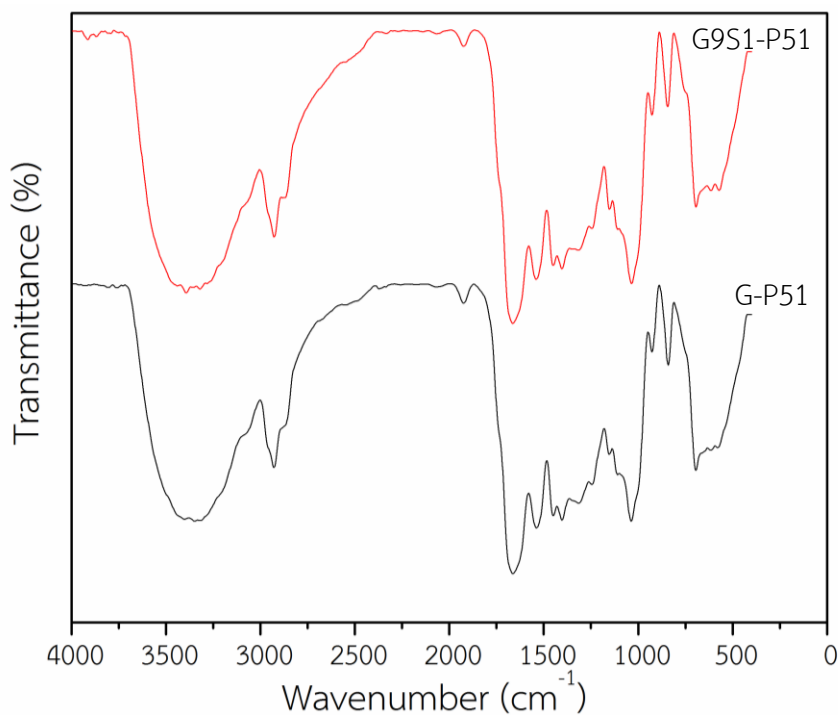
สูตรโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางแตกต่างกัน	ปริมาณสารเชื่อมขวาง (%) ^a	อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล	พลาสติกไซเซออร์ (phr)	อัตราส่วนระหว่างกลูเตนและแป้งสาลี	ปริมาณ NaHCO ₃ (phr)
G-P51	0	5:1	70	100:0	12
G-P51-C6	6				
G-P51-C8	8				
G-P51-C10	10				
G-P51-C12	12				
G9S1-P51	0	5:1	70	90:10	12
G9S1-P51-C6	6				
G9S1-P51-C8	8				
G9S1-P51-C10	10				
G9S1-P51-C12	12				

^a เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์

4.5.1 การตรวจสอบการเกิดปฏิกิริยาระหว่างโฟมชีวภาพกับสารเชื่อมขวาง

สารเชื่อมขวางนั้นมีหน้าที่เชื่อมขวางสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ทำให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นร่างแห เพื่อให้โฟมชีวภาพมีสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอที่สูงขึ้น การเชื่อมขวางของพอลิเมอร์เมทริกซ์โดยใช้สารเชื่อมขวางคือบอแรกซ์ทำโดย เทคนิค Fourier transform infrared

spectroscopy (FTIR) เพื่อยืนยันการเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างการขึ้นรูปโพลีเมอร์ชีวภาพกับสารเชื่อมขวาง โดยพอลิเมอร์จะเกิดการสั่นในรูปแบบต่างๆ เมื่อได้รับพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่น IR โดยภาพที่ 4.21 แสดงสเปกตรัมของโพลีเมอร์ชีวภาพที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง



ภาพที่ 4.21 FTIR สเปกตรัมของโพลีเมอร์ชีวภาพที่ไม่มีการเชื่อมขวาง โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ 100:0 และ 90:10 และใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ 5:1 (G-W5C1 และ G9S1-W5C1 ตามลำดับ)

เมื่อพิจารณาดำเนินการเลขคลื่นที่สำคัญของโพลีเมอร์ชีวภาพ G-P51 และ G9S1-P51 พบพีกที่เลขคลื่นที่สำคัญซึ่งแสดงถึงการสั่น (vibration) ของพันธะได้แก่

- OH stretching อยู่ในช่วง $3,600-3,300 \text{ cm}^{-1}$ และ OH bending ที่ $1,406-1,403 \text{ cm}^{-1}$ ของสายโซ่แป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์, ปลายสายโซ่ของโปรตีนกลูเตน, side chain ของกรดอะมิโนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ เช่น Proline, Serine, Threonine, Glutamic acid และ Aspartic acid และหมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล
- CH stretching ที่ $2,928-2,926 \text{ cm}^{-1}$ ของสายโซ่โปรตีน, แป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ และกลีเซอรอล

- C=O stretching ที่ $1,664-1,659\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะเพปไทด์ในกลูเตน และกรดอะมิโนในกลูเตน ที่มีหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบ เช่น Proline, Glutamine/Glutamic acid และ Asparagine/Aspartic acid

- NH bending ที่ $1,549-1,538\text{ cm}^{-1}$ ของปลายสายโซ่โปรตีนกลูเตน, พันธะเพปไทด์ และกรดอะมิโนที่มีหมู่เอมีนหรือหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบ เช่น Arginine, Lysine, Glutamine acid และ Asparagine acid สำหรับพีก -NH stretching ซึ่งอยู่ในช่วง $3,500-3,300\text{ cm}^{-1}$ ไม่ปรากฏให้เห็นอย่างชัดเจน เนื่องจากพีกเกิดการซ้อนทับกับพีก -OH stretching ที่ปรากฏอยู่ในช่วง $3,600-3,300\text{ cm}^{-1}$

- CH_2 bending ที่ $1,449-1,403\text{ cm}^{-1}$ ของกลีเซอรอลและกรดอะมิโนชนิด Leucine, Valine, Cysteine, Methionine, Serine, Arginine, Lysine, Glutamine/Glutamic acid และ Asparagine/Aspartic acid

- CO stretching ที่ $1,340-1,314\text{ cm}^{-1}$ ของกรดอะมิโนที่มีหมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบชนิด Proline, Glutamic acid และ Aspartic acid

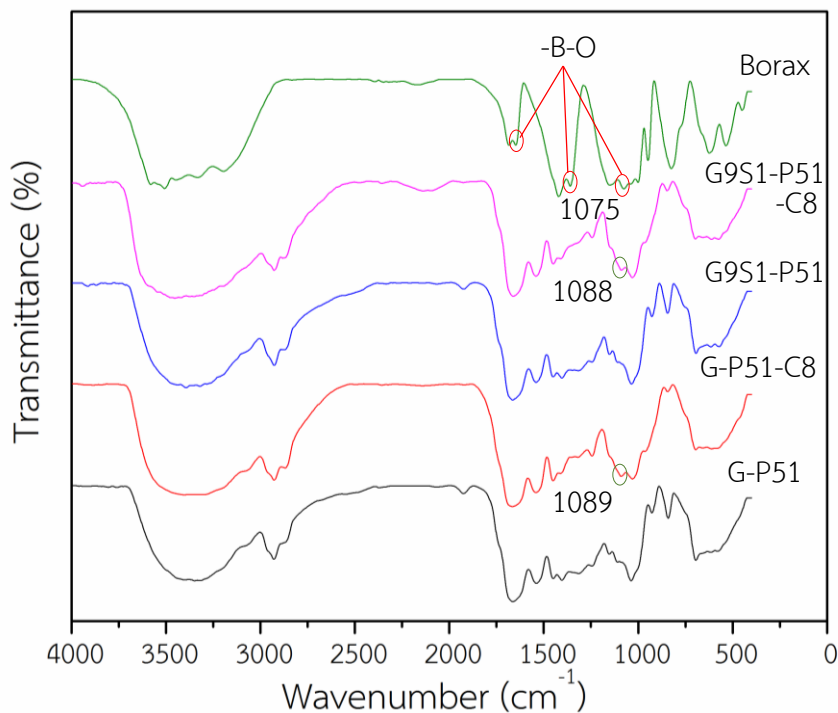
- CN stretching ที่ $1,152-1,151\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะเพปไทด์ หมู่ปลายสายโซ่ของโปรตีนกลูเตน และกรดอะมิโนที่มีหมู่เอมีนเป็นองค์ประกอบ เช่น Arginine และ Lysine

- CO stretching ที่ $1,112-1,111\text{ cm}^{-1}$ ของกลีเซอรอลตำแหน่ง 2° แอลกอฮอล์ และกรดอะมิโนที่มี 2° แอลกอฮอล์ เช่น Threonine , C-O stretching ที่ $1,036-1,034\text{ cm}^{-1}$ ของกลีเซอรอลตำแหน่ง 1° แอลกอฮอล์ และกรดอะมิโนที่มี 1° แอลกอฮอล์ เช่น Serine

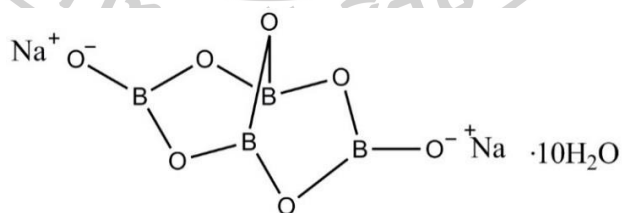
- CO bending ที่ $926-925\text{ cm}^{-1}$ ของกลีเซอรอล และกรดอะมิโนที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ เช่น Serine และ Threonine, N-H out of plane bending ที่ $848-839\text{ cm}^{-1}$ ของหมู่ปลายสายโซ่ของโปรตีนกลูเตน และกรดอะมิโนที่มีหมู่เอมีนเป็นองค์ประกอบ เช่น Arginine และ Lysine

ภาพที่ 4.22 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมของบอแรกซ์ โฟมชีวภาพที่ไม่มีและมีการเติมสารเชื่อมขวาง เมื่อพิจารณาดำแหน่งเลขคลื่นที่สำคัญของสารเชื่อมขวาง (Borax) พบพีกของ OH stretching ที่ $3,506.43\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีกที่มีลักษณะกว้างและเข้มของโมเลกุลน้ำ และ B-O stretching ที่ $1,683.22-1,647.85\text{ cm}^{-1}$, $1,420.27\text{ cm}^{-1}$ และ $1,075.48\text{ cm}^{-1}$ โดยโครงสร้างของบอแรกซ์แสดงดังภาพที่ 4.23 โดยงานวิจัยของ W. Xie [57] ได้ทำการศึกษาการเตรียมบอแรกซ์จากโบรอนออกไซด์ที่มีสิ่งเจือปนสูงด้วยวิธีการตกผลึก ซึ่งจากการทดสอบบอแรกซ์ด้วยเทคนิค FTIR พบตำแหน่ง

เลขคลื่นที่สำคัญคือ OH ที่ $3,508\text{ cm}^{-1}$ เป็นพีกที่มีลักษณะกว้างและเข้ม และ B-O stretching ที่ $1,646\text{ cm}^{-1}$, $1,406\text{ cm}^{-1}$ และ $1,074\text{ cm}^{-1}$



ภาพที่ 4.22 FTIR สเปกตรัมของบอแรกซ์ (Borax) โฟมชีวภาพที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมขวาง (G-P51 และ G9S1-P51) และโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางในปริมาณ 8% (G-P51-C8 และ G9S1-P51-C8)



ภาพที่ 4.23 โครงสร้างบอแรกซ์ (Borax)

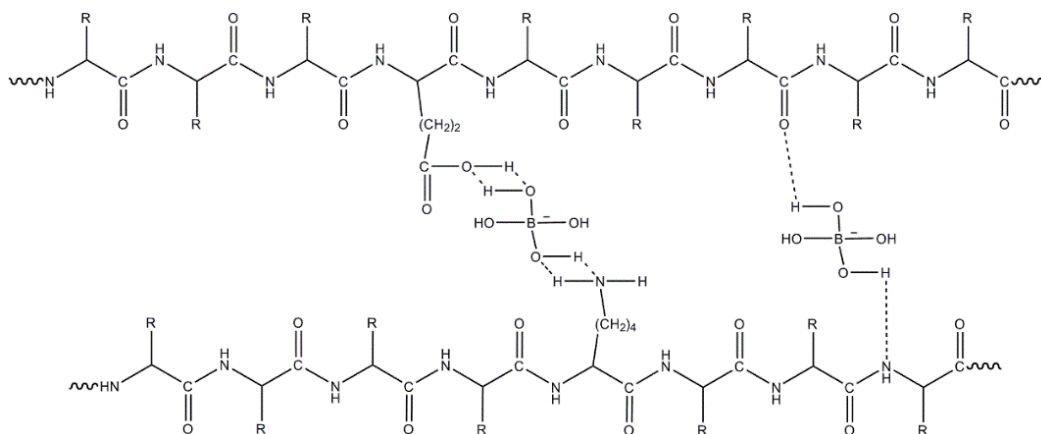
ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาพีกของ -B-O stretching ของบอแรกซ์ในโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางเพื่อยืนยันปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ในโฟมชีวภาพ โดยจะพิจารณาพีก -B-O stretching ที่เฉพาะเลขคลื่นในช่วง $1,075.48\text{ cm}^{-1}$ เนื่องจากที่เลขคลื่นนี้ไม่เกิดการซ้อนทับกับพีกที่ปรากฏในกลุ่มเตนและแป้งสาลีในโฟมชีวภาพ ในขณะที่พีก -B-O stretching ของบอแรกซ์ที่

ปรากฏที่ 1,683.22-1,647.85 cm^{-1} จะซ้อนทับกับพีค C=O stretching ที่ 1,664-1,659 cm^{-1} ของพันธะเพปไทด์ และกรดอะมิโนที่มีหมู่คาร์บอกซิลหรือหมู่เอไมด์เป็นองค์ประกอบในกลูเตน และพีค -B-O stretching ของบอแรกซ์ที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1,420.27 cm^{-1} จะซ้อนทับกับพีค -CH₂ bending ที่ 1,449-1,403 cm^{-1} ของกลีเซอรอลและกรดอะมิโนชนิดต่างๆ ในกลูเตน เมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัมของโฟมชีวภาพที่ไม่มีและมีการเติมสารเชื่อมขวางระหว่าง G-P51 และ G-P51-C8 ในภาพที่ 4.30 พบว่าใน สเปกตรัมของโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางปรากฏพีคของ -B-O stretching ที่เลขคลื่น 1,089-1,088 cm^{-1} ซึ่งจะเห็นว่าตำแหน่งเลขคลื่นของ -B-O stretching เลื่อนสูงขึ้นไปเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพีคของ -B-O stretching ที่ 1,075 cm^{-1} ของบอแรกซ์บริสุทธิ์ ซึ่งเลขคลื่นของ -B-O ของโฟมชีวภาพในแต่ละสูตรที่เติมสารเชื่อมขวางแสดงดังตารางที่ 4.7

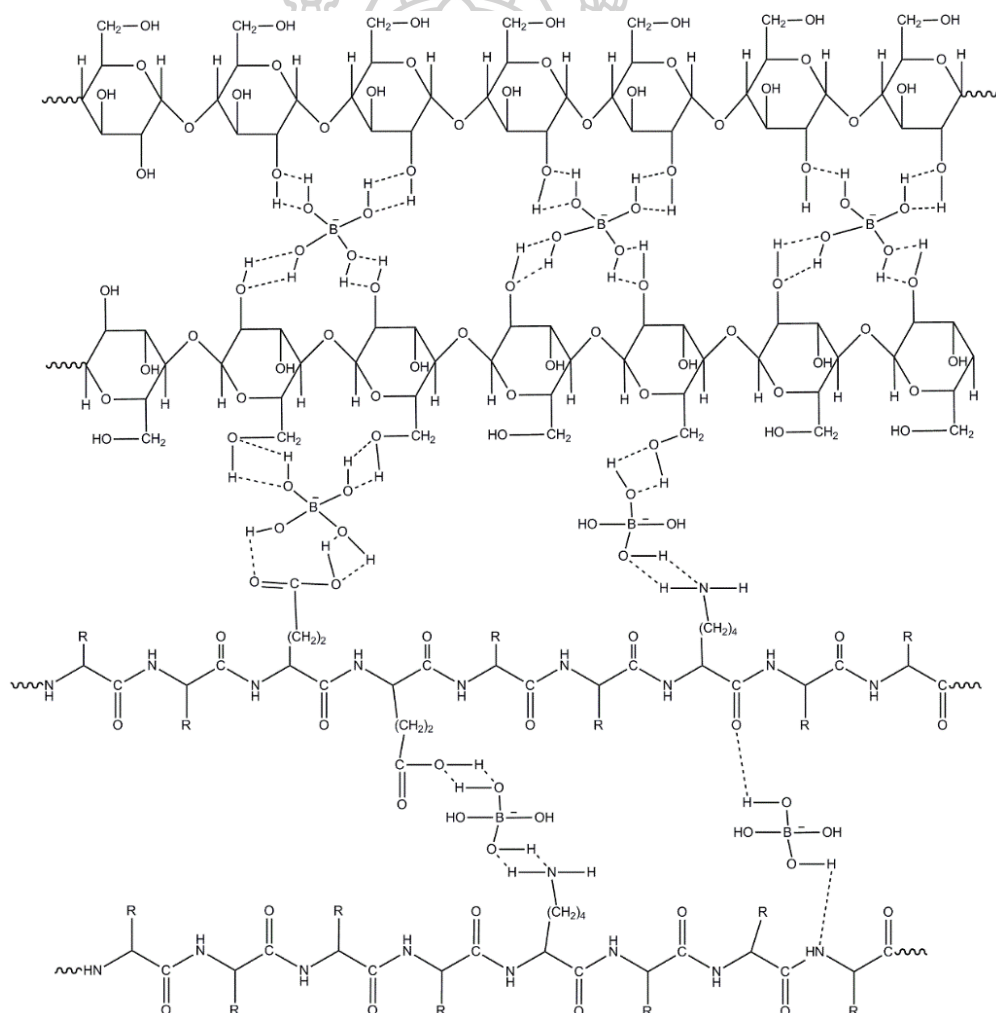
ตารางที่ 4.7 เลขคลื่นของพันธะ B-O ของโฟมชีวภาพที่ใช้สารเชื่อมขวาง 8%โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์เมทริกซ์

Sample	Bonding Type	Wavenumber (cm^{-1})
Borax	B-O	1,075.48
G-P51-C8	B-O	1,089.04
G9S1-P51-C8	B-O	1,088.48

การที่เลขคลื่นของ -B-O stretching ในโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเลขคลื่นบ่งบอกถึงมีการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างบอแรกซ์และพอลิเมอร์เมทริกซ์ (กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์) ซึ่งปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของบอแรกซ์กับพอลิเมอร์เมทริกซ์จะเกิดผ่านพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของบอเรตไอออน ($\text{B}(\text{OH})_4^-$) กับหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสาลี และระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของบอแรกซ์กับหมู่เอไมด์ในสายโซ่หลักของกลูเตนและกรดอะมิโนที่มีหมู่ side chain เป็นหมู่เอมีน คาร์บอกซิลิก และไฮดรอกซิลในโปรตีน [43] โดยขั้นตอนการเชื่อมขวางเริ่มจากเมื่อบอแรกซ์ละลายน้ำจะเปลี่ยนอยู่ในรูปของกรดบอริก ($\text{B}(\text{OH})_3$) และกรดบอริกสามารถเปลี่ยนรูปเป็นบอเรตไอออน ($\text{B}(\text{OH})_4^-$) ดังสมการที่ 2.15-2.17 หลังจากนั้นเมื่อนำสารละลายบอแรกซ์มาผสมกับกลูเตน หรือกลูเตน/แป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์ และต่อมาเมื่อทำการขึ้นรูปโฟมก็จะเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างบอแรกซ์และโฟมกลูเตน และปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างบอแรกซ์และโฟมกลูเตน/แป้งสาลีที่ถูกเจลาตินซ์ โดยปฏิกิริยาการเชื่อมขวางที่คาดว่าจะเกิดขึ้นแสดงดังภาพที่ 2.24 และภาพที่ 2.25 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.24 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของโพลีเมอร์จากกลูเตนที่มีการเติมสารเชื่อมขวาง



ภาพที่ 4.25 ปฏิกิริยาที่คาดว่าจะเกิดขึ้นของโพลีเมอร์จากกลูเตน/แป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ที่มีการเติมสารเชื่อมขวาง

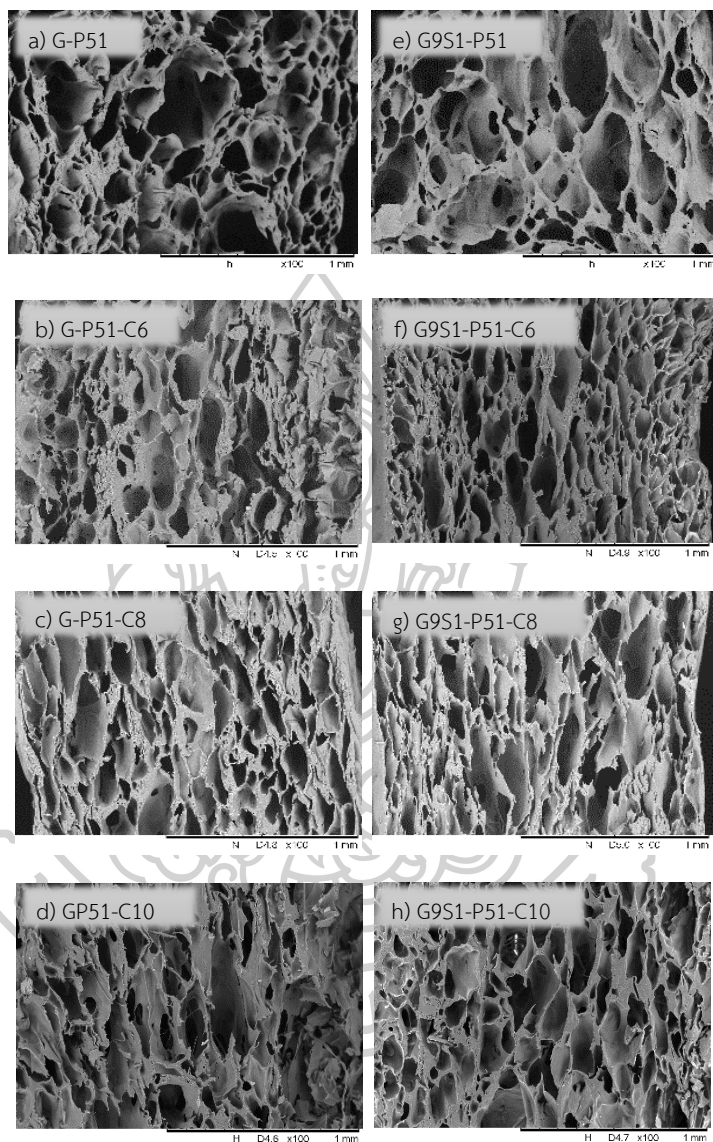
4.5.2 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีน

สัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนที่มีการเติมสารเชื่อมขวางในปริมาณต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.26 โดยขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ แสดงดังภาพที่ 4.27 และภาคผนวก ก.22 โดยโพลีเอทิลีนสูตร G-P51-C12 และ G9S1-P51-C12 ไม่สามารถขึ้นรูปได้เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะแข็งเปราะหลังการขึ้นรูปมาก จึงไม่ทดสอบ สัณฐานวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี สมบัติการดูดซึมน้ำต่อไป

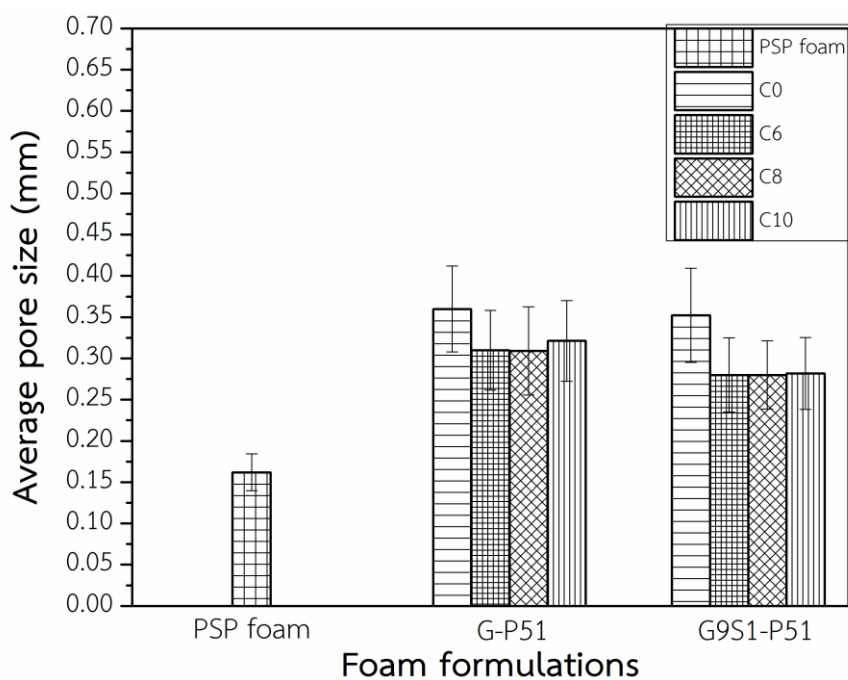
เมื่อเปรียบเทียบสัณฐานวิทยาของโพลีเอทิลีนที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางและเติมสารเชื่อมขวางในสูตรเดียวกัน (ภาพที่ 4.26 a-d และภาพที่ 4.26 e-h)) พบว่าขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนของโพลีเอทิลีนที่มีการเติมบอแรกซ์เล็กกว่าโพลีเอทิลีนที่ไม่มีการเติมบอแรกซ์ เนื่องจากในโพลีเอทิลีนที่เติมบอแรกซ์นั้นเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ซึ่งเป็นกลูเตนและแป้งสาลีเกิดการเชื่อมขวางกับบอแรกซ์ทำให้กลูเตนและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ซึ่งทำหน้าที่เป็นผนังเซลล์โพลีเอทิลีนมีความแข็งแรงขึ้นและมีความยืดหยุ่นน้อยลง ดังนั้นทำให้การขยายตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง ส่งผลให้เซลล์โพลีเอทิลีนขนาดเล็กเมื่อเทียบกับโพลีเอทิลีนที่ไม่เติมสารเชื่อมขวาง และเมื่อสังเกตบริเวณขอบชิ้นงานของโพลีเอทิลีนที่เติมสารเชื่อมขวางพบว่าขอบชิ้นงานหนากว่าโพลีเอทิลีนที่ไม่ได้เติมสารเชื่อมขวางเนื่องจากเป็นบริเวณที่สัมผัสความร้อนในระหว่างการขึ้นรูปก่อนส่งผลให้บริเวณพื้นผิวเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ก่อนบริเวณอื่น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ J.Tavakoli [43] ได้ทำการเตรียมโพลีเอทิลีนจากพอลิเมอร์ชีวภาพระหว่างเจลาตินและแป้งข้าวโพด โดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อมขวางที่ปริมาณ 10, 20, 30 และ 40% โดยในงานวิจัยนี้ พบว่าการเติมบอแรกซ์ลงในโพลีเอทิลีน/แป้งจะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนในโพลีเอทิลีนเล็กกว่าที่ไม่ได้เติมบอแรกซ์

เมื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อสัณฐานวิทยาและขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนของโพลีเอทิลีน โดยจะเปรียบเทียบโพลีเอทิลีนที่เติมปริมาณสารเชื่อมขวาง 6% 8% และ 10% ของน้ำหนักพอลิเมอร์เมทริกซ์ พบว่าผนังเซลล์โพลีเอทิลีนและขนาดเซลล์โพลีเอทิลีนเฉลี่ยมีขนาดใกล้เคียงกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.27 และภาคผนวก ก.22 อาจเนื่องจากปริมาณบอแรกซ์ที่เติมลงไปโพลีเอทิลีนมีปริมาณใกล้เคียงกันคือ 6% 8% และ 10% จึงไม่เห็นความแตกต่างของภาพสัณฐานวิทยาและขนาดของเซลล์โพลีเอทิลีนของโพลีเอทิลีนในแต่ละสูตร โดยผลการทดลองในงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยของ J.Tavakoli [43] ที่พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 10, 20, 30 และ 40% ขนาดรูพรุนของโพลีเอทิลีน/แป้งมีขนาดเล็กลง แต่ในงานวิจัยนี้เมื่อเพิ่มปริมาณบอแรกซ์จาก 6% 8% และ 10% ไม่พบความแตกต่างของขนาดเซลล์โพลีเอทิลีน ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยของ J.Tavakoli ใช้ปริมาณบอแรกซ์ที่

เต็มลงไปมากกว่าในงานวิจัยนี้จึงทำให้โฟมเจลาติน/แป้ง มีปริมาณการเชื่อมขวางที่มากกว่าส่งผลต่อการขยายตัวของฟองแก๊สเกิดขึ้นได้น้อยจึงทำให้ได้ขนาดเซลล์โฟมที่เล็ก



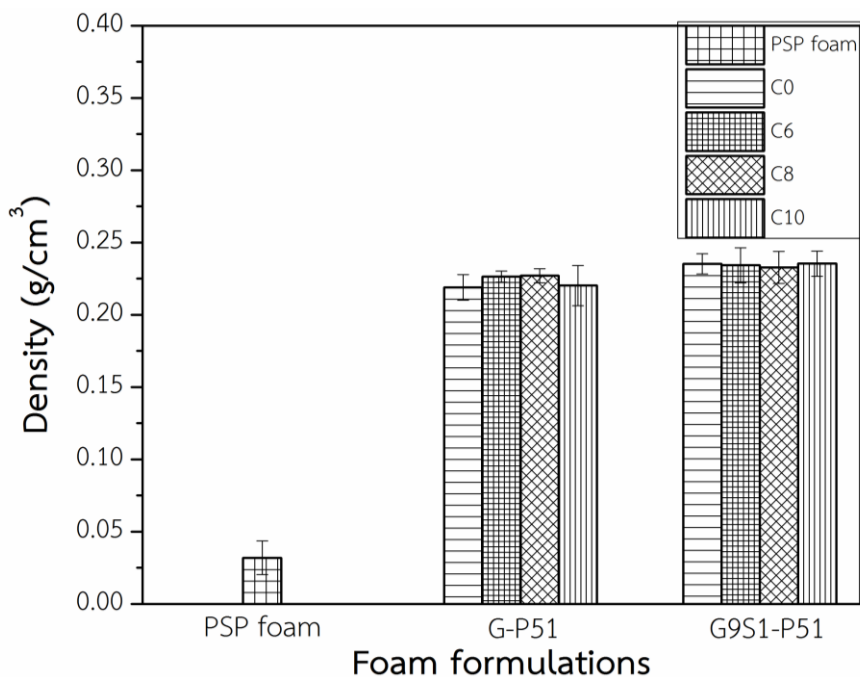
ภาพที่ 4.26 ภาพ SEM ของ a) G-P51, b) G-P51-C6, c) G-P51-C8 d) GP51-C10, e) G9S1-P51, f) G9S1-P51-C6, g) G9S1-P51-C8 และ h) G9S1-P51-C10 คือโฟมชีวภาพที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมขวาง 0%, 6%, 8% และ 10% โดยใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ 100:0, 90:10 และใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล 5:1 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.27 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

4.5.3 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อค่าความหนาแน่นของโฟมชีวภาพ

ความหนาแน่นของโฟมชีวภาพที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ได้แสดงในภาพที่ 4.28 และภาคผนวก ก.23 เมื่อพิจารณาความหนาแน่นของโฟมที่มีการเติมและไม่เติมสารเชื่อมขวางในโฟมชีวภาพสูตร G และ G9S1 พบว่าโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางมีความหนาแน่นใกล้เคียงกับโฟมชีวภาพที่ไม่มีการเติมบอแรกซ์ โดยขนาดเซลล์โฟมและผนังเซลล์โฟมมีอิทธิพลต่อความหนาแน่นของโฟมชีวภาพ ซึ่งจากภาพถ่าย SEM แสดงดังภาพที่ 4.2 และภาคผนวก ก.22 สังเกตเห็นว่าโฟมชีวภาพที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางจะมีขนาดของเซลล์โฟมใหญ่กว่าโฟมชีวภาพที่เติมสารเชื่อมขวาง แต่ความหนาแน่นของผนังเซลล์โฟมไม่แตกต่างกันมาก ความหนาแน่นของโฟมชีวภาพจึงมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 4.28 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

4.5.4 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพ

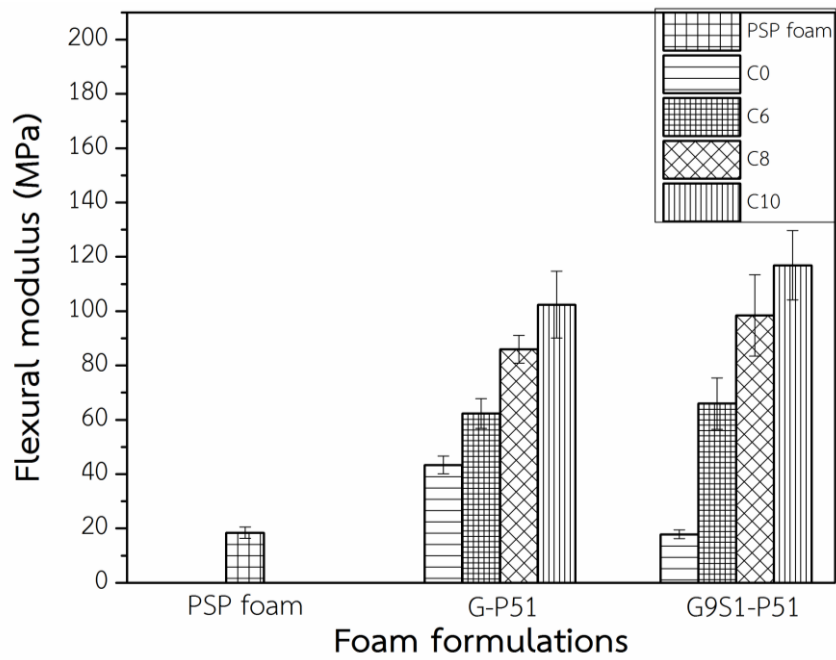
จากผลการทดสอบการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพที่ไม่ได้เติมสารเชื่อมขวางที่เก็บไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ในหัวข้อที่ 4.4.3 ก่อนหน้านี้นี้ดังภาพที่ 4.19 ภาพที่ 4.20 และภาคผนวก ก.14 จะพบว่าโฟมชีวภาพที่ไม่มีการเติมสารเชื่อมขวางมีสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอที่ต่ำกว่า PSP foam มาก ดังนั้นการเชื่อมขวางโฟมพอลิเมอร์น่าจะช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอได้ดีขึ้น โดยภาพที่ 4.29 ภาพที่ 4.30 และภาคผนวก ก.24 แสดงค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength ที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% และภาพที่ 4.31 ภาพที่ 4.32 และภาคผนวก ก.24 แสดงค่า Flexural modulus และค่า Flexural strength ที่เก็บไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ที่ 75% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

เมื่อพิจารณาสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพที่เก็บไว้ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% ก่อนการทดสอบ พบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของ PSP foam มีค่าต่ำกว่าโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวาง เนื่องจาก PSP foam นั้นมีพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นพอลิสไตรีน ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้ว โดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลคือแรงลอนดอนซึ่งเป็นแรงแบบอ่อน ซึ่งแรงลอนดอนนี้จะเพิ่มตามน้ำหนักโมเลกุลของพอลิสไตรีน

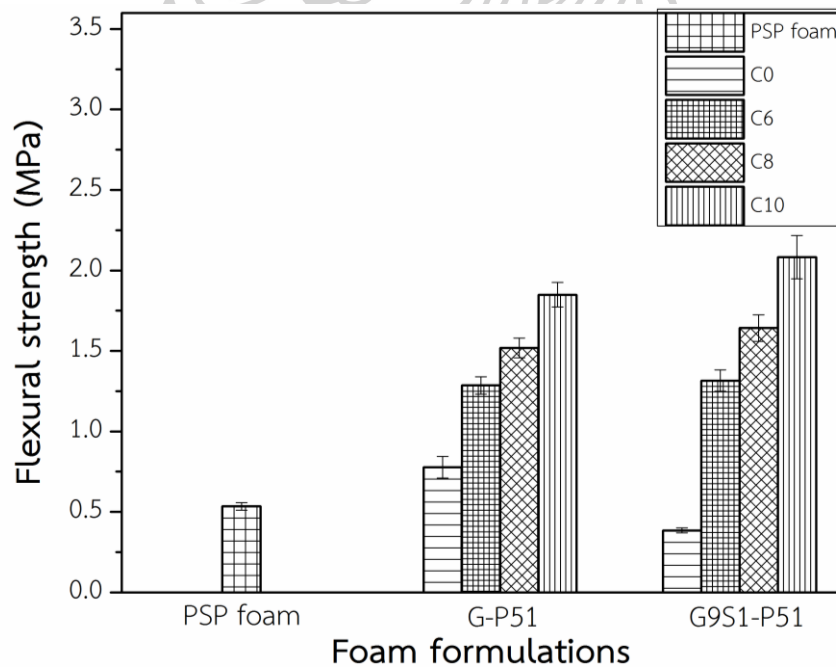
ในขณะที่โฟมชีวภาพสูตร G และ G9S1 เมื่อได้รับความร้อนในขณะที่ขึ้นรูปจะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่จึงทำให้สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพสูงกว่า PSP foam โดยโฟมชีวภาพสูตร G ซึ่งมีพอลิเมอร์เมทริกซ์คือกลูเตนนั้นจะเกิดกระบวนการเชื่อมขวางสองกระบวนการ กระบวนการแรกเป็นการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของกลูเตนินและไกลอะดิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในกลูเตน โดยปฏิกิริยาเชื่อมขวางเกิดผ่านหมู่ Thiol (-SH) 2 หมู่ เข้าทำปฏิกิริยากันได้เป็นพันธะ disulfide (-S-S-) เชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ของโปรตีน และกระบวนการที่สองเป็นการเชื่อมขวางระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลหรือหมู่อะมิโนในโปรตีนกับบอแรกซ์ ในขณะที่โฟมชีวภาพสูตร G9S1 ซึ่งมีพอลิเมอร์เมทริกซ์คือกลูเตนและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ ซึ่งส่วนที่เป็นกลูเตนจะเกิดกระบวนการเชื่อมขวางดังที่อธิบายไว้ข้างต้น และในส่วนของแป้งที่ถูกเจลาตินไนซ์สามารถเกิดการเชื่อมขวางกับบอแรกซ์ที่หมู่ไฮดรอกซิลได้อีกด้วย

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมชีวภาพสูตร G และ G9S1 ที่มีการเติมบอแรกซ์ พบว่าโฟมสูตร G9S1 มีค่า Flexural modulus และ Flexural strength สูงกว่าโฟมชีวภาพสูตร G เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติมสารเชื่อมขวางเท่ากัน เนื่องจากในโฟมชีวภาพสูตร G9S1 พอลิเมอร์เมทริกซ์ทั้งในส่วนที่เป็นกลูเตนและแป้งสามารถเกิดการเชื่อมขวางได้ทั้งสองส่วน จึงทำให้การเชื่อมขวางเกิดขึ้นได้มากกว่าโฟมชีวภาพสูตร G ซึ่งมีแต่กลูเตนที่เป็นพอลิเมอร์เมทริกซ์

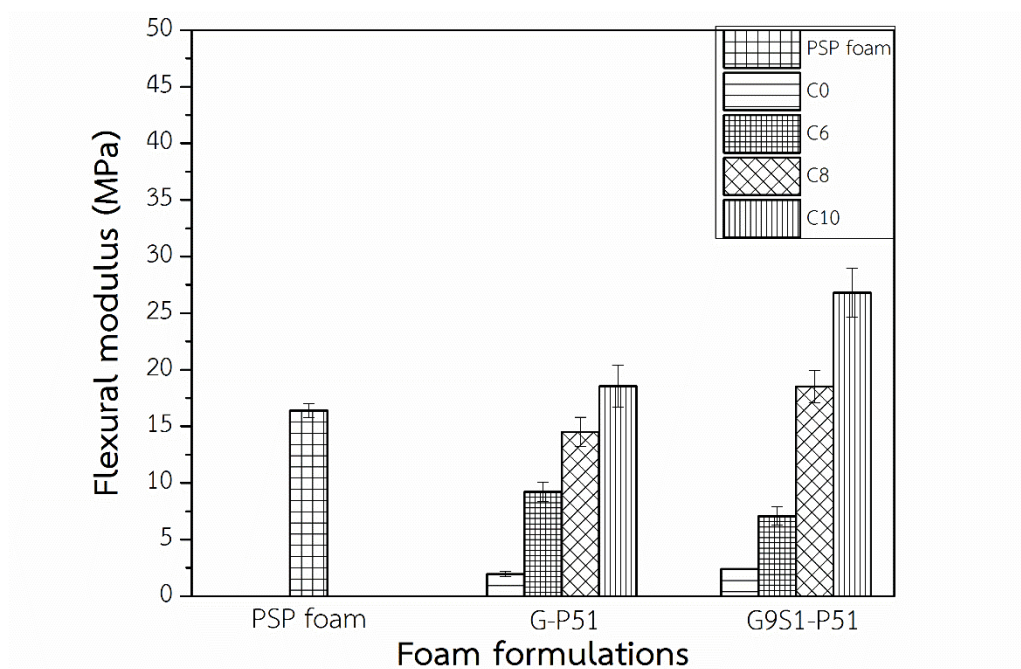
เมื่อพิจารณาปริมาณบอแรกซ์ที่เติมลงในโฟมชีวภาพ พบว่าสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอของโฟมสูงขึ้นตามปริมาณการเพิ่มขึ้นของสารเชื่อมขวาง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ K. Das และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์ผสมระหว่างสารละลายแป้งและ poly(vinyl alcohol) (PVA) โดยใช้บอแรกซ์เป็นสารเชื่อม พบว่าค่า Tensile strength และค่า Tensile modulus มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมสารเชื่อมขวาง



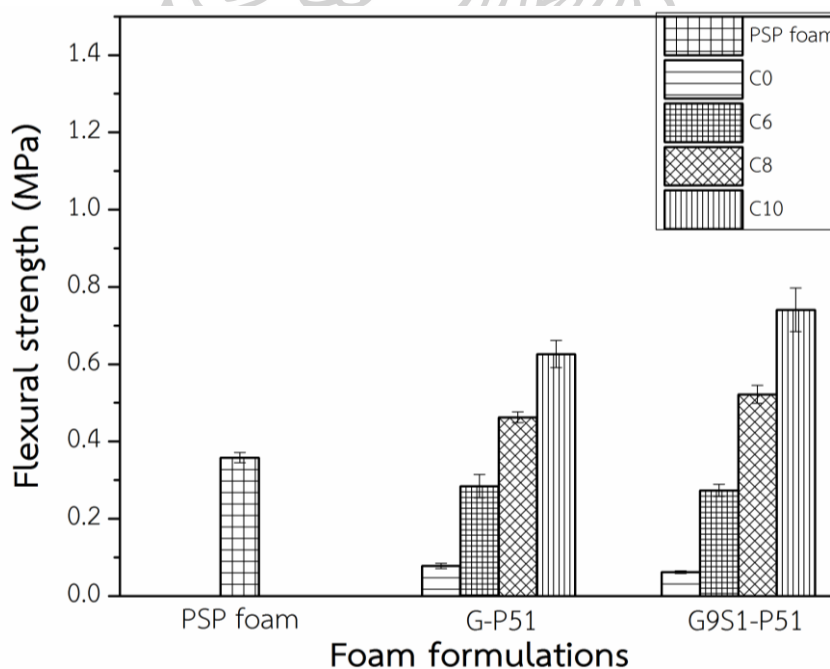
ภาพที่ 4.29 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%



ภาพที่ 4.30 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%



ภาพที่ 4.31 ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 75%



ภาพที่ 4.32 ค่า Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 75%

เมื่อเปรียบเทียบค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพที่ปรับสภาวะที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% ก่อนการทดสอบสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีค่าน้อยกว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% เนื่องจากการเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์จาก 50% เป็น 75% ทำให้น้ำในบรรยากาศเข้าไปแทรกอยู่ระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์เมทริกซ์ทั้งในกลูเตนและแป้งสาลีได้มากขึ้น ส่งผลให้ free volume ในพอลิเมอร์มากขึ้น และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ของกลูเตนและแป้งสาลี เช่นพันธะไฮโดรเจนลดลงส่งผลให้ความแข็งแรงของพอลิเมอร์ต่ำลง เมื่อโฟมชีวภาพได้รับแรงกดในระหว่างการทดสอบจะมีความต้านทานต่อการเสียรูปลดลงจึงทำให้ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพที่เก็บไว้ในความชื้นสัมพัทธ์ 75% มีค่าต่ำกว่าโฟมชีวภาพที่เก็บไว้ในความชื้นสัมพัทธ์ที่ 50% ก่อนการทดสอบ

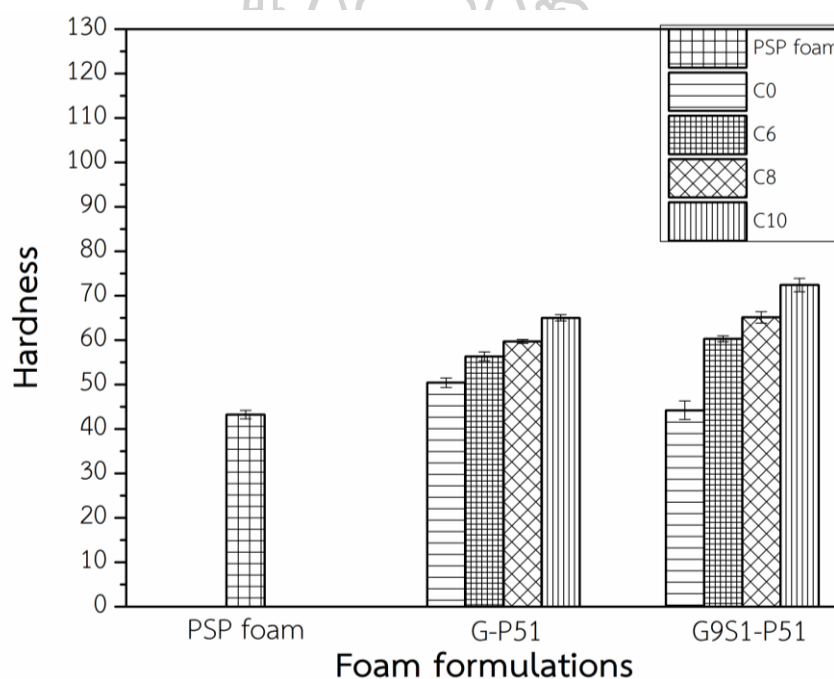
4.4.5 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อความแข็งของโฟมชีวภาพ

การทดสอบสมบัติทางกายภาพของโฟมนั้นในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะทดสอบความแข็ง (Hardness) ของวัสดุโฟม เนื่องจากง่ายต่อการทดสอบและเครื่องมือทดสอบราคาไม่แพง ซึ่งหลักการทดสอบความแข็งที่พื้นผิวของวัสดุโฟมนั้นจะนำเครื่อง Hardness (type O) สำหรับการทดสอบวัสดุที่มีความแข็งระดับกลางไปจนถึงอ่อนเล็กน้อย ได้แก่วัสดุโฟม ซึ่งเครื่อง Hardness จะมีหัวกดเมื่อนำมากดลงบนพื้นผิววัสดุโฟม หัวกดจะยุบเข้าไปในเครื่อง ซึ่งเครื่อง Hardness จะมีสปริงเป็นตัววัดความแข็งหากสปริงหดตัวมากแสดงว่าหัวกดยุบเข้ามาในตัวเครื่องมาก ค่าความแข็งจึงมีค่ามาก โดยการวัดความแข็งของโฟมชีวภาพจะทำการเปรียบเทียบกับโฟมที่ใช้กันทั่วไปตามท้องตลาด (PSP foam) โดยภาพที่ 4.33 และภาคผนวก ก.25 แสดงค่าความแข็งของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

เมื่อพิจารณาความแข็งของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีสารเชื่อมขวางปริมาณต่างๆ พบว่าค่าความแข็งของ PSP foam มีค่าต่ำกว่าโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางและไม่เติมสารเชื่อมขวาง เนื่องจาก PSP foam เป็นสารประกอบที่ไม่มีขั้วมีแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลเป็นแรงลอนดอนซึ่งเป็นแรงอ่อนๆ ในขณะที่โฟมชีวภาพสูตร G-P51 และ G9S1-P51 มีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ผ่านหมู่ Thiol (-SH) ในกลูเตนและโฟมชีวภาพสูตร G-P51 และ G9S1-P51 ที่มีการเติมสารเชื่อมขวาง จะมีการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่ผ่านหมู่ Thiol (-SH) ของกลูเตนและการเชื่อมขวางของบอแรกซ์ระหว่างสายโซ่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงโฟมชีวภาพที่ใช้สารเชื่อมขวางมีค่าความแข็ง

มากกว่าโฟมชีวภาพที่ไม่ใช้สารเชื่อมขวาง โดยผลการทดสอบค่าความแข็งนี้สอดคล้องกับภาพ SEM ของโฟมชีวภาพที่ใช้และไม่ใช้สารเชื่อมขวางซึ่งแสดงดังภาพที่ 2.6 พบว่าบริเวณพื้นผิวชั้นงานของโฟมชีวภาพมีความหนามากกว่าโฟมชีวภาพที่ไม่ได้ใช้สารเชื่อมขวาง ดังนั้นโฟมชีวภาพที่ใช้สารเชื่อมขวาง จึงมีความแข็งบริเวณพื้นผิวที่มากกว่าโฟมชีวภาพที่ไม่ใช้สารเชื่อมขวาง

เมื่อเปรียบเทียบความแข็งของโฟมชีวภาพสูตร G-P51 และ G9S1-P51 ที่มีการเติมบอแรกซ์ พบว่าโฟมสูตร G9S1-P51 มีค่าความแข็งสูงกว่าโฟมชีวภาพสูตร G-P51 โดยพิจารณาที่การเติม ปริมาณสารเชื่อมขวางที่เท่ากัน เนื่องจากในโฟมชีวภาพสูตรที่มีแป้งสาลี (G9S1-P51) แป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์สามารถเกิดการเชื่อมขวางบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลซึ่งมีเป็นจำนวนมาก จึงทำให้การเชื่อมขวางเกิดขึ้นได้มากกว่าโฟมชีวภาพที่มีกลูเตนเพียงอย่างเดียว (G-P51) และเมื่อเพิ่มปริมาณ สารเชื่อมขวางที่เติมลงไป โฟมชีวภาพ พบว่าค่าความแข็งของโฟมสูงขึ้น



ภาพที่ 4.33 ความแข็งของ Polystyrene Paper Foam (PSP foam) และผลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อโฟมชีวภาพ

4.4.6 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อสีของโฟมชีวภาพ

บรรจุภัณฑ์อาหารที่ใช้กันทั่วไปคือ PSP foam ซึ่งสีที่ปรากฏนั้นคือสีขาว ดังนั้นผู้บริโภคจึงคุ้นเคยกับภาพลักษณะของโฟมบรรจุภัณฑ์อาหารที่เป็นสีขาว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการตรวจวัดค่าสีของโฟมชีวภาพ เพื่อให้ทราบว่าสีของโฟมชีวภาพ แตกต่างหรือใกล้เคียงกับ PSP foam อย่างไร ซึ่งค่าสีที่วัดจะใช้ระบบ CIE Laboratory system เป็นระบบสีแบบ 3 มิติ (L^* , a^* และ b^*) ค่า L^* บ่งบอกถึงความสว่างและความมืดของโฟม โดยค่า $L^*=0$ จะแสดงค่าความมืดที่สุด และ $L^*=100$ จะแสดงค่าความสว่างที่สุด ค่า a^* บ่งบอกถึงเฉดสีจากสีเขียวไปจนถึงสีแดง โดย $(-a^*)$ แสดงถึงเฉดสีจากสีเขียวและ $(+a^*)$ แสดงถึงเฉดสีจากสีแดง และค่า b^* บ่งบอกถึงเฉดสีจากสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง โดย $(-b^*)$ แสดงถึงเฉดสีจากสีน้ำเงินและ $(+b^*)$ แสดงถึงเฉดสีจากสีเหลือง นอกจากนี้ยังได้คำนวณค่าความแตกต่างรวมของสี (Total color difference, ΔE) โดยเปรียบเทียบกับของ PSP foam โดยค่า L^* , a^* , b^* และ ΔE ของโฟมชีวภาพในสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.21 และนำค่า L^* , a^* , b^* มาคำนวณเพื่อพิจารณาเฉดสีของโฟมด้วยระบบ LCh โดยค่า L^* บ่งบอกถึงความสว่างและความมืดของโฟม $L^*=0$ จะแสดงค่าความมืดที่สุด และ $L^*=100$ ค่า C^* บ่งบอกถึงความเข้มของสี (chroma) โดยค่า C^* มีค่ามากแสดงถึงสีมีความเข้มมาก และค่า h^* ย่อมาจาก hue angle คือค่าที่บอกสีสีนั้น โดยกำหนดเป็นตัวเลขแสดงมุมของวงกลมซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0-359 องศา ซึ่งแสดงตำแหน่งของสีสีนั้นที่อยู่ล้อมรอบแกนกลาง ค่า $h^*=0$ แสดงถึงเฉดสีแดง, $h^*=90$ แสดงถึงเฉดสีเหลือง, $h^*=180$ แสดงถึงเฉดสีเขียว และ $h^*=270$ แสดงถึงเฉดสีน้ำเงิน โดยแผนภาพวงกลมและค่ามุมที่สอดคล้องกับสีสีต่างๆ ถูกแสดงดังภาพที่ 3.6 และค่า L^* , C^* และ h^* ของโฟมชีวภาพในสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.8 ค่าสี (L*, a*, b* และ ΔE) ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณเชื่อมขวางต่างๆ

สูตรโฟม	การวัดสีระบบCIE Lab				การวัดสีระบบCIE LCh		
	L*	a*	b*	ΔE	L*	C*	h*
PSP foam	83.81±0.17 ^a	-0.21±0.67 ^{abc}	0.43±0.24 ^a	-	83.81±0.17 ^a	0.72±0.36 ^a	101.59±46.72 ^{a-e}
G-P51	63.36±0.97 ^d	7.56±0.95 ^d	31.53±1.61 ^b	38.05±1.77 ^a	63.36±0.97 ^d	32.43±1.78 ^b	76.55±0.99 ^a
G-P51-C6	77.09±0.48 ^{bc}	-0.62±0.10 ^c	20.27±0.81 ^e	20.90±0.81 ^d	77.09±0.48 ^{bc}	20.28±0.80 ^e	91.76±0.35 ^c
G-P51-C8	77.09±0.48 ^{bc}	-0.41±0.27 ^{bc}	23.31±1.03 ^d	23.86±1.06 ^c	77.09±0.48 ^{bc}	23.32±1.03 ^d	91.02±0.70 ^{cd}
G-P51-C10	76.11±0.46 ^c	0.65±0.13 ^a	22.25±0.42 ^d	23.17±0.44 ^c	76.11±0.46 ^c	22.26±0.42 ^d	88.32±0.34 ^e
G9S1-P51	63.61±0.89 ^e	9.81±0.67 ^e	35.18±0.71 ^c	41.44±0.99 ^b	63.61±0.89 ^e	36.52±0.80 ^c	74.43±0.87 ^b
G9S1-P51-C6	76.79±0.59 ^c	-0.15±0.14 ^{abc}	22.28±0.72 ^d	22.96±0.84 ^c	76.79±0.59 ^c	22.28±0.72 ^d	90.40±0.38 ^d
G9S1-P51-C8	78.19±0.74 ^b	-0.71±0.27 ^c	20.29±0.50 ^e	20.68±0.71 ^d	78.19±0.74 ^b	20.31±0.00 ^e	92.02±0.00 ^c
G9S1-P51-C10	78.23±0.45 ^b	0.47±0.07 ^{ab}	19.95±0.47 ^e	20.33±0.56 ^d	78.23±0.45 ^b	19.95±0.47 ^e	88.64±0.19 ^e

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

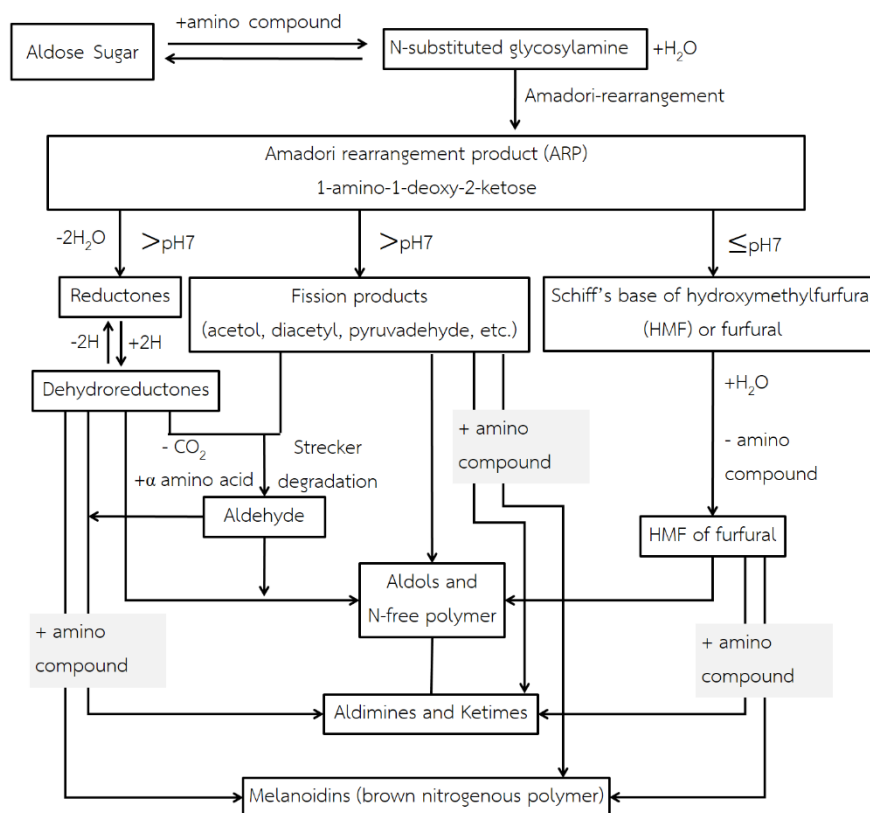
เมื่อพิจารณาค่าสีของ PSP foam ในระบบ Lab พบว่าค่า L^* เท่ากับ 83.53 แสดงให้เห็น PSP foam มีความสว่างมาก ค่า a^* เท่ากับ -0.21 แสดงให้เห็น PSP foam มีสีอยู่ระหว่างกึ่งกลางสีเขียวและแดง และค่า b^* เท่ากับ 0.43 แสดงให้เห็น PSP foam มีสีอยู่ระหว่างกึ่งกลางสีน้ำเงินและเหลือง ค่าโดยจะเห็นว่าค่า L^* คือค่าความสว่างของ PSP foam มีค่ามาก และค่า a^* และ b^* เข้าใกล้ 0 และจากการวัดค่าสีด้วยระบบ LCh พบว่า ค่า C^* เท่ากับ 0.72 ซึ่งมีค่าต่ำมากและประกอบกับมีค่า L^* สูง แสดงให้เห็นถึงสีโดยรวมของ PSP foam มีสีขาว เมื่อพิจารณาโฟมชีวภาพที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางเมื่อเปรียบเทียบกับ PSP foam กับโฟมชีวภาพที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางสูตร G-P51 และ G9S1-P51 พบว่า ค่า L^* มีค่าประมาณ 63 แสดงให้เห็นถึงโฟมชีวภาพมีความสว่างน้อยกว่า PSP foam ค่า a^* มีค่าประมาณ 7.5 และ 9.8 แสดงให้เห็นถึงโฟมชีวภาพมีเฉดสีแดง ค่า b^* มีค่าประมาณ 31 และ 35 ค่า ΔE มีค่าประมาณ 38 และ 41 แสดงให้เห็นถึงโฟมชีวภาพมีเฉดสีที่แตกต่างจาก PSP foam มาก โดยจากการวัดสีด้วยระบบ Lch ซึ่งมีค่า h^* เท่ากับ 74 และ 76 องศา และมีค่า C^* เท่ากับ 32 และ 36 ซึ่งแสดงถึงเฉดสีโดยรวมเป็นสีน้ำตาลเหลืองเข้ม เนื่องจากในกรณีของโฟมชีวภาพสูตร G มีพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นกลูเตนจากแป้งสาลีเพียงอย่างเดียว ซึ่งกลูเตนโดยธรรมชาติแล้วจะมีสีน้ำตาลอมเหลืองเนื่องจากมีเม็ดสีบางชนิดปนอยู่ในกลูเตน เมื่อกลูเตนได้รับความร้อนในขณะขึ้นรูปเม็ดสีเหล่านี้จะมีสีที่เข้มขึ้น ซึ่งสีของโฟมชีวภาพที่ได้จึงเป็นสีแดงอมเหลือง โดยงานวิจัยของ M. Gallstedt และคณะ [58] ได้ศึกษาฟิล์มจากกลูเตนจากแป้งสาลีที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการ compression molding ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวว่าคุณสมบัติมีผลต่อเม็ดสีในกลูเตนจากแป้งสาลี เนื่องจากสีของกลูเตนที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ในงานวิจัยของ V. Micard และคณะ [59] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกายภาพและเคมีของฟิล์มกลูเตนเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ โดยเตรียมฟิล์มด้วยวิธีการ cast solution หลังจากนั้นนำแผ่นฟิล์มมาประกบด้วยแผ่นเหล็ก ที่ให้อุณหภูมิ 40-140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีในแต่ละอุณหภูมิ พบว่าแผ่นฟิล์มที่ถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงขึ้น ค่า L^* มีค่าลดลงซึ่งแสดงถึงแผ่นฟิล์มมีความสว่างที่ลดลง, ค่า a^* มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งแสดงถึงแผ่นฟิล์มมีเฉดสีที่เป็นสีแดงมากขึ้น และค่า b^* มีค่าเพิ่มขึ้นแสดงถึงแผ่นฟิล์มมีเฉดสีที่เป็นเหลืองมากขึ้น

ในกรณีของโฟมชีวภาพสูตร G9S1 การที่โฟมสูตรนี้มีสีไปทางเฉดน้ำตาลเหลืองเข้มนั้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของเม็ดสีที่อยู่ในกลูเตนเมื่อได้รับความร้อน และอีกสาเหตุคือการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ในโฟมชีวภาพ ปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล (Browning reaction) ชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ (Non-enzymatic browning reaction) ซึ่งเกิดขึ้นจากการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่คาร์บอนิลของน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar)

ทั้งชนิดที่เป็นน้ำตาล Aldose (เช่นกลูโคส) และชนิดที่เป็นน้ำตาล ketose (เช่น ฟรุคโตส) กับ หมูอะมิโน (RNH_2) ในกรดอะมิโน เปปไทด์หรือโปรตีน โดยมีความร้อนในการเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยา Maillard นั้นจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่ไม่ละลายน้ำและเป็นสารที่มีสีน้ำตาลที่เรียกว่าเมลานอยดิน (Melanoidins) [60] ซึ่งภาพที่ 4.34 แสดงแผนภาพการเกิดสาร Melanoidins จากปฏิกิริยา Maillard ที่สภาวะความเป็นกรดต่างๆ

ในโพลีสตอร์ G9S1 มีองค์ประกอบของพอลิเมอร์เมทริกซ์คือกลูเตนและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ ซึ่งในขั้นตอนในการเตรียมแป้งเจลาติไนซ์โดยใช้ในกระบวนการ twin screw extrusion ภายใต้การให้ความร้อนและแรงเฉือน อะไมโลสและอะไมโลเพกตินที่เป็นองค์ประกอบในแป้งมีน้ำหนักโมเลกุลลดลง เนื่องจากสายโซ่บางส่วนถูกตัดให้สั้นลง [61] และพบว่ามีย่านน้ำตาลโมเลกุลคู่และโมเลกุลเดี่ยว เช่น dextrin และกลูโคสเกิดขึ้นในขั้นตอนการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ในเครื่อง twin screw extrusion [62] ดังนั้นกลูโคสที่อยู่ในแป้งสาลีเจลาติไนซ์สามารถเกิดปฏิกิริยา Maillard กับกลูเตนซึ่งเป็นโปรตีนในระหว่างการขึ้นรูปเกิดเป็นสาร Melanoidins ที่เป็นสีน้ำตาลขึ้น จึงส่งผลให้โพลีสตอร์ G9S1 เมื่อขึ้นรูปแล้วมีเฉดสีไปทางสีแดงอมเหลืองมากขึ้น

เมื่อพิจารณาโพลีสตอร์ทั้งสูตร G และ G9S1 ที่มีการเติมสารเชื่อมขวางลงไปโพลีสตอร์ พบว่าค่า L^* , a^* , b^* และ ΔE เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับโพลีสตอร์ในสูตรเดียวกันที่ไม่มีการเติมบอแรกซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.21 กล่าวคือโพลีสตอร์ที่เติมสารเชื่อมขวาง มีค่า L^* เพิ่มขึ้น แสดงถึงโพลีสตอร์มีความสว่างมากขึ้น ค่า a^* ลดลง แสดงให้เห็นว่าโพลีสตอร์มีเฉดสีไปทางสีเขียวเล็กน้อย ค่า b^* ลดลง แสดงให้เห็นว่าโพลีสตอร์มีเฉดสีเหลืองที่อ่อนลง ค่า ΔE มีค่าลดลง และค่า h^* จากการวัดสีด้วยระบบ Lch มีค่าเท่ากับ 88-91 องศา และค่า C^* เท่ากับ 19-23 ซึ่งแสดงถึงเฉดสีโดยรวมเป็นสีเหลืองอ่อน เมื่อเทียบกับโพลีสตอร์ที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางซึ่งจะมีน้ำตาลเหลืองเข้มและเมื่อพิจารณาปริมาณสารเชื่อมขวางที่เติมลงไปจาก 6% ไปจนถึง 10% ในโพลีสตอร์ พบว่าการเติมบอแรกซ์เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า L^* , a^* , b^* , ΔE , C^* และ h^* มากนัก ดังแสดงในตารางที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของสารเชื่อมขวางที่เติมลงไปโพลีสตอร์ในช่วง 6-10% ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมของโพลีสตอร์มากนัก



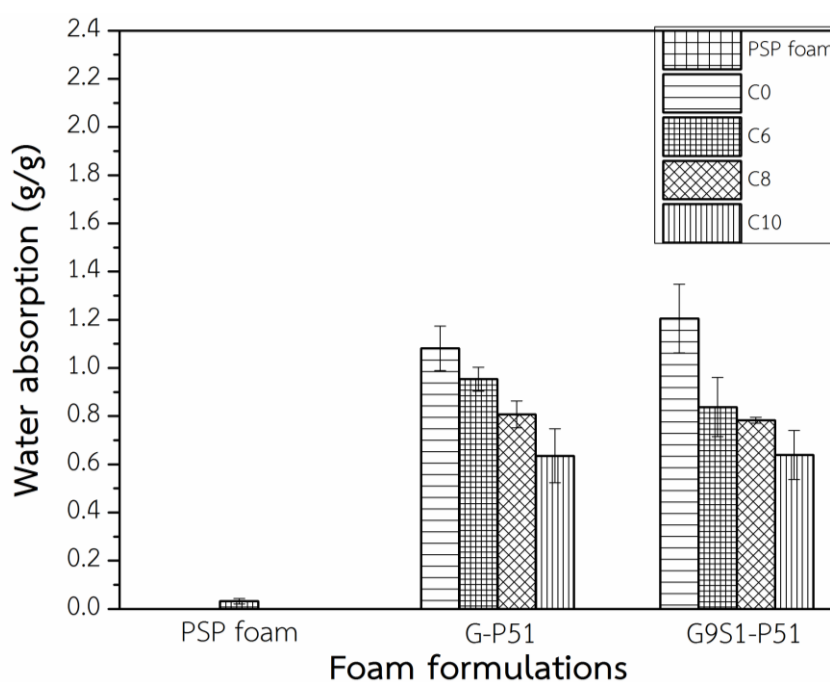
ภาพที่ 4.34 การเกิดสาร Melanoidins จากปฏิกิริยา Maillard ที่สภาวะความเป็นกรดต่างๆ [63]

4.5.7 อิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีผลต่อสมบัติการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพ

การดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพนั้นเป็นสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งที่ควรพิจารณาในการนำไปใช้งานสำหรับเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากส่วนประกอบหนึ่งที่มีอยู่ในอาหารเกือบทุกประเภทนั้นคือ น้ำ และหากบรรจุภัณฑ์ดูดซึมน้ำในอาหารมากเกินไปอาจทำให้บรรจุภัณฑ์เสียรูปและไม่สามารถใส่อาหารได้ ดังนั้นสมบัติการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ควรพิจารณาเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้เหมาะสม การดูดซึมน้ำของโฟมทำโดยนำชิ้นงานโฟมแช่น้ำเป็นเวลา 60 วินาที และทำการชั่งน้ำหนักของโฟมก่อนและหลังแช่น้ำ โดยภาพที่ 4.35 และภาคผนวก ก.26 แสดงการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพสูตรต่างๆ

จากผลการทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพ โดยเปรียบเทียบกับ PSP foam ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.35 และภาคผนวก ก.26 พบว่า PSP foam มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำมากเนื่องจากเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์เป็นพอลิสไตรีนซึ่งในโครงสร้างมีสายโซ่หลักประกอบไปด้วยคาร์บอนอะตอม

และไฮดรเจนอะตอม ดังนั้น PSP foam จึงเป็นสารที่ไม่มีขั้ว ประกอบกับโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของ PSP foam นั้นเป็นเซลล์โฟมแบบปิด จึงทำให้ PSP foam มีความสามารถในการดูดซึมน้ำน้อยมาก ในขณะที่โฟมชีวภาพนั้นเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์ประกอบด้วยกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาติไนซ์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ เนื่องจากในโครงสร้างมีหมู่ที่มีขั้วเป็นจำนวนมาก เช่นหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโน โฟมชีวภาพทั้งที่เติมสารเชื่อมขวางและไม่เติมสารเชื่อมขวางมีลักษณะเซลล์โฟมแบบเปิดจึงส่งผลให้โฟมชีวภาพน้ำสามารถดูดซึมน้ำได้ดี

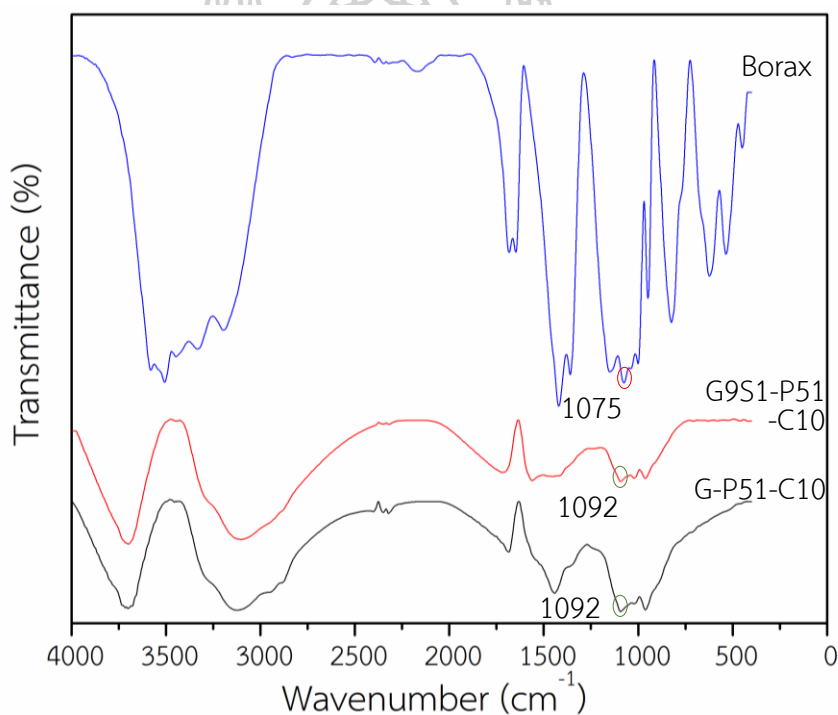


ภาพที่ 4.35 ค่าการดูดซึมน้ำของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณเชื่อมขวางต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบโฟมชีวภาพที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางและเติมปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ พบว่าโฟมชีวภาพที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางมีค่าการดูดซึมน้ำสูงกว่าโฟมชีวภาพที่เติมสารเชื่อมขวาง เนื่องจากการเติมสารเชื่อมขวาง (บอแรกซ์) นั้นเมื่ออยู่ในรูปของสารละลายในพลาสติกไซเซออร์จะอยู่ในรูปของ $B(OH)_4^-$ จะทำปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ทำให้จำนวนหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโนอิสระที่ชอบน้ำของพอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง ส่งผลให้ความมีขั้วในโฟมชีวภาพน้อยลง ดังนั้นโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารเชื่อมขวางจึงมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางในโฟมชีวภาพ ค่าการดูดซึมน้ำลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางนั้น จะทำให้เกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เมทริกซ์มากขึ้น

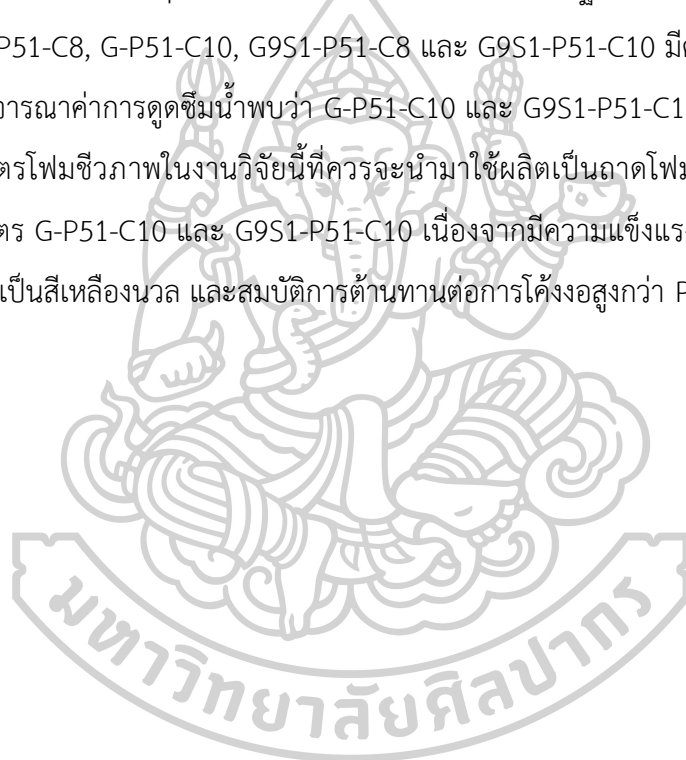
ซึ่งการเชื่อมขวางจะเกิดบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ ส่งผลให้หมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโนอิสระในสายโซ่พอลิเมอร์เมทริกซ์ลดลง ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่อะมิโนนี้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับน้ำได้ดี โดยการลดลงของหมู่ที่มีขั้วเหล่านี้ เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางกับบอแรกซ์ ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางจาก 6, 8 และ 10% ตามลำดับ

เมื่อนำน้ำจากการแช่โพลีเมอร์ G-P51-C10 และ G9S1-P51-C10 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปตรวจสอบเพื่อหาบอแรกซ์ที่ละลายออกมาจากชิ้นงานด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งแสดงดังภาพที่ 4.36 พบว่าน้ำจากการแช่โพลีเมอร์ทั้งสองสูตรจะพบพีคที่เลขคลื่น $1,092\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเลขคลื่นของบอแรกซ์ที่ละลายออกมาจากโพลีเมอร์



ภาพที่ 4.36 FTIR สเปกตรัมของบอแรกซ์ (Borax) และน้ำจากการแช่โพลีเมอร์ที่มีการเติมสารเชื่อมขวางในปริมาณ 10% (G-P51-C10 และ G9S1-P51-C10)

จากผลการศึกษาโฟมชีวภาพที่ใช้ปริมาณสารเชื่อมขวางที่เหมาะสมต่อการผลิตเป็น โฟมชีวภาพ โดยพิจารณาจากสัณฐานวิทยา สี ค่าการดูดซึมน้ำ ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ (Flexural modulus และ Flexural strength) ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% และค่าความแข็งของโฟมชีวภาพ พบว่าค่าความแข็งของโฟมชีวภาพที่เติมสารเชื่อมขวางทุกสูตร มีค่ามากกว่า PSP foam จากนั้นจะพิจารณาต่อที่ค่า Flexural modulus และ Flexural strength พบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของโฟมชีวภาพสูตร G-P51-C8, G-P51-C10, G9S1-P51-C8 และ G9S1-P51-C10 มีค่ามากกว่า PSP foam ดังนั้นจึงเลือกสูตรโฟมชีวภาพเหล่านี้มาพิจารณาสมบัติอื่นๆ ต่อไป โดยเมื่อพิจารณาจากภาพสัณฐานวิทยา, ค่าความหนาแน่นและค่าสีพบว่า G-P51-C8, G-P51-C10, G9S1-P51-C8 และ G9S1-P51-C10 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จากนั้นเมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำพบว่า G-P51-C10 และ G9S1-P51-C10 มีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำที่สุด ดังนั้นสูตรโฟมชีวภาพในงานวิจัยนี้ที่ควรจะนำมาใช้ผลิตเป็นถาดโฟมบรรจุภัณฑ์อาหาร คือ โฟมชีวภาพสูตร G-P51-C10 และ G9S1-P51-C10 เนื่องจากมีความแข็งแรงมาก ค่าความดูดซึมน้ำต่ำ สีที่ปรากฏเป็นสีเหลืองนวล และสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอสูงกว่า PSP foam



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารฟู อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลี และแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ อัตราส่วนของพลาสติกไซเซอร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอล และปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อสัญญาณวิทยา ความหนาแน่น สมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอ ความแข็ง สี และการดูดซึมน้ำของโพนชีวภาพที่เตรียมจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ โดยผลจากการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 จากการศึกษาการเตรียมแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ โดยใช้พลาสติกไซเซอร์ได้แก่ น้ำและกลีเซอรอลที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่าแป้งที่ถูกเจลาตินไนซ์มีความเป็นผลึกลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดิบที่ไม่ผ่านการทำเจลาตินไนซ์ นอกจากนี้ยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอลที่ใช้ในการเจลาตินไนซ์แป้งสาลีดิบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นผลึกและร้อยละความเป็นผลึกของแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อกลีเซอรอล ที่มีปริมาณกลีเซอรอลน้อยที่สุดคือแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์สูตร S 30:30 เนื่องจากกลีเซอรอลมีสมบัติที่ดูดความชื้นจากอากาศได้ดี เมื่อนำแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์มาผสมกับกลูเตนเพื่อทำการขึ้นรูปเป็นโพนทำให้มีสมบัติการดูดความชื้นสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติการต้านทานต่อการโค้งงอที่ต่ำลง

5.1.2 จากการศึกษาอิทธิพลของสารฟู พบว่าเมื่อใช้ปริมาณสารฟูเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เซลล์โพนเฉลี่ยมีขนาดเล็ก ความหนาแน่นของโพนต่ำ เนื่องจากไซโตเคมีไฮโดรเจนคาร์บอนเนตทำหน้าที่เป็นสารฟู และสารก่อกำเนิดฟอง โดยค่า Flexural modulus และ Flexural strength ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของโพนชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน

5.1.3 จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ ส่งผลให้เซลล์โพนเฉลี่ยมีขนาดใหญ่ ผนังเซลล์โพนบาง ความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากสมบัติ viscoelastic ของกลูเตนทำให้ dough สามารถกักเก็บแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากการสลายตัวของสารฟู นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ เนื่องจาก

กลูเตนสามารถเกิดการเชื่อมขวางของหมู่ Thiol (-SH) ระหว่างสายโซ่ของกลูเตนินและไกลอะดิน เกิดเป็นพันธะ disulfide (-S-S-) ระหว่างสายโซ่กลูเตนินและไกลอะดิน

5.1.4 จากการศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล (มีปริมาณน้ำสูง) ทำให้โฟมชีวภาพมีขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นลดลง เนื่องจากฟองแก๊สไอน้ำปริมาณมากเกิดการขยายตัวในโฟมและความดันในฟองแก๊สดันผนังเซลล์ที่อยู่ระหว่างฟองแก๊สให้ทะลุถึงกันได้มากขึ้น จึงทำให้เซลล์โฟมใหญ่ขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อลดอัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอล (ปริมาณกลีเซอรอลสูง) เนื่องจากปริมาณกลีเซอรอลที่น้อยลงจะไปลดแรงระหว่างโมเลกุล (พันธะไฮโดรเจน) ระหว่างสายโซ่กลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ได้น้อยลง โฟมชีวภาพจึงมีความแข็งแรงขึ้น

5.1.5 จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเชื่อมขวางที่มีต่อโฟมชีวภาพ พบว่าโฟมชีวภาพที่เติมสารเชื่อมขวาง ส่งผลให้ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยเล็กลง และความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการเชื่อมขวางของบอเรตไอออน (เกิดจากบอแรกซ์ละลายในพลาสติกไซเซออร์) ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรงขึ้น ทำให้ฟองแก๊สขยายตัวได้น้อยจึงทำให้เซลล์โฟมมีขนาดเล็ก นอกจากนี้พบว่าค่า Flexural modulus และ Flexural strength ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งแรงมีค่าเพิ่มขึ้น และการดูดซึมน้ำมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวาง สำหรับการวัดสีของโฟมชีวภาพนั้น พบว่าโฟมชีวภาพที่เกิดการเชื่อมขวางมีสีเฉดสีเหลืองอ่อน ในขณะที่โฟมชีวภาพที่ไม่เติมสารเชื่อมขวางจะมีเฉดสีน้ำตาลเหลืองเข้ม เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมชีวภาพที่เกิดการเชื่อมขวาง อาจเนื่องมาจากสารเชื่อมขวางไปขัดขวางการปฏิกิริยา Maillard ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ทำให้ได้สารผลิตภัณฑ์ที่มีสีน้ำตาล

5.1.6 โฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและแป้งสาลี ในงานวิจัยนี้ที่เหมาะสมสำหรับการนำไปผลิตบรรจุภัณฑ์อาหาร เช่น ถาดโฟม คือ โฟมชีวภาพสูตร G9S1-P51-C10 และ G9S1-P51-C10 เนื่องจากมีค่า Flexural properties ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50% และ 75% สูงกว่า PSP foam อีกทั้งมีค่า Hardness สูงกว่า PSP foam อย่างไรก็ตาม โฟมชีวภาพที่ถูกขึ้นมานี้มีความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า PSP foam

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ทำการผลิตโฟมชีวภาพจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างกลูเตนและแป้งสาลีสำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารพบว่า

5.2.1 โฟมชีวภาพที่เตรียมได้มี ขนาดเซลล์ใหญ่ และการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ผนังเซลล์โฟมหนา ส่งผลให้มีความหนาแน่นสูง เนื่องจากการใช้ไซโตเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนตเป็นสารฟูซึ่งที่อุณหภูมิการสลายตัวในช่วงกว้าง ดังนั้นควรใช้สารฟูชนิดอื่นที่มีการสลายตัวในช่วงแคบ

5.2.2 โฟมชีวภาพที่เตรียมได้มีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่า PSP foam มาก เนื่องจากเนื้อพอลิเมอร์เมทริกซ์มีสมบัติที่ดูดซึมน้ำ ดังนั้นอาจต้องมีการผสมสารชนิดอื่นที่มีความเป็นขี้ด่ำ เช่น น้ำมันหรือ wax เพื่อปรับปรุงสมบัติการต้านทานต่อการดูดซึมน้ำของโฟมชีวภาพนี้ให้สูงขึ้น



รายการอ้างอิง

- [1] แนวหน้า. โฟม ความตายได้ความอร่อย ระวังภัยเจ็บชุกมากกับกล่องข้าว. เข้าถึงเมื่อ 7 กรกฎาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.naewna.com/scoop/142849,%2020.07.2015>
- [2] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนานนท์. **Dough**. เข้าถึงเมื่อ 20 กรกฎาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0292/dough-%E0%B9%82%E0%B8%94>
- [3] กล้าณรงค์ ศรีรอดม และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.
- [4] Kerr, R.W. **Chemistry and Industry of Starch**. 2nd ed. New York: Academic Press, 1950.
- [5] Oates, C.G. "Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis." **Trends in Food Science & Technology**, 1997, 8 (11), 375-382.
- [6] French, D. **Organization of Starch Granules**. 2nd ed. Florida: Academic Press Inc., 1984.
- [7] Aderibigbe, F.A. and Adejumo L.A. "Effect of different hydrolysis methods on starch degradation." **African Journal of Biotechnology**, 2014, 14 (3), 264-271.
- [8] Ball, S., Guan H.P., James M., Myers A., Keeling P, Mouille G., Buléon A., Colonna P. and Preiss J. "From Glycogen to Amylopectin: A Model for the Biogenesis of the Plant Starch Granule." **Cell**, 1996, 86 (3), 349-352.
- [9] Tester, R.F., Karkalas J. and Qi X. "Starch-composition fine structure and architecture." **Journal of Cereal Science**, 2004, 39, 151-165.
- [10] Bogracheva, T. Ya. and Ring S. G. and Hedley C. L. Morris V. J. "The granular structure of C-type pea starch and its role in gelatinization." **Biopolymer**, 1998, 45 (4), 323-332.
- [11] Oates, C.G. " Physical Modification of Starch." In Advanced Post Academic Course on Tapioca Starch Technology, Jan. 22-26 & Feb. 19-23 ,1996. AIT Center ,Bangkok.
- [12] Cagnato, C. **Starch Grain Analysis**. เข้าถึงเมื่อ 2 August 2016. เข้าถึงได้จาก <http://archaeobotany.dept.shef.ac.uk/wiki/index.php/Image:PotatoKI.jpg>

- [13] Seoyoung. **The Science of Rice Starches and Korean Rice Cake**. เข้าถึงเมื่อ 2 August 2016. เข้าถึงได้จาก <http://ireport.cnn.com/docs/DOC-810642>
- [14] Radley, J. A. **Starch and Its Derivatives**. London: Chapman and Hall Ltd., 1941.
- [15] ดุษฎี อุตภาพ และ นื่องนุช เจริญกุล. เทคโนโลยีของคาร์โบไฮเดรต. เข้าถึงเมื่อ 20 กรกฎาคม 2558. เข้าถึงได้จาก http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_5.html
- [16] Fruton, J.S. and Simmonds S. **General Biochemistry**. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1958.
- [17] Swinkels, J.J.M. "Composition and properties of commercial native starches." **starch/starke**, 1985, 37 (1), 1-5.
- [18] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. **Wheat flour**. เข้าถึงเมื่อ 20 กรกฎาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1378/wheat-flour-%E0%B9%81%E0%B8%9B%E0%B9%89%E0%B8%87%E0%B8%AA%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B8%B5>
- [19] Kitts, D. **Wheat Protein**. Accessed July 20, 2015. Available from <http://www.landfood.ubc.ca/courses/fnh/301/protein/protq4.htm>
- [20] Krull, L.H. and Inglett G.E. **Industrial Uses of Gluten**. New york: Marcel Dekker, 2001.
- [21] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. **Gluten**. เข้าถึงเมื่อ 20 กรกฎาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/0351/gluten-%E0%B8%81%E0%B8%A5%E0%B8%B9%E0%B9%80%E0%B8%95%E0%B8%99>
- [22] Thomas, H. **Proceedings of the World Congress on Vegetable Protein Utilization in Human Foods and Animal Feedstuffs**. 2nd ed. New york: Amer Oil Chemists Society, 1989.
- [23] Branden, C. and Tooze J. **Introduction to Protein Structure**. 2nd ed. New york: Garland Publishing, 1991.
- [24] Lagrain, B., Goderis B., Brijs K. and Delcour J. "Molecular Basis of Processing Wheat Gluten toward Biobased Materials." **Biomacromolecules**, 2010, 11 (3), 533–541.
- [25] Blaga, A. **Plastic foams**. Accessed July 20, 2015. Available from http://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd166_e.html

- [26] Pentrakoon, D. and Ellis D. **An introduction to Plastic foam**. Bangkok: Chulalongkorn University, 2005.
- [27] Saunders, J.H. "The Formation of Urethan Foams." **Rubber Chemistry and Technology**, 1960, 33 (5), 1293-1322.
- [28] glasswarechemical. ผงฟู (**sodium bicarbonate**). เข้าถึงเมื่อ 20 กรกฎาคม 2558. เข้าถึงได้จาก <http://glasswarechemical.com/chemicals/%E0%B8%9C%E0%B8%87%E0%B8%9F%E0%B8%B9-sodium-bicarbonate/>
- [29] เคมีภัณฑ์ CHEMIPAN.COM. **Borax** (บอแรกซ์). เข้าถึงเมื่อ 13 เมษายน 2560. เข้าถึงได้จาก <https://www.chemipan.com/home/index.php>
- [30] Thombarea, N., Jhab U., Mishrab S. and Siddiqui M.Z. "Borax cross-linked guar gum hydrogels as potential adsorbents for water purification." **Carbohydrate Polymers**, 2017, 168, 274–281.
- [31] Spoljaric, S., Salminen A., Luong D.L. and Seppälä J. "Stable, self-healing hydrogels from nanofibrillated cellulose, poly(vinyl alcohol) and borax via reversible crosslinking." **European Polymer Journal**, 2014, 56, 105-117.
- [32] Shewry, P.R., Halford N.G., Belton P.S. and Tatham A.S. "The structure and properties of gluten: an elastic protein from wheat grain." **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, 2002, 357, 133-142.
- [33] Crosby, G. **Explaining Gluten**. Accessed Available from <http://www.cookingscienceguy.com/pages/wp-content/uploads/2012/07/Explaining-Gluten.pdf>
- [34] Hartman, M., Svoboda K., Pohorelý M. and Šyct M. "Thermal Decomposition of Sodium Hydrogen Carbonate and Textural Features of Its Calcines." **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2013, 52 (31), 10619–10626.
- [35] Lagrain, B., Brijs K., Veraverbeke W.S. and Delcour J.A. "The impact of heating and cooling on the physico-chemical properties of wheat gluten–water suspensions." **Journal of Cereal Science**, 2005, 42, 327–333.
- [36] Singh, H. and MacRitchie F. "Changes in proteins induced by heating gluten dispersions at high temperature." **Journal of Cereal Science**, 2003, 39, 297–301.

- [37] Lagrain, B., Thewissen B.G., Brijs K. and Delcour J.A. "Mechanism of gliadin–glutenin cross-linking during hydrothermal treatment." **Food Chemistry**, 2007, 107, 753–760.
- [38] Quester, S., Dahesh M. and Strey R. "Microcellular foams made from gliadin." **Colloid Polym Science**, 2014, 292 (9), 2385-2389.
- [39] Thomas, O., Blomfeldt J., Kuktaite R., Johansson E. and Hedenqvist M.S. "Mechanical Properties and Network Structure of Wheat Gluten Foams." **Biomacromolecules**, 2011, 5 (12), 1707–1715.
- [40] Salgado, P.R., Schmidt V.C., Ortiz S.E.M, Mauri A.M and Laurindo J.B. "Biodegradable foams based on cassava starch, sunflower proteins and cellulose fibers obtained by a baking process." **Food Engineering**, 2007, 85, 435–443.
- [41] Das, K., Ray D., Bandyopadhyay N.R., Gupta A., Sengupta S., Sahoo S., Mohanty A. and Misra M. "Preparation and Characterization of Cross-Linked Starch/Poly(vinyl alcohol) Green Films with Low Moisture Absorption." **American Chemical Society**, 2010, 49, 2176–2185.
- [42] Angelova, L.A. "Gels from borate-crosslinked partially hydrolyzed poly(vinyl acetate): Characterization of physical properties and application in art conservation." Faculty of the Graduate School of Arts and Sciences of Georgetown University, 2013.
- [43] Tavakoli, J. "Physico-mechanical, morphological and biomedical properties of a novel natural wound dressing material." **Journal of the mechanical behavior of biomedical materials** 2016, 62, 373-385.
- [44] Abinader, G., Lacoste C., Baillif M.L., Erre D. and Copinet A. "Effect of the formulation of starch-based foam cushions on the morphology and mechanical properties." **Cellular Plastics**, 2015, 51 (1), 1–14.
- [45] Nazdar Ink Technologies. **Enter the L*a*b*oratory: Making Color Spatial**. Accessed November 24, 2017. Available from <https://www.nazdar.com/en-us/News-events/ArtMID/4165/ArticleID/224>

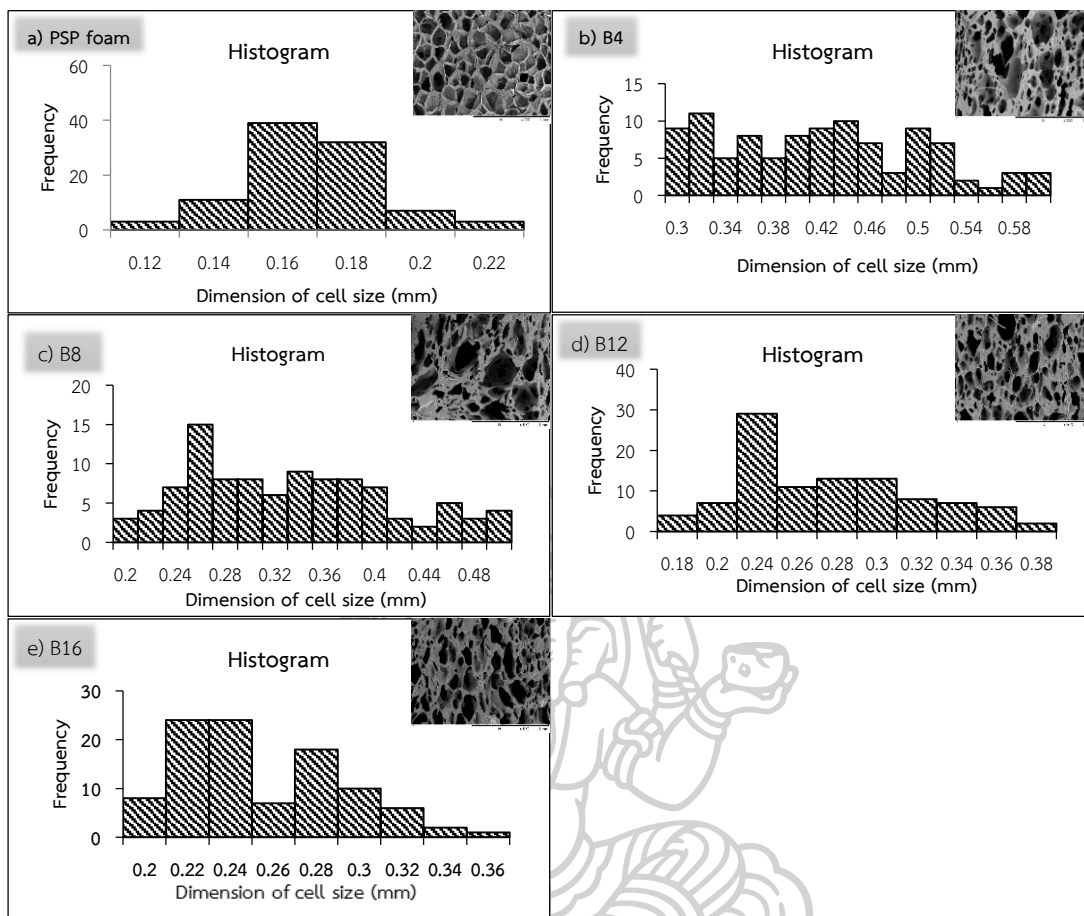
- [46] Portugal. **Best way to achieve a plot of polar coordinate points for CIE L*C*H* colour system** Accessed November 26, 2017. Available from <https://www.physicsforums.com/threads/best-way-to-achieve-a-plot-of-polar-coordinate-points-for-cie-l-c-h-colour-system.633314/>
- [47] Sessini, V., Arrieta M.P., Kenny J.M. and Peponi L. "Processing of edible films based on nanoreinforced gelatinized starch." **Polymer Degradation and Stability**, 2016, 132, 157-168.
- [48] Teixeira, E.M., Campos A., Marconcini J.M., Bondancia T.J., Wood D., Klamczynski A., Mattosoa L. H. C. and Glenn G. M. "Starch/fiber/poly(lactic acid) foam and compressed foam composites." **The Royal Society of Chemistry**, 2013, 4, 6616–6623.
- [49] Smith, R. **Biodegradable polymers for industrial applications**. New York: CRC Press, 2005.
- [50] Soest, J.J.G., Hulleman S.H.D., Wit D. and Vliegenthart J.F.G. "Crystallinity in starch bioplastics." **Industrial Crops and Products** 1996, 5, 11-22.
- [51] Majzoobi, M., Radi M., Farahnaky A., Jamalian J., Tongdang T. and Mesbahi Gh. "Physicochemical Properties of Pre-gelatinized Wheat Starch Produced by a Twin Drum Drier." **Journal of Agricultural Science and Technology**, 2011, 13, 193-202.
- [52] Najib, N.N., Ariff Z.M., Manan N.A., Bakar A.A. and Sipaut C.S. "Effect of Blowing Agent Concentration on Cell Morphology and Impact Properties of Natural Rubber Foam." **Journal of Physical Science**, 2009, 20 (1), 13–25.
- [53] Kaisangsri, N., Kerdchoechuen O., Laohakunjit N. and Matta F.B. "Cassava Starch-Based Biodegradable Foam Compositated with Plant Fibers and Proteins." **Journal of Composites and Biodegradable Polymers**, 2014, 2, 71-79.
- [54] Pan, Y., Wang X. and Yuan Q. "Thermal, Kinetic, and Mechanical Properties of Glycerol-Plasticized Wheat Gluten." **Journal of Applied Polymer Science**, 2011, 121, 797–804.
- [55] Zubeldía, F., Ansorena M.R. and Marcovich N.E. "Wheat gluten films obtained by compression molding." **Polymer Testing**, 2015, 43, 68-77.

- [56] Shogren, R. L., Lawton J. W., Doane W. M. and Tiefenbacher K. F. "Structure and morphology of baked starch foams." **Polymer** 1997, 39 (25), 6649–6655.
- [57] Xie, W., Zou C., Tang Z., Fu H., Zhu X., Kuanga J. and Denga Y. "Well-crystallized borax prepared from boronbearing tailings by sodium roasting and pressure leaching." **The Royal Society of Chemistry**, 2017, 7 (49), 31042–31048.
- [58] Gallstedt, M., Mattozzi A., Johansson E. and Hedenqvist M.S. "Transport and Tensile Properties of Compression-Molded Wheat Gluten Films." **Biomacromolecules**, 2004, 5, 2020-2028.
- [59] Micard, V., Belamri R., Morel M.H. and Guilbert S. "Properties of Chemically and Physically Treated Wheat Gluten Films." **journal of agricultural and food chemistry**, 2000, 48, 2948-2953.
- [60] Wang, H.Y., Qian H. and Yao W.R. "Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity." **Food Chemistry**, 2011, 128, 573–584.
- [61] Cai, W., Diosady L.L. and Rubin L.J. "Degradation of Wheat Starch in a twin-screw Extruder." **Journal of Food Engineering**, 1994, 26, 289-300.
- [62] Shahidi, F., Chi-Tang Ho and Chuyen N.Y. **Process-Induced Chemical Changes in Food**. New York: Plenum Press, 1998.
- [63] Martins, S., Jongen W. and Boekel M. "A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling." **Trends in Food Science & Technology**, 2001, 11 364–373.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก.1 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟู ปริมาณต่างๆ

ภาคผนวก ก.2 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้สารฟูในปริมาณต่างๆ

สูตรโฟม	ขนาดของเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)
PSP foam	0.16 ± 0.02^a
B4	0.41 ± 0.08^b
B8	0.32 ± 0.08^b
B12	0.26 ± 0.05^c
B16	0.25 ± 0.04^c

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ภาคผนวก ก.3 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการเติมสารฟูในปริมาณต่างๆ

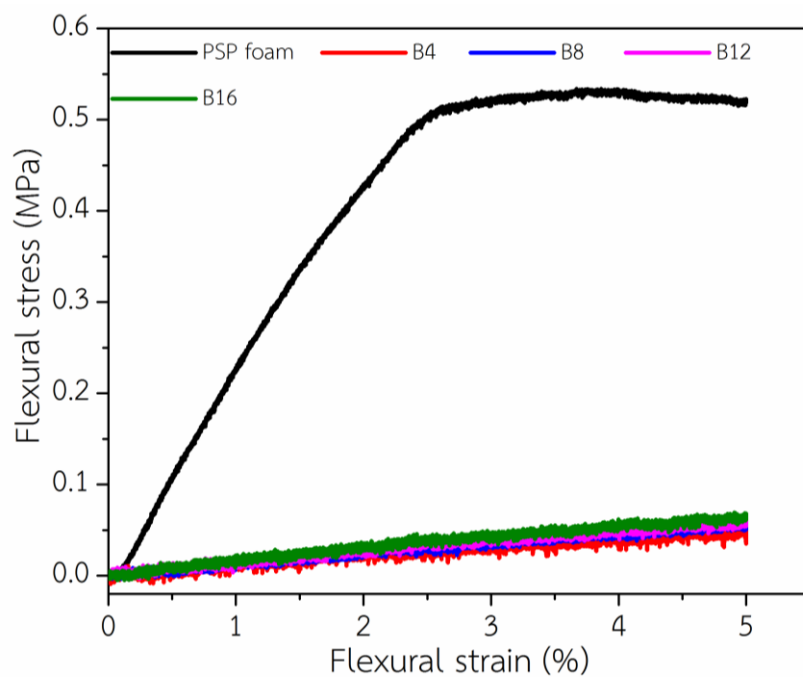
สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PSP foam	0.02±0.00 ^a
B4	0.54±0.02 ^b
B8	0.51±0.01 ^c
B12	0.48±0.01 ^d
B16	0.49±0.02 ^d

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

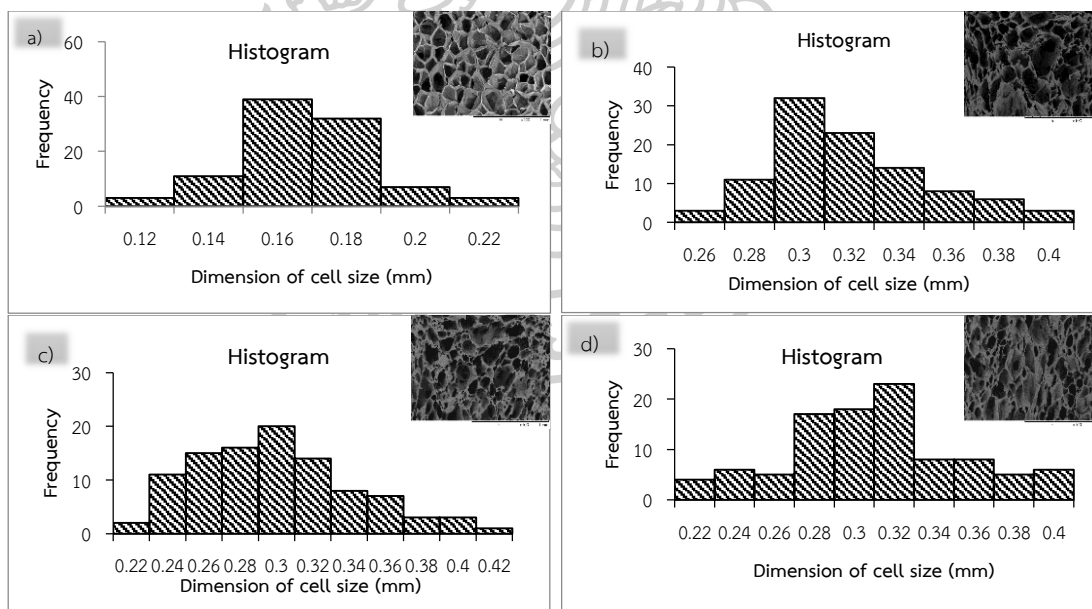
ภาคผนวก ก.4 ค่า Flexural modulus และ Flexural strength ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สารฟูปริมาณต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50%RH

สูตรโฟม	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)
PSP foam	18.43±2.10 ^a	0.53±0.02 ^a
B4	1.75±0.09 ^b	0.06±0.00 ^b
B8	1.50±0.09 ^b	0.06±0.00 ^b
B12	1.58±0.23 ^b	0.06±0.00 ^b
B16	1.78±0.19 ^b	0.07±0.01 ^b

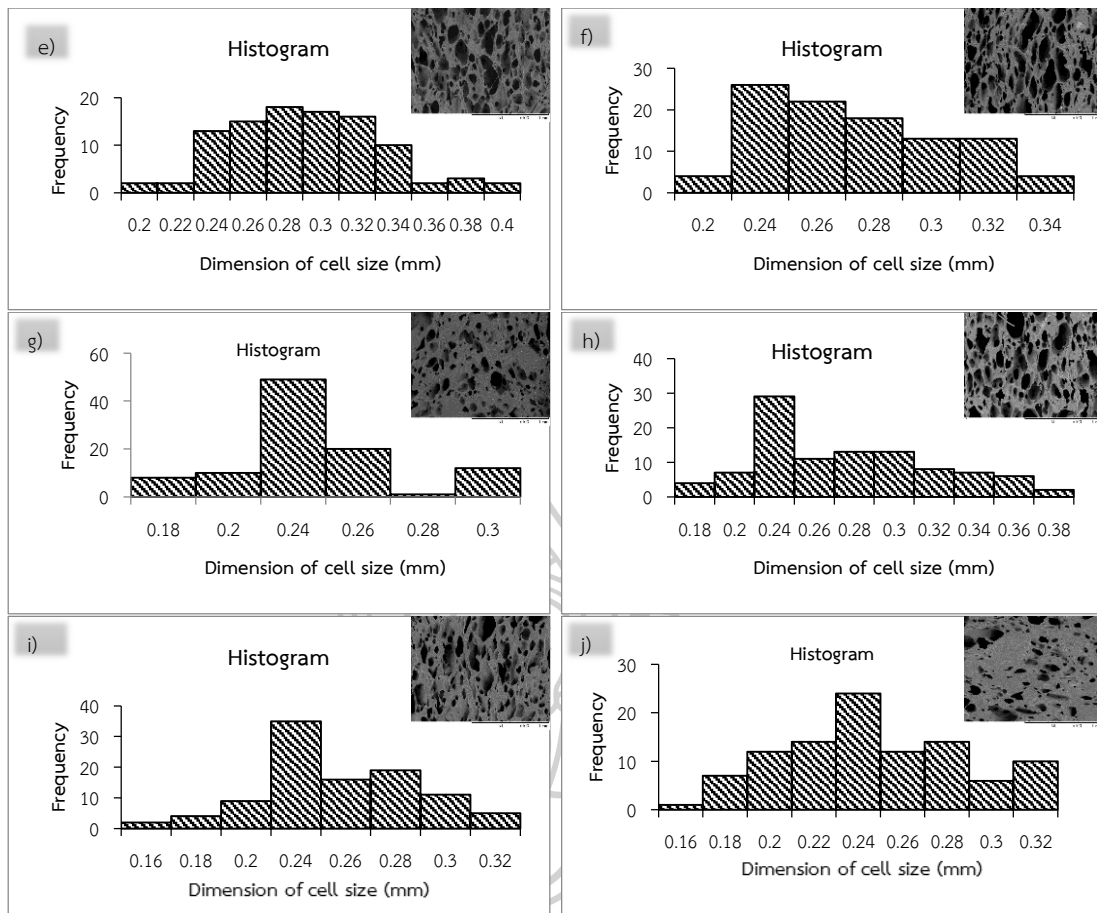
*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)



ภาคผนวก ก.5 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้สาหร่ายปริมาณต่างๆ



ภาคผนวก ก.6 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของ a) PSP foam, b) G, c) G9S1 และ d) G8S2



ภาคผนวก ก.6 (ต่อ) การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของ e) G7S3, f) G6S4, g) G5S5, h) G4S6, i) G3S7 และ j) G2S8

ภาคผนวก ก.7 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกุกเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตีไนซ์ต่างๆ

สูตรโฟม	ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)	สูตรโฟม	ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)
PSP foam	0.16 ± 0.02^a	G6S4	0.26 ± 0.04^{de}
G	0.31 ± 0.03^b	G5S5	0.26 ± 0.05^{de}
G9S1	0.29 ± 0.04^c	G4S6	0.24 ± 0.04^e
G8S2	0.30 ± 0.04^c	G3S7	0.23 ± 0.03^e
G7S3	0.28 ± 0.04^d	G2S8	0.24 ± 0.04^e

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ภาคผนวก ก.8 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ

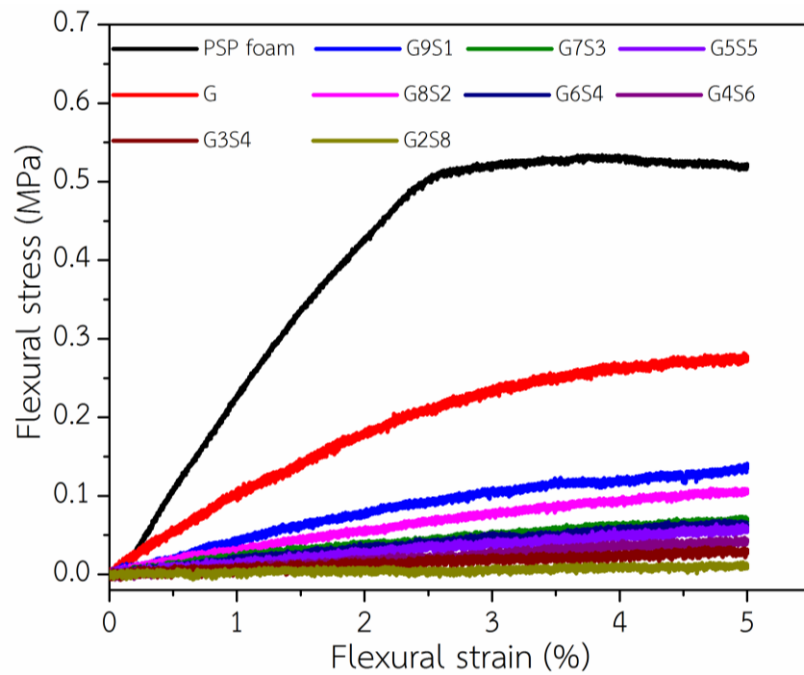
สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)	สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PSP foam	0.02±0.00 ^a	G6S4	0.41±0.01 ^f
G	0.24±0.01 ^b	G5S5	0.48±0.01 ^g
G9S1	0.26±0.00 ^c	G4S6	0.53±0.01 ^h
G8S2	0.29±0.01 ^d	G3S7	0.56±0.01 ⁱ
G7S3	0.32±0.01 ^e	G2S8	0.66±0.02 ^j

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ภาคผนวก ก.9 ค่า Flexural strength และ ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และ โฟมชีวภาพที่มีการใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ

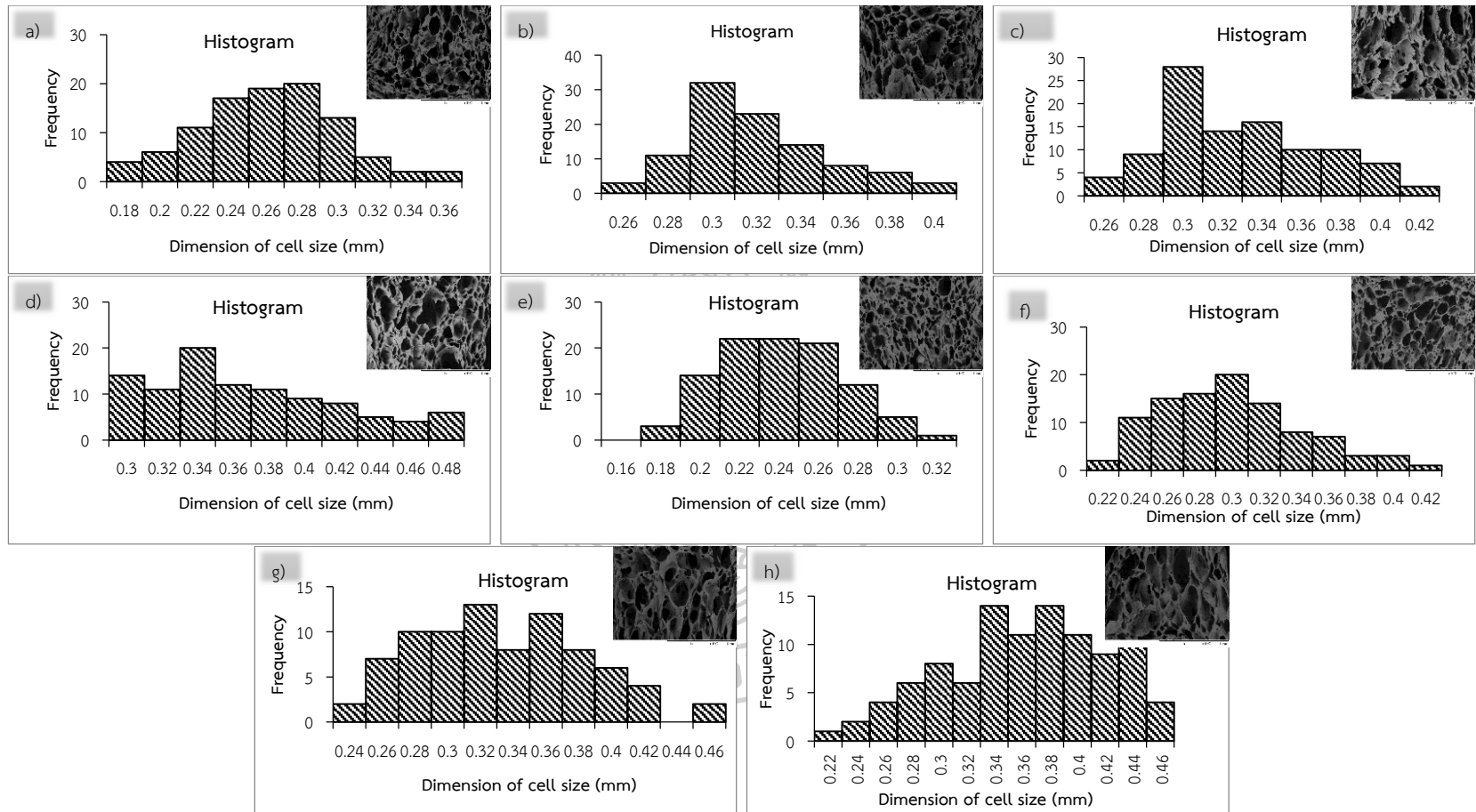
สูตรโฟม	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)
PSP foam	18.43±2.10 ^a	0.53±0.02 ^a
G	9.51±0.75 ^b	0.28±0.02 ^b
G9S1	4.03±0.34 ^c	0.14±0.01 ^c
G8S2	2.88±0.45 ^{cd}	0.11±0.01 ^d
G7S3	1.82±0.26 ^{de}	0.07±0.00 ^e
G6S4	1.43±0.24 ^{de}	0.07±0.00 ^e
G5S5	1.58±0.23 ^e	0.06±0.00 ^{ef}
G4S6	0.92±0.08 ^e	0.05±0.00 ^{fg}
G3S7	0.62±0.07 ^e	0.04±0.00 ^{gh}
G2S8	0.55±0.08 ^e	0.02±0.00 ^h

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

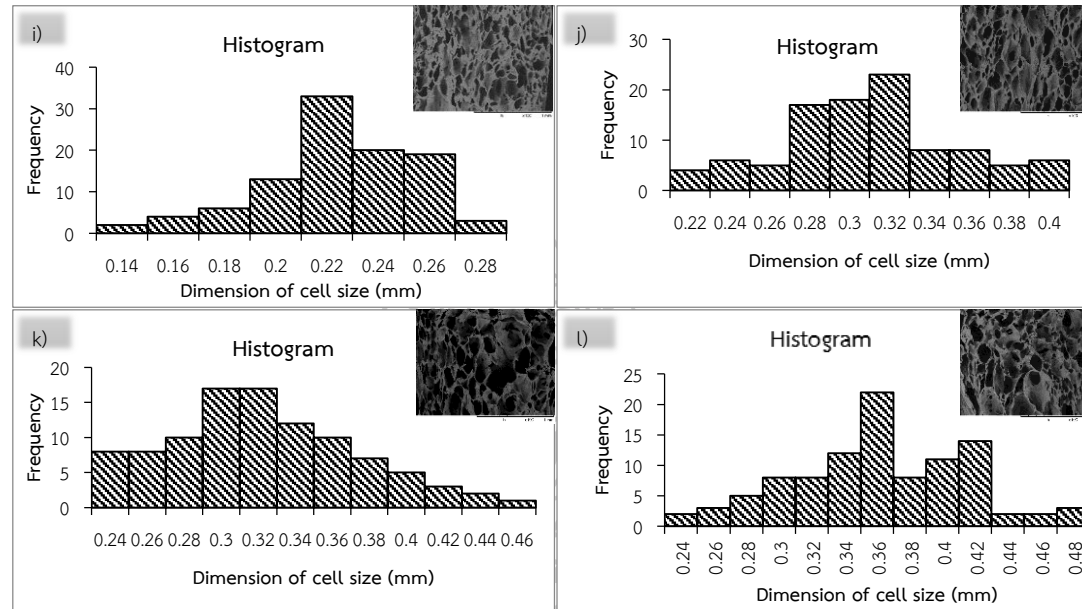


ภาคผนวก ก.10 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนระหว่างกลูเตนจากแป้งสาลีและแป้งสาลีที่ถูกเจลาตินไนซ์ต่างๆ





ภาคผนวก ก.11 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของ a) G-P21, b) G-P31, c) G-P41, d) G-P51, e) G9S1-P21, f) G9S1-P31, g) G9S1-P41 และ i) G9S1-P51



ภาคผนวก ก.11 (ต่อ) การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของ i) G8S2-P21, j) G8S2-P31, k) G8S2-P41 และ l) G8S2-P51

ภาคผนวก ก.12 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ยของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติก-ไฮเซอรร์ระหว่างน้ำตอกลีเซอรอลต่างๆ

สูตรโฟม	ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)	สูตรโฟม	ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)	สูตรโฟม	ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)
PSP foam	0.16±0.02 ^a				
G-P21	0.25±0.04 ^b	G9S1-P21	0.23±0.03 ^{bc}	G8S2-P21	0.21±0.03 ^c
G-P31	0.31±0.03 ^{de}	G9S1-P31	0.29±0.04 ^d	G8S2-P31	0.30±0.04 ^{de}
G-P41	0.32±0.04 ^e	G9S1-P41	0.32±0.05 ^e	G8S2-P41	0.31±0.05 ^{de}
G-P51	0.36±0.05 ^f	G9S1-P51	0.35±0.06 ^f	G8S2-P51	0.35±0.05 ^f

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ภาคผนวก ก.13 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติก-ไฮเซอรร์ระหว่างน้ำตอกลีเซอรอลต่างๆ

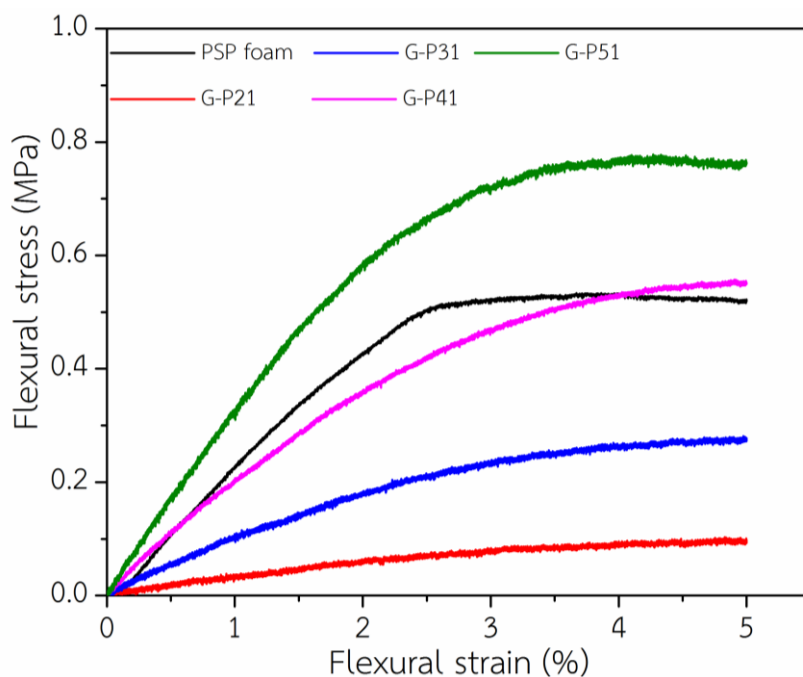
สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)	สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)	สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PSP foam	0.02±0.00 ^a				
G-P21	0.26±0.01 ^b	G9S1-P21	0.30±0.01 ⁱ	G8S2-P21	0.33±0.01 ^j
G-P31	0.24±0.01 ^{bcd}	G9S1-P31	0.25±0.01 ^{cde}	G8S2-P31	0.26±0.01 ^b
G-P41	0.23±0.01 ^{fg}	G9S1-P41	0.24±0.00 ^{cdef}	G8S2-P41	0.25±0.01 ^{bc}
G-P51	0.22±0.01 ^g	G9S1-P51	0.24±0.01 ^{def}	G8S2-P51	0.24±0.01 ^{cde}

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

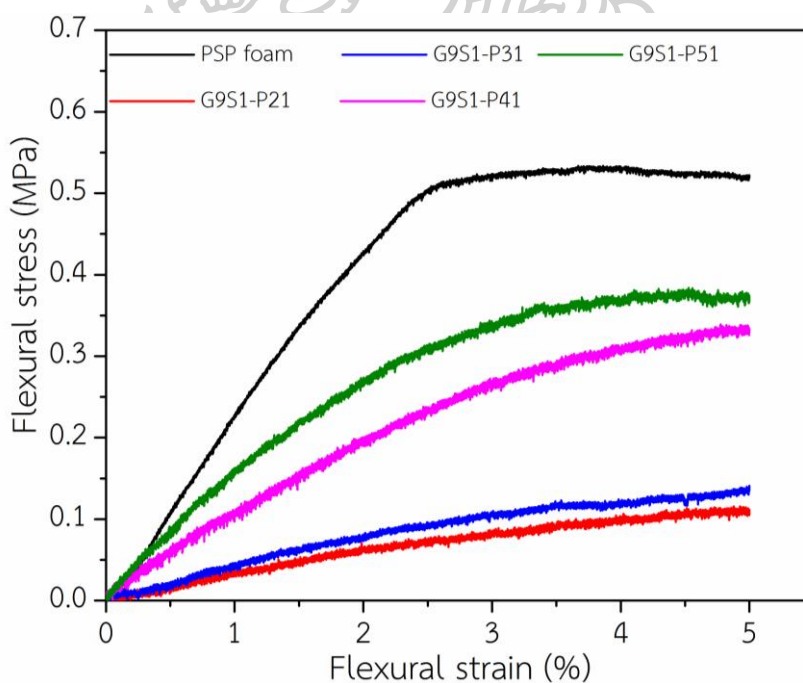
ภาคผนวก ก.14 ค่า Flexural strength และ ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และ โฟมชีวภาพที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ

สูตรโฟม	50%RH		75%RH	
	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)
PSP foam	18.43±2.10 ^a	0.53±0.02 ^{ab}	16.39±0.62 ^a	0.36±0.01 ^a
G-P21	3.35±0.50 ^{de}	0.11±0.01 ^{hi}	0.62±0.08 ^{ijk}	0.02±0.00 ^{ghij}
G-P31	9.51±0.75 ^{bc}	0.27±0.02 ^{ef}	0.90±0.09 ^{fghi}	0.04±0.00 ^g
G-P41	21.89±1.84 ^f	0.54±0.05 ^a	1.59±0.24 ^{de}	0.07±0.01 ^e
G-P51	43.36±3.27 ^h	0.78±0.07 ^k	1.95±0.22 ^d	0.08±0.01 ^d
G9S1-P21	3.80±0.55 ^{de}	0.11±0.01 ^{hi}	0.35±0.06 ^{jk}	0.02±0.00 ^{ijk}
G9S1-P31	4.03±0.34 ^{de}	0.14±0.01 ^{gh}	0.72±0.12 ^{hij}	0.03±0.00 ^{ghi}
G9S1-P41	11.61±1.36 ^b	0.33±0.03 ^{de}	1.07±0.06 ^{fgh}	0.05±0.00 ^f
G9S1-P51	17.83±1.60 ^a	0.39±0.02 ^{cd}	1.33±0.09 ^{ef}	0.06±0.00 ^{ef}
G8S2-P21	0.84±0.10 ^e	0.02±0.00 ⁱ	0.20±0.03 ^k	0.01±0.00 ^k
G8S2-P31	2.88±0.45 ^{de}	0.11±0.01 ^{hi}	0.40±0.06 ^{jk}	0.02±0.00 ^{jk}
G8S2-P41	6.20±0.82 ^{cd}	0.14±0.02 ^{sh}	0.52±0.03 ^{ijk}	0.02±0.00 ^{hijk}
G8S2-P51	9.35±1.09 ^{bc}	0.23±0.01 ^{fg}	0.78±0.13 ^{shij}	0.02±0.00 ^{hij}

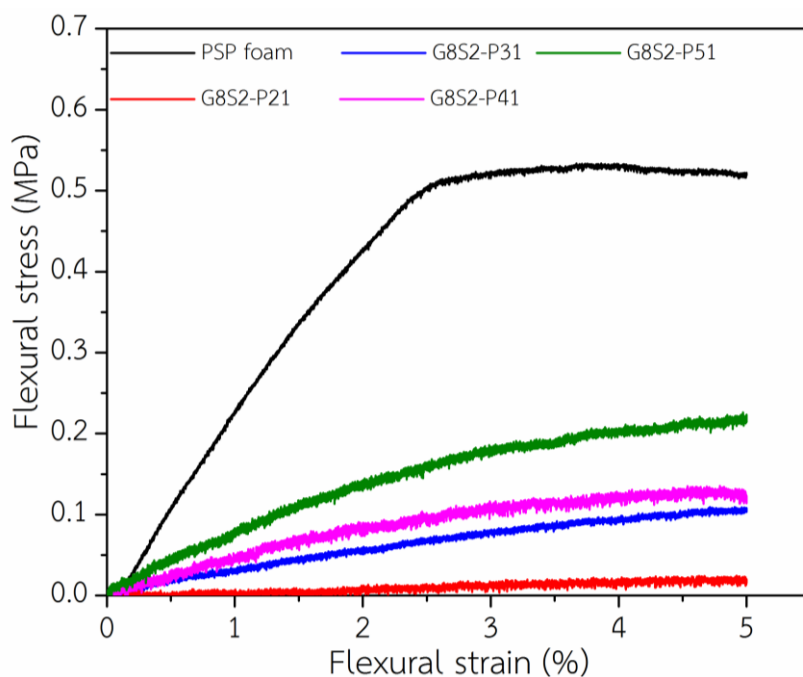
*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)



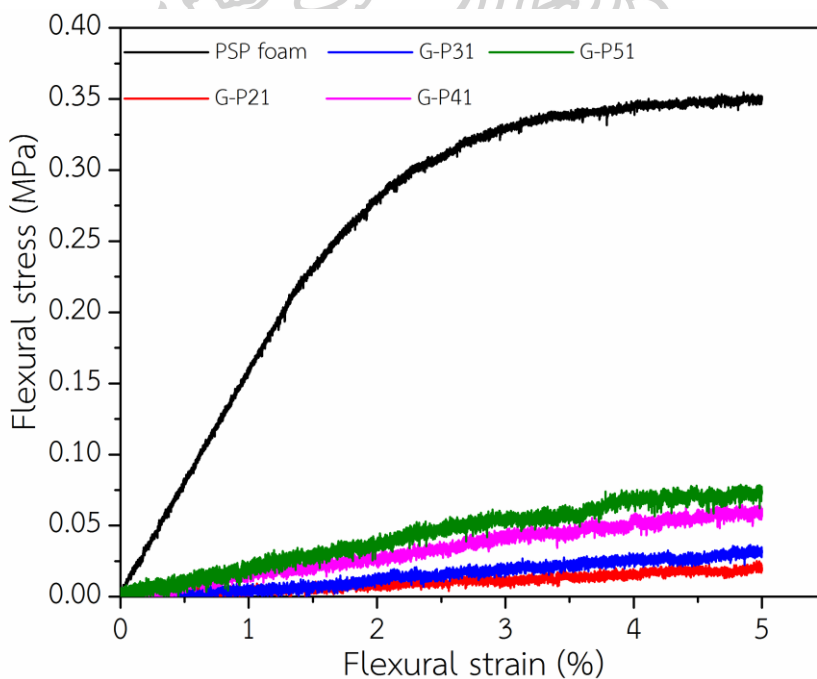
ภาคผนวก ก.15 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G ที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลต่างๆ



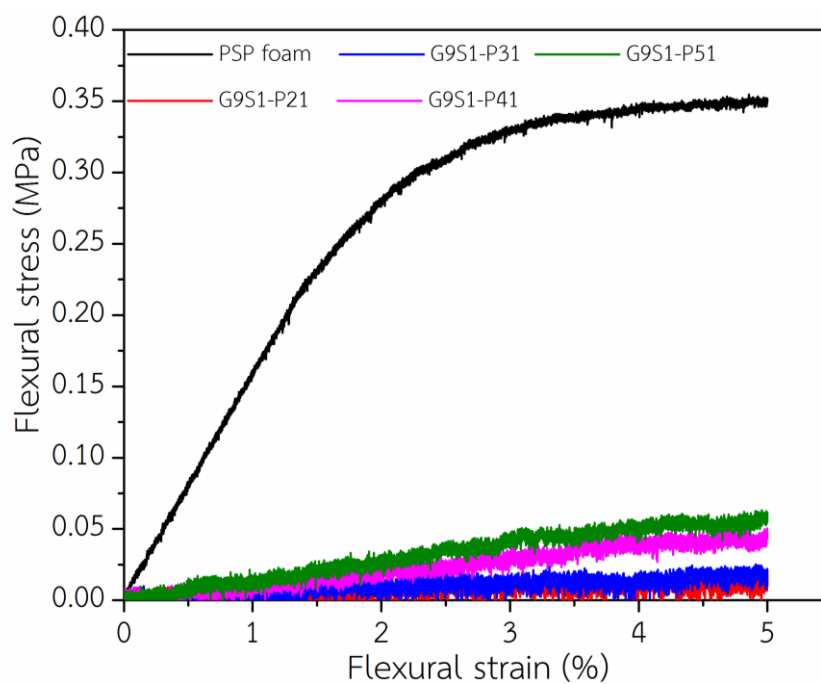
ภาคผนวก ก.16 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G9S1 ที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลต่างๆ



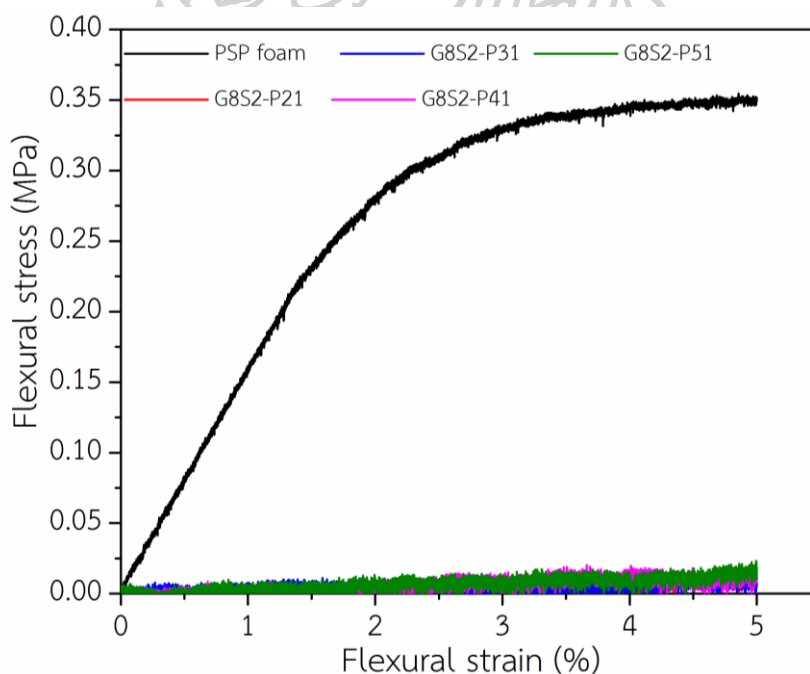
ภาคผนวก ก.17 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สถานะความขึ้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G8S2 ที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลต่างๆ



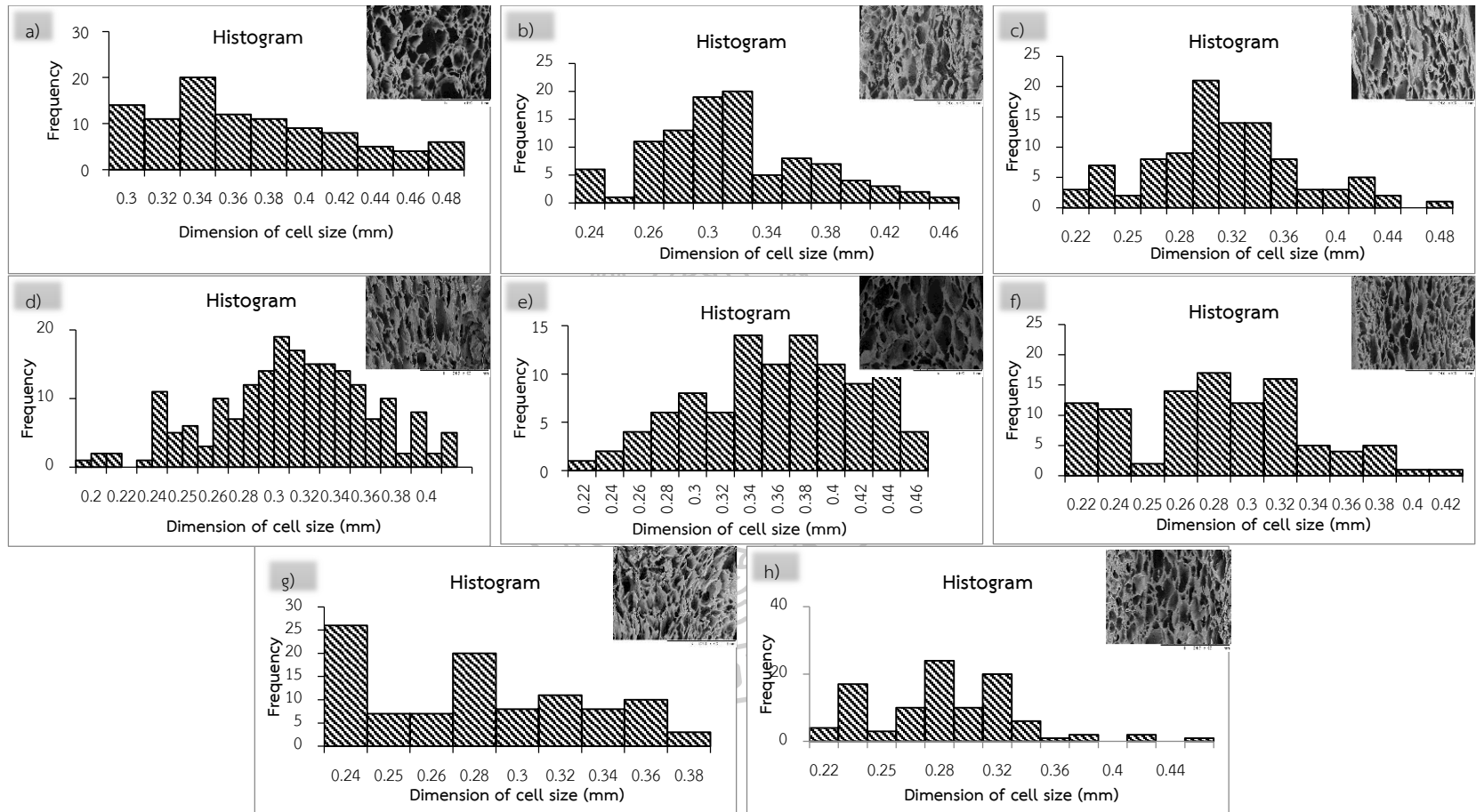
ภาคผนวก ก.18 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สถานะความขึ้นสัมพัทธ์ 75% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G ที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำต่อกลีเซอรอลต่างๆ



ภาคผนวก ก.19 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G9S1 ที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ



ภาคผนวก ก.20 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G8S2 ที่ใช้อัตราส่วนของพลาสติกไซเซออร์ระหว่างน้ำตอกลิเซอรอลต่างๆ



ภาคผนวก ก.21 การกระจายตัวของขนาดเซลล์โฟมของ a) G-P51, b) G-P51-C6, c) G-P51-C8, d) G-P51-C10, e) G-P51, f) G9S1-P51-C6, g) G9S1-P51-C8 และ h) G9S1-P51-C10

ภาคผนวก ก.22 ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

สูตรโฟม	ขนาดเซลล์โฟมเฉลี่ย (mm)
PSP foam	0.16±0.02 ^a
G-P51	0.36±0.05 ^b
G-P51-C6	0.31±0.05 ^c
G-P51-C8	0.31±0.05 ^c
G-P51-C10	0.32±0.05 ^c
G9S1-P51	0.35±0.06 ^b
G9S1-P51-C6	0.28±0.05 ^d
G9S1-P51-C8	0.28±0.04 ^d
G9S1-P51-C10	0.28±0.04 ^d

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ภาคผนวก ก.23 ความหนาแน่นของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)	สูตรโฟม	ความหนาแน่น (g/cm ³)
PSP foam	0.02±0.00 ^a	G9S1-P51	0.24±0.01 ^d
G-P51	0.22±0.01 ^b	G9S1-P51-C6	0.23±0.01 ^{cd}
G-P51-C6	0.23±0.00 ^{bcd}	G9S1-P51-C8	0.23±0.01 ^d
G-P51-C8	0.23±0.00 ^{bcd}	G9S1-P51-C10	0.24±0.01 ^{bcd}
G-P51-C10	0.22±0.01 ^{bc}		

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ภาคผนวก ก.24 ค่า Flexural strength และ ค่า Flexural modulus ของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ ที่สภาวะความชื้น 50% และ 75%

สูตรโฟม	50%RH		75%RH	
	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)	Flexural modulus (MPa)	Flexural strength (MPa)
PSP foam	18.43±2.10 ^a	0.53±0.02 ^a	16.39±0.62 ^{ab}	0.36±0.01 ^a
G-P51	43.36±3.27 ^b	0.78±0.07 ^b	1.95±0.22 ^f	0.08±0.01 ^b
G-P51-C6	62.32±5.46 ^c	1.29±0.05 ^c	9.22±0.85 ^d	0.28±0.03 ^c
G-P51-C8	85.95±5.11 ^d	1.52±0.06 ^d	14.51±1.29 ^b	0.46±0.01 ^d
G-P51-C10	102.37±12.30 ^{ef}	1.85±0.08 ^e	18.54±1.86 ^a	0.63±0.04 ^e
G9S1-P51	17.83±1.60 ^a	0.39±0.02 ^f	1.33±0.09 ^f	0.06±0.00 ^b
G9S1-P51-C6	65.97±9.42 ^c	1.32±0.07 ^c	7.07±0.81 ^e	0.27±0.02 ^c
G9S1-P51-C8	99.68±13.68 ^{de}	1.61±0.11 ^d	18.52±1.44 ^a	0.52±0.02 ^f
G9S1-P51-C10	116.88±12.77 ^f	2.08±0.13 ^g	26.80±2.16 ^c	0.74±0.06 ^g

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

ภาคผนวก ก.25 ค่าความแข็งของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

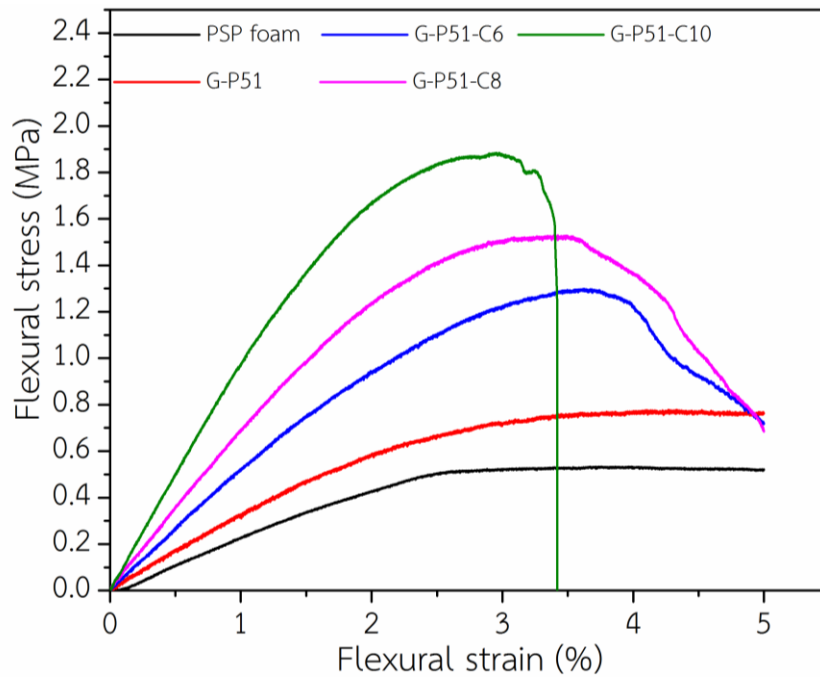
สูตรโฟม	Hardness
PSP foam	43.20±0.96 ^a
G-P51	50.4±1.01 ^b
G-P51-C6	56.29±1.01 ^c
G-P51-C8	59.72±0.44 ^d
G-P51-C10	65.00±0.70 ^e
G9S1-P51	44.20±2.12 ^a
G9S1-P51-C6	60.26±0.65 ^d
G9S1-P51-C8	65.11±1.30 ^e
G9S1-P51-C10	72.38±1.53 ^f

*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

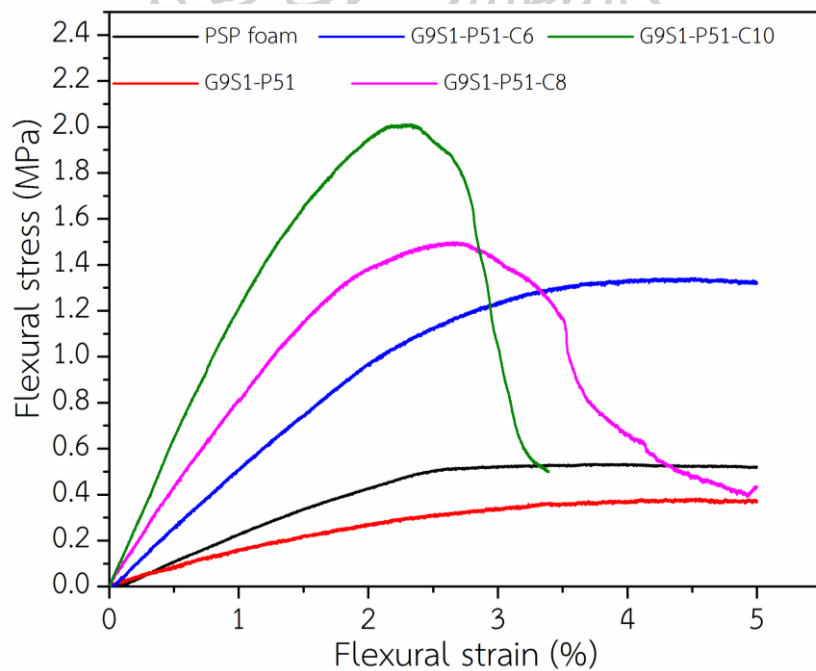
ภาคผนวก ก.26 ค่าการดูดซึมน้ำของ PSP foam และโฟมชีวภาพที่มีปริมาณสารเชื่อมขวางต่างๆ

สูตรโฟม	ค่าการดูดซึมน้ำ (g/g)
PSP foam	0.03±0.01 ^a
G-P51	1.08±0.09 ^{bc}
G-P51-C6	0.95±0.05 ^{cd}
G-P51-C8	0.81±0.06 ^{de}
G-P51-C10	0.64±0.11 ^e
G9S1-P51	1.21±0.14 ^b
G9S1-P51-C6	0.84±0.12 ^d
G9S1-P51-C8	0.78±0.01 ^{de}
G9S1-P51-C10	0.64±0.10 ^e

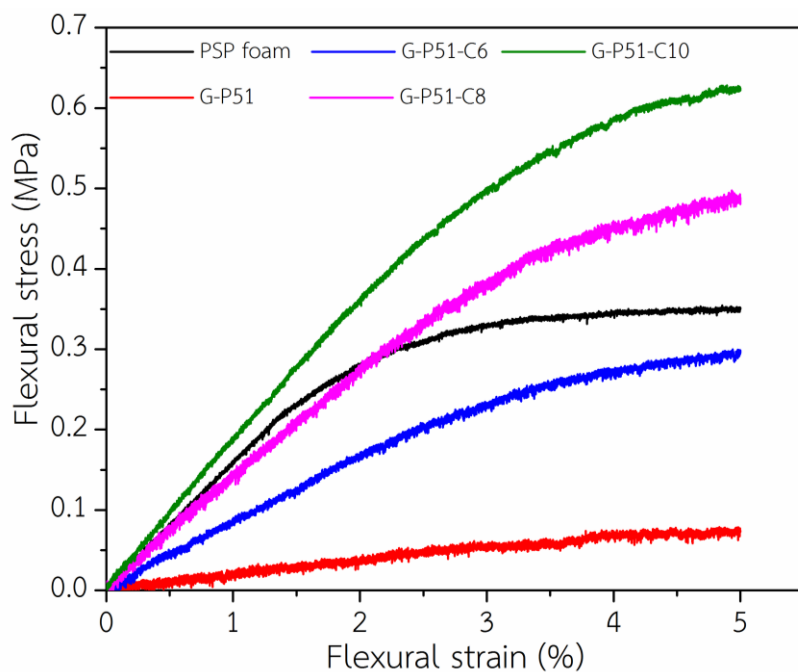
*หมายเหตุ : ตัวอักษรภาษาอังกฤษหลังตัวเลขที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



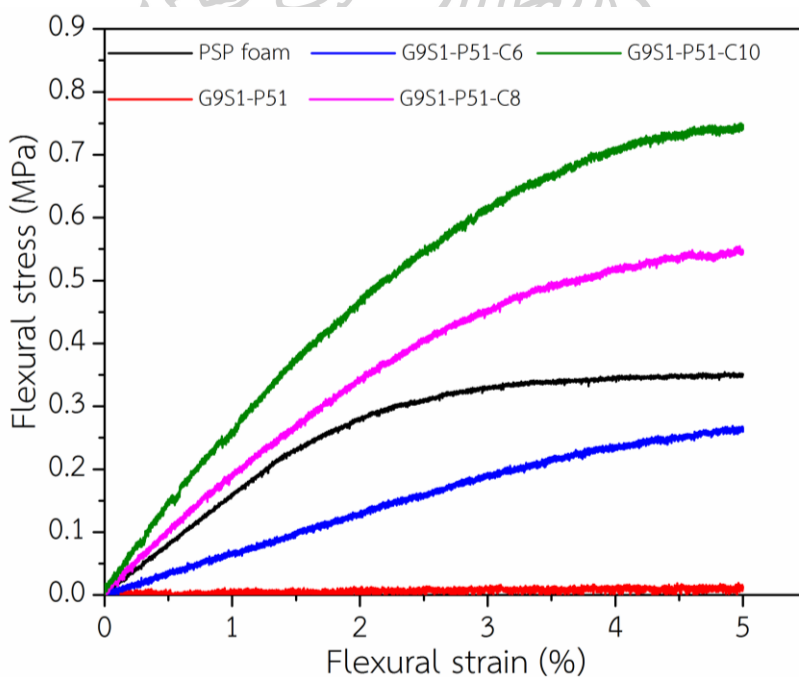
ภาคผนวก ก.27 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G-P51 ที่ใช้สารเชื่อมขวางปริมาณต่างๆ



ภาคผนวก ก.28 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สถานะความชื้นสัมพัทธ์ 50% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G9S1-P51 ที่ใช้สารเชื่อมขวางปริมาณต่างๆ



ภาคผนวก ก.29 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G-P51 ที่ใช้สารเชื่อมขวางปริมาณต่างๆ



ภาคผนวก ก.30 พฤติกรรมการต้านทานต่อการโค้งงอที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 75% ของ PSP foam และโฟมชีวภาพสูตร G9S1-P51 ที่ใช้สารเชื่อมขวางปริมาณต่างๆ



ข.-1 การประชุมวิชาการ The International Polymer Conference of Thailand ครั้งที่ 6
(PCT-6 2016)

- บันทึกงานประชุม (Proceeding)

-PCT-6-

144

BIOPOL-P14

Effect of blowing agent content on morphology, mechanical properties and water resistance of wheat gluten/gelatinized wheat starch foams

Punnakit Nakkharat¹ and **Sudsiri Hemsri^{1,*}**

¹Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology
Silpakorn University, Nakhon Pathom 73000, Thailand
Phone +34 219 363, Fax +34 219 363, *E-Mail: sudsirihemsri@yahoo.com

Abstract

The objective of this work is to develop biodegradable foams from renewable resources for the use as single -use foam trays to replace commercial expanded polystyrene (EPS) foams. The biodegradable foams were prepared from wheat gluten/gelatinized wheat starch (WG/GWS) blend using compression molding process. Wheat starch (WS) was gelatinized in a twin screw extruder using various ratios of water/glycerol (30:30, 30:35 and 30:40) with respect to WS weight. Sodium bicarbonate (baking soda) with amount of 0, 4, 8, 12 and 20 was used as blowing agent for foam production. The effect of blowing agent content on morphology, mechanical properties and water resistance of foams was evaluated. The scanning electron microscopy (SEM) analysis revealed a presence of open-cell structure in all foams containing the blowing agent. The cell size and density of foams increased with increasing blowing agent concentration. Flexural modulus and strength of the foams tended to decrease as reducing density. Moreover, the foam with high content of blowing agent provided an improvement of water resistance.

Keywords: Foam, Wheat gluten, Wheat starch, Blowing agent

1. Introduction

Nowadays, foams for food packaging play an important role in the daily lives of human. The foams are popular to use as single-use trays and containers for food due to a change of human lifestyle as well as a growth of the economy and technology. The foams for food packaging are mainly made of expanded polystyrene (EPS) which is a non-biodegradable materials and difficult for recycle resulting in the environmental pollution. Thus, there is a strong attention on development of biodegradable foams based on renewable resources. Of great interest are starch and cereal proteins as biodegradable substitutes for petroleum based EPS to produce foam packaging. Various starch based foams baked were prepared by compression and baking processes from corn starch [1,2], cassava starch [3-5], potato starch [6] and wheat starch [7].

In this research, new biodegradable foam was prepared from the blend between wheat gluten (WG) and gelatinized wheat starch (GWS) using baking soda

(sodium bicarbonate, NaHCO_3) as a blowing agent. The research idea is generated from the way to make food foams such as breads or cakes by baking process in which wheat flour, water (or milk) and baking soda are main ingredient. In this work, wheat starch (WS) was gelatinized by water/glycerol before used in order reduce temperature and time for foam processing. Moreover, what gluten (WG) was blended into gelatinized wheat starch because WG possesses unique properties such as good viscoelastic and foaming properties [8]. Furthermore, the incorporation of WG could reduce water absorption in cassava starch foam [5].

The aim of the present study was to investigate the effect of blowing agent content on morphology and mechanical properties of WG/GWG biofoams.

2. Materials and methods

2.1 Materials

Wheat starch (WS) was purchased from Manildra Starches PTY Ltd. Australian Wheat gluten (WG) was

obtained from Anhui Ante Food Co., Ltd, China. Sodium bicarbonate (NaHCO_3) and glycerol were supplied from Ajax Finechem PTY Ltd. All chemicals used as received, except for WS and WG which were dried in oven at 70°C for 12 hr. before used with moisture content of 5%.

2.2 Preparation of gelatinized wheat starch (GWS)

Gelatinization of WS was performed in a twin screw extruder with a temperature profile of 90, 110, 120, 120 and 120°C from feed zone to die section, respectively with a screw speed of 60 rpm. The WS was gelatinized by a mixture of distilled water (DI) and glycerol with three different ratios of 30:30, 30:35 and 30:40 with respect to WS weight. Then extruded was dried at 70°C for 6 hr., after that ground with a gridding machine to obtain coarse powder and then ground with a ball mill machine 5 hr. to obtain fine powder.

2.3 Preparation of biofoams

A mixture of WG and GWS (200 g) with various content of NaHCO_3 (0, 4, 8, 12 or 20 phr.) were mixed in dry state. Then water and glycerol (a ratio of 1:1 by weight of total solid) was added, mixed into the WG/GWS mixture. The batter was kept at room temperature overnight and then kneaded using a two roll mill machine for 10 min to provide homogeneous dough. The mold foams was prepared using compression molding machine at 120°C for 5 min without applying pressure. Table 1 shows all formulation for preparation of the foams.

Table 1. Foam formulations

Foam formulations	Ratio of WG:GWS (w/w)	Amount of NaHCO_3 (phr) ^{a)}
WG/GWS5050_B0	50:50	0
WG/GWS5050_B4	50:50	4
WG/GWS5050_B8	50:50	8
WG/GWS5050_B12	50:50	12
WG/GWS5050_B20	50:50	20

^{a)}phr = part per hundred of WG/GWS weight

2.4 X-ray diffraction analysis (XRD)

X-ray diffraction analysis was used to investigate crystalline characteristic of native WS and gelatinized starches by using XRD-6100, SHIMADZU at 30 kV, 20 mA, scan range 3° - 35° and scan speed 5 deg/min.

2.5 Scanning electron microscopy

Morphology of biofoams was examined using a scanning electron microscope (SEM), Hitachi TM3030, with operating voltage of 15 kV was cut by a razorblade and the cross-sectional surface of foams was coated with gold and palladium under vacuum.

2.6 Porous diameter

Porous diameter was investigated by SEM images of the cross-sectional surface of foams with magnification of 150 x. A hundred pores were used to measure diameter using an Image J software.

2.7 Density of biofoam

Foam density was determined by weight and volume measurement. The foam specimens were weighed. The density of foam was calculated as follows: Density = W/V , where W and V are weight (g) and volume (cm^3) of the foam, respectively. At least 10 specimens were measured for each foam formulation.

2.8 Mechanical properties

The biofoams were conditioned in environmental chamber with $50 \pm 2\%$ relative humidity (R.H.) at 25°C for 48 hr. previous to mechanical testing. Flexural testing was performed in the three point bending mode using an Instron model 5969 Universal Testing Machine. Foam specimens with width of 12 mm, length of 62 mm and thickness of 3 mm were used for testing. Flexural strength and elastic bending modulus at stain of 5% were reported according to ASTM D790. The modulus was calculated using the equation:

$$E = (dF/dL \times c^3) / (4 \times b \times a^3)$$

where dF/dL is the initial slope of the force versus deformation curve, c is the support span (49 mm), b is the sample width (12 mm) and the sample thickness.

Crosshead speed was 1.3 mm/min. The samples were conditioned in a closed container under relative humidity (RH) of 50 ± 2 % using saturated magnesium nitrate hexahydrate solution before testing.

2.9 Water absorption

Water absorption test of the foam was performed by weighing the sample (12 x 62 x 3 mm) before and after immersion in deionized water at 25°C at certain time of 5, 10, 30, 60, 120, 360, 720 and 1440 min. Three replicate samples were tested. The water absorption (WA) of the foams was calculated as:

$$WA = [W_1 - W_0] / W_0$$

where W_0 and W_1 are the weight (g) of the foam before and after submersion in water.

2.10 Statistical analysis

Statistical analysis was conducted using Fisher's comparison (Minitab Statistical software; Release 16.2.0) to evaluate the significant difference of data.

3. Results and Discussion

3.1 X-ray diffraction analysis

X-ray diffraction analysis was used to study a change of crystallinity in granular starch before and after gelatinization. The WS was gelatinized with water/glycerol mixture with three different ratios (30:30, 30:35 and 30:40). XRD pattern of native WS and all gelatinized wheat starch (GWS) are presented in Figure 1. The XRD pattern of WS showed that starch is a semi-crystalline polymer with strong peaks at $2\theta = 15.14, 17.12, 18.03, 20.01$ and 23.08 indicating A-type crystalline structure pattern [9]. On the other hand, the A-type structure disappeared in XRD patterns of all GWSs as a result of the loss of crystalline structure during gelatinization. Moreover, it was clearly seen that in the XRD patterns of all GWSs observed two new peaks at $2\theta = 13.58^\circ$ and 20.78° . These peaks indicated a presence of V_A (anhydrous)-type crystallinity structure formed by the crystallization of amylose complexed with glycerol or lipids [10]. Considering an effect of different water/glycerol ratios on the XRD pattern, it was found that

all GWSs gelatinized with various water/glycerol ratios provided similar XRD patterns. Thus, in this work the water/glycerol ratio of 30:30 was chosen for gelatinization of native starch performed in the twin screw extruder. This is because the GWS prepared from the higher glycerol content (at the ratios of 30:35 and 30:40) showed low modulus and tensile strength due to good plasticization effect of glycerol, resulting in reduction of mechanical properties of WG/GWS foams.

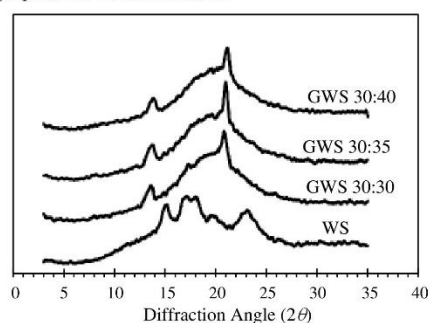


Figure 1. X-ray diffraction diagrams of WS, GWS 30:30, GWS 30:35 and GWS 30:40

3.2 Scanning electron microscopy

SEM analysis was used to investigate morphology prepared WS and WG/GWS foams. Figure 2 illustrates SEM images of cross-sections of WG/GWG and GWS foam specimens. Fig.2a-e presents SEM images of WG/GWG foams at a ratio of 50:50 with various NaHCO_3 content of 0, 4, 8, 12 and 20 phr.

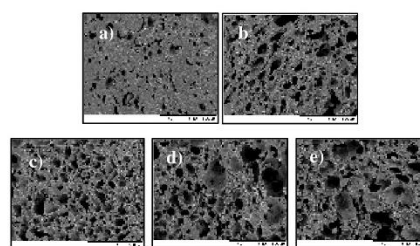


Figure 2. Scanning electron micrographs of a)WG/GWS 5050_B0, b)WG/GWS5050_B4, c)WG/GWS5050_B8, d) WG/GWS5050_B12 and e)WG/GWS5050_B20

From fig. 2, it was observed that all WG/GWS foams had open-cell type structure. The cellular structure is generated from venting CO₂ and H₂O which are by-products from the decomposition process of NaHCO₃ during hot-compression the dough. The size of cells increased with an increase in blowing agent content whereas thickness of cell walls was thinner with increasing NaHCO₃ content. These results indicated that the WG/GWS foam with high amount of the blowing agent had a more expansion properties.

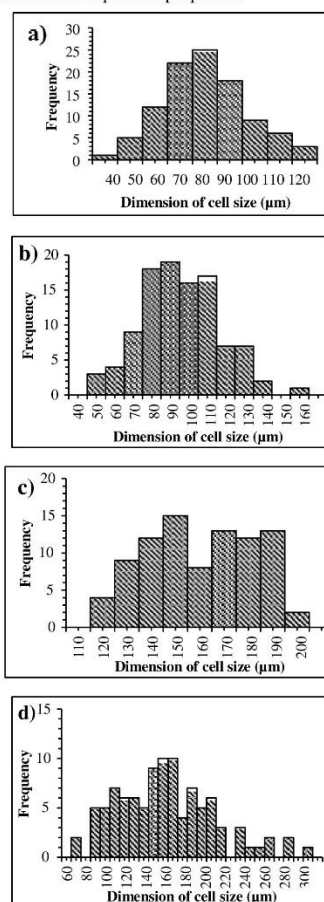


Figure 3. Distribution of cell size of WG/GWS foams at a ratio of 50:50 at different blowing agent content of a) 4, b) 8, c) 12 and d) 20 phr

Figure 3, 4 and 5 shown distribution of cell size, average cell size diameter and density of WG/GWS foams with the blowing agent content of 4, 8, 12 and 20 phr, respectively. It was obvious in fig.3 that the foams with 4, 8 and 12 phr of NaHCO₃ possessed a normal bell shape distribution but in the case of the foam containing 20 phr of NaHCO₃, the cell size distribution showed an asymmetrical right-skewed pattern. As shown in fig. 4, the average cell size diameter of the foam with 4, 8 12 and 20 phr of NaHCO₃ was around 75, 90, 155 and 157 µm, respectively. Incorporation of NaHCO₃ into the WG/GWS blends increased the size diameter of cell. However, the average cell size diameters of WG/GWS foams containing 12 and 20 phr of blowing agent were not significantly different. Considering densities of all foams in fig. 5, the density of foam decreased from 1.079 to 0.545 as increasing blowing agent loading from 0 to 20 phr because of a presence of a bigger cell size diameter when NaHCO₃ content increased.

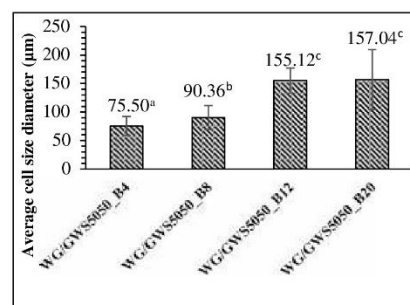


Figure 4. Average cell size diameter of WG/GWS5050 foams with NaHCO₃ content of 4, 8, 12 and 20 phr. A different letter means significantly different at 95% confidence level (Fisher's comparison).

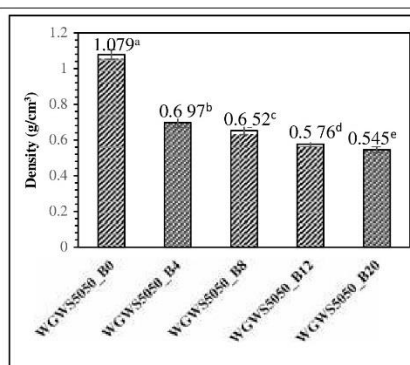


Figure 5. Density of WG/GWS5050 foams with NaHCO₃ content of 0, 8, 12 and 20 phr

3.4 Mechanical properties

Table 2 presents flexural modulus and strength values of WG/GWS biofoams at ratio of 50:50 with NaHCO₃ content of 4, 8, 12 and 20 phr. It was found that flexural modulus and strength reduced with increased NaHCO₃ content. This was because the foam with higher blowing agent content possessed larger opened-cell size diameter as shown in fig. 2, resulting in low density and thereby providing softer foam.

Table 2. Mechanical properties of WG/GWS foams with difference blowing agent content

Formulations	Flexural modulus (kPa)	Flexural strength (kPa)
WG/GWS5050_B4	1166.3±91.0 ^a	61.3±3.7 ^a
WG/GWS5050_B8	1045.1±100.5 ^b	55.1±4.4 ^b
WG/GWS5050_B12	853.8±91.5 ^c	45.5±4.3 ^c
WG/GWS5050_B20	555.9±69.8 ^d	28.9±3.2 ^d

3.5 Water absorption

The water absorption (WA) result of foams illustrates in Figure 6. The WA of foam with NaHCO₃ of 8 phr showed a higher WA than that of the foams containing the blowing agent of 12 and 20 phr. Moreover, the WA value of the foam with 12 phr was comparable to that of 20 phr. The WA of foams decreased with an

increase in blowing agent content. Thus, the foam with higher level of blowing agent had high water resistance ability. This is because the foam containing low NaHCO₃ content possessed thicker cell walls, leading to higher water absorption with respect to the foam prepared from high blowing agent content with thinner cell wall thickness.

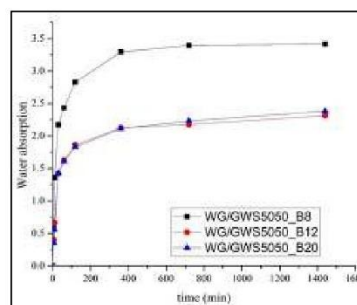


Figure 7. Water absorption of WG/GWS5050 foams with NaHCO₃ content of 8, 12 and 20 phr

4. Conclusions

The WG/GWS biofoams were fabricated using a compression process with various contents of sodium bicarbonate as a blowing agent to investigate their morphology, mechanical properties as well as water absorption. The results of SEM showed that the foam without adding the blowing agent provided fewer holes with high density compared to that without incorporation of the blowing agent, while the open-cell structure appeared in all foam containing the blowing agent. As the blowing agent concentration increased, the cell size diameter of the foams increased leading to a decrease in foam density. Furthermore, the addition of sodium bicarbonate could also enhance water resistance of the foams.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge Department of Materials Science and Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University for financial support.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายปุณณกิจ นาคราช
วัน เดือน ปี เกิด	3 มกราคม 2535
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลแม่และเด็ก จังหวัดนครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนต้น จากโรงเรียน วัฒนไพฑูริย์ จังหวัดเชียงใหม่ พ.ศ. 2553 สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียน แก้วเขียววิทยา จังหวัดนครสวรรค์ พ.ศ. 2557 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2557 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาการและ วิศวกรรมพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ประวัติการฝึกงาน พ.ศ. 2556 บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) ทุนการศึกษาที่ได้รับ พ.ศ. 2557 – 2559 ได้รับทุนนักศึกษาผู้ช่วยสอน จากภาควิชาวิทยาการและ วิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	330/36 ถ.สวรรคคีวิถี ซ.สวรรคคีวิถี 26 ต.ปากน้ำโพ อ.เมือง จ.นครสวรรค์ 60000
ผลงานตีพิมพ์	1. Punnakit Nakkharat and Sudsiri Hemsri. “Effect of blowing agent content on morphology, mechanical properties and water resistance of wheat gluten/gelatinized wheat starch foams.” The International Polymer Conference of Thailand : PCT-6, Pathumwan Princess Hotel, Bangkok, Thailand, June 30 - July 1, 2016. 2. Sudsiri Hemsri and Punnakit Nakkharat. “Biodegradable Wheat Gluten/Thermoplastic Wheat Starch Foams.” The 10th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-10), Bexco, Busan, Korea, Thailand, October 16 - 19, 2016.