



## พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี Bioplastics from Wheat Gluten

แก้วตา แก้วตาทิพย์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

การสะสมของขยะพลาสติกสังเคราะห์เป็นปัญหาที่ทั่วโลกกำลังให้ความสนใจ แนวทางหนึ่งที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ คือ การผลิตและใช้พลาสติกชีวภาพ กลูเตนข้าวสาลีเป็นวัตถุดิบที่น่าสนใจอย่างมากในการนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ราคาถูก มีปริมาณมาก และย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ และเมื่อผสมกลูเตนข้าวสาลีร่วมกับพลาสติกไฮเซอรสามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เหมือนการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป โครงสร้างของกลูเตนข้าวสาลีประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด แต่กรดอะมิโนที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและสมบัติของกลูเตนข้าวสาลี คือ ซีสทีน เนื่องจากซีสทีนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไทออลที่สามารถสร้างพันธะไดซัลไฟด์ทั้งภายในและภายนอกสายโซ่ของโปรตีนหรือเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีน โดยการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีนจะส่งผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีน เช่น อุณหภูมิในการขึ้นรูป ชนิดของพลาสติกไฮเซอร และชนิดของสารเติมแต่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนให้มีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่มีสมบัติที่ดีและสม่ำเสมอเหมาะแก่การนำไปใช้งาน

<sup>1</sup>ภาควิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

## ABSTRACT

The accumulation of synthetic plastic wastes in nature has become a worldwide environmental problem. One partial solution to this problem is to produce and use bioplastics. Wheat gluten is an interesting raw material for the development of bioplastics, because of its low cost, availability in large quantities and biodegradability. In the presence of appropriate plasticizers, wheat gluten can be prepared using common thermoplastic processing. Wheat gluten is composed of many types of amino acids. However, cystine is the amino acid that plays an important role in bioplastics from wheat gluten. This is because SH groups can form disulfide (SS) bonds or crosslink between protein chains. The degree of crosslinking affects the quality of the final product. There are many factors that can influence the crosslinking such as the temperature during processing, the type of plasticizer and other additives. It is therefore necessary to control the extent of protein crosslinking because protein crosslinking plays a key role in the properties of the bioplastics from wheat gluten.

**คำสำคัญ:** พลาสติกชีวภาพ กลูเตนข้าวสาลี สารเติมแต่ง

**Keywords:** Bioplastic, Wheat gluten, Additive

## บทนำ

พลาสติกสังเคราะห์ (synthesis plastic) ถูกใช้อย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน เนื่องจากมีสมบัติที่ดีหลายประการ เช่น ทนทาน ราคาถูก น้ำหนักเบา ไม่เป็นสนิม และผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายรูปแบบ ในปัจจุบันพลาสติกสังเคราะห์ที่ถูกนำมาใช้ในรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ ฟิล์มสำหรับห่อหุ้มอาหาร และฟิล์มที่ใช้ในการเกษตรมีปริมาณที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ไม่มีระบบการกำจัดขยะพลาสติกสังเคราะห์ที่ดี จึงทำให้เกิดการสะสมของขยะพลาสติกสังเคราะห์ตามธรรมชาติ เนื่องจากขยะพลาสติกเหล่านี้ทนต่อการเสื่อมสภาพจากสารเคมี แสงแดด ความชื้น และไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ ทำให้ขยะพลาสติกสังเคราะห์ใช้เวลาในการย่อยสลายนาน หรือแม้กระทั่งกระบวนการกำจัดขยะด้วยวิธีการเผา

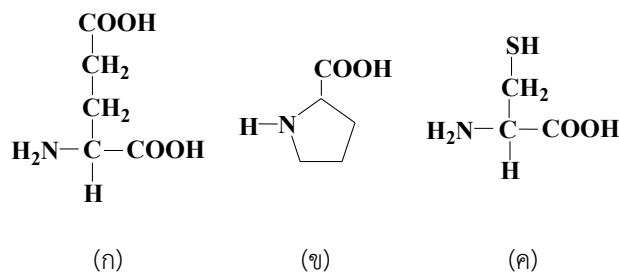
ทำลาย ก็จะปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ซึ่งนำไปสู่ปัญหาภาวะโลกร้อนตามมา แม้ว่าจะมีการแก้ปัญหาเหล่านี้โดยใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ เช่น พอลิคาโพรแลกโตน (polycaprolactone) พอลิไฮดรอกซีบิวทีเรต (polyhydroxybutyrate) และพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid) พลาสติกเหล่านี้นอกจากย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติแล้วยังมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่ยังไม่มีการใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีราคาแพง ดังนั้นการเตรียมพลาสติกจากวัสดุจากธรรมชาติ เช่น แป้ง (starch) โปรตีนพืช (plant protein) และเส้นใยธรรมชาติ (natural fiber) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างมาก โดยเรียกพลาสติกที่เตรียมจากวัสดุจากธรรมชาตินี้ว่า พลาสติกชีวภาพ (bioplastic) ข้อดีของวัสดุจากธรรมชาติ คือ ราคาถูก มีปริมาณมาก

สามารถปลูกใหม่ทดแทนได้ ย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

กลูเตนเป็นโปรตีนที่พบได้ในพืชหลายชนิด เช่น ข้าวไรย์ (rye) ข้าวสาลี (wheat) ข้าวโพด (corn) และข้าวบาร์เลย์ (barley) โด (dough) ที่เกิดจากการผสมกลูเตนจากข้าวสาลี (wheat gluten) กับน้ำ มีสมบัติเหนียวและยืดหยุ่น แม้ว่ากลูเตนจากข้าวไรย์สามารถเกิดโดได้เช่นเดียวกัน แต่โดที่ได้ไม่มีความแข็งแรง (weak dough) และไม่ยืดหยุ่น ในขณะที่กลูเตนจากพืชชนิดอื่น ๆ ไม่สามารถเกิดโดได้ (Hoseney, 1998) กลูเตนจากข้าวสาลีเป็นผลพลอยได้ (by product) จากกระบวนการผลิตแป้งสาลี (wheat starch) โดยทั่วไปในโครงสร้างของแป้งสาลีประกอบด้วยโปรตีนหลักที่สำคัญ 2 ชนิด คือ ไกลอะดีน (gliadin) และกลูเตนิน (glutenin) ในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยโปรตีนทั้ง 2 สร้างพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) เชื่อมต่อกันเกิดเป็นกลูเตน ข้าวสาลี ไกลอะดีนมีสมบัติที่เหนียว (viscous properties) แต่กลูเตนินมีสมบัติยืดหยุ่นคล้ายสปริง (elastic properties) ดังนั้นกลูเตนข้าวสาลีจึงมีสภาพหยุ่นเหนียว (viscoelastic) (Auvergne et al., 2008) โปรตีนที่เป็นองค์ประกอบในกลูเตนข้าวสาลีประกอบด้วยกรดอะมิโนหลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 1 กรดอะมิโนที่มีปริมาณมากมี 2 ชนิด คือ กรดกลูตามิก (glutamic acid) ประมาณ 37.3 โมล% และ

โพรลีน (proline) ประมาณ 13.7 โมล% (โครงสร้างกรดกลูตามิกและโพรลีน แสดงในรูปที่ 1) แต่กรดอะมิโนที่มีอิทธิพลต่อโครงสร้างและสมบัติของกลูเตนข้าวสาลี คือ ซีสทีน (cystine) ถึงแม้ว่าซีสทีนมีปริมาณเพียง 2 โมล% แต่โครงสร้างของซีสทีนประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันไทออล (thiol group; SH) (รูปที่ 1) ซึ่งสามารถสร้างพันธะไดซัลไฟด์ทั้งภายในและภายนอกสายโซ่ของโปรตีน หรือเกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างสายโซ่โปรตีน (Lagrain et al., 2010) โดยมีกลไกที่เกี่ยวข้อง 2 กลไก คือ กลไกแรดิคัล (radical mechanism) และกลไกนิวคลีโอฟิลิก (nucleophilic mechanism) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยกลไกทั้ง 2 นี้จะเกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูป ภายใต้กระบวนการให้ความร้อนและแรงเฉือน (Auvergne et al., 2008)

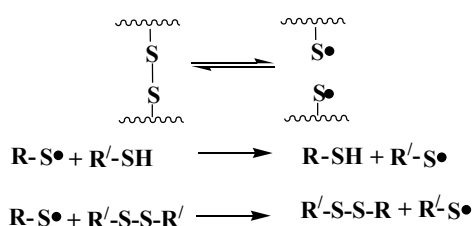
จากการศึกษาของ Morel et al. (2002) พบว่าการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีนผ่านกลไกแรดิคัลถูกควบคุมโดยไทอิลแรดิคัล (thiyl radical, S<sup>•</sup>) นอกจากนี้ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างสายโซ่โปรตีนผ่านกลไกนิวคลีโอฟิลิก เนื่องจากซัลเฟอร์แอนไอออน (sulfur anion, S<sup>-</sup>) สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีภายใต้สภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างสูง (Pommet et al., 2003)



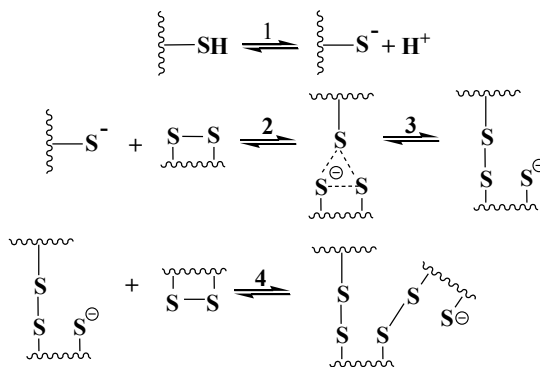
รูปที่ 1 โครงสร้างของกรดกลูตามิก (ก) โพรลีน (ข) และซีสทีน (ค)

ตารางที่ 1 ชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนในกลูเตนข้าวสาลี (Verbeek and Berg, 2010)

กรดอะมิโน (amino acid)	โมล% (mol%)	กรดอะมิโน (amino acid)	โมล% (mol%)
Tryptophane	1.0	Glycine	3.1
Lysine	1.2	Tyrosine	3.8
Methionine	1.8	Isoleucine	4.0
Cystine	2.1	Valine	4.1
Histidine	2.2	Phenylalanine	4.9
Alanine	2.4	Serine	5.2
Arginine	2.4	Leucine	6.8
Threonine	2.5	Proline	13.7
Aspartic acid	2.9	Glutamic acid	37.3



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 กลไกเรดิคัล (radical mechanism) (ก) และกลไกนิวคลีโอฟิลิก (nucleophilic mechanism) (ข) (ดัดแปลงจาก Walsh, 2002; Auvergne et al., 2008; Kunanopparat, 2008)

**ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเตรียมพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี**

การเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพจาก

กลูเตนข้าวสาลี หากสามารถควบคุมการเชื่อมขวางได้ จะทำให้สามารถกำหนดสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีได้เช่นกัน ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่สนใจศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีน

ในพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี เช่น อุดมหมู่มีน การขึ้นรูป ชนิดของพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) และ ชนิดของสารเติมแต่ง (additive) การขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่อุดมหมู่มีนแตกต่างกันก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติที่แตกต่างกัน นอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์และสารเติมแต่งแต่ละชนิดก็จะมีอิทธิพลต่อการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนที่แตกต่างกันออกไป

### อิทธิพลของพลาสติกไซเซอร์

พลาสติกไซเซอร์มีบทบาทที่สำคัญมากในการเตรียมพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี เนื่องจากการเติมพลาสติกไซเซอร์ทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้ว (glass transition temperature; Tg) ลดลง ส่งผลให้กลูเตนข้าวสาลีหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง และขึ้นรูปได้ง่ายขึ้น (Mangavel et al., 2003; Pommet et al., 2005) เมื่อผสมกลูเตนข้าวสาลีร่วมกับพลาสติกไซเซอร์สามารถขึ้นรูปได้ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เหมือนการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป เช่น การอัดรีด (extrusion) และการกดอัด (compression) เป็นต้น (Angellier-Coussy et al., 2011) นอกจากนี้พลาสติกไซเซอร์ยังมีบทบาทที่สำคัญมากต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี โดยทั้งโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน การซึมผ่านของไอน้ำ (water vapor permeability) และการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนในกลูเตนข้าวสาลี (Pommet et al., 2003) พลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียมพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี เช่น กลีเซอรอล (glycerol) ซอบิทอล (sorbitol) น้ำตาล (sugar) เอทิลีนไกลคอล (ethylene glycol) และกรดไขมัน (fatty acid) เป็นต้น แต่กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ที่นิยมใช้มากที่สุดในการเตรียมพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี

(Pommet et al., 2005; Pan et al., 2011) เนื่องจากราคาถูก และไม่เป็นพิษ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อใช้กลีเซอรอลในปริมาณมาก ส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึง (tensile strength) และค่ามอดูลัส (modulus) ลดลง (Song et al., 2008) นอกจากนี้ยังส่งผลให้การซึมผ่านของไอน้ำมีค่าสูงขึ้น (Irission-Mangata et al., 2001) สำหรับพลาสติกไซเซอร์ชนิดไฮโดรฟิลิก (hydrophilic plasticizer) ที่มีความยาวของสายโซ่แตกต่างกัน เช่น เอทิลีนไกลคอล (ethyleneglycol) ไดเอทิลีนไกลคอล (diethyleneglycol) ไตรเอทิลีนไกลคอล (triethyleneglycol) และเตตระเอทิลีนไกลคอล (tetraethyleneglycol) ส่งผลให้พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีมีสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากจำนวนพันธะไฮโดรเจนที่เกิดกับสายโซ่โปรตีนในกลูเตนข้าวสาลีมีจำนวนไม่เท่ากัน (Mangavel et al., 2003) และนอกจากนั้นพบว่าสมบัติด้านการซึมผ่านของไอน้ำของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีลดลงเมื่อใช้กรดไขมัน เช่น กรดเฮกซานอิก (hexanoic acid) กรดเดคาโนอิก (decanoic acid) กรดลอริก (lauric acid) กรดไมริสติก (myristic acid) กรดปาล์มิติก (palmitic acid) หรือกรดสเตียริก (stearic acid) เป็น พลาสติกไซเซอร์ ในขณะที่พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่ใช้กรดแล็กติก (lactic acid) หรือกรดออกทาโนอิก (octanoic acid) เป็นพลาสติกไซเซอร์จะทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนลดลง เนื่องจากเมื่อผสมกลูเตนข้าวสาลีและกรดแล็กติก หรือกรดออกทาโนอิก ได้ของผสมที่มีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 2.4 หรือ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ซัลเฟอร์แอนไอออนที่ทำหน้าเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ของกลไกนิวคลีโอฟิลิก (รูปที่ 2) ถูกยับยั้ง จึงทำให้ปริมาณการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนลดลง แต่อย่างไรก็ตามค่าการบวมตัวใน

น้ำของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีมีค่าลดลง เมื่อใช้กรดออกทานอิกเป็นพลาสติกไซเซอร์ เนื่องจากสมบัติความไม่ชอบน้ำของกรดออกทานอิก (Pomet et al., 2005)

### อิทธิพลของอุณหภูมิ

ความร้อนหรืออุณหภูมิในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีเป็นปัจจัยที่สำคัญ ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี เนื่องจากความร้อนจะเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนผ่านพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งส่งผลให้ค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสสูงขึ้น (Chen et al., 2012) Sun et al. (2008) รายงานว่าค่าการทนต่อแรงดึงเพิ่มขึ้นจาก 0.52 MPa เป็น 6.69 MPa เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25°C เป็น 125°C ตามลำดับ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้โครงสร้างของโปรตีนเปลี่ยนไป คือ จากที่ขดเป็นเกลียวก็เกิดการคลายเกลียว ดังนั้นการเชื่อมขวางผ่านพันธะไดซัลไฟด์ระหว่างสายโซ่โปรตีนจึงเกิดได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ในขณะที่ค่าการซึมผ่านของไอน้ำลดลง 29% และการบวมตัวลดลง 71% เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 80°C เป็น 120°C เนื่องจากเกิดการเชื่อมขวางเพิ่มขึ้นทำให้สามารถขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำ (Angellier-Coussy et al., 2011)

### อิทธิพลของสารเติมแต่ง

แม้ว่าพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีมีข้อดีมากมาย เช่น ราคาถูก มีปริมาณมาก สามารถผลิตใหม่ทดแทนได้ เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ โดยถูกย่อยสลายได้หมดภายใน 36 วัน ในสภาวะการหมักที่มีออกซิเจน (aerobic fermentation) และ 50 วัน ในดินสำหรับ

เพาะปลูก (farmland soil) (Domenek et al., 2004) แต่พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีก็ยังคงมีข้อด้อยหลายประการ เช่น ขึ้นรูปยาก สมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนต่ำ จากข้อด้อยดังกล่าวจึงมีงานวิจัยที่สนใจศึกษาหาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี โดยแนวทางที่ได้รับความนิยมมากที่สุดแนวทางหนึ่งคือ การผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี โดยสารเติมแต่งที่นิยมใช้ เช่น เส้นใย (fiber) ดินเหนียว (clay) น้ำมัน (oil) และพอลิเมอร์สังเคราะห์ (synthesis polymer) เป็นต้น

#### เส้นใย (fiber)

เส้นใยที่นิยมใช้ปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพ จากกลูเตนข้าวสาลีส่วนใหญ่เป็นเส้นใยที่ได้จากธรรมชาติ (natural fiber) เช่น เส้นใยกัญชง (hemp fiber) เส้นใยปอกระเจา (jute fiber) เส้นใยไม้ (wood fiber) และกาบมะพร้าว (coconut coir fiber) เป็นต้น เส้นใยธรรมชาติเหล่านี้มีข้อดีหลายประการ เช่น ราคาถูก หาได้ง่าย มีความแข็งแรง น้ำหนักเบา ความหนาแน่นต่ำ ปลูกใหม่ทดแทนได้ สามารถย่อยสลายได้ง่ายในธรรมชาติ ไม่ทำให้เกิดรอยขีดข่วนและการสึกกร่อนของเครื่องจักรในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่ผสมเส้นใยปอกระเจาในอัตราส่วน 40 wt% และใช้น้ำเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดูลัสสูงสุด คือ 69 MPa และ 7.7 GPa ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบสมบัติระหว่างพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีผสมเส้นใยปอกระเจา และพอลิโพรพิลีน (polypropylene) ผสมเส้นใยปอกระเจาในอัตราส่วนเดียวกัน พบว่าเมื่อผสมเส้นใยปอกระเจาในอัตราส่วน 40 wt% ค่าการทนต่อแรงดึง และค่ามอดูลัส ของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตน

ข้าวสาลีมีค่าสูงกว่าพอลิโพรพิลีนประมาณ 2 เท่า (Reddy and Yang, 2011) และเมื่อผสมเส้นใยกับของหรือกาบมะพร้าวกับกลูเตนข้าวสาลี และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ พบว่าพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีมีค่ามอดูลัสสูงชัน และค่าการดูดความชื้นลดลง (Kunanopparat et al., 2008a; Muensri et al., 2011) จากการศึกษาของ Kunanopparat et al. (2008b) พบว่าประสิทธิภาพในการเสริมแรงของเส้นใยธรรมชาติเกี่ยวข้องกับปริมาณลิกนิน ซึ่งโดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ปริมาณขององค์ประกอบหลักทั้ง 3 ชนิดขึ้นอยู่กับชนิดและถิ่นกำเนิดของพืช โครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ (polysaccharide) แต่โครงสร้างของลิกนินมีลักษณะเป็นโครงสร้างร่างแห 3 มิติของพอลิฟีนอลิก (polyphenolic) (Kaewtatip et al., 2010) ถึงแม้ว่าเส้นใยธรรมชาติจะมีปริมาณลิกนินอยู่น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับเซลลูโลสซึ่งมีอัตราส่วนมากที่สุด และรองลงมาคือเฮมิเซลลูโลส แต่ลิกนินมีอิทธิพลอย่างมากต่อการยึดเกาะกันระหว่างกลูเตนเมทริกซ์และเส้นใยธรรมชาติ เนื่องจากโครงสร้างพอลิฟีนอลิกของลิกนินสามารถเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับโปรตีนได้ดี ทำให้ลิกนินสามารถแสดงสมบัติเป็นสารเสริมสภาพเข้ากันได้ (interfacial compatibilizer) ระหว่างกลูเตนกับเส้นใยธรรมชาติ และนอกจากนี้พบว่าลิกนินยังแสดงสมบัติเป็น radical scavenger ทำหน้าที่จับปรีแรดิคัลและแอนไอออนที่เกิดขึ้นในระหว่างการแปรรูป ภายใต้กระบวนการให้ความร้อน และแรงเฉือน ซึ่งส่งผลให้การเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนลดลง (Kaewtatip et al., 2010)

### มอนท์มอริลโลไนท์ (montmorillonite)

มอนท์มอริลโลไนท์เป็นดินเหนียวชนิดหนึ่งที่ไม่นอกจากจะมีราคาถูก และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ยังมีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์เนื่องจากโครงสร้างของมอนท์มอริลโลไนท์ประกอบด้วยชั้นซิลิเกตที่มีขนาด 1 นาโนเมตร ที่จัดเรียงตัวซ้อนกันอย่างเป็นระเบียบ โดยชั้นซิลิเกตเหล่านี้สามารถแตกออกได้ง่าย (Mondragon et al., 2009) และเมื่อชั้นซิลิเกตแตกออกจะเกิดการกระจายตัวในระดับนาโนในพอลิเมอร์เมทริกซ์ เรียกว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโน (nanocomposite) ชั้นซิลิเกตเหล่านี้เป็นสารเสริมแรงที่มีขนาดเล็กระดับนาโน ทำให้มีพื้นที่ผิวมากส่งผลให้เกิดอันตรกิริยากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี จึงมีมีประสิทธิภาพสูงในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์แม้ใช้ในปริมาณน้อย (Chivrac et al., 2010) ดังนั้นจึงมีการนำมอนท์มอริลโลไนท์มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี การกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของชั้นซิลิเกตของมอนท์มอริลโลไนท์ในกลูเตนเมทริกซ์ ทำให้สามารถขัดขวางการซึมผ่านของไอน้ำ และก๊าซ เช่น ออกซิเจน และคาร์บอนไดร็อกไซด์ได้ และยังปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนด้วยเช่นกัน นอกจากนี้พบว่าฟิล์มวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของกลูเตนข้าวสาลีและมอนท์มอริลโลไนท์จะเสื่อมสภาพที่อุณหภูมิสูงชันประมาณ 10°C เมื่อมีปริมาณมอนท์มอริลโลไนท์เพียง 5 wt% (Tunc et al., 2007) นอกจากนี้มอนท์มอริลโลไนท์ถูกใช้ในการหน่วงการเสื่อมสภาพของแคปซูลกลูเตนข้าวสาลีที่ใช้บรรจุสารเคมีทางการเกษตร เช่น ปุ๋ย หรือยาฆ่าแมลง เนื่องจากพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีมีอัตราการสลายตัว (degradation rate) ที่สูง ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นแคปซูลสำหรับบรรจุสารเคมีทาง

การเกษตร ดังนั้นเพื่อป้องกันการระเหยหรือสะสมของ สารเคมีเหล่านี้ในแหล่งน้ำ หรือดินในปริมาณที่มาก เกินไป การเติมมอนท์มอริลโลไนท์ทำให้การปลดปล่อย สารเคมีเหล่านี้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจาก มอนท์มอริลโลไนท์ที่เติมลงไปมีผลต่อจลนพลศาสตร์ ของการย่อยสลายทางชีวภาพ (kinetic of biodegradation) ของ แคมปูสลูกูเตน ข้าวสาลี (Chevallard et al., 2012)

### น้ำมัน (oil)

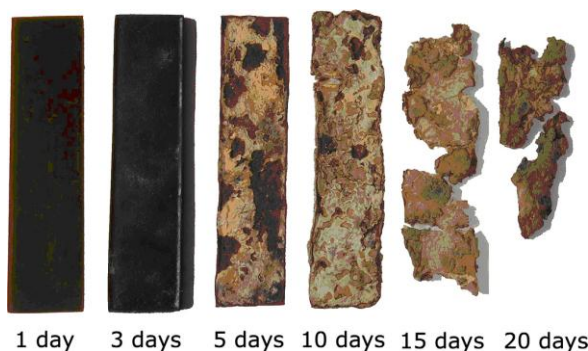
จากข้อจำกัดของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตน ข้าวสาลี คือ ไรต่อความชื้น การเติมน้ำมัน (oil) เช่น น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ (epoxidized soybean oil; ESO) หรือ น้ำมันละหุ่ง (castor oil) ซึ่งมี โครงสร้างเป็นไฮโดรโฟบิก ทำให้สามารถลดการซึมผ่าน ของไอน้ำในพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีได้ โดย น้ำมันถั่วเหลืองอีพอกไซด์ทำให้พลาสติกชีวภาพ จากกลูเตนข้าวสาลีมีความเป็นไฮโดรโฟบิกเพิ่มขึ้นแต่ไม่ มีผลต่อการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีน จึงไม่ทำให้ สมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี ลดลง (Zhang et al., 2010) แต่น้ำมันละหุ่งนอกจาก เพิ่มความเป็นไฮโดรโฟบิกให้แก่พลาสติกชีวภาพจาก กลูเตนข้าวสาลีแล้ว เมื่อใช้อัตราส่วนของกลีเซอรอลต่อ

น้ำมันละหุ่งเป็น 4:6 จะได้พลาสติกชีวภาพจากกลูเตน ข้าวสาลีที่มีความแข็งแรง เนื่องจากที่อัตราส่วนดังกล่าว ส่งผลให้เกิดอันตรกิริยาไฮโดรโฟบิก (hydrophobic interaction) ได้ดีทำให้เกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่ โปรตีนเพิ่มขึ้น (Song and Zheng, 2008)

### สารเติมแต่งอื่น ๆ

เส้นใยบะซอลท์ (basalt fiber) ทำให้ พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีดูความชื้นลดลง และจากการศึกษาการย่อยสลายพบว่าพลาสติกชีวภาพ จากกลูเตนข้าวสาลีที่ไม่ผสมเส้นใยบะซอลท์ย่อยสลาย ได้หมดภายในระยะเวลา 50 วัน แต่เมื่อผสมเส้นใย บะซอลท์ แม้ว่าถูกฝังดินไว้เป็นเวลา 40 วัน พลาสติก ชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลียังคงมีค่ามอดูลัสเท่ากับ 1 GPa (Ye et al., 2006)

อะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ (aliphatic polyester) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และย่อย สลายได้ง่ายในธรรมชาติ แต่ข้อเสียของพอลิเมอร์ชนิดนี้ คือ มีราคาแพง ดังนั้นเมื่อผสมอะลิฟาติกพอลิเอสเทอร์ กับกลูเตนข้าวสาลี ทำให้ได้พลาสติกที่มีราคาถูก ย่อย สลายได้ในธรรมชาติ มีสมบัติเชิงกลและสมบัติทาง ความร้อนสูง (Lim et al., 1999)



รูปที่ 3 การเสื่อมสภาพของวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของกลูเตนข้าวสาลีและแอตตาพัลไจต์ 7 wt% ที่ถูกฝังดิน เป็นระยะเวลาต่าง ๆ (Yuan et al., 2010)



Zuo et al. (2008) ศึกษาการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) เป็นสารเสริมแรง (filler) สำหรับพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีพบว่าเมื่อผสมแคลเซียมคาร์บอเนต 10 wt% ทำให้พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีมีค่ามอดูลัสและค่าการทนต่อแรงดึงสูงขึ้น ในขณะที่การดูดความชื้นและค่าการยืดตัวลดลง

เมื่อใช้ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) เช่น โซเดียมไบซัลไฟท์ (sodium bisulfite) โซเดียมซัลไฟท์ (sodium sulfite) และกรดไตรโกลโคลิค (thioglycolic acid) พบว่าทำให้ค่าการไหลเหนียว (viscous flow) ของกลูเตนข้าวสาลิลดลง แต่ไม่ขัดขวางการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีน จึงไม่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลี (Min et al., 2008)

แอตตาพัลไจต์ (attapulgit) เป็นสารอนินทรีย์ที่มีรูปร่างแบบแท่ง (rod-like) มีขนาดเล็กเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นาโนเมตร และยาว 100 นาโนเมตร วัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของกลูเตนข้าวสาลีและแอตตาพัลไจต์ในปริมาณไม่เกิน 7 wt% จะมีค่ามอดูลัสที่สูงกว่าพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่ไม่ผสมแอตตาพัลไจต์ แต่เมื่อปริมาณแอตตาพัลไจต์เพิ่มขึ้นจะเกิดการเกาะกลุ่มกันส่งผลให้ค่ามอดูลัสลดลงจากการศึกษาของ Domenek et al. (2004) พบว่าพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีย่อยสลายได้หมดเมื่อฝังดินเป็นเวลา 50 วัน แต่จากการศึกษาของ Yuan et al. (2010) พบว่าวัสดุเชิงประกอบระดับนาโนของกลูเตนข้าวสาลีและแอตตาพัลไจต์ 7 wt% สามารถสังเกตเห็นการเสื่อมสภาพได้อย่างชัดเจนเมื่อฝังดินเป็นเวลา 15 วัน และเมื่อฝังดินเป็นเวลา 20 วัน น้ำหนักของชิ้นตัวอย่างลดลงมากถึง 80%

## บทสรุป

กลูเตนข้าวสาลีเป็นวัสดุจากธรรมชาติที่มีศักยภาพสูงสามารถนำมาทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันได้ แต่ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีคือ การเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนที่เกิดผ่านพันธะไดซัลไฟด์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนให้มีปริมาณที่เหมาะสม เพื่อให้ได้พลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีที่มีสมบัติที่ดีและสม่ำเสมอเหมาะแก่การนำไปใช้งาน โดยตัวแปรที่สำคัญที่มีอิทธิพลต่อการเกิดการเชื่อมขวางของสายโซ่โปรตีนคือ ชนิดของพลาสติกไซเซอร์ สารเติมแต่ง และอุณหภูมิในการขึ้นรูป ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติของพลาสติกชีวภาพจากกลูเตนข้าวสาลีให้เหมาะแก่การผลิตเชิงอุตสาหกรรมนั้น ถือได้ว่าเป็นแนวทางที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

## เอกสารอ้างอิง

- Angellier-Coussy, H., Gastaldi, E., Gontard, N. and Guillard, V. (2011). Influence of processing temperature on the water vapour transport properties of wheat gluten based agromaterials. *Industrial Crops and Products* 33: 457-461.
- Auvergne, R., Morel, M. -H., Menut, P., Gianl, O., Guilbert, S. and Robin, J. -J. (2008). Reactivity of wheat gluten protein during mechanical mixing: Radical and Nucleophilic reactions for the addition of molecules on sulfur. *Biomacromolecules* 9: 664-671.
- Chen, L., Reddy, N., Wu, X. and Yang, Y. (2011). Thermoplastic films from wheat proteins. *Industrial Crops and Products* 35: 70-76.
- Chevillard, A., Angellier-Coussy, H., Cuq, B., Guillard, V., Cesar, G., Gontard, N. and Gastaldi, E. (2012).

- Investigating the biodegradation pattern of an ecofriendly pesticide delivery system based on wheat gluten and organically modified montmorillonites. *Polymer Degradation and Stability*. (in press).
- Chivrac, F., Angellier-Coussy, F., Guillard, V., Pollet, E. and Averous, L. (2010). How does water diffuse in starch/montmorillonite nanobiocomposite materials? *Carbohydrate Polymers* 82: 128-135.
- Domenek, S., Feuilloley, P., Gratraud, J., Morel, M. -H. and Guilbert, S. (2004). Biodegradability of wheat gluten based bioplastics. *Chemosphere* 54: 551-559.
- Hoseney, R. C. (1998). Principles of cereal science and technology. 2<sup>nd</sup> edition. USA: The American Association of Cereal Chemists, Inc.
- Irission-Mangata, J., Bauduin, G., Boutevin, B. and Gontard, N. (2001). New plasticizers for wheat gluten films. *European Polymer Journal* 37: 1533-1541.
- Kaewtatip, K., Menut, P., Auvergne, R., Tanrattanakul, V., Morel, M., Guilbert, S. (2010). Interactions of kraft lignin and wheat gluten during biomaterial processing: evidence for the role of phenolic groups. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 58: 4185-4192.
- Kunanopparat, T. (2008). Reactivity of Kraft lignin/wheat gluten blends upon biomaterials processing. Thesis. SupAgro, Montpellier, France.
- Kunanopparat, T., Menut, P., Morel, M. -H. and Guilbert, S. (2008a). Plasticized wheat gluten reinforcement with natural fibers: Effect of thermal treatment on the fiber/matrix adhesion. *Composites: Part A* 39: 1787-1792.
- Kunanopparat, T., Menut, P., Morel, M. -H. and Guilbert, S. (2008b). Reinforcement of plasticized wheat gluten with natural fibers: From mechanical improvement to deplasticizing effect. *Composites: Part A* 39: 777-785.
- Lagrain, B., Goderis, B., Brijs, K. and Delcour, JA. (2010). Molecular basis of processing wheat gluten toward biobased materials. *Biomacromolecules* 11: 533-541.
- Lim, S., Jung, I., Lee, K. and Jin, B. (1999). Structure and properties of biodegradable gluten/aliphatic polyester blends. *European Polymer Journal* 35: 1875-1881.
- Mangavel, C., Barbot, J., Gueaguen, J. and Popineau, Y. (2003). Molecular determinants of the influence of hydrophilic plasticizers on the mechanical properties of cast wheat gluten films. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51: 1447-1452.
- Min, Z., Song, Y. and Zheng, Q. (2008). Influence of reducing agents on properties of thermo-molded wheat gluten bioplastics. *Journal of Cereal Science* 48: 794-799.
- Mondragon, M., Hernandez, E., Rivera-Armenta, J. and Rodríguez-Gonzalez, F. (2009). Injection molded thermoplastic starch/natural rubber/clay nanocomposites: Morphology and mechanical properties. *Carbohydrate Polymers* 77: 80-86.
- Morel, M. -H., Redl, A., Guilbert, S. (2002). Mechanism of heat and shear mediated aggregation of wheat gluten protein upon mixing. *Biomacromolecules* 3: 488-497.
- Muensri, P., Kunanopparat, T., Menut, P. and Sriwattanayotin, S. (2011). Effect of lignin removal on the properties of coconut coir fiber/wheat gluten biocomposite. *Composites: Part A* 42: 173-179.

- Pan, Y., Wang, X. and Yuan, Q. (2011). Thermal, Kinetic, and Mechanical Properties of Glycerol-Plasticized Wheat Gluten. *Journal of Applied Polymer Science* 121: 797-804.
- Pommet, M., Redl, A., Morel, M. -H. and Guilbert, S. (2003). Study of wheat gluten plasticization with fatty acids. *Polymer* 44: 115-122.
- Pommet, M., Redl, A., Morel, M. -H. and Guilbert, S. (2005). Intrinsic influence of various plasticizers on functional properties and reactivity of wheat gluten thermoplastic materials. *Journal of Cereal Science* 42: 81-91.
- Reddy, N. and Yang, Y. (2011). Biocomposites developed using water-plasticized wheat gluten as matrix and jute fibers as reinforcement. *Polymer International* 60: 711-716.
- Song, Y., Zheng, Q. (2008). Improved tensile strength of glycerol-plasticized gluten bioplastic containing hydrophobic liquids. *Bioresource Technology*. 99: 7665-7671.
- Song, Y. and Zheng, Q., Liu, C. (2008). Influence of glycerol content on properties of wheat gluten/hydroxyethyl cellulose biocomposites. *Chemical Research in Chinese Universities* 24: 644-647.
- Sun, S., Song, Y. and Zheng, Q. (2008). Thermo-molded wheat gluten plastics plasticized with glycerol: Effect of molding temperature. *Food Hydrocolloids* 22: 1006-1013.
- Tunc, S., Angellier, H., Cahyana, Y., Chalier, P., Gontard, N. and Gastaldi, E. (2007). Functional properties of wheat gluten/montmorillonite nanocomposite films processed by casting. *Journal of Membrane Science* 289: 159-168.
- Verbeek, C. and Berg, L. (2010). Extrusion processing and properties of protein-based thermoplastics. *Macromolecular Materials and Engineering* 295: 10-21.
- Walsh, G. (2002). *Proteins biochemistry and biotechnology*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Ye, P., Reitz, L., Horan, C. and Parnas, R. (2006). Manufacture and Biodegradation of Wheat Gluten/Basalt Composite Material. *Journal of Polymers and the Environment* 14: 1-7.
- Yuan, Q., Lu, W. and Pan, Y. (2010). Structure and properties of biodegradable wheat gluten/attapulgite nanocomposite sheets. *Polymer Degradation and Stability* 95: 1581-1587.
- Zhang, X., Do, M., Kurniawan, L. and Qiao, G. (2010). Wheat gluten-based renewable and biodegradable polymer materials with enhanced hydrophobicity by using epoxidized soybean oil as a modifier. *Carbohydrate Research* 345: 2174-2182.
- Zuo, M., Lai, Z., Song, Y. and Zheng, Q. (2008). Preparation and properties of gluten/calcium carbonate composites. *Chinese Chemical Letters* 19: 992-995.

