

การดัดแปรวัตถุดิบด้วยวิธีทางฟิสิกส์เพื่อการผลิตอาหารสัตว์ Physical Modification of Raw Materials for Feed Production

การุณ ทองประจุแก้ว^{1*} และ อุทัยวรรณ โกวิทวดี²
Karun Thongprajukaew^{1*} and Uthaiwan Kovitvadhi²

บทคัดย่อ

วัตถุดิบอาหารและผลพลอยได้ทางการเกษตรหลายชนิดมีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ไม่เหมาะสมต่อการย่อยของเอนไซม์ในสัตว์ การใช้วัตถุดิบดังกล่าวเพื่อเป็นส่วนผสมของอาหารจึงใช้ได้ปริมาณจำกัดเนื่องจากสัตว์ย่อยได้ยาก และนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยส่งผลให้สัตว์มีการเจริญเติบโตช้า และการรอดชีวิตต่ำ การดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบด้วยวิธีทางฟิสิกส์ เช่น การต้ม การนึ่งด้วยความดันไอน้ำ การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง คลื่นไมโครเวฟ รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบ โดยเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของวัตถุดิบให้เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ย่อยอาหาร ลดปริมาณสารต้านโภชนาการโดยไม่ทำให้องค์ประกอบเชิงปริมาณของวัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังนั้น การดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรโดยวิธีทางฟิสิกส์จึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ในอนาคต

Abstract

Many feedstuffs and agricultural by-products have inappropriate physicochemical properties for digestion by animal enzymes. The use of these raw materials as animal feed ingredients has been limited due to difficulties in digestion and utilization. This results in the reduction in growth and survival of animal. Structural modifications of the raw materials using physical methods such as boiling, autoclaving, ultrasonic wave, microwave irradiation, gamma irradiation and electron beam cause increase in animal digestibility. Physicochemical properties of raw materials are altered for optimizing digestive enzyme hydrolysis and also reducing antinutritional compounds. However, quantitative analysis and chemical compositions of raw materials are unchanged. Therefore, structural modification of raw materials or agricultural by-products using physical methods might be important for developing feed industry in the future.

คำสำคัญ: การดัดแปรโครงสร้าง อาหารสัตว์ ประสิทธิภาพการย่อย สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์

Keyword: Structural Modification, Feed, Digestibility, Physicochemical Property

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* Corresponding Author, Tel 0-7428-8562, E-mail: karun.t@psu.ac.th

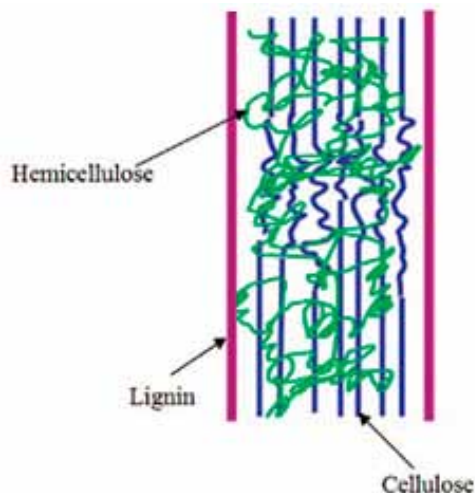
1. บทนำ

วัตถุดิบอาหารสัตว์จากพืช (Plant Feedstuffs) และผลพลอยได้ทางการเกษตร (Agricultural By-Products) หลายชนิด มีคุณค่าทางโภชนาการค่อนข้างต่ำ และมีองค์ประกอบที่สัตว์ย่อยได้ยาก หรือไม่สามารถย่อยได้ เช่น เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) [1]-[4] การใช้วัตถุดิบดังกล่าวเพื่อเป็นองค์ประกอบในอาหารจะทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตช้า อัตราการเจริญพันธุ์ และการรอดชีวิตต่ำ นอกจากนี้ วัตถุดิบดังกล่าวยังมีสารต้านโภชนาการ (Antinutritional Compounds) หลายชนิดที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของสัตว์ เช่น สารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Inhibitors) สารต้านการกินอาหาร (Antifeedants) เป็นต้น รวมถึงสารพิษ (Toxins) ที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหาร ซึ่งสารดังกล่าวทำให้สัตว์ใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารได้ในปริมาณที่จำกัด [5]-[7]

การศึกษาเพื่อพัฒนาวัตถุดิบอาหารสัตว์หลายชนิด พบว่าการดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบอาหารและผลพลอยได้ทางการเกษตร ให้เหมาะสมต่อการย่อยของเอนไซม์ จะทำให้สัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากอาหารได้มากขึ้น [5], [6], [8]-[10] การดัดแปรวัตถุดิบอาหารมีหลายวิธี ได้แก่ วิธีทางกล (Mechanical Modification) ชีวภาพ (Biological Modification) เคมี (Chemical Modification) ฟิสิกส์ (Physical Modification) หรือใช้หลายวิธีร่วมกัน สำหรับวิธีการดัดแปรที่สะดวก รวดเร็ว สามารถใช้กับวัตถุดิบอาหารได้ในปริมาณมาก และไม่ต้องกำจัดสารเคมีตกค้าง คือการดัดแปรด้วยวิธีทางฟิสิกส์ [4] ได้แก่ การต้ม การนึ่ง ด้วยแรงดันไอน้ำ การใช้คลื่นความถี่สูง คลื่นไมโครเวฟ รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน เป็นต้น ดังนั้น การดัดแปรจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบอาหารให้ดีขึ้น และสัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

2. โครงสร้างที่เป็นอุปสรรคต่อการย่อยของเอนไซม์

วัตถุดิบหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรจากพืชมีผนังเซลล์ที่เป็นลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส ที่มีการจัดเรียงตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (ดัดแปลงจาก [4])

ซึ่งสัตว์ทุกชนิดไม่สามารถย่อยได้ การย่อยที่เกิดขึ้นในกระเพาะรวมของสัตว์จึงเกิดจากเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ในรูเมน (Rumen) และไส้ติ่ง (Caecum) เท่านั้น ลิกโนเซลลูโลสมีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

องค์ประกอบดังกล่าวมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยเซลลูโลสหน่วยย่อยจะจับตัวกันอย่างหนาแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) เป็นโครงสร้างที่เรียกว่าไมโครไฟบริล (Microfibril) และยึดเหนี่ยวกับลิกนินด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) การจัดเรียงตัวของเซลลูโลสในรูปแบบดังกล่าวอาจทำให้เกิดผลึก (Crystalline) ทำให้น้ำวัตถุดิบอาหารไปใช้ประโยชน์ได้น้อย เนื่องจากเอนไซม์สามารถย่อยเซลลูโลสที่เรียงตัวแบบไร้ระเบียบ (Amorphous Form) ได้ดีกว่า [11] ดังนั้นการสลายโครงสร้างของเซลลูโลส (Cellulose Depolymerization) และลิกนิน (Delignification) จึงเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบได้ ทั้งนี้เนื่องจากการทำลายโพลิเมอร์ที่กีดขวาง (Building Block) จะทำให้องค์ประกอบของสารที่อยู่ในวัตถุดิบอาหารเกิดการ

กระจายตัว ส่งผลให้เอนไซม์จากสัตว์ย่อยได้ดีขึ้น สำหรับองค์ประกอบของโพลีเมอร์ที่สำคัญ และพบในโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส ได้แก่

1. เซลลูโลส เป็นโฮโมโพลีเมอร์ (Homopolymer) ของโพลีแซคคาไรด์ที่พบมากที่สุดในผลพลอยได้ทางการเกษตร [4] เป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ และเรียงตัวเป็นเส้นตรง เซลลูโลสมีหน่วยย่อยเป็นกลูโคส ที่เชื่อมต่อกันด้วย β 1-4 Glycosidic Bond โมเลกุลของเซลลูโลสจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) กับวงแหวนของออกซิเจนในโมเลกุลถัดไป

2. เฮมิเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลีเมอร์ (Heteropolymer) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลเพนโทส (Pentose) และเฮกโซส (Hexose) และอาจมีองค์ประกอบของน้ำตาลอื่น เช่น ไซโลส (Xylose) อะราบินอส (Arabinose) แมนโนส (Mannose) กาแลกโทส (Galactose) และแรมนโนส (Rhamnose) เป็นต้น การเชื่อมต่อนี้ระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลจะอาศัย β 1-4 Glycosidic Bond

3. ลิกนิน เป็นสารเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ Phenyl Propionic Alcohol ได้แก่ Coniferyl Alcohol, Coumaryl Alcohol และ Sinapyl Alcohol การเชื่อมต่อของโมเลกุลลิกนินจะอาศัยพันธะอีเทอร์ที่เกิดขึ้นระหว่าง Alkyl-Aryl, Alkyl-Alkyl และ Aryl-Aryl ของสารประกอบฟีนอลหน่วยย่อย (Phenolic Monomer) [4]

3. การดัดแปรโครงสร้างด้วยวิธีทางฟิสิกส์

การดัดแปรวัตถุดิบอาหารหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรโดยวิธีทางฟิสิกส์ที่นิยมใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์ มีดังนี้

3.1 การต้ม (Boiling) และการนึ่งด้วยแรงดันไอน้ำ (Autoclaving)

การต้มมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนมีค่าสูงขึ้น [6] ขณะที่การนึ่งที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าทำให้ประสิทธิภาพ

การย่อยโปรตีน และคาร์โบไฮเดรต [6], [7] สูงขึ้นเช่นกัน การศึกษาในวัตถุดิบอาหารพบว่า การต้มและนึ่งด้วยความดันไอน้ำสามารถลดปริมาณแทนนิน (Tannin) กรดไฟติก (Phytic Acid) ซาโปนิน (Saponin) และสารยับยั้งการทำงานของทริปซิน (Trypsin Inhibitor) ได้ [7], [12] ขณะเดียวกันกระบวนการดังกล่าวมีผลต่อการเกิดเจลลิตินในเซชันของแป้ง โดยเปลี่ยนแปลงปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (Rapidly Digestible Starch) แป้งที่ย่อยได้ช้า (Slowly Digestible Starch) และแป้งที่ทนต่อการย่อย (Resistant Starch) ซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสย่อยได้ดีขึ้น [13]

3.2 คลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonic Wave)

คลื่นเสียงความถี่สูงนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตและตัดแปรรอาหาร [14] การศึกษาพบว่าคลื่นเสียงความถี่สูงทำให้เกิดการคืนตัวของแป้งสุก (Retrogradation) [15] การแตกหักของกากตะกอน (Sludge) ซึ่งมีผลทำให้มีการกระจายตัว และเกิดการย่อยทางเคมีและชีวภาพที่สูงขึ้น [16] นอกจากนี้ คลื่นเสียงความถี่สูงยังใช้เพื่อทำลายผนังเซลล์ในการสกัดสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ [17] หรือทำลายผนังเซลล์เพื่อทำให้สัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากสารประกอบภายในเซลล์ให้มากขึ้น [18] อย่างไรก็ตาม การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างผลึกของโปรตีน (Crystallization) [19], [20] ซึ่งอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในวัตถุดิบมีค่าลดลง

3.3 คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Irradiation)

คลื่นไมโครเวฟเป็นพลังงานที่ไม่มีการแตกตัวเป็นไอออน (Non-Ionizing Energy) สามารถทำให้เกิดความร้อนกับวัตถุจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นและรวดเร็ว และทำให้เกิดความร้อนทั้งบริเวณพื้นผิว (Surface) และภายใน (Interior) ของตัวกลาง [21] อย่างไรก็ตาม ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบอาหารโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ คือ ความแรงของคลื่น ระยะเวลาที่ใช้ และความเข้มข้นของวัตถุดิบ [22]

การใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีการที่ช่วยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบอาหารให้มีประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนใน Canola Meal [8] Moth Bean [23], Bengal Gram, Green Gram, Horse Gram [3] และ Chick Pea [6] และคาร์โบไฮเดรตใน Moth Bean [23], Bengal Gram, Green Gram และ Horse Gram [3] ที่ดีขึ้น กระบวนการดังกล่าวมีผลต่อการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินซึ่งอาจใช้ร่วมกับต่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวให้สูงขึ้น [24]

3.4 รังสีแกมมา (Gamma Irradiation)

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดพลังงานโดยการแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing Energy) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานเพื่อให้อะตอมเกิดความเสถียร รังสีแกมมาที่ใช้สำหรับอุตสาหกรรมอาหารมักมีแหล่งกำเนิดมาจากซีเซียม-137 หรือโคบอลต์-60 [3] การใช้รังสีแกมมาเป็นวิธีการที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน [3], [5], [10] และคาร์โบไฮเดรต [9], [25] ให้กับวัตถุดิบอาหารได้ เนื่องจากระบวนการดังกล่าวมีผลต่อการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลส [24] และผนังเซลล์ [3] ทำให้มีการลดลงของ Neutral Detergent Fiber, Acid Detergent Fiber และ Acid Detergent Lignin เพิ่มสมบัติการละลายน้ำ [9] ลดสารต้านโภชนาการ [5], [10] และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีน โดยการสลาย Disulphide Bond, Hydrogen Bond, Ionic Interaction และ Hydrophobic Interaction [26] ซึ่งมีผลให้เอนไซม์สามารถย่อยได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การใช้รังสีแกมมาในระดับสูงอาจทำให้โปรตีนเกิดการ Crosslink และจับตัวกันแน่น ทำให้มีการย่อยที่ลดลงได้ [27] การใช้รังสีแกมมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยนิยมศึกษาในวัตถุดิบจากพืชเนื่องจากมีโครงสร้างของโพลีเมอร์ที่ซับซ้อน ขณะที่การใช้กับวัตถุดิบจากสัตว์มักมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (Sulfur-Containing Amino Acid) และกรดไขมัน ทำให้วัตถุดิบอาหารเกิด

กลิ่นเฉพาะตัว [28]

3.5 ลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam)

ลำแสงอิเล็กตรอนมีการประยุกต์ใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อโรค (Decontamination) และยับยั้งการเจริญของไข่และตัวอ่อนแมลง (Disinfestation) นอกจากนี้ ยังใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของอาหารหรือผลผลิตทางการเกษตร [29], [30] การศึกษาในเมล็ดข้าวฟ่าง [31] และ Canola meal [3] พบว่าการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนโดยไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลง แต่มีผลทำให้ปริมาณสารต้านโภชนาการลดลง ขณะที่การศึกษาในฟางข้าว พบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโดยการทำให้เกิดรอยแผลบนพื้นผิวของวัตถุดิบอาหารเปลี่ยนแปลงปริมาณผลึก และช่วยลดปริมาณกลูแคนไซแลน และลิกนินได้ [32]

นอกจากการดัดแปรวัตถุดิบอาหารโดยวิธีการหลักแล้ว (3.1–3.5) การดัดแปรโดยวิธีทางฟิสิกส์อื่นๆ ที่มีรายงานการใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ได้แก่ การบด (Milling) การใช้ความร้อนร่วมกับไอน้ำ (Hydrothermal) เอกซ์ทรูชัน (Extrusion) [33] และการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อทำให้เกิดรูรั่ว (Electroporation) [18] เป็นต้น ซึ่งผลผลิตที่ผ่านการดัดแปรเหล่านี้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น น้ำตาลรีดิวส์ (Reducing Sugar) เอนไซม์ (Enzyme) น้ำมัน (Biofuel) กรดอินทรีย์ (Organic Acid) ปุ๋ยอินทรีย์ (Compost) อาหาร (Food) ยา (Medicine) และตัวดูดซับทางชีวภาพ (Biosorbent) เป็นต้น นอกเหนือจากการผลิตอาหารสัตว์ได้เช่นกัน [24]

4. วิธีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์และชีวภาพ

วัตถุดิบอาหารที่ผ่านการดัดแปรโครงสร้างจะมีสมบัติทางกายภาพและชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งวิธีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์และชีวภาพของวัตถุดิบอาหาร ที่นิยมตรวจสอบมีดังนี้

4.1 การตรวจสอบสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของวัตถุดิบอาหาร มีดังนี้

4.1.1 เจลาติไนเซชัน (Gelatinization) เป็นกระบวนการที่แบ่งเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติให้มีลักษณะใสและหนืดโดยการใช้ความร้อน มีผลต่อการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้ง ทำให้มีการละลายน้ำได้ดีขึ้น และสัตว์น้ำสามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตได้ดีขึ้น [34], [35] การตรวจสอบการเจลาติไนซ์ของวัตถุดิบอาศัยสมบัติการละลายของแป้งในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ [2] หรือศึกษาโดยใช้ Rapid Visco Analysis (RVA) [36], Differential Scanning Calorimetry (DSC) หรือ Polarized Light Microscope [32]

4.1.2 การละลายน้ำ (Water Solubility) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงส่วนอสัณฐาน (Amorphous Region) ของอาหาร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันน้อย การจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ให้สามารถเกิดปฏิกิริยารับน้ำได้มากขึ้น (Hydration) สมบัติดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการเจลาติไนซ์ของแป้งและประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง (*In Vitro* Digestibility) [9], [34], [36]

4.1.3 โครงสร้างพื้นผิว (Surface Structure) การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัตถุดิบอาหารมีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์ของสัตว์ โดยวัตถุดิบอาหารที่มีพื้นผิวผิวมากจะทำให้เอนไซม์สามารถย่อยได้ดี [32], [34] การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวของอาหารสามารถศึกษาโดยใช้ Scanning Electron Microscope (SEM) [37] หรือ Atomic Force Microscope (AFM) [2]

4.1.4 ความเป็นผลึก (Crystallinity) เป็นสมบัติของอาหารที่มีโครงสร้างภายในจับตัวกันแน่น และเป็นระเบียบ เพื่อป้องกันการกระจายตัวและการละลายน้ำ มีผลทำให้การไฮโดรไลสของเอนไซม์เกิดขึ้นได้น้อย [36] การศึกษาความเป็นผลึกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการย่อยมักใช้รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ได้จาก X-Ray Diffractometer [9], [36], [37] ซึ่งสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของสารในเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ขนาดของผลึก (Crystallite Size) ความเครียดระดับจุลภาค

(Microstrain) และสามารถเปรียบเทียบกับวิภาคของโครงสร้างผลึกกับฐานข้อมูลมาตรฐานได้ (Phase Analysis)

4.2 การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบอาหาร

การดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบอาหารมักไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบเชิงปริมาณ แต่มักมีผลต่อองค์ประกอบเชิงคุณภาพที่มีผลต่อการย่อย [3], [5], [10], [38] อย่างไรก็ตาม การดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบที่อาศัยน้ำเป็นตัวกลาง อาจทำให้คุณค่าทางโภชนาการของวัตถุดิบลดลง เนื่องจากการละลายของสารอาหารในตัวกลาง [1], [6] ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการอบเพื่อระเหยน้ำที่อุณหภูมิต่ำ หรือใช้เครื่องทำแห้งแบบเยือกแข็ง (Freeze Dryer) [34] สำหรับองค์ประกอบหลักที่นิยมศึกษาเพื่อพัฒนาวัตถุดิบหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรเพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์คือเยื่อใย เนื่องจากแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของลิกโนเซลลูโลส [1]-[3] สำหรับองค์ประกอบอื่นที่นิยมศึกษาเช่นกัน ได้แก่ กรดไขมัน [34] น้ำตาล [2] วิตามิน [6] แร่ธาตุ [6], [34] สารต้านอนุมูลอิสระ [5]-[7] เป็นต้น สำหรับรายละเอียดของสารต้านอนุมูลอิสระที่ศึกษาในวัตถุดิบอาหารแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สารต้านอนุมูลอิสระและสารพิษบางชนิดที่พบในวัตถุดิบอาหารสัตว์บางชนิด

Feedstuff	Antinutritional compound/toxin
Canola Meal	Glucosinolate, Goitrin, Myrosinase, Phenolic Compounds, Phytate, Tannin, Sinapine,
Flax	Mucilage, Non-Starch Polysaccharide
Lupin	Non-Starch Polysaccharide, Phytoestrogen, Protein Antigen, Saponin
Peanut Meal	Aflatoxin, Goitrogen, Protease Inhibitor, Saponin
Soybean Meal	Goltrin, Haeagglutinin, Lectin, Non-Starch Polysaccharide, Phytate, Phytoestrogen, Protein Antigen, Saponin, Trypsin Inhibitor,

ที่มา: ดัดแปลงจาก [39] และ [40]

4.3 การตรวจสอบทางชีวภาพของวัตถุดิบอาหาร

การทดสอบทางชีวภาพจะใช้การทดลองเลี้ยงจริงหรือใช้วิธีการประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองสำหรับในที่นี้จะกล่าวเฉพาะ การประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง ซึ่งมีประโยชน์ต่อการคัดเลือกวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เหมาะสม เนื่องจากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถของสัตว์ในการย่อยวัตถุดิบแต่ละชนิด นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อพยากรณ์เกี่ยวกับผลของอาหารต่อการเจริญเติบโตของสัตว์มีชีวิตได้ [33], [41] การประเมินประสิทธิภาพการย่อยอาหารในหลอดทดลอง โดยใช้เอนไซม์ที่สกัดจากสิ่งมีชีวิตนิยมศึกษาในสัตว์หลายกลุ่ม สำหรับในสัตว์เคี้ยวเอื้อง (Ruminant) มักใช้วิธี In Situ, In Sacco หรือ Mobile Nylon Bag เพื่อหมักวัตถุดิบในรูเมนของสัตว์โดยตรง [3], [8] การประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองเป็นเทคนิคที่วิเคราะห์ได้รวดเร็ว มีค่าใช้จ่ายน้อย และมีความสอดคล้องกับการประสิทธิภาพการย่อยในตัวสัตว์ (In Vivo Digestibility) [34], [42], [43] การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองพบว่ามีความสัมพันธ์กับคุณภาพของโปรตีนในอาหารหรือวัตถุดิบอาหาร เช่น ปริมาณ Amino Acid D-Enantiomer [44], Reactive Sulphydryl Group, Disulphide Bond, D-Aspartic Acid [41] และ Protein Subunit Degradation [8], [10] ขณะที่ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต พบว่าขึ้นอยู่กับองค์ประกอบเชิงคุณภาพ (Qualitative) ได้แก่ ชนิดของแป้ง โครงสร้าง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพกติน และความสุกของแป้ง [36] เป็นต้น

5. สรุป

การดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบอาหารหรือผลพลอยได้ทางการเกษตรด้วยวิธีการฟิสิกส์ ได้แก่ การต้ม การนึ่งด้วยความดันไอน้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ การฉายรังสีแกมมา และการฉายลำแสงอิเล็กตรอน หรือหลายวิธีร่วมกัน มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพบางประการของวัตถุดิบอาหารให้มีความเหมาะสมต่อการย่อยอาหารของสัตว์ได้ดีขึ้น เช่น การเจลาติไนซ์ การละลายน้ำ ความเป็นผลึก โครงสร้างพื้นผิว แรงยึดเหนี่ยว

ทางเคมี เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีแนวโน้มช่วยลดปริมาณสารต้านโภชนาการ และโพลีเมอร์ที่เป็นอุปสรรคต่อการย่อย ทำให้สัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารได้เต็มประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยใช้เทคนิคการประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง ดังนั้นการดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบด้วยวิธีการฟิสิกส์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับการพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Ma, W-W. Liu, X. Chen, Y-J. Wu, Z-L. Yu, "Enhanced enzymatic saccharification of rice straw by microwave pretreatment," *Biores Technol*, vol. 100, no. 3, pp. 1279–1284, 2009.
- [2] J.B. Kristensen, L.G. Thygesen, C. Felby, H. Jørgensen, and T. Elder, "Cell-wall structural changes in wheat straw pretreated for bioethanol production," *Biotechnol Biofuel*, doi:10.1186/1754-6834-1-5, 2008.
- [3] M.P. Palekar, E. Cabrera-Diaz, A. Kalbasi-Ashtari, J.E. Maxim, R.K. Miller, L. Cisneros-Zevallos, A. Castillo, "Effect of electron beam irradiation on the bacterial load and sensorial quality of sliced cantaloupe," *J Food Sci*, vol. 69, no. 9, pp. 267–273, 2004.
- [4] P. Kumar, D.M. Barrett, M.J. Delwiche, and P. Strove, "Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production," *Ind Eng Chem Res*, vol 48, no. 8, pp. 3713–3729, 2009.
- [5] H.F.G. El-Niely, "Effect of radiation processing on antinutrients, *in vitro* protein digestibility and protein efficiency ratio bioassay of legume seeds," *Radiat Phys Chem*, vol. 76, no. 1, pp. 1050–1057, 2007.
- [6] S.A. Alajaji and T.A. El-Adawy, "Nutritional

- composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by microwave cooking and other traditional cooking methods,” *J Food Comp Anal*, vol. 19, no. 8, pp. 806–812, 2006.
- [7] Z-U. Rehman and W.H. Shah, “Thermal heat processing effects on antinutrients, protein and starch digestibility of food legumes,” *Food Chem*, vol. 91, no. 1, pp. 327–331, 2005.
- [8] A.A. Sadeghi and P. Shawrang, “Effects of microwave irradiation on ruminal degradability and *in vitro* digestibility of canola meal,” *Anim Feed Sci Technol*, vol. 127, no. 1, pp. 45–54, 2006.
- [9] H-J. Chung, S-Y. Lee, J-H. Kim, J-W. Lee, M-W. Byun, and S-T. Lim, “Pasting characteristics and *in vitro* digestibility of γ -irradiated RS4 waxy maize starches,” *J Cereal Sci*, vol. 52, no. 1, pp. 53–58, 2010.
- [10] S.R. Ebrahimi, A. Nikkhah, A.A. Sadeghi, and G. Raisali, “Chemical composition, secondary compounds, ruminal degradation and *in vitro* crude protein digestibility of gamma irradiated canola seed,” *Anim Feed Sci Technol*, vol. 151, no. 3, pp. 184–193, 2009.
- [11] P. Beguin and J.P. Aubert, “The biological degradation of cellulose,” *FEMS Microbiol Rev*, vol. 13, no. 1, pp. 25–58, 1994.
- [12] R.E. Arndt, R.W. Hardy, S.H. Sugiura, and F.M. Dong, “Effects of heat treatment and substitution level on palatability and nutritional value of soy defatted flour in feeds for coho salmon, *Oncorhynchus kisutch*,” *Aquaculture*, vol. 180, no. 1, pp. 129–145, 1999.
- [13] R. Eyaru, A.K. Shrestha, and A. Jayashree, “Effect of various processing techniques on digestibility of starch in red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) and two varieties of peas (*Pisum sativum*),” *Food Res Int*, vol. 42, no. 1, pp. 956–962, 2009.
- [14] D. Knorr, M. Zenker, V. Heinz, and D. Lee, “Applications and potential of ultrasonics in food processing,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 15, no. 5, pp. 261–266, 2004.
- [15] F. Lionetto, A. Maffezzoli, M-A. Ottenhof, I. A. Farhat, and J. R. Mitchell, “Ultrasonic investigation of wheat starch retrogradation,” *J Food Eng*, vol. 75, no. 2, pp. 258–266, 2006.
- [16] S. Pilli, P. Bhunia, S. Yan, R.J. Leblanc, and R.D. Tyagi, R.Y. Surampalli, “Ultrasonic pretreatment of sludge: A review,” *Ultra Sonochem*, vol. 18, no. 1, pp. 1–18, 2011.
- [17] S. Albu, E. Joyce, L. Paniwnyk, J.P. Lorimer, and T.J. Mason, “Potential for the use of ultrasound in the extraction of antioxidants from *Rosmarinus officinalis* for the food and pharmaceutical industry,” *Ultra Sonochem*, vol. 11, no. 3–4, pp. 261–265, 2004.
- [18] P. Janczyk, H. Franke, and W.B. Souffrant, “Nutritional value of *Chlorella vulgaris*: Effects of ultrasonication and electroporation on digestibility in rats,” *Anim Feed Sci Technol*, vol. 132, no. 1, pp. 163–169, 2007.
- [19] K. Kakinouchi, H. Adachi, H. Matsumura, T. Inoue, S. Murakami, Y. Mori, Y. Koga, Takano, and S. Kanaya, “Effect of ultrasonic irradiation on protein crystallization,” *J Cryst Growth*, vol. 292, no. 2, pp. 437–440, 2006.
- [20] R. Crespo, P.M. Martins, L. Gales, F. Rocha, and A.M. Damas, “Potential use of ultrasound to promote protein crystallization,” *J Appl Cryst*, vol. 43, no. 1, pp. 1419–1425, 2010.
- [21] M.O. Fakhouri and H.S. Ramaswamy, “Temperature

- uniformity of microwave heated foods as influenced byproduct type and composition,” *Food Res Int*, vol. 26, no. 2, pp. 89–95, 1993.
- [22] H.S. Guraya and R.T. Toledo, “Determining gelatinized starch in a dry starchy product,” *J Food Sci*, vol. 58, no. 4, pp. 888, 1993.
- [23] A. Negi, P. Boora, and N. Khetarpaul, “Effect of microwave cooking on the starch and protein digestibility of some newly released moth bean (*Phaseolus aconitifolius* Jacq.) cultivars,” *J Food Comp Anal*, vol. 14, no. 5, pp. 541–546, 2001.
- [24] G.Y.S. Mtui, “Recent advances in pretreatment of lignocellulosic waste and production of value added products,” *J Biotechnol*, vol. 8, no. 8, pp. 1398–1415, 2009.
- [25] E.N. Fombang, J.R.N. Taylor, C.M.F. Mbofung, and A. Minnaar, “Use of gamma irradiation to alleviate the poor protein digestibility of sorghum porridge,” *Food Chem*, vol. 91, no. 4, pp. 695–703, 2005.
- [26] E.S. Kempner, “Damage to proteins due to the direct action of ionizing radiation,” *Quart Rev Biophys*, vol 26, no. 1, pp. 27–49, 1993.
- [27] K. Ciesla, Y. Yoo, and W. Gluszewski, “Denaturation processes in gamma irradiated proteins studied by differential scanning calorimetry,” *Radiat Phys Chem*, vol. 58, no. 3, pp. 233–243, 2000.
- [28] M.R. Al-Masri and M. Zarkawi, “Digestibility and composition of broiler litter, as affected by gamma irradiation,” *Biores Technol*, vol. 69, no. 2, pp. 129–132, 1999.
- [29] N. Khatoon, and J. Prakash, “Nutrient retention in microwave cooked germinated legumes,” *Food Chem*, vol. 97, no. 1, pp. 115–121, 2006.
- [30] R. Bhat, K.R. Sridhar, and K. Toita-Yokotani, “Effect of ionizing radiation on antinutritional features of velvet bean seeds (*Mucuna pruriens*),” *Food Chem*, vol. 103, no. 3, pp. 860–866, 2007.
- [31] P. Shawrang, A.A. Sadeghi, M. Behgar, M. Zareshahi, G. Shahhoseini, “Study of chemical compositions, anti-nutritional contents and digestibility of electron beam irradiated sorghum grains,” *Food Chem*, vol 125, no. 2, pp. 376–379, 2011.
- [32] J.S. Bak, J.K. Ko, Y.H. Han, B.C. Lee, I-G. Choi, and K.H. Kim, “Improved enzymatic hydrolysis yield of rice straw using electron beam irradiation pretreatment,” *Biores Technol*, vol. 100, no. 3, pp. 1285–1290, 2009.
- [33] K. Rungruangsak-Torrissen, R. Moss, L. H. Andresen, A. Berg, and R. Waagbo, “Different expressions of trypsin and chymotrypsin in relation to growth in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.),” *Fish Physiol Biochem*, vol. 32, no. 1, pp. 7–23, 2006.
- [34] K. Thongprajukaew, “Feed Development using Digestive Enzyme Technology for Successive Growth in Siamese Fighting Fish (*Betta splendens* Regan, 1910),” Ph.D. Thesis, Kasetsart University, 2011 (in Thai).
- [35] S. Kumar, N.P. Sahu, A. K. Pal, D. Choudhury, and S.C. Mukherjee, “Studies on digestibility and digestive enzyme activities in *Labeo rohita* (Hamilton) juveniles: effect of microbial α -amylase supplementation in non-gelatinized or gelatinized corn-based diet at two protein levels,” *Fish Physiol Biochem*, vol. 32, no. 3, pp. 209–220, 2006.
- [36] M. Kaur, K.S. Sandhu, and S-T. Lim, “Microstructure, physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starches from different Indian lentil (*Lens culinaris*) cultivars,” *Carbohydr Pol*,

- vol. 79, no. 2, pp. 349–355, 2010.
- [37] A. Lopez-Rubio, B.M. Flanagan, A.K. Shrestha, M.J. Michael, and E.P. Gilbert, “Molecular rearrangement of starch during *in vitro* digestion: toward a better understanding of enzyme resistant starch formation in processed starches,” *Biomacromolecules*, vol. 9, no. 7, pp. 1951–1958, 2008.
- [38] M. Taghinejad-Roudbaneh, S.R. Ebrahimi, S. Azizi, P. Shawrang, “Effects of electron beam irradiation on chemical composition, antinutritional factors, ruminal degradation and *in vitro* protein digestibility of canola meal,” *Radiat Phys Chem*, vol. 79, no. 12, pp. 1264–1269, 2010.
- [39] A.A. Sindhu, M.A. Khan, M.U. Nisa, and M. Sarwar, “Agro-industrial by-products as a potential source of livestock feed,” *Int J Agricult Biol*, vol. 4, no. 1, pp. 307–310, 2002.
- [40] M. D. Drew, T.L. Borgeson, and D.L. Thiessen, “A review of processing of feed ingredients to enhance diet digestibility in finfish,” *Anim Feed Sci Technol*, vol. 138, no. 1, pp. 118–136, 2007.
- [41] K. Rungruangsak-Torrissen, A. Rustad, J. Sunde, S.A. Eiane, H.B. Jensen, J. Opstvedt, E. Nygard, T.A. Samuelsen, H. Mundheim, U. Luzzana, and G. Venturini, “*In vitro* digestibility based on fish crude enzyme extract for prediction of feed quality in growth trials,” *J Sci Food Agricult*, vol. 82, no. 6, pp. 644–654, 2002.
- [42] F. Forejtova, F. Lad, J. Trinacty, M. Richter, L. Gruber, P. Dolezal, P. Homolka, and L. Pavelek, “Comparison of organic matter digestibility determined by *in vivo* and *in vitro* methods,” *Czech J Anim Sci*, vol. 50, no. 1, pp. 47–53, 2005.
- [43] J.M. Ezquerro, F.L. Garc’ia-Carreno, and O. Carrillo, “*In vitro* digestibility of dietary protein sources for white shrimp (*Penaeus vannamei*),” *Aquaculture*, vol. 163, no. 1–2, pp. 123–136, 1998.
- [44] U. Luzzana, T. Mentasti, J. Opstvedt, E. Nykard, V.M. Moretti, and F. Valfre, “Racemization kinetics of aspartic acid in fish material under different conditions of moisture, pH and oxygen pressure,” *J Agricult Food Chem*, vol. 47, no. 7, pp. 2879–2884, 1999.
- [45] J. Parada and J.M. Aquilera, “Microstructure, mechanical properties, and starch digestibility of a cooked dough made with potato starch and wheat gluten,” *Food Sci Technol*, vol. 44, no. 1, pp. 1739–1744, 2011.
- [46] M.J. Taherzadeh and K. Karimi, “Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: A review,” *Int J Mol Sci*, vol. 9, no. 1, pp. 1621–1651, 2008.
- [47] M.S. Brewer, “Irradiation effects on meat flavor: A review,” *Meat Sci*, vol. 81, no. 1, pp. 1–14, 2009.