

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยนี้ประกอบด้วยข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับกากมะพร้าว การดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบอาหาร การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางเคมีกายภาพ ประสิทธิภาพการย่อยอาหารของในหลอดทดลอง ชีววิทยาของปลาที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ ปลาตะเพียน ปลานิล และปลาช่อน เอนไซม์ในระบบย่อยอาหาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. กากมะพร้าว

กากมะพร้าวเป็นผลพลอยได้ (By-Product) ที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตน้ำกะทิ และน้ำมันมะพร้าว การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับกากมะพร้าวมีดังนี้

1.1 ข้อมูลทั่วไป

มะพร้าว (*Cocos nucifera* Linn.) เป็นพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย โดยประชากรไทยจะบริโภคเนื้อมะพร้าวเฉลี่ยประมาณ 18 ผล/คน/ปี ประเทศไทยผลิตมะพร้าวได้เป็นอันดับ 6 ของโลก รองจากอินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ อินเดีย บราซิล และศรีลังกา โดยส่งออกมะพร้าวทั้งผลและน้ำมันมะพร้าวเป็นอันดับที่ 11 และ 20 ของโลก ตามลำดับ และมีพื้นที่ปลูกมะพร้าว 1.54 ล้านไร่ มีผลผลิตรวม 1.48 ล้านตัน/ปี โดยผลผลิตมะพร้าวของภาคใต้มีมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 73 ของผลผลิตทั้งประเทศ (สำนักงานยุทธศาสตร์การพาณิชย์ 2553)

อุตสาหกรรมมะพร้าวสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ อุตสาหกรรมแปรรูปเพื่อการบริโภค เช่น อุตสาหกรรมมะพร้าวแห้ง น้ำมันมะพร้าว กะทิเข้มข้น มะพร้าวชุบแข็ง และน้ำตาลมะพร้าว เป็นต้น และประเภทอุตสาหกรรมเพื่ออุปโภค เช่น อุตสาหกรรมเส้นใยมะพร้าว แท่งเพาะชำ และถ่านจากกะลามะพร้าว เป็นต้น โดยประเทศไทยจะส่งออกผลิตภัณฑ์ดังกล่าวไม่ต่ำกว่าปีละ 2,700 ล้านบาท สำหรับผลิตภัณฑ์จากมะพร้าวที่ส่งออกเป็นหลัก ได้แก่ มะพร้าวสด (Fresh Coconut) มะพร้าวแห้ง (Desiccated Coconut) น้ำมันมะพร้าว (Coconut Oil) เส้นใยจากมะพร้าว (Coir Fiber) และกากมะพร้าว สำหรับกากมะพร้าวจัดเป็นผลพลอยได้ที่ส่วนใหญ่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนให้กับสัตว์เลี้ยงเศรษฐกิจ จากข้อมูลการส่งออก

ของประเทศไทย พบว่ามีการส่งออกกากมะพร้าวคิดเป็นมูลค่ามากกว่า 53 ล้านบาท/ปี (สำนักงานยุทธศาสตร์การพาณิชย์ 2553)

1.2 องค์ประกอบทางเคมี

กากมะพร้าวที่ผลิตในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นชนิดอัดน้ำมันโดยเครื่องอัดเกลียว (ภาพที่ 2.1) ซึ่งมีปริมาณโปรตีนและลิพิดตกค้างผันแปรไปตามโรงงานที่ผลิต (สาโรช คำเจริญ 2542) กากมะพร้าวมีองค์ประกอบทางเคมีประกอบด้วยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และลิพิดประมาณร้อยละ 13–23, 42–55 และ 3–15 ตามลำดับ (นันทนา มูลมัตย์ และคณะ 2553; Sundu *et al.*, 2006; Moorthy and Viswanathan, 2010) และมีองค์ประกอบที่ย่อยได้ยาก ได้แก่ ลิกนิน (ร้อยละ 5.17) เยื่อใยที่ไม่ละลายในดิวเทเจนต์ที่เป็นกรด (Acid Detergent Fiber: ADF) (ร้อยละ 43.92) และ เยื่อใยที่ไม่ละลายในดิวเทเจนต์ที่เป็นกลาง (Neutral Detergent Fiber: NDF) (ร้อยละ 67.39) มีค่าโภชนาการที่ย่อยได้รวมทั้งหมดร้อยละ 51.97 ค่าพลังงานที่ย่อยได้ 11.18 เมกะจูล/กิโลกรัม และค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ 9.93 เมกะจูล/กิโลกรัม (นันทนา มูลมัตย์ และคณะ 2553)



ภาพที่ 2.1 กากมะพร้าวที่ผ่านการอัดน้ำมัน

กากมะพร้าวมีกรดอะมิโนหลายชนิด โดยชนิดที่พบมาก คือ กลูตามิก ลิวซีน และอาร์จินีน (Moorthy and Viswanathan, 2010) ในส่วนของแร่ธาตุ กากมะพร้าวมีปริมาณแคลเซียมค่อนข้างต่ำ แต่มีฟอสฟอรัสสูงใกล้เคียงกับกากถั่วเหลือง มีวิตามินเกือบทุกชนิดต่ำ และยังเป็นแหล่งอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อราจึงมีโอกาที่จะเกิดอะฟลาท็อกซินในกากมะพร้าวที่มีความชื้นสูงได้ง่าย (ฉัฐพงษ์ เมืองสุวรรณ 2550) อย่างไรก็ตาม คุณภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าวอาจเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของมะพร้าว (Yong *et al.*, 2009) และกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละแห่ง (สาโรช คำเจริญ 2542)

1.3 การใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์

กากมะพร้าวสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารทั้งสัตว์น้ำและสัตว์บกซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1 การใช้เป็นวัตถุดิบอาหารของสัตว์น้ำ

การใช้กากมะพร้าวเพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับสัตว์น้ำยังไม่มีการศึกษามากนัก การศึกษาการทดแทนกากมะพร้าวในอาหารของปลาคูกอุกผสม (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) พบว่าทำให้อัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการแลกเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และต้นทุนค่าอาหารดีที่สุด นอกจากนี้ ยังไม่ส่งผลให้เกิดความผิดปกติของลำทางโลหิตวิทยา (ณัฐพงศ์ เมืองสุวรรณ 2550) สำหรับการใช้อากมะพร้าวเสริมในอาหารชั้นของปลาดะเพียนขาว (*Puntius gonionotus*) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากการให้อาหารชั้นเพียงอย่างเดียว (เกษม เขตะวัน และ พิจิตร พันธุ์ศรี 2536) นอกจากนี้ การคัดแปรกากมะพร้าวโดยการแช่น้ำพบว่าสามารถใช้แทนกากถั่วเหลืองในปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ได้โดยไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์จากสารอาหารของปลานิล (Olude *et al.*, 2008) สำหรับการศึกษาของการรณ ทองประจุแก้ว (2554) เกี่ยวกับประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนจากกากมะพร้าวในหลอดทดลองพบว่าปลากัด (*Betta splendens*) ทุกช่วงอายุ ทั้งเพศผู้และเพศเมียมีประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนอยู่ในระดับต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบชนิดอื่น

1.3.2 การใช้เป็นวัตถุดิบอาหารของสัตว์บก

กากมะพร้าวเป็นวัตถุดิบอาหารที่ใช้เป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญในการเลี้ยงสัตว์ปีกและสุกร (O'Doherty and McKeon, 2000; Dung *et al.*, 2002) การผสมกากมะพร้าวในอาหารนกกระทา ไก่ไข่ และสุกรขุน พบว่าสามารถทดแทนแหล่งโปรตีนชนิดอื่นได้ดีที่ร้อยละ 40, 55 และ 10–20 ตามลำดับ (สาโรช คำเจริญ 2542) อย่างไรก็ตาม การเสริมกากมะพร้าวในอาหารอาจทำให้นก (Sundu *et al.*, 2004) และไก่ (Sundu *et al.*, 2006) มีการเจริญเติบโตและใช้อาหารได้น้อยลง แต่หากมีการเสริมเอนไซม์สังเคราะห์บางชนิดพบว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ประโยชน์จากกากมะพร้าวได้ดีขึ้น นอกจากนี้ การเสริมแหล่งโปรตีนชนิดอื่นในอาหารอาจทำให้มีการใช้ประโยชน์จากกากมะพร้าวได้ดีขึ้น เช่น การใช้อากมะพร้าวร่วมกับใบกระถินป่นเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารของสุกรขุน (สุริยา แก้วทอง 2533) หรือโคเนื้ออุกผสม (*Simmental* × *Brahman*) (เสกสรรค์ สวนกุล และคณะ 2547) อย่างไรก็ตาม การกินอาหารของสุกรที่ผสมกากมะพร้าวที่ระดับร้อยละ 10–30 พบว่าทำให้มีการกินอาหารลดน้อยลงตามระดับของกากมะพร้าวที่เสริม แต่ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพซาก และอัตราการเปลี่ยนอาหาร (Feed

Conversion Rate: FCR) (Thorne *et al.*, 1992) สำหรับในโคนม การใช้กากมะพร้าวพบว่าสามารถทดแทนแหล่งโปรตีนอื่นในอาหารชั้นได้ทั้งหมด แต่เนยที่ได้รับจากนมโคที่เลี้ยงด้วยกากมะพร้าวจะค่อนข้างแข็งตามสภาพความอืดตัวของไขมันมะพร้าว (สาโรช คำเจริญ 2542)

การใช้กากมะพร้าวเป็นอาหารสำหรับสัตว์บกจะทำให้อาหารเกิดความหืนง่าย เนื่องจากกากมะพร้าวอัดน้ำมันจะมีปริมาณลิพิดหลงเหลืออยู่ในระดับสูง (ประมาณร้อยละ 6) ทำให้การกินอาหารของสัตว์ลดลง เกิดอาการท้องเสียเนื่องจากในกากมะพร้าวมีปริมาณเยื่อใยสูง สัตว์มีการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารลดลง นอกจากนี้กากมะพร้าวที่มีเชื้อราจะทำให้สุกรไอบและทำให้สัตว์ปีกมีการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตลดลง (Thorne *et al.*, 1992)

2. การดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบอาหารด้วยวิธีทางฟิสิกส์

การดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบอาหารด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Physical Modification) เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และนิยมใช้กับวัตถุดิบในปริมาณมาก (Kumar *et al.*, 2009) การดัดแปรวัตถุดิบอาหารด้วยวิธีทางฟิสิกส์สามารถกระทำได้หลายแบบ เช่น การแช่น้ำ (Water Soaking) การนึ่งด้วยความดันไอน้ำ (Autoclave) การใช้คลื่นไมโครเวฟ (Microwave Irradiation) การฉายรังสีแกมมา (Gamma Irradiation) และลำแสงอิเล็กตรอน (Electron Beam) เป็นต้น สำหรับการศึกษาครั้งนี้เลือกใช้วิธีการดัดแปรโครงสร้าง ได้แก่ การแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละวิธีดังนี้

2.1 การแช่น้ำ

การดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบอาหารสัตว์ด้วยวิธีการแช่น้ำเป็นวิธีการที่ง่าย สะดวก และสามารถช่วยลดปริมาณสารต้านโภชนาการได้หลายชนิด เช่น แทนนิน (Tannin) สารประกอบฟีนอล (Phenolic Compound) และกรดไฟติก (Phytic Acid) เป็นต้น (Abd El-Hady and Habiba, 2003; Vijayakumari *et al.*, 2007; Khandelwal *et al.*, 2010) รวมทั้งช่วยลดปริมาณสารยับยั้งการทำงานของอะไมเลส (Amylase Inhibitor) สารยับยั้งการทำงานของทริปซิน (Trypsin Inhibitor) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง (Abd El-Hady and Habiba, 2003) และสลายองค์ประกอบที่เป็นวัตถุแห้งได้ (*In Vitro* Organic Matter Degradability) (Rymer, 2008) การศึกษาในปลาการ์ป (*Cyprinus carpio*) พบว่าการเลี้ยงด้วยอาหารที่มีองค์ประกอบของเมล็ด Sesbania ที่ผ่านการแช่น้ำหรือแช่น้ำร่วมกับการนึ่งด้วยความดันไอน้ำจะทำให้การเจริญเติบโตและ

การใช้ประโยชน์จากอาหารเกิดขึ้นได้ดีกว่าการเลี้ยงด้วยเมล็ดที่ไม่ผ่านกระบวนการ (Hossain *et al.*, 2001) เช่นเดียวกับการใช้กากมะพร้าวแห้งซึ่งพบว่าสามารถใช้เป็นอาหารให้กับปลานิลวัยอ่อนแทนกากถั่วเหลืองได้โดยไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์จากอาหาร (Olude *et al.*, 2008)

2.2 การใช้คลื่นไมโครเวฟ

คลื่นไมโครเวฟเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่สามารถสัมผัสได้ และสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือเฉพาะเท่านั้น พลังงานของคลื่นไมโครเวฟมีไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคแตกตัว (Non-Ionizing Energy) ดังนั้นจึงไม่ทำให้โมเลกุลของสารเปลี่ยนแปลง และไม่มีผลตกค้าง จึงไม่มีอันตราย และมีโอกาสน้อยมากที่เตาอบไมโครเวฟจะมีคลื่นรั่วออกมาเกินระดับมาตรฐาน คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนกับวัตถุจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นความร้อนดังกล่าวเกิดขึ้นในระยะเวลาอันสั้นและรวดเร็ว และทำให้เกิดความร้อนทั้งบริเวณพื้นผิว (Surface) และภายใน (Interior) ของตัวกลาง (Fakhouri and Ramaswamy, 1993) คลื่นไมโครเวฟทำให้เกิดความร้อนขึ้นอย่างรวดเร็วและเป็นผลให้เกิดการสูญเสียคุณภาพด้านต่าง ๆ เช่น กลิ่น รส สี เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการ น้อยกว่าการให้ความร้อนแบบดั้งเดิม ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อวัตถุดิบอาหารที่ตัดแปรโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ได้แก่ ความแรงของคลื่น ระยะเวลาที่ใช้ และความเข้มข้นของวัตถุดิบ (Ma *et al.*, 2009) การศึกษาในวัตถุดิบอาหารหลายชนิดพบว่า การตัดแปรโครงสร้างโดยใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนใน Moth Bean (Negi *et al.*, 2001) และ เมล็ดคาโนลาป็น (Sadeghi and Shawrang, 2006) และประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตใน Switch Grass (Hu and Wen, 2008) มีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังมีผลต่อการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งอาจใช้ร่วมกับด่างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวให้สูงขึ้น (Mtui, 2009; Zhu *et al.*, 2006)

2.3 การฉายรังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing Energy) ไม่มีสมบัติของอนุภาค ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่สามารถสัมผัสได้ แต่มีพลังงานและอำนาจทะลุทะลวงสูง โดยสามารถทะลุผ่านแผ่นโลหะบาง ขณะที่โลหะที่ทึบและหนาหรือคอนกรีตสามารถกั้นรังสีแกมมาได้ พลังงานของรังสีแกมมาเกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน ทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานเพื่อให้อะตอมเกิดความเสถียร การประยุกต์ใช้รังสีแกมมาพบว่าสามารถลดการปนเปื้อนของเชื้อโรค เช่น ลดจำนวนแบคทีเรียพวกโคลิฟอร์มและ

Staphylococcus aureus ในปูอัด (เสาวพงศ์ เจริญ และสุรศักดิ์ สัจจนตร 2550) นอกจากนี้ การฉายรังสีแกมมายังสามารถกำจัดไรสองจุดในไม้ตัดดอกได้ โดยการฉายรังสีจะทำให้ตัวเต็มวัยเพศเมียของไรที่ได้รับการฉายรังสีเป็นหมัน (มานนท์ สุตันทวงษ์ และคณะ 2543) ขณะที่การใช้รังสีแกมมาในการพัฒนาพันธุ์พืชพบว่าแก้วมังกรที่ผ่านการฉายรังสี สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานขึ้น อีกทั้งยังช่วยรักษาและพัฒนาคุณภาพของผล โดยมีปริมาณของคาโรทีนอยด์ วิตามินซี และปริมาณฟีนอลรวมเพิ่มขึ้น (อรพิน เกิดชูชื่น และคณะ 2550)

การดัดแปรโครงสร้างวัตถุดิบอาหารโดยการใช้รังสีแกมมาสามารถนำมาใช้เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตให้กับวัตถุดิบอาหารได้ (Ebrahimi *et al.*, 2009; Chung *et al.*, 2010) เนื่องจากการใช้รังสีจะช่วยเพิ่มสมบัติในการละลายน้ำ (Chong *et al.*, 2010) การสลายตัวของลิกโนเซลลูโลส (Mtui, 2009) ผนังเซลล์ (Al-Masri and Zarkawi, 1999) เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนโดยการสลายพันธะไดซัลไฟด์ (Disulphide Bond) และพันธะไฮโดรเจน (Hydrogen Bond) (Kemper, 1993) รวมทั้งยังช่วยลดสารต้านโภชนาการ (El-Niely, 2007; Ebrahimi *et al.*, 2009) ทำให้เอนไซม์สามารถไฮโดรไลส์ได้ดีขึ้น การใช้รังสีแกมมาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยนิยมนศึกษาในวัตถุดิบจากพืช เนื่องจากมีโครงสร้างของโพลีเมอร์ที่ซับซ้อน ขณะที่การใช้กับวัตถุดิบจากสัตว์มักมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์ (Sulfur-Containing Amino Acid) และกรดไขมันเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะส่งผลให้วัตถุดิบอาหารเกิดกลิ่นเฉพาะตัว (Brewer, 2009) นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้รังสีแกมมาในระดับสูงมากเกินไปอาจทำให้โปรตีนเกิดการจับตัวกันแน่นส่งผลให้การย่อยลดลงได้ (Ciesla *et al.*, 2000)

2.4 การใช้ลำแสงอิเล็กตรอน

ลำแสงอิเล็กตรอนเกิดจากการเพิ่มความเร่งเพื่อแปลงกระแสไฟฟ้าโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยากระตุ้นเพื่อให้เกิดลำแสงอย่างต่อเนื่อง ลำแสงดังกล่าวมีการแผ่กระจายต่ำและต้องใช้ในอัตราที่ค่อนข้างสูง การประยุกต์ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนพบว่าสามารถปรับปรุงคุณภาพของอาหารและผลผลิตทางการเกษตรได้ (Palekar *et al.*, 2004; Bhat *et al.*, 2007) การศึกษาในเมล็ดข้าวฟ่างพบว่าการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีน โดยที่ไม่ทำให้องค์ประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลง แต่ทำให้ปริมาณสารต้านโภชนาการลดลง (Shawrang *et al.*, 2011) นอกจากนี้ การศึกษาในฟางข้าวพบว่าการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโดยการทำให้เกิดรอยแผลบนพื้นผิวของวัตถุดิบ เปลี่ยนแปลงปริมาณผลึก และช่วยลดปริมาณกลูแคน ไซแลน และลิกนินได้ (Bak *et al.*, 2009)

3. การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพของวัตถุดิบอาหาร

วัตถุดิบอาหารที่ผ่านการคัดแปร โครงสร้างจะมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม สมบัติบางประการของอาหารที่มีผลต่อการไฮโดรไลส์ของเอนไซม์ และการใช้ประโยชน์ของสัตว์ ที่ตรวจสอบมีดังนี้

3.1 การละลายน้ำ (Water Solubility)

การละลายน้ำของอาหารเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่วนอสัณฐาน (Amorphous) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันน้อย การจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมากทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยารับน้ำได้มากขึ้น (Hydration) สมบัติดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการเจลาติไนส์ของแป้งและประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง (Chung *et al.*, 2010; Kaur *et al.*, 2010) โดยจากการศึกษาในลูกเดี๋ยพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน และเพิ่มความดันไอ ทำให้แป้งมีดัชนีการละลายน้ำ (Water Solubility Index) และปริมาณแป้งที่ย่อยได้เร็ว (Rapidly Digestible Starch) มีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ปริมาณแป้งที่ย่อยได้ช้า (Slowly Digestible Starch) จะมีปริมาณลดลง (จิราภรณ์ ชัยศิริเจริญกุล 2552)

3.2 โครงสร้างพื้นผิว (Surface Structure)

การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของอาหารมีความสัมพันธ์กับการใช้ประโยชน์ของสัตว์ อาหารที่มีพื้นที่ผิวมากจะทำให้เอนไซม์ย่อยอาหารสามารถไฮโดรไลส์วัตถุดิบได้ดี (การรวมทองประจุแก้ว 2554) สำหรับวัตถุดิบอาหารกลุ่มแป้ง ขนาดของอนุภาคจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับปริมาณผลึกสัณพัทธ์และปริมาณแป้งที่ทนทานต่อการย่อย (Resistant Starch) และมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับแป้งที่ย่อยได้เร็ว และแป้งที่ย่อยได้ช้า (Kaur *et al.*, 2010) ทั้งนี้พืชที่มีความแตกต่างของแทกซอน (Taxon) จะมีขนาดของอนุภาคแป้ง ลักษณะของรู และช่องว่างบริเวณพื้นผิวที่แตกต่างกันไป (Fannon *et al.*, 1992, 1993; Achremowicz *et al.*, 1997; Huber and BeMiller, 1997; Juszczak, 2001) การศึกษาในแป้งจากมันฝรั่ง ข้าวสาลี และข้าวโพด พบว่าเมื่อชักนำให้เกิดการออกซิเดชันด้วยโซเดียมคลอเรต (I) โซเดียมคลอเรต (III) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ พบว่าสามารถทำให้โครงสร้างพื้นผิวของอนุภาคแป้งเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมได้ (Pietrzyk and Fortuna, 2005) ขณะที่การต้มและการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมโลไลติกจะทำให้โครงสร้างพื้นผิวเปลี่ยนแปลงและปริมาณน้ำตาลมอลโทสมีค่าสูงขึ้น (Bhattacharyya *et al.*, 2004) ซึ่งอาจมีผลทำให้กระบวนการย่อยคาร์โบไฮเดรตเกิดได้ง่ายยิ่งขึ้นด้วย การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นผิวของอาหาร นิยมศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Palav and Seetharaman, 2007;

Lopez–Rubio *et al.*, 2008) หรือกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Kristensen *et al.*, 2008) สำหรับการศึกษาโครงสร้างภายในพบว่าสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอมได้เช่นเดียวกัน หรืออาจใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านก็ได้ (Ridout *et al.*, 2002)

3.3 การเปลี่ยนแปลงลิกโนเซลลูโลส

ลิกโนเซลลูโลสเป็นส่วนของผนังเซลล์พืชซึ่งประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โครงสร้างดังกล่าวมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยเซลลูโลส หน่วยย่อยจะจับตัวกันอย่างหนาแน่นด้วยพันธะไฮโดรเจน และแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waals Force) เป็นโครงสร้างไมโครไฟบริล (Microfibril) และยึดเหนี่ยวกับลิกนินด้วยพันธะโควาเลนต์ การจัดเรียงตัวของเซลลูโลสในรูปแบบดังกล่าวอาจทำให้เกิดผลึก (Crystalline) ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการย่อยของเอนไซม์ ทำให้สัตว์ไม่สามารถย่อยได้ ดังนั้น การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารสามารถทำได้โดยการทำลายโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลส ทำให้องค์ประกอบของสารที่อยู่ในวัตถุดิบอาหารเกิดการกระจายตัวและส่งผลให้เอนไซม์สามารถย่อยได้ดียิ่งขึ้น องค์ประกอบของโพลีเมอร์ที่พบในโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 เซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นโฮโมโพลีเมอร์ (Homopolymer) ที่พบมากที่สุดในการผลิตในผลพลอยได้ทางการเกษตร (Kumar *et al.*, 2009) เป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ และเรียงตัวเป็นเส้นตรง เซลลูโลส มีหน่วยย่อยเป็นกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบตา (β 1–4 Glycosidic Bond) โมเลกุลสายยาวของเซลลูโลสประกอบด้วยกลูโคส 2,000–15,000 โมเลกุล และมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 20,000–2,400,000 ดาลตัน การเรียงตัวของโมเลกุลเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีแขนงย่อย โดยโมเลกุลจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) กับวงแหวนของออกซิเจนในโมเลกุลถัดไป โดยธรรมชาติของเซลลูโลสจะมีลิกนินจับอยู่ซึ่งจะเป็นช่วยขัดขวางปฏิกิริยาการย่อยสลาย ทำให้ย่อยสลายเซลลูโลสได้ยาก เซลลูโลสไม่ละลายน้ำ ทนต่อปฏิกิริยาของเอนไซม์ กรดและด่างที่เจือจาง แต่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์เซลลูเลส

ระบบย่อยอาหารของคนและสัตว์บางชนิดไม่มีเอนไซม์เซลลูเลส จึงไม่สามารถย่อยเซลลูโลสจากพืชเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ ส่วนสัตว์กินพืช (Herbivorous Animal) มีเอนไซม์เซลลูเลสจากจุลินทรีย์ในกระเพาะ จึงสามารถย่อยเซลลูโลสได้ โดยทั่วไปเซลลูโลสเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุดประมาณร้อยละ 45 ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในธรรมชาติ ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงทุกชนิด การศึกษาในผลพลอยได้ทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ชานอ้อย ชังข้าวโพด ฟางข้าว กาบมะพร้าว กากเมล็ดปาล์ม และสับปะรด พบว่าประกอบด้วย

เซลลูโลสประมาณร้อยละ 41, 39, 37, 36, 33 และ 32 ตามลำดับ (วิวัฒน์ จิรัฐพงศ์ และ กฤษณเวช ทรงชนศักดิ์ 2554; อนันท์ เชาว์เครือ และคณะ 2550)

3.3.2 เฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบเฮเทอโพลิเมอร์ (Heteropolymer) ที่มีโมเลกุลใหญ่ ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์หลายชนิดประกอบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน เฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบที่อยู่ร่วมกับลิกนินและเซลลูโลสในผนังเซลล์ ในพืชจะพบเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 20–30 การศึกษาในผลพลอยได้ทางการเกษตรหลายชนิด เช่น ชานอ้อย ช้างข้าวโพด ฟางข้าว กาบมะพร้าว กากเมล็ดปาล์ม และสับปะรด พบว่าประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสประมาณร้อยละ 20, 21, 22, 26, 21 และ 39 ตามลำดับ (วิวัฒน์ จิรัฐพงศ์ และ กฤษณเวช ทรงชนศักดิ์ 2554; อนันท์ เชาว์เครือ และคณะ 2550) โดยทั่วไปเฮมิเซลลูโลสสามารถแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ ตามชนิดของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น กาแลคโตกลูโคแมนแนน (Galactoglucomannan) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนส กลูโคส และกาแลคโตส ส่วนอะราบินอกลูโรโนไซแลน (Arabinoglucuronoxylan) ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลส กาแลคโตส และอะราบินโนส เป็นต้น

3.3.3 ลิกนิน

ลิกนินเป็นสารเชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ และมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนิน ประกอบด้วยหน่วยย่อยของฟีนิลโพรพีนิกแอลกอฮอล์ (Phenyl Propionic Alcohol) ได้แก่ คอนิเฟอรอลแอลกอฮอล์ (Coniferyl Alcohol) คูมาริลแอลกอฮอล์ (Coumaryl Alcohol) และไซแนปิลแอลกอฮอล์ (Sinapyl Alcohol) การเชื่อมต่อของโมเลกุลลิกนินจะอาศัยพันธะอีเทอร์ที่เกิดขึ้นระหว่างอัลคิล-แอริล (Alkyl-Aryl) อัลคิล-อัลคิล (Alkyl-Alkyl) และแอคิล-แอริล (AkyI-Aryl) ของสารประกอบฟีนอลหน่วยย่อย (Phenolic Monomer) (Kumar *et al.*, 2009) ลิกนินไม่ละลายน้ำ ไม่มีสมบัติการยืดหยุ่น ดังนั้นพืชที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่จึงมีความแข็งแรงทนทาน ลิกนินพบมากในพืชที่มีอายุค่อนข้างมาก และพบในผลไม้สุกมากกว่าผลไม้ดิบ การศึกษาพบว่าในชานอ้อย ช้างข้าวโพด ฟางข้าว กาบมะพร้าว กากเมล็ดปาล์ม และสับปะรด ประกอบด้วยลิกนินประมาณร้อยละ 23, 18, 21, 15, และ 15 ตามลำดับ (วิวัฒน์ จิรัฐพงศ์ และ กฤษณเวช ทรงชนศักดิ์ 2554)

3.4 ความเป็นผลึก (Crystallinity)

ความเป็นผลึกเป็นสมบัติของอาหารที่มีโครงสร้างภายในจับตัวกันแน่นอย่างเป็นระเบียบ เพื่อป้องกันการกระจายตัวและการละลายน้ำ สมบัตินี้ดังกล่าวเป็นอุปสรรคต่อการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์มีผลทำให้เกิดการย่อยน้อยลง (Kaur *et al.*, 2010) โครงสร้างผลึกในเมล็ด

แป้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ได้แก่ ชนิดเอ (A Type) เป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่เรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำน้อย พบได้ในแป้งจากธัญพืช เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด และข้าวเจ้า เป็นต้น ชนิด บี (B Type) เป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่แบบหลวม และมีปริมาณน้ำตลามาก ซึ่งพบได้จากพืชหัว และแป้งที่มีอะไมโลสสูง เช่น มันฝรั่ง เป็นต้น และชนิดซี (C Type) เป็นโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ที่คล้ายคลึงระหว่างผลึกทั้งชนิดเอและชนิดบี มักพบในเมล็ดแป้งที่ได้จากพืชตระกูลถั่ว ราก ลำต้น และแป้งจากผลไม้บางชนิด อย่างไรก็ตาม ลักษณะโครงสร้างของผลึกเมล็ดแป้งดิบในธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อได้รับความร้อน เช่น เม็ดแป้งที่มีลักษณะโครงสร้างผลึกชนิดบีเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 102 องศาเซลเซียส ความชื้นร้อยละ 40 นาน 16 ชั่วโมง จะเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างผลึกเป็นลักษณะผสมของโครงสร้างผลึกชนิดเอและบี การศึกษาความเป็นผลึกเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการย่อยมักใช้รูปแบบการกระจายรังสีเอกซ์ที่ได้จากเอกซเรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer) (Lopez-Rubio *et al.*, 2008; Chung *et al.*, 2010; Kaur *et al.*, 2010) ซึ่งสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของสารในเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ขนาดของผลึก (Crystallite Size) ความเครียดระดับจุลภาค (Microstrain) และสามารถเปรียบเทียบกับวัฏภาคของโครงสร้างผลึกกับฐานข้อมูลมาตรฐานได้ (Phase Analysis) (การุณ ทองประจุแก้ว และอุทัยวรรณ โกวิทวาท 2555)

4. การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหารของสัตว์น้ำในหลอดทดลอง

การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง (*In Vitro* Digestibility) เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่ไม่จำเป็นต้องทดลองกับสัตว์โดยตรง เช่น การเลียนแบบธรรมชาติภายในของกระเพาะรูเมน ซึ่งผลที่ได้อาจแตกต่างจากการย่อยได้ของโภชนาการจริงภายในตัวสัตว์บ้าง แต่ก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ข้อดีของการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองคือ ประหยัดเวลา ค่าใช้จ่าย และแรงงาน เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยได้ในสัตว์โดยตรง (*In Vivo* Digestibility) นอกจากนี้การทดสอบประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองยังมีประโยชน์ต่อการคัดเลือกวัตถุดิบในสูตรอาหารสัตว์ เนื่องจากค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยวัตถุดิบแต่ละชนิดของสัตว์ และยังสามารถใช้เพื่อพยากรณ์เกี่ยวกับผลของอาหารต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตได้ (Rungruangsak-Torrissen *et al.*, 2002, 2006)

การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหารของปลาเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการย่อยอาหาร การประเมินประสิทธิภาพการย่อยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น คำนวณจากผลต่างของอาหารที่กินเข้าไป คำนวณจากอุจจาระที่ขับออกมา หรือศึกษาประสิทธิภาพการย่อยของปลาจากการใช้สารอินดิเคเตอร์ อย่างไรก็ตาม วิธีการดังกล่าวอาจไม่เหมาะสมสำหรับสัตว์น้ำ เนื่องจากอุจจาระของสัตว์น้ำอาจละลายออกมา เมื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมีอาจมีผลทำให้ผลการวิเคราะห์มีค่าต่ำ ทำให้การคำนวณประเมินประสิทธิภาพการย่อยของสัตว์น้ำได้สูงเกินความเป็นจริง การประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองนิยมศึกษาเกี่ยวกับการย่อยโปรตีนและการโบไฮเดรตเป็นหลัก ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน (Protein Digestibility)

โปรตีนเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนเชื่อมต่อกัน มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของร่างกาย ทำให้มีขนาดหรือน้ำหนักเพิ่มขึ้น ปลาที่ได้รับปริมาณโปรตีนเพียงพอต่อความต้องการจะมีการเจริญเติบโตเป็นปกติ การศึกษาพบว่าปลากินเนื้อมีความสามารถในการย่อยโปรตีนได้ดีกว่าปลากินพืชและสัตว์ และปลากินพืชตามลำดับ (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย 2536) โดยโปรตีนที่มาจากสัตว์จะย่อยได้ง่ายกว่าโปรตีนจากพืช และปลาส่วนใหญ่จะสามารถใช้แหล่งโปรตีนที่มาจากสัตว์ได้ดีกว่า

เอนไซม์ย่อยโปรตีนของปลาสามารถพบได้ในกระเพาะอาหารและลำไส้ เอนไซม์ที่พบในกระเพาะอาหารของปลาที่สำคัญคือ เปปซิน (Pepsin) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนได้ดีในสภาวะที่เป็นกรด และปลากินเนื้อจะมีประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์มากกว่าปลากินพืช ส่วนเอนไซม์ที่พบในลำไส้จะมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ ทริปซิน (Trypsin) ไคโมทริปซิน (Chymotrypsin) คาร์บอกซีเพปติเดส (Carboxypeptidase) และอีลาสเตส (Elastase) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การประเมินประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนอาศัยการย่อยของทริปซิน เนื่องจากเป็นเอนไซม์หลักที่ทำหน้าที่ย่อยโปรตีน กระตุ้นไซโมเจนอื่นๆ เป็นอินดิเคเตอร์ทางชีวภาพที่สำคัญในระบบย่อยอาหาร และมีบทบาทสำคัญต่อการใช้ประโยชน์จากอาหารและการเจริญเติบโต (Rungruangsak-Torrissen *et al.*, 2006) โดยประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของโปรตีนในอาหาร เช่น อีแนนทิโอเมอร์ของกรดอะมิโนชนิดดี (Amino Acid D-Enantiomer) (Luzzana *et al.*, 1999) หมู่ซัลไฟดริลอิสระ (Free Sulfhydryl Group) (Rungruangsak-Torrissen *et al.*, 2002) การแยกตัวของโปรตีนหน่วยย่อย (Protein Subunit Segregation) (Sadeghi and Shawrang, 2006; Ebrahimi *et al.*, 2009) เป็นต้น

4.2 ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate Digestibility)

คาร์โบไฮเดรตเป็นสารอินทรีย์ที่พบในธรรมชาติในรูปของสารโมเลกุลใหญ่ (Macromolecule) เช่น แป้ง ไกลโคเจน และเซลลูโลส เป็นต้น คาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำและทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของผนังเซลล์พืช การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการย่อยแป้งขึ้นอยู่กับชนิด โครงสร้าง ปริมาณ และความสุก (Kaur *et al.*, 2010) โดยการทำให้แป้งสุกพบว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยให้สูงขึ้นอีกร้อยละ 25–30 (กลุ่มวิจัยอาหารสัตว์น้ำ 2534)

คาร์โบไฮเดรตที่ปลากินเป็นอาหาร ได้แก่ แป้ง น้ำตาล และเซลลูโลส โดยปลาสามารถย่อยน้ำตาลได้ดีกว่าแป้ง และย่อยแป้งได้ดีกว่าเซลลูโลส การศึกษาด้านการดูดซึมไปใช้ประโยชน์ พบว่าปลาจะใช้ประโยชน์จากแป้งได้มากที่สุด เนื่องจากเมื่อแป้งถูกย่อยเป็นน้ำตาลจะถูกดูดซึมไปอย่างช้าๆ เมื่อเปรียบเทียบกับ การย่อยน้ำตาลซึ่งจะย่อยและดูดซึมเร็วกว่า ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตของปลาจะขึ้นอยู่กับชนิด โดยพบว่าปลากินพืชมีเอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรตมากกว่าปลากินเนื้อจึงทำให้สามารถดูดซึมคาร์โบไฮเดรตได้ดีกว่าปลากินพืชและเนื้อและปลากินเนื้อ ตามลำดับ ดังนั้น ปริมาณแป้งที่เหมาะสมในอาหารปลากินพืชปลากินพืชและเนื้อ และปลากินเนื้อ ควรอยู่ระหว่างร้อยละ 40–50, 30–40 และ 10–20 ตามลำดับ (กลุ่มวิจัยอาหารสัตว์น้ำ 2534)

เอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรตที่พบในกระเพาะอาหารและลำไส้ ได้แก่ แอลฟา-อะไมเลส (α -Amylase) กลูโคซิเดส (Glucosidase) มอลเทส (Maltase) ซูเครส (Sucrase) แลคเตส (Lactase) และเซลลูเลส (Cellulase) เป็นต้น โดยแอลฟา-อะไมเลสเป็นเอนไซม์สำคัญในการย่อยคาร์โบไฮเดรตให้เป็นกลูโคสและมอลโทส ซึ่งจะย่อยแป้งที่พันธะไกลโคซิดิกชนิดอัลฟา (α -1,4 Glucosidic Bond) เอนไซม์ดังกล่าวของปลากินพืชและเนื้อ และปลากินพืชส่วนใหญ่จะได้มาจากการหลั่งของผนังลำไส้ ผนังกระเพาะอาหาร ตับอ่อน ตับและไพโลริก ซีกา ในขณะที่ปลากินเนื้อส่วนใหญ่มักจะหลั่งออกมาจากตับอ่อนแหล่งเดียวเท่านั้น สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตจะอาศัยการย่อยของอะไมเลสเป็นหลัก ดังนั้น จึงสามารถใช้ค่ากิจกรรมของอะไมเลสในการเทียบมาตรฐาน (Standardization) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในสิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันหรือต่างชนิดกัน (Areekijserree *et al.*, 2006)

5. ชีวิตวิทยาของปลาที่ใช้ในการศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้เลือกใช้ปลาเศรษฐกิจ 3 ชนิด ที่มีพฤติกรรมการกินอาหารที่แตกต่าง กัน ได้แก่ ปลาดูเพียน ปลานิล และ ปลาช่อน ซึ่งเป็นตัวแทนของกลุ่มปลาน้ำจืดที่กินพืช กินทั้งพืช และสัตว์ และกินเนื้อ ตามลำดับ

5.1 ปลาดูเพียน

ปลาดูเพียน (*Puntius gonionotus*) เป็นปลาน้ำจืดในสกุล *Barbonymus* (ภาพที่ 2.2) มีถิ่นกำเนิดดั้งเดิมอยู่แถบประเทศกัมพูชา ลาว เวียดนาม พม่า อินโดนีเซีย อินเดีย ปากีสถาน สำหรับในประเทศไทยพบปลาดูเพียนทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ห้วย หนอง คลอง และบึง ทั่วทุกภาคของประเทศ เป็นต้น ลักษณะทั่วไปของปลาดูเพียนมีลักษณะ ลำตัวแบน ข้างหัวเล็ก ปากเล็ก ริมฝีปากขอบส่วนหลังโค้งยกสูงขึ้น ความยาวเหยียดเป็น 2.5 เท่าของความกว้างลำตัว ปากแหลม มีหนวดสั้นเล็ก 2 คู่ ตันของครีบหลังอยู่ตรงข้ามกับเกล็ดที่สิบของ เส้นข้างตัว เกล็ดตามแนวเส้นข้างตัวมี 29-31 เกล็ด ลำตัวมีสีเงิน ส่วนหลังมีสีคล้ำ ส่วนท้องมีสีขาว ที่โคนของเกล็ดมีสีเทาจนเกือบดำ เมื่อโตเต็มที่มีขนาดลำตัวยาวสูงสุดถึง 50 เซนติเมตร

ปลาดูเพียนมักอยู่รวมกันเป็นฝูงนอกจากเวลาสืบพันธุ์หรือวางไข่ เคลื่อนที่ได้ รวดเร็ว และมักหลบซ่อนบริเวณที่มีกระแสน้ำไหลช้าหรือนิ่ง ปลาดูเพียนสามารถปรับตัวเข้ากับ สภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี สามารถนำมาเลี้ยงและเพาะพันธุ์ได้ง่าย โดยทั่วไปปลาดูเพียนเพศผู้มี ขนาดเล็กกว่าเพศเมียในวัยเดียวกัน ปลาเพศเมียจะมีลำตัวเรียวยาว ส่วนเพศผู้มีลำตัวสั้นป้อม ปลาดูเพียนเป็นปลากินพืช โดยถูกปลาว่ายอ่อนจะกินสาหร่ายเซลล์เดียวและแพลงก์ตอนขนาดเล็ก ส่วนปลาที่มีขนาด 3-5 นิ้ว กินพืชน้ำ เช่น แหนเป็ด สาหร่ายพวงพะโค และผักบุ้ง เป็นต้น สำหรับ ปลาขนาดใหญ่สามารถกินใบพืชบก เช่น ใบมันเทศ ใบมันสำปะหลัง และหญ้าขน เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 ปลาดูเพียน

ระบบย่อยอาหารของปลาดูเพียนประกอบด้วยอวัยวะที่สำคัญได้แก่ ปาก ฟัน ซึ่งกรอง ช่องปากและคอหอย หลอดอาหาร กระเพาะอาหารและลำไส้ โดยปากมีขนาดกว้างพอประมาณ มีฟันในลำคอ (Pharyngeal Teeth) เป็นชนิดกักตบแบบสามแถวช่วยให้เคี้ยวพืชได้ดี มีซี่เหงือกสั้นๆ อยู่ห่างกันพอประมาณ และมีหลอดอาหารเป็นทางผ่านของอาหารไปยังกระเพาะอาหาร กระเพาะอาหารไม่มีลักษณะแตกต่างจากลำไส้ โดยลำไส้มีลักษณะเป็นท่อขดไปมา มีผนังบางๆ ขดเป็นม้วนยาว 2.02–2.73 เท่า ความยาวสุดของลำตัว

5.2 ปลานิล

ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) เป็นปลาน้ำจืดในสกุล *Oreochromis* (ภาพที่ 2.3) สามารถเลี้ยงได้ในทุกสภาพของท้องถิ่นต่างๆ ทั้งประเทศเขตร้อน เขตอบอุ่น หรือแม้กระทั่งเขตหนาว ปลานิลมีถิ่นกำเนิดอยู่ที่ทวีปแอฟริกา โดยพบทั่วไปตามหนอง บึง และทะเลสาบในประเทศซูดานและยูกันดา ปลานิลเริ่มรู้จักและเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย ตั้งแต่ พ.ศ. 2508 เนื่องจากเป็นปลาที่สามารถปรับตัวเข้ากับสิ่งแวดล้อมต่างๆ ทั้งในธรรมชาติ และระบบการเพาะเลี้ยงได้เป็นอย่างดี มีความแข็งแรง ทนต่อโรคพยาธิ และเจริญเติบโตเร็ว นอกจากนี้เนื้อของปลานิลสามารถนำมาประกอบอาหารได้หลายรูปแบบ และเป็นสินค้าส่งออกลำดับต้นๆ ของปลาน้ำจืด (กรมประมง 2541)

ปลานิลมีลักษณะคล้ายกับปลาหมอเทศ มีลักษณะทั่วไป คือ ริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว ตามลำตัวมีลายพาดขวางจำนวน 9–10 แถว ครีบหลังมีเพียง 1 ครีบ ประกอบด้วยก้านครีบแข็งและก้านครีบอ่อน เป็นจำนวนมาก ครีบกันประกอบด้วยก้านครีบแข็งและอ่อน มีเกล็ดตามแนวเส้นข้างตัว 33 เกล็ด ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาล ตรงกลางเกล็ดมีสีเข้มที่กระดูกแก้มมีจุดสีเข้มอยู่หนึ่งจุด บริเวณส่วนอ่อนของครีบหลัง ครีบกัน และครีบหางจะมีจุดสีขาวและสีดำตัดขวาง ปลานิลมีนิสัยอยู่รวมกันเป็นฝูง (ยกเว้นเวลาสืบพันธุ์) สามารถผสมพันธุ์

ได้ตลอดปี และใช้เวลา 2–3 เดือนต่อครั้ง แต่ถ้ำอาหารเพียงพอและเหมาะสม ปลานิลอาจจะผสมพันธุ์ได้ 5–6 ครั้ง/ปี



ภาพที่ 2.3 ปลานิล

ระบบย่อยอาหารของปลานิลประกอบด้วยอวัยวะที่สำคัญได้แก่ ปาก ฟัน ซึ่งกรองช่องปากและคอหอย หลอดอาหาร กระเพาะอาหารและลำไส้ โดยปากเป็นอวัยวะที่ใช้ในการกินอาหาร ซึ่งอยู่ปลายสุดของส่วนหัว (นฤมล อัสวเกศมณี 2550) ช่องปากจะไม่มีน้ำลายเนื่องจากใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่นและทำให้กลืนอาหารได้สะดวกยิ่งขึ้น ฟันของปลานิลมี 2 แถวหรือหลายแถวที่บริเวณขากรรไกรและคอหอย ซึ่งมีหลายขนาด ตั้งแต่ค่อนข้างหยาบจนถึงละเอียด ซึ่งกรองจะมีลักษณะคล้ายซี่หวีเรียงกันเป็นแถวอยู่บนแกนเหงือก (Gill Arch) โดยเหงือกของปลานิลมีซี่กรองประมาณ 15–27 อัน (เพ็ญพรรณ ศรีสกุลเดิยว 2543) ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อาหารหรือวัสดุชิ้นใหญ่ที่มากับน้ำติดอยู่ในช่องคอ ช่องปากและคอหอยจะอยู่ถัดจากอู่ปากลงไปก่อนถึงหลอดคอ ทำหน้าที่สกัดกั้นหรือกรองอาหารแล้วส่งผ่านไปยังหลอดคอ (นฤมล อัสวเกศมณี 2550) ส่วนหลอดอาหารจะเป็นทางผ่านของอาหารไปยังกระเพาะซึ่งมีรูปร่างคล้ายตัวอักษรเจ (J-shape) กระเพาะอาหารของปลานิลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนต้น (Fundic Portion) และส่วนท้าย (Pyloric Portion) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยอาหารให้เป็นชิ้นเล็ก สำหรับลำไส้จะเป็นอวัยวะในกระบวนการย่อยอาหารต่อเนื่องจากกระเพาะ ประกอบด้วยเซลล์สร้างน้ำเมือก (Mucous Cell) และเซลล์สร้างฮอร์โมนที่เกี่ยวกับการควบคุมการย่อยอาหาร (Endocrine Cell) (รุ่งกานต์ กล้าหาญ 2552) นอกจากนี้ ปลานิลยังมีอวัยวะช่วยย่อยอาหาร (Accessory Organ) ซึ่งได้แก่ ตับ ตับอ่อน และถุงน้ำดี โดยตับจะอยู่ด้านหน้าสุดในช่องท้อง ยึดติดกับเนื้อเยื่อชั้นช่องอกออกจากช่องท้อง ซึ่งมีเซลล์ตับทำหน้าที่สร้างน้ำดีและมีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมของโปรตีน ไขมัน และ

คาร์โบไฮเดรต ช่วยกำจัดสารพิษ รวมทั้งยังเป็นแหล่งสะสมคาร์โบไฮเดรต โปรตีน วิตามิน และไขมันบางชนิด (Takashima and Hibiya, 1995) ตับอ่อนทำหน้าที่สร้างน้ำย่อยเข้าสู่ลำไส้เล็ก และส่วนที่เป็นต่อมไร้ท่อ (Endocrine Portion) ทำหน้าที่สร้างฮอร์โมนอินซูลิน (Insulin) และกลูคากอน (Glucagon) เพื่อควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด ส่วนถุงน้ำดีทำหน้าที่สะสมน้ำดี โดยจะหลั่งไปที่ลำไส้เมื่ออาหารมาถึง โดยน้ำดีช่วยให้อาหารจำพวกไขมันอยู่ในรูปสารละลายแขวนลอย ทำให้เอนไซม์ทำหน้าที่ย่อยได้สะดวกขึ้น (นฤมล อัสวเกศมณี 2550)

5.3 ปลาช่อน

ปลาช่อน (*Channa striatus*) เป็นปลาน้ำจืดในสกุล Channa (ภาพที่ 2.4) อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำจืดทั่วไป เช่น แม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง และทะเลสาบทั่วทุกภาคของประเทศไทย นอกจากนี้ ปลาช่อนยังพบในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้หลายประเทศ ได้แก่ อินเดีย พม่า มาเลเซีย เวียดนาม กัมพูชา ฟิลิปปินส์ และอินโดนีเซีย ปลาช่อนนิยมเลี้ยงกันแพร่หลายในเขตจังหวัดนนทบุรี ปทุมธานี นครปฐม และสุพรรณบุรี ลักษณะโดยทั่วไปของปลาช่อนจะมีรูปร่างทรงกระบอก ขาวเรียว ท่อนหางแบนข้าง หัวแบนลง เกล็ดมีขนาดใหญ่ ปากกว้าง มีฟันซี่เล็กอยู่บนขากรรไกรทั้งสองข้าง ครีบหลังและครีบก้นยาวเกือบถึงโคนหาง ครีบหางเรียวปลายมน ด้านข้างลำตัวมีลายพาดเฉียง ลำตัวสีคล้ำอมน้ำตาลอ่อน มีลายเส้นทแยงสีคล้ำตลอดทั้งลำตัว 6-7 เส้น ด้านท้องสีจางตัดกับด้านบน ครีบลีคล้ำมีขอบสีเหลืองอ่อน ครีบท้องจาง มีขนาดลำตัวประมาณ 30-40 เซนติเมตร และสามารถยาวได้ถึง 1 เมตร นอกจากนี้ ปลาช่อนยังมีอวัยวะพิเศษช่วยในการหายใจทำให้สามารถเคลื่อนไหวไปบนบกหรือฝังตัวอยู่ในโคลนได้เป็นเวลานาน



ภาพที่ 2.4 ปลาช่อน

ปลาช่อนเป็นปลากินเนื้อที่มีปากขนาดใหญ่ ภายในปากมีฟันเขี้ยว (Canine) ขนาดใหญ่ ลักษณะโค้งรีรูปกรวย ฐานใหญ่ ปลายเรียวแหลม ซึ่งมีความแข็งแรง ใช้สำหรับกัด จับยึด และฉีกเนื้อของเหยื่อ ซึ่งกรงของปลาช่อน (Gill Raker) เป็นส่วนประกอบของเหงือกที่เกาะอยู่ด้านในของกระดูกด้านตรงข้ามกับเส้นเหงือก มีลักษณะเป็นตุ่มและมีจำนวนน้อย มีหน้าที่ในการกรอง

และกั้นให้อาหารไหลผ่านเข้าสู่ช่องคอ นอกจากนี้ ยังทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้สิ่งแปลกปลอมเข้าไปขัดขวางการแลกเปลี่ยนแก๊สที่เส้นเหงือก หลอดอาหารของปลาช่อนค่อนข้างสั้น ทำหน้าที่เป็นทางผ่านของอาหารเพื่อเข้าสู่กระเพาะอาหาร ซึ่งแบ่งเป็นสองส่วนคือส่วนต้น (Cardiac) และส่วนปลาย (Pyloric) กระเพาะอาหารของปลาช่อนเป็นกระเพาะแบบเหยียดตรง (Straight Type) โดยกระเพาะส่วนต้นและส่วนปลายจะอยู่ต่อเนื่องกันและทอดไปในระดับเดียวกัน ทำให้อาหารประเภทเนื้อสามารถย่อยในได้เร็วและย่อยได้ดีกว่าในลำไส้

ลำไส้เป็นส่วนที่ยาวที่สุดในระบบย่อยอาหารของปลาช่อน มีลักษณะเป็นท่อเหยียดตรงและสั้น เซลล์บุผนังประกอบด้วยเซลล์หลั่งน้ำย่อยและเซลล์ผลิตเมือก โดยเซลล์หลั่งน้ำย่อยจะหลั่งน้ำย่อยหรือเอนไซม์ออกมาย่อยโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน (วีรพงษ์ วสุพินธุ์ชัย 2536) เอนไซม์ในกลุ่มโปรติเอส อะไมเลส และไลเปสในระบบทางเดินอาหารของปลาช่อนมีกิจกรรมในลำไส้สูงกว่าในกระเพาะอาหาร สำหรับอาหารของปลาช่อน โดยทั่วไปลูกปลานขนาดเล็กจะกินสาหร่ายและสัตว์เซลล์เดียวเป็นอาหาร เมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นจะกินสัตว์น้ำขนาดเล็กและกินพืชบ้าง ส่วนปลาช่อนขนาดใหญ่จัดเป็นปลากินเนื้อ โดยจะกินสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ เช่น ปลานขนาดเล็ก และแมลงที่อาศัยในน้ำเป็นอาหาร เมื่อปลาขาดแคลนอาหาร ปลาช่อนจะมีพฤติกรรมกินกันเอง โดยปลานขนาดใหญ่จะกินปลานขนาดเล็ก

6. เอนไซม์ในระบบย่อยอาหาร

เอนไซม์ย่อยอาหาร (Digestive Enzyme) ส่วนใหญ่ผลิตจากตับอ่อน เอนไซม์เป็นสารชีวโมเลกุลประเภทโปรตีนที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการย่อยอาหารให้เกิดเร็วขึ้นและทำงานได้ดีเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสม โดยปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ ได้แก่ อุณหภูมิ พีเอช และตัวยับยั้ง เป็นต้น เอนไซม์ย่อยอาหารมีบทบาทสำคัญต่อการเติบโตและการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ โดยกิจกรรมของเอนไซม์มีความสัมพันธ์กับการตอบสนองทางโภชนาการ การเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา และพฤติกรรมการกินอาหาร เอนไซม์ย่อยอาหารถูกสร้างขึ้นจากอวัยวะหลักได้แก่ กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก และอวัยวะช่วยย่อยอาหาร (ตับอ่อน ตับและตับอ่อน หรือไพโลริก ซีกา) เอนไซม์ย่อยอาหารที่มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงสารชีวโมเลกุลกลุ่มหลักให้เป็นพลังงาน ได้แก่ แอลฟา-อะไมเลส ไลเปส ทริปซิน และไลโมทริปซิน สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองในครั้งนี้เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยโปรตีน คือ เอนไซม์ทริปซิน (Rungruangsak-Torrissen *et al.*, 2002) และการย่อยคาร์โบไฮเดรต คือ

เอนไซม์อะไมเลส (Thongprajukaew *et al.*, 2011) ซึ่งเอนไซม์ทั้ง 2 ชนิดมีบทบาทและความสำคัญดังนี้

6.1 ทริปซิน (Trypsin)

ทริปซินเป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทหลักในการควบคุมการย่อยโปรตีนโดยจะย่อยพันธะเพปไทด์ทางด้านในของสายเพปไทด์ เฉพาะตำแหน่งที่มีกรดอะมิโนที่เป็นเบส คือ อาร์จินีน และไลซีนทำให้สายโพลิเพปไทด์มีขนาดสั้นลง ทริปซินสร้างจากตับอ่อนและทำหน้าที่ได้ดีในสภาวะที่เป็นเบส โดยเป็นอัลคาไลน์โปรติเอสที่เร่งปฏิกิริยาได้ดีในช่วงพีเอช 7-10 ทำหน้าที่กระตุ้นโปรเอนไซม์ (Proenzyme) หรือไซโมเจน (Zymogen) ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยโปรตีนได้หลายชนิด ได้แก่ ทริปซิโนเจน ไคโมทริปซิโนเจน โปรคาร์บอกซีเปปติเดส และโปรอีลาสเตส ให้อยู่ในรูปที่สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ (Active Enzyme) ได้แก่ ทริปซิน ไคโมทริปซิน คาร์บอกซีเปปติเดส และอีลาสเตส ตามลำดับ ทริปซินเป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญต่อการใช้ประโยชน์จากอาหารและการเจริญเติบโต มีความสำคัญต่อการพัฒนาการของสัตว์น้ำ การศึกษากิจกรรมของทริปซินในสัตว์น้ำมีความผันแปรเนื่องจากปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ (Rungruangsak-Torrissen *et al.*, 2006) อายุและเพศ (Thongprajukaew *et al.*, 2010) คุณภาพของอาหาร (Sunde *et al.*, 2004) แสง (Sunde *et al.*, 2001) การแสดงออกของยีนและการได้รับฮอร์โมน (Rungruangsak-Torrissen and Sundby, 2000) และระบบภูมิคุ้มกัน (Andrés *et al.*, 2010) เป็นต้น การสกัดเอนไซม์ทริปซินจากอวัยวะภายในปลานิล พบว่าม้ามมีกิจกรรมของเอนไซม์สูงที่สุด รองลงมาคือ ลำไส้ ดับ อวัยวะภายในรวม และกระเพาะ อาหารขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์ไคโมทริปซินมีค่าสูงสุดที่ลำไส้ รองลงมาคือ ม้าม อวัยวะภายในรวม ดับ และกระเพาะตามลำดับ (จิรภา หินชูช 2552)

6.2 อะไมเลส (Amylase)

อะไมเลสเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายพันธะ α -D-1,4 กลูโคซิดิก (α -D-1,4-Glycosidic Bond) ของสายโพลิแซคคาไรด์ในอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง สามารถย่อยสลายอะไมโลสได้เป็นโอลิโกแซคคาไรด์ และส่วนใหญ่ได้เป็นไดแซ็กคาไรด์ คือ มอลโทส หากแบ่งอะไมเลสตามตำแหน่งของการย่อยแป้งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มเอนโดอะไมเลส (Endoamylase) ซึ่งจะตัดพันธะ α -1,4 กลูโคซิดิก ระหว่างโมเลกุลของกลูโคสภายในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน เอนไซม์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ แอลฟา-อะไมเลส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำงาน ได้แก่ โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) และกลุ่มเอกโซอะไมเลส (Exoamylase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะที่จับกันของกลูโคสทั้งพันธะ α -1,4 และ α -1,6

กลูโคซิติก เอนไซม์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) เบตา-อะไมเลส (β -Amylase) และ แอลฟา-กลูโคซิเดส (α -Glucosidase)

การสร้างอะไมเลสในปลากินพืช และปลากินพืชและเนื้อ ส่วนใหญ่จะได้มาจากการหลั่งของผนังลำไส้ กระเพาะอาหาร ตับ ตับอ่อน และไส้ติ่ง ในขณะที่ปลากินเนื้อส่วนใหญ่ มักจะหลั่งออกมาจากตับอ่อนแหล่งเดียวเท่านั้น จึงทำให้ปลากินเนื้อมีประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตไม่ดี เพราะหลั่งเอนไซม์ออกมาในปริมาณที่น้อยกว่า (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย 2536) จากการศึกษากิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสในปลากัดพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสมีค่าสูงขึ้นในปลากัดที่ได้รับอาหารที่ผ่านการไมโครเวฟ ซึ่งอาจมีสาเหตุเนื่องมาจากปลามีความสามารถในการใช้คาร์โบไฮเดรตได้ดีขึ้น แต่การศึกษาในปลากลุ่มที่ได้รับอาหารเคลือบคาร์โบไฮเดรตพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์อะไมเลสมีค่าลดลง ซึ่งอาจเกิดจากปลาลดระดับการสร้างเอนไซม์ในภาวะที่มีการเสริมเอนไซม์จากภายนอก (Exogenous Carbohydrases) ดังนั้น อะไมเลสที่ปลาสร้างขึ้นอาจเพียงพอต่อการดำรงชีวิตในสภาวะปกติ (Thongprajukaew *et al.*, 2011)

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลพลอยได้ทางการเกษตร หรือวัตถุดิบที่ได้รับการดัดแปรให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมเมื่อใช้เป็นวัตถุดิบอาหารจะทำให้สัตว์สามารถย่อย ดูดซึม และใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและใช้ประโยชน์ในสัตว์ การดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยลดต้นทุนการผลิต สร้างงาน และเป็นการใช้ทรัพยากรได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน ปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปรโครงสร้างของวัตถุดิบหลายชนิดดังนี้

Hossain และคณะ (2001) ศึกษาผลของการนำเมล็ด *Sesbania* ที่ผ่านการแช่น้ำ และแช่น้ำร่วมกับการนึ่งด้วยความดันไอน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาคาร์พ (*Cyprinus carpio* L.) พบว่าเมล็ด *Sesbania* ที่ผ่านการแช่น้ำ และแช่น้ำร่วมกับการนึ่งด้วยความดันไอน้ำจะทำให้ปลาคาร์พมีการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์จากอาหารได้ดีกว่าการเลี้ยงด้วยเมล็ด *Sesbania* ที่ไม่ผ่านกระบวนการดังกล่าว

Abd El-Hady และ Habiba (2003) ศึกษาผลของการแช่น้ำต่อการเปลี่ยนแปลงสารต้านโภชนาการและการย่อยโปรตีนของเมล็ดถั่ว ผลการศึกษาพบว่า การแช่น้ำเป็นเวลา 16 ชั่วโมงสามารถลดสารต้านโภชนาการ ได้แก่ กรดไฟติก แทนนิน ฟีนอล ตัวยับยั้งเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส และเอนไซม์ทริปซินได้ สำหรับการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองพบว่า การแช่น้ำถั่วช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองให้ดีขึ้น

Vijayakumari และคณะ (2007) ศึกษาผลของการแช่น้ำต่อระดับสารต้านโภชนาการและการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองของเมล็ดชงโค (*Bauhinia purpurea* L.) ผลการศึกษาพบว่า การแช่เมล็ดชงโคในน้ำกลั่นเป็นเวลา 6 ชั่วโมง สามารถลดกรดไฟติกได้ร้อยละ 37 และลดแทนนินได้ร้อยละ 71 ขณะที่ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนพบว่าไม่แตกต่างจากเมล็ดชงโคที่ไม่ผ่านการแช่น้ำ

Alajaji และ El-Adawy (2006) ศึกษาผลของการใช้ไมโครเวฟต่อองค์ประกอบทางโภชนาการของถั่วชิกพี (*Cicer arietinum* L.) เปรียบเทียบกับการใช้วิธีแบบดั้งเดิม ได้แก่ การต้มและการใช้หม้อนึ่งไอน้ำ ผลการศึกษาพบว่าทั้ง 3 วิธีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน และลดสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน สารที่ทำให้เม็ดเลือดแดงตกตะกอน แทนนิน กรดไฟติก และซาโปนิน นอกจากนี้ การใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้มีการสูญเสียวิตามินบีและแร่ธาตุต่างๆ น้อยที่สุด และมีดัชนีของกรดอะมิโนจำเป็น (Essential Amino Acid Index) เพิ่มขึ้น

Palav และ Seetharaman (2007) ศึกษาผลของการใช้คลื่นไมโครเวฟต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของน้ำแป้งข้าวสาลี โดยนำแป้งมากระจายตัวในน้ำให้มีความเข้มข้นของของแข็งสุดท้ายเท่ากับร้อยละ 33, 40 หรือ 50 แล้วเก็บตัวอย่างที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ผลการศึกษาพบว่าคลื่นไมโครเวฟทำให้โมเลกุลของน้ำสั่นสะเทือนและเกิดความร้อนอย่างรวดเร็ว จนทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งแตกออกก่อนที่จะถึงอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดการเจลลิตในซ์

Mahdi และ Lope (2011) ศึกษาผลของการใช้คลื่นไมโครเวฟและการใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารเคมีต่อคุณภาพทางกายภาพของฟางข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ ผลการศึกษาพบว่าฟางข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยไมโครเวฟมีปริมาณลิกนินลดลงจากร้อยละ 8.33 และ 11.9 เป็นร้อยละ 8.01 และ 8.05 ตามลำดับ

Thongprajukaew และคณะ (2011) ศึกษาการพัฒนาสูตรอาหารโดยใช้เทคโนโลยีของเอนไซม์ย่อยอาหารเพื่อการเจริญเติบโตอย่างมีคุณภาพของปลากัด โดยทำการคัดแปรสูตรอาหารที่ได้จากการคัดเลือกว่าดีจากการประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองด้วยวิธีการฉายรังสีแกมมา การใช้คลื่นไมโครเวฟ การเสริมด้วยโปรไบโอติก และเสริมด้วยเอนไซม์คาร์โบไฮเดรต พบว่า องค์ประกอบทางโภชนาการของอาหารซึ่ง ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน เถ้า และเยื่อใย และปริมาณแร่ธาตุไม่เปลี่ยนแปลง และมีสมบัติทางกายภาพ (การเจลลิตในซ์ การละลายน้ำ และโครงสร้างพื้นผิว) ที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลสของเอนไซม์ และเมื่อศึกษาการเจริญเติบโต พบว่า ปลากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ผ่านการไมโครเวฟมีการเจริญเติบโต และการแสดงออกของเอนไซม์ (ยกเว้นไลเปส) ในระดับสูง มีการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตได้ดี รวมทั้งมีคุณภาพของกล้ามเนื้อและองค์ประกอบซากที่ใกล้เคียงกับปลาในกลุ่มอื่น

Sunthornchot และคณะ (2009) ศึกษาการพัฒนาสูตรอาหารที่ผ่านกระบวนการฉายรังสีแกมมาสำหรับการเพาะเลี้ยงปลานิลตัวเต็มวัย โดยศึกษากิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ทริปซิน ไคโมทริปซิน อะไมเลส และไลเปส ของปลานิลตัวเต็มวัย จากนั้นนำเอนไซม์จากลำไส้ทดลองย่อยวัตถุดิบอาหารเปรียบเทียบกับระหว่างวัตถุดิบอาหารที่ฉายและไม่ฉายรังสีโดยเทคนิคการประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง ผลการศึกษาพบว่า การฉายรังสีในวัตถุดิบอาหารมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนมีค่าสูงขึ้น โดยเฉพาะวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของโปรตีน เช่น ปลาป่น และ กากถั่วเหลือง รวมทั้งวัตถุดิบอาหารที่เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากพืชทั้งหมด ซึ่งสามารถนำวัตถุดิบเหล่านี้มาผลิตสูตรอาหารสำหรับใช้เลี้ยงปลานิลต่อไปได้

Taghinejad (2009) ศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาต่อการเปลี่ยนแปลงสารต้านโภชนาการ การสลายตัวในกระเพาะรูเมน (Ruminal Degradability) และการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองของถั่วเหลืองที่มีไขมันสูง โดยฉายรังสีแกมมาถั่วเหลืองที่ 15, 30 และ 45 กิโลเกรย์ พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของถั่วเหลืองที่ฉายรังสีแกมมาไม่แตกต่างจากถั่วเหลืองชุดควบคุม และการฉายรังสีแกมมาที่ 30 กิโลเกรย์ ทำให้กรดไฟติกหมดไป นอกจากนี้ยังพบว่าการฉายรังสีที่ 15, 30 และ 45 กิโลเกรย์ ทำให้ตัวบ่งชี้เอนไซม์ทริปซินลดลงร้อยละ 18.4, 55.5 และ 63.5 ตามลำดับ

Taghinejad และคณะ (2009) ศึกษาผลของการฉายรังสีแกมมาต่อการเปลี่ยนแปลงสารต้านโภชนาการ การสลายตัวในกระเพาะรูเมน และการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองของเมล็ดคาโนลาป่นโดยฉายรังสีแกมมาที่ระดับ 15, 30 และ 45 กิโลเกรย์ ผลการศึกษาพบว่า การฉายรังสีแกมมาทำให้ความเข้มข้นของกลูโคซิโนเลตทั้งหมดลดลง รวมทั้งลดอัตราการสลายตัวของโปรตีน นอกจากนี้การฉายรังสีแกมมาที่ 30 และ 45 กิโลเกรย์ ยังทำให้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนหยาบของเมล็ดคาโนลาป่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.6 และ 15.5 ตามลำดับ

Chung และ Liu (2010) ศึกษาโครงสร้างระดับโมเลกุลและสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งมันฝรั่งและแป้งจากถั่วที่ได้รับรังสีแกมมา โดยนำแป้งมันฝรั่งและแป้งจากถั่วมาฉายรังสีแกมมาที่ 50 กิโลเกรย์ พบว่าหลังการฉายรังสีแกมมาแป้งทั้ง 2 ชนิดมีปริมาณอะไมโลสลดลง โดยการฉายรังสีทำให้สามารถลดขนาดของแป้งมันฝรั่งได้ดีกว่าแป้งจากถั่ว และทำให้แป้งทั้ง 2 ชนิดมีสัดส่วนของแป้งที่ย่อยได้ช้า และแป้งที่ย่อยไม่ได้ เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งมันฝรั่งมีสัดส่วนของแป้งที่ย่อยได้เร็วเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

Hamza และคณะ (2012) ศึกษาผลของรังสีแกมมาต่อคุณค่าทางโภชนาการของแป้งถั่วเหลือง โดยฉายรังสีแกมมาเมล็ดถั่วที่ระดับ 5 และ 10 กิโลเกรย์ ผลการศึกษาพบว่า การฉายรังสีแกมมาไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน ไขมัน เยื่อใยและเถ้า แต่การฉายรังสีแกมมาสามารถลด

ระดับกรดไฟติก เทนนิน ตัวยับยั้งเอนไซม์ทริปซิน และทำให้ปริมาณฟีนอลทั้งหมดเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแป้งถั่วเหลืองหุ้ดควบคุม

Pimpa และคณะ (2007) ศึกษาผลของการฉายรังสีด้วยลำแสงอิเล็กตรอนต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพของแป้งสาธูโดยศึกษาคุณสมบัติของแป้งหลังจากผ่านการฉายรังสีด้วยลำแสงอิเล็กตรอนในระดับ 10 ถึง 30 กิโลเกรย์ ผลการศึกษา พบว่าการฉายรังสีทำให้ความหนืดสูงสุดของแป้งสาธูลดลง เมื่อระดับการฉายรังสีเพิ่มขึ้น ความแข็งของเจลมีค่าสูงขึ้นเมื่อฉายรังสีที่ 10 และ 15 กิโลเกรย์ แต่เมื่อระดับการฉายรังสีสูงขึ้นอีกพบว่าค่าความแข็งของเจลมีค่าลดลง นอกจากนี้การฉายรังสียังทำให้ค่าการละลาย ค่าสีเหลือง สีแดงและความเป็นกรดของแป้งสาธูเพิ่มขึ้น ในขณะที่การพองตัวลดลง รวมทั้งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด น้ำหนักโมเลกุลของแป้งสาธูมีค่าลดลง

Roudbaneh และคณะ (2010) ศึกษาผลของการฉายลำแสงอิเล็กตรอนต่อองค์ประกอบทางเคมี สารต่อต้านโภชนาการ การสลายตัวในกระเพาะรูเมน และประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองของ เมล็ดคาโนลาป่น ผลการศึกษา พบว่าการฉายลำแสงอิเล็กตรอนที่ 15, 30 และ 45 กิโลเกรย์ ทำให้การสลายตัวของโปรตีนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการฉายลำแสงอิเล็กตรอน และสามารถลดสารต้านคุณค่าทางโภชนาการได้ สำหรับประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลอง พบว่า การฉายลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับ 15 และ 30 กิโลเกรย์ ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองของเมล็ดคาโนลาป่นเพิ่มขึ้นร้อยละ 11 และ 8 ตามลำดับ

Shawrang และคณะ (2011) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารต้านโภชนาการ และการย่อยเมล็ดข้าวฟ่างที่ฉายลำแสงอิเล็กตรอนที่ระดับ 10, 15, 20, 25 และ 30 กิโลเกรย์ ผลการศึกษาพบว่าการฉายลำแสงอิเล็กตรอนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวฟ่าง แต่การฉายรังสีมีผลทำให้ความเข้มข้นของเทนนินและกรดไฟติกลดลง เมื่อความเข้มข้นของลำแสงอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การฉายลำแสงอิเล็กตรอนยังทำให้เมล็ดข้าวฟ่างมีคุณค่าทางโภชนาการเพิ่มขึ้นด้วย