

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ โดยดัดแปรโครงสร้างของกากมะพร้าวด้วยวิธีทางฟิสิกส์ ได้แก่ การแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ การฉายรังสีแกมมา และการฉายลำแสงอิเล็กตรอน หลังจากนั้น นำกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพบางประการ และศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง โดยใช้เอนไซม์ที่สกัดจากปลาเศรษฐกิจ 3 ชนิด คือ ปลาตะเพียน ปลานิล และปลาทู เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัตถุดิบอาหารสำหรับสัตว์น้ำ ผลการทดลองสามารถสรุป อภิปรายและมีข้อเสนอแนะจากการวิจัยดังนี้

1. สรุปการวิจัย

1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อดัดแปรโครงสร้างของกากมะพร้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้ทางการเกษตรให้มีสมบัติที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบอาหารของสัตว์น้ำโดยใช้วิธีการทางฟิสิกส์

1.2 วิธีดำเนินการวิจัย

สุ่มตัวอย่างกากมะพร้าวด้วยวิธีสุ่มอย่างง่าย จากเครื่องคั้นกะทิระบบอัดเกลียวของอุตสาหกรรมผลิตน้ำกะทิ 3 แห่ง ในอำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา โดยสุ่มตัวอย่างมาจากภาชนะบรรจุประมาณร้อยละ 20 และนำตัวอย่างที่เก็บจากทุกจุดมารวมและผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปดัดแปรโครงสร้างโดยใช้วิธีทางฟิสิกส์ ได้แก่ การแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน และศึกษาการใช้ประโยชน์ของกากมะพร้าวในระดับหลอดทดลอง โดยศึกษา 1) การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณ โปรตีน ลิพิด เถ้า เยื่อใยและคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ 2) การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพที่มีผลต่อการไฮโดรไลส์ของเอนไซม์ย่อยอาหาร ได้แก่ ค่าพีเอช การละลายน้ำ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระดับจุลภาค ความเป็นผลึก และสมบัติทางความร้อน และ 3) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลองโดยใช้เอนไซม์ที่สกัดจากปลาเศรษฐกิจที่มีพฤติกรรมกินอาหารที่แตกต่างกัน ได้แก่

ปลาตะเพียน (ปลากินพืช) ปลานิล (ปลากินพืชและเนื้อ) และ ปลาช่อน (ปลากินเนื้อ) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสังคมศาสตร์ รายงานผลข้อมูลในรูปของค่าเฉลี่ย $\pm$ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบทางเคมี สมบัติทางเคมีกายภาพ และประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

1.3 ผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของกากมะพร้าวโดยวิธีทางฟิสิกส์ ได้แก่ การแช่น้ำ การไมโครเวฟ การฉายรังสีแกมมา และการฉายลำแสงอิเล็กตรอน เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสำหรับสัตว์น้ำประกอบด้วยการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพ และการประเมินประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองซึ่งมีผลดังนี้

1.3.1 องค์ประกอบทางเคมี

กากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปร โครงสร้างมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างจากกากมะพร้าวชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยองค์ประกอบทางเคมีที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหลังการดัดแปร ได้แก่ คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ และเถ้า ในขณะที่ปริมาณเยื่อใยมีค่าลดลง ปริมาณลิพิดของกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการแช่น้ำและใช้คลื่นไมโครเวฟลดลง ส่วนกากมะพร้าวที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามีปริมาณเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดัดแปรด้วยการฉายลำแสงอิเล็กตรอนพบว่า ปริมาณลิพิดไม่แตกต่างจากชุดควบคุม สำหรับปริมาณโปรตีนของกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีการแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ และฉายรังสีแกมมาพบว่า ไม่แตกต่างจากชุดควบคุม ส่วนกากมะพร้าวที่ฉายลำแสงอิเล็กตรอนมีปริมาณโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

1.3.2 สมบัติทางเคมีกายภาพ

พีเอชของกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปร มีค่าแตกต่างจากกากมะพร้าวชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ส่วนสมบัติการละลายน้ำ พบว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปร โดยการแช่น้ำมีค่าสูงสุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับการละลายน้ำของกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรด้วยวิธีอื่นๆ ซึ่งไม่แตกต่างกับกากมะพร้าวชุดควบคุม การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่าลักษณะพื้นผิวของกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรมีความแตกต่างจากชุดควบคุม โดยการแช่น้ำ และการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้โครงสร้างของกากมะพร้าวมีลักษณะโค้งงอและม้วนพับมากขึ้น ในขณะที่กากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรโดยใช้รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน จะมีการม้วนพับของโครงสร้างเพียงเล็กน้อย พื้นผิวบางส่วนถูกทำลาย และมีการแตกหัก

รูปแบบการเลี้ยงเบนรังสีเอกซ์ของกากมะพร้าวก่อนและหลังการคัดแปรมีความคล้ายคลึงกัน และเมื่อคำนวณความเป็นผลึกสัมพัทธ์พบว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรมีค่าความเป็นผลึกลดลง สำหรับผลการศึกษาสมบัติทางความร้อนพบว่า อุณหภูมิเริ่มต้น อุณหภูมิพีก และอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของกากมะพร้าวที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าชุดควบคุม ส่วนกากมะพร้าวที่ผ่านการแช่น้ำและใช้คลื่นไมโครเวฟมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงกว่า แต่มีอุณหภูมิพีกและอุณหภูมิสุดท้ายที่เกิดการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า ในขณะที่เอนทัลปีของการหลอมละลายของกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรรวมมีค่าต่ำกว่าชุดควบคุม

1.3.3 ประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรรองสร้างด้วยวิธีทางฟิสิกส์โดยใช้เอนไซม์จากปลาเศรษฐกิจ 3 ชนิดได้แก่ ปลาตะเพียน ปลานิลและปลาช่อน มีดังนี้

1) ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลอง

ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของปลาตะเพียนในกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรรองโดยวิธีการแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ และการใช้ลำแสงอิเล็กตรอนไม่แตกต่างจากกากมะพร้าวในชุดควบคุม ($p > 0.05$) ในขณะที่การฉายรังสีแกมมาทำให้ค่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนลดลง ส่วนประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของปลานิล พบว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรรองโดยวิธีการแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ และการฉายรังสีแกมมา ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยไม่แตกต่างจากชุดควบคุม ($p > 0.05$) ซึ่งแตกต่างจากประสิทธิภาพการย่อยของกากมะพร้าวที่ผ่านการฉายลำแสงอิเล็กตรอนที่มีค่าลดลง สำหรับประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของปลาช่อน พบว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรมีค่าประสิทธิภาพการย่อยไม่แตกต่างจากชุดควบคุม ($p > 0.05$)

2) ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในหลอดทดลอง

ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตของกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรรองไม่แตกต่างจากกากมะพร้าวชุดควบคุม ($p > 0.05$) ในปลาตะเพียน ขณะที่ประสิทธิภาพการย่อยกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรรองของปลานิลและปลาช่อนมีค่าแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยการศึกษาในปลานิลพบว่า การคัดแปรรองกากมะพร้าวโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้ประสิทธิภาพการย่อยมีค่าสูงสุด รองลงมาคือการแช่น้ำ การฉายลำแสงอิเล็กตรอน และการฉายรังสีแกมมา ตามลำดับ สำหรับการศึกษาในปลาช่อนพบว่า การคัดแปรรองโดยวิธีการฉายรังสีแกมมาทำให้การย่อยมีค่าสูงสุด รองลงมาคือ การฉายลำแสงอิเล็กตรอน การแช่น้ำ และ การใช้คลื่นไมโครเวฟ ตามลำดับ

2. อภิปรายผล

2.1 องค์ประกอบทางเคมี

ผลการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของกากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปร โครงสร้างเปรียบเทียบกับกากมะพร้าวหูดควบคุมประกอบด้วยโปรตีน ลิพิด เถ้า เยื่อใย และคาร์โบไฮเดรตที่ข่อยได้ ดังนี้

2.1.1 โปรตีน

โปรตีนของกากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธีการแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ และฉายรังสีแกมมามีปริมาณไม่แตกต่างจากกากมะพร้าวหูดควบคุม ($p > 0.05$) ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาในแป้งถั่วเหลืองที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (Hamza *et al.*, 2012) และส่วนผสมของอาหารปลาที่ผ่านการตัดแปรโดยการใช้คลื่นไมโครเวฟและการฉายรังสีแกมมา (Thongprajukaew *et al.*, 2011) ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าการตัดแปรด้วยวิธีการดังกล่าวไม่ทำให้มีการสูญเสียปริมาณโปรตีนในวัตถุดิบ ขณะที่การฉายลำแสงอิเล็กตรอนพบว่าทำให้ปริมาณโปรตีนลดลงซึ่งอาจเกิดขึ้นเนื่องจากระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการสูญเสียกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบได้ (Brewer, 2009)

2.1.2 ลิพิด

กากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการแช่น้ำ การใช้คลื่นไมโครเวฟ และการฉายรังสีแกมมามีปริมาณลิพิดแตกต่างจากหูดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยปริมาณลิพิดของกากมะพร้าวที่ผ่านการฉายรังสีแกมมามีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบที่เป็นไขมันไม่อิ่มตัวสามารถเปลี่ยนเป็นกรดไขมันอิ่มตัวได้ตามปฏิกิริยาไฮโดรเจเนชัน (Hydrogenation) ซึ่งมีความเสถียรมาก และมีโอกาสสูญเสียได้น้อยกว่า ทำให้ปริมาณลิพิดในวัตถุดิบอาหารมีค่าสูงกว่าการตัดแปรโดยวิธีอื่นๆ ขณะที่ปริมาณลิพิดที่ลดลงหลังจากการตัดแปรโดยการแช่น้ำและใช้คลื่นไมโครเวฟอาจเกิดจากปฏิกิริยาลิพิดเพอรอกซิเดชัน (Lipid Peroxidation) ในตำแหน่งพันธะคู่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คือ ไฮโดรเพอรอกไซด์ (Hydroperoxide) และเมทาบอลไลท์ทุติยภูมิ (Secondary Oxidation Product) อื่นๆ (Stewart *et al.*, 2003) ทำให้ปริมาณลิพิดลดลง ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาในส่วนผสมของวัตถุดิบอาหารปลาที่พบว่าการใช้ไมโครเวฟทำให้กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งมีพันธะคู่ตั้งแต่ 2 ตำแหน่ง และมีคาร์บอนตั้งแต่ 18 อะตอมขึ้นไป (Polyunsaturated Fatty Acid) มีปริมาณลดลง (การุณ ทองประจุแก้ว 2554) ในขณะที่กากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรโดยวิธีการฉายลำแสงอิเล็กตรอนมีปริมาณลิพิดไม่แตกต่างจากกากมะพร้าวหูด

ควบคุม ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในเมล็ดข้าวฟ่าง (Shawrang *et al.*, 2011) ที่พบว่าการฉายลำแสงอิเล็กตรอนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบดังกล่าว

2.1.3 เถ้า

กากมะพร้าวที่ผ่านการใช้คลื่นไมโครเวฟมีปริมาณเถ้าไม่แตกต่างจากชุดควบคุม ($p > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Thongprajukaew และคณะ (2011) ที่พบว่าการใช้คลื่นไมโครเวฟไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณเถ้าในอาหารปลารวมทั้งไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแร่ธาตุบางชนิด ได้แก่ คลอรีน แคลเซียม โพแทสเซียม โซเดียม ฟอสฟอรัส สังกะสี เหล็ก กำมะถัน และซิลิกอน (การุณ ทองประจุแก้ว 2554) สำหรับกากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรโดยการแช่น้ำ การฉายรังสีแกมมา และการฉายลำแสงอิเล็กตรอนพบว่า มีปริมาณเถ้าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวอาจเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการตัดแปรมีผลต่อการรวมตัวของแร่ธาตุกับสารองค์ประกอบอื่นๆ ในวัตถุดิบอาหารเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน เมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ผลจึงทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามผลการศึกษาในการศึกษาในวัตถุดิบอาหารที่ถูกตัดแปรโดยใช้รังสีแกมมา (Al-Masri and Zarkawi, 1999) และคลื่นไมโครเวฟ (การุณ ทองประจุแก้ว 2554) พบว่าการตัดแปรอาหารไม่มีผลต่อปริมาณของแร่ธาตุ

2.1.4 เยื่อใยและคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้

ปริมาณเยื่อใยของกากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกากมะพร้าวชุดควบคุม ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาในวัตถุดิบหลายชนิดที่ผ่านการตัดแปร เช่น เปลือกถั่วเหลือง เปลือกถั่วลิสง เมล็ดทานตะวัน (Al-Masri and Guenther, 1999) และฟางข้าวสาลี (Kristensen *et al.*, 2008) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของเยื่อใยแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงของลิกโนเซลลูโลส (Palekar *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 2009) ซึ่งเป็นอุปสรรคต่อการย่อยอาหารของสัตว์ ทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้มีค่าสูงขึ้นหลังจากการตัดแปร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในแป้งข้าวโพดและแป้งมันฝรั่งที่พบว่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตของแป้งที่ย่อยได้เร็ว มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการตัดแปร (Chung and Liu, 2009; 2010)

2.2 สมบัติทางเคมีกายภาพ

2.2.1 ฟีเอช

การเปลี่ยนแปลงของฟีเอชแสดงถึงการปลดปล่อยหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการสลายตัวของโมเลกุลขนาดใหญ่หลังจากการตัดแปร (Chung and Liu, 2010) โดยกากมะพร้าวที่ผ่านการใช้คลื่นไมโครเวฟ และแช่น้ำจะมีค่าฟีเอชเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากการปลดปล่อยหมู่ไฮดรอกซิลจากการสลายตัวของลิกโนเซลลูโลส ขณะที่กากมะพร้าวที่ผ่าน

การฉายรังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอนมีค่าพีเอชที่ลดลง สอดคล้องกับการศึกษาในแป้งสาคุ (Pimpa *et al.*, 2007) แป้งมันฝรั่ง (Chung and Liu, 2010) และแป้งข้าวโพด (Chung *et al.*, 2009) ซึ่งการลดลงของค่าพีเอชอาจเกิดขึ้นเนื่องจากการสลายของแป้งทำให้เกิดอนุมูลอิสระ และชักนำให้เกิดการสร้างหมู่คาร์บอกซิลที่แสดงคุณสมบัติการเป็นกรด

2.2.2 การละลายน้ำ

กากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรด้วยวิธีการแช่น้ำมีค่าการละลายสูงขึ้น คุณสมบัติดังกล่าวเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่วนอสัณฐานของวัตถุดิบอาหาร ซึ่งเป็นบริเวณที่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันน้อย การจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ และมีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยารับน้ำได้มากขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการเจลาติไนซ์ของแป้งและประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง (Chung *et al.*, 2010; Kaur *et al.*, 2010) ดังนั้นค่าการละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของปลาทั้ง 3 ชนิด

2.2.3 โครงสร้างระดับจุลภาค

กากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรมีโครงสร้างระดับจุลภาคที่แตกต่างจากชุดควบคุม โดยการแช่น้ำ และการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้โครงสร้างมีลักษณะโค้งงอและม้วนพับมากขึ้น ผลที่ได้ใกล้เคียงกับการศึกษาในแป้งข้าวโพด (Chung and Liu, 2009) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้เอนไซม์สามารถไฮโดรไลสวัตถุดิบอาหารได้ดี ขณะที่กากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรโดยใช้รังสีแกมมา และลำแสงอิเล็กตรอน จะมีการม้วนพับของโครงสร้างเพียงเล็กน้อย พื้นผิวบางส่วนถูกทำลายและมีการแตกหัก ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในแป้งมันฝรั่งและแป้งจากถั่ว (Chung and Liu, 2010) ที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา ดังนั้นการตัดแปรรเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของกากมะพร้าวจึงอาจช่วยให้สัตว์มีประสิทธิภาพการย่อยในท้องทางเดินอาหารดียิ่งขึ้น

2.2.4 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

รูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของกากมะพร้าวก่อนและหลังการตัดแปรรมีความคล้ายคลึงกัน แต่เมื่อศึกษาความเป็นผลึกสัมพัทธ์พบว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรมีค่าความเป็นผลึกลดลง การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจเกิดขึ้นจากการที่โครงสร้างของผลึกบางส่วนถูกทำลายหลังจากได้รับการตัดแปรร ทำให้โครงสร้างส่วนอสัณฐานของกากมะพร้าวมีค่าสูงขึ้น นอกจากนี้การที่โครงสร้างผลึกบางส่วนถูกทำลายอาจทำให้การไฮโดรไลสของเอนไซม์ย่อยอาหารสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างที่มีการจับตัวกันแน่นอย่างเป็นระเบียบของผลึกจะเป็นอุปสรรคต่อการไฮโดรไลสของเอนไซม์ (Kaur *et al.*, 2010) ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาในแป้งที่

พบว่าประสิทธิภาพการย่อยจะสูงขึ้นเมื่อแป้งมีความเป็นผลึกสัมพัทธ์ต่ำ (Chung and Liu, 2010; Kaur *et al.*, 2010)

2.2.5 สมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของกากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรูปแตกต่างจากกากมะพร้าวหูดควบคุม โดยผลการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 400 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นถึงการดูดพลังงาน ซึ่งสามารถอภิปรายผลได้ดังนี้

1) พิกที่ 1 ช่วงอุณหภูมิ 40 ถึง 150 องศาเซลเซียส

กากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรูปโดยการฉายรังสีแกมมา และฉายลำแสงอิเล็กตรอนมีอุณหภูมิในการหลอมเหลว (T_o , T_p และ T_c) เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลว ($T_c - T_o$) ของกากมะพร้าวที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา การเพิ่มขึ้นของช่วงอุณหภูมิดังกล่าวอาจเกิดจากวัตถุดิบมีผลึกที่เพิ่มขึ้น (Chung and Liu, 2009) ทำให้มีการรวมกันของส่วนอสัณฐานและผลึกน้อยลง (Bao and Corke, 2002) ผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาในแป้งมันฝรั่งที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (Chung and Liu, 2010) ขณะที่กากมะพร้าวที่ผ่านการฉายลำแสงอิเล็กตรอน การแช่น้ำ และการใช้คลื่นไมโครเวฟ มีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลวลดลง ซึ่งอาจเป็นเพราะอนุภาคของเม็ดแป้งในวัตถุดิบมีความแข็งแรงลดลง จึงสามารถหลอมเหลวได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า

เอนทาลปีของการหลอมละลาย (ΔH) มีค่าลดลงอย่างชัดเจนในกากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรูป แสดงให้เห็นว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการตัดแปรรูปและกากมะพร้าวหูดควบคุม มีองค์ประกอบของอะไมโลส และอะไมโลเพกตินที่แตกต่างกัน โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพกตินสูงจะใช้พลังงานในการเกิดเจลลิตีในเซชันสูงกว่า เนื่องจากมีปริมาณของผลึกมาก (Fredriksson *et al.*, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ค่าความเป็นผลึกที่พบว่าการตัดแปรรูปทำให้ค่าความเป็นผลึกในกากมะพร้าวลดลง รวมทั้งระดับการเกิดเจลลิตีในเซชันของแป้งที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการตัดแปรรูปมีผลต่อการทำลายโครงสร้างผลึกภายในเม็ดแป้งของวัตถุดิบ และทำให้วัตถุดิบละลายน้ำได้ดีขึ้น (การุณ ทองประจุแก้ว และ อุทัยวรรณ โกวิทวาทิ 2555) สอดคล้องกับผลการศึกษาค่าการละลายน้ำที่เพิ่มขึ้นในกากมะพร้าวที่ผ่านการแช่น้ำ และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในกากมะพร้าวที่ผ่านการใช้คลื่นไมโครเวฟ

2) พิกที่ 2 ช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 400 องศาเซลเซียส

การศึกษาสมบัติทางความร้อนของกากมะพร้าวพบว่าไม่เกิดพีคการดูดพลังงานในช่วงอุณหภูมิ 150 ถึง 240 องศาเซลเซียส ขณะที่มียางานว่าเซลลูโลส และลิกนินจะ

มีการสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส (Sinha and Rout, 2009) แสดงว่าองค์ประกอบที่เป็นเซลลูโลส และลิกนินในกากมะพร้าวอาจมีความเสถียร

ลิกโนเซลลูโลสหลายชนิดจะมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส การศึกษาในปอกระเจาพบว่า การสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและพันธะไกลโคซิดิก (Glycosidic Linkage) ของเซลลูโลส เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 290.2 องศาเซลเซียส (Sinha and Rout, 2009) ใกล้เคียงกับการศึกษาในกากมะพร้าวที่พบว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของพีคที่ 2 อยู่ในช่วง 260 ถึง 293 องศาเซลเซียส แสดงว่าองค์ประกอบที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสในกากมะพร้าวเริ่มเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว เมื่อศึกษาเอนทาลปีของการสลายตัว พบว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรใช้พลังงานในการสลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสน้อยลง แสดงว่าการดัดแปรมีผลต่อปริมาณเชื้อใยของกากมะพร้าว ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์เชื้อใยที่มีค่าลดลงในกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปร

2.3 ประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลอง

2.3.1 ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน

ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีการแช่น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการดัดแปรวัตถุดิบด้วยวิธีการดังกล่าวสามารถลดสารต้านโภชนาการ และตัวยับยั้งเอนไซม์ทริปซิน (Abd El-Hady and Habiba, 2003) ทำให้เอนไซม์สามารถไฮโดรไลส์ได้ดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของการแช่น้ำเมล็ดถั่ว (Abd El-Hady and Habiba, 2003) ขณะที่การฉายรังสีมีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของปลาตะเพียนและปลานิล โดยทำให้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนลดลง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากระดับของการฉายรังสีที่สูงเกินไปทำให้วัตถุดิบมีคุณสมบัติบางประการที่ไม่เหมาะสมต่อการย่อยโปรตีนของปลาทั้ง 2 ชนิด ผลดังกล่าวสอดคล้องกับการรายงานของ Ciesla และคณะ (2002) ที่พบว่าการใช้รังสีแกมมาในระดับสูงมากเกินไปอาจทำให้โปรตีนเกิดการจับตัวกันแน่นส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยลดลงได้ สำหรับการศึกษาในปลาช่อนพบว่าระดับการฉายรังสีไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน นอกจากนี้ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในหลอดทดลองยังมีความสัมพันธ์กับคุณภาพของโปรตีนในวัตถุดิบอาหาร เช่น ปริมาณ Amino Acid D-Enantiomer (Luzzana *et al.*, 1999) และ Protein Subunit Degradation (Sadeghi and Shawrang, 2006; Ebrahimi *et al.*, 2009) เป็นต้น

2.3.2 ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต

ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตในกากมะพร้าวที่ผ่านการดัดแปรทุกวิธีของปลาทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งอาจมีผลเนื่องมาจากการดัดแปรโครงสร้างทำให้วัตถุดิบมีสมบัติทางเคมีกายภาพที่เหมาะสมต่อการไฮโดรไลส์ของเอนไซม์ เช่น การละลายน้ำ

(Chung *et al.*, 2010; Kaur *et al.*, 2010) โครงสร้างพื้นผิว (Bak *et al.*, 2009) และความเป็นผลึก (Chung *et al.*, 2010) เป็นต้น นอกจากนี้ยังสามารถลดสารต้านโภชนาการ และตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้ (Abd El-Hady and Habiba, 2003) ทำให้เอนไซม์สามารถไฮโดรไลสได้ดียิ่งขึ้น ผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับการศึกษาของ Thongprajukaew และคณะ (2011) ที่พบว่า การตัดแปรรูปโครงสร้างส่วนผสมของอาหารปลาสามารถทำให้วัตถุดิบมีประสิทธิภาพการย่อยที่ดีขึ้น รวมทั้งผลการศึกษาในวัตถุดิบอื่นๆ เช่น เมล็ด *Sesbania* เมล็ดถั่ว และ เมล็ดชงโค (Hossain *et al.*, 2010; Abd El-Hady and Habiba, 2003; Vijayakumari *et al.*, 2007) เป็นต้น นอกจากนี้ผล การศึกษายังพบว่าการแช่น้ำ และการใช้คลื่นไมโครเวฟทำให้ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรต ในปลาตะเพียนและปลานิลมีค่าสูงสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาประสิทธิภาพการย่อย คาร์โบไฮเดรตใน Switch grass (Hu and Wen, 2008) ที่พบว่า มีค่าสูงขึ้นเมื่อผ่านการตัดแปรรูปโดยใช้ คลื่นไมโครเวฟ และผลการศึกษาการเจริญเติบโตของปลานิลวัยอ่อนที่เลี้ยงด้วยกากมะพร้าวที่ผ่าน การแช่น้ำ (Olude *et al.*, 2008) หรือปลาการ์ฟที่เลี้ยงด้วยเมล็ด *Sesbania* ที่ผ่านการแช่น้ำ (Hossain *et al.*, 2001) ขณะที่การฉายรังสีแกมมาทำให้ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตของปลาช่อนมี ค่าสูงสุด สอดคล้องกับผลการศึกษาในสูตรอาหารสำหรับเพาะเลี้ยงปลานิลตัวเต็มวัยที่พบว่า ประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตมีค่าสูงขึ้นในวัตถุดิบที่ผ่านการฉายรังสีแกมมา (Sunthornchot *et al.*, 2009)

3. สรุปผลการทดลอง

การแช่น้ำและการใช้คลื่นไมโครเวฟเป็นวิธีที่เหมาะสมในการตัดแปรรูปกากมะพร้าว สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบอาหารของปลากินพืช (ปลาตะเพียน) และปลากินพืชและเนื้อ (ปลานิล) ส่วน การฉายรังสีแกมมาเป็นวิธีที่เหมาะสมในการตัดแปรรูปกากมะพร้าวสำหรับปลากินเนื้อ (ปลาช่อน) เนื่องจากวิธีดังกล่าวไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ โปรตีน ทำให้ปริมาณ คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้เพิ่มขึ้น ลดเชื้อยั้งที่เป็นอุปสรรคต่อการย่อย และทำให้กากมะพร้าวมีการ เปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีกายภาพที่เหมาะสม ได้แก่ โครงสร้างทางจุลภาค ความเป็นผลึก สมบัติ ทางความร้อน และทำให้ประสิทธิภาพการย่อยในหลอดทดลองมีค่าสูงขึ้น โดยการแช่น้ำทำให้ค่า ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในปลาทั้ง 3 ชนิด นอกจากนี้การ แช่น้ำยังเป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่าย และประหยัดค่าใช้จ่าย เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้คลื่น ไมโครเวฟ ขณะที่การฉายรังสีแกมมาทำให้ค่าประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตมีค่าสูงที่สุดใน

ปลาช่อน ดังนั้นการแช่น้ำ และการฉายรังสีแกมมาจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารสำหรับสัตว์น้ำ

4. ข้อเสนอแนะ

4.1 ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

4.1.1 การนำกากมะพร้าวไปใช้เป็นอาหารสัตว์ควรคัดแปรโดยการแช่น้ำก่อนนำไปผสมและอัดเม็ดเป็นอาหารเพื่อให้สัตว์ใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากผลการศึกษาพบว่า การคัดแปรโดยวิธีการแช่น้ำเป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตของสัตว์น้ำได้ ดังนั้นเกษตรกรอาจสามารถลดต้นทุนการผลิตอาหารสัตว์น้ำได้โดยการเพิ่มปริมาณกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรโดยการแช่น้ำลงในอาหารเพื่อทดแทนวัตถุดิบชนิดอื่นที่มีราคาแพงกว่า

4.2 ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

4.2.1 การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยของเอนไซม์ในกากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรแสดงให้เห็นว่ากากมะพร้าวที่ผ่านการคัดแปรโดยการแช่น้ำเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยในครั้งต่อไปเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการแช่น้ำมากยิ่งขึ้น เช่น อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อน้ำ อุณหภูมิ ระยะเวลาในการแช่น้ำ และอัตราการเขย่า เป็นต้น

4.2.2 ควรมีการศึกษาผลของการคัดแปรกากมะพร้าวต่ออัตราการรอดและการเจริญเติบโตของปลาทั้ง 3 ชนิดโดยการทดลองเลี้ยงจริงในห้องปฏิบัติการ