

การพัฒนาวัสดุผสมจากแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินที่สกัดได้จาก
หนังปลานิล (*Oreochromis niloticus*)

DEVELOPMENT OF BLEND MATERIALS BASED ON RICE FLOUR
AND GELATIN EXTRACTED FROM NILE TILAPIA (*Oreochromis niloticus*) SKIN

พีรพงศ์ บุญฤกษ์^{1*} และ อธิวัชร วิริยะอมรชัย^{2*}

¹โรงเรียนมัธยมสาธิตวัดพระศรีมหาธาตุ วิทยาลัยการฝึกหัดครู มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร กรุงเทพฯ 10220

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมวัสดุและกระบวนการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง ระยอง 21120

Pheeraphong Bunroek^{1*} and Atiwat Wiriya-amornchai^{2*}

¹Wat Phrasirimahadhat Secondary Demonstration School, College of Teacher Education,

Phranakhon Rajabhat University, Bangkok 10220

²Materials and Processing Technology, Faculty of Engineering and Technology,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok Rayong campus, Rayong 21120

*E-mail: pheeraphong@pnru.ac.th, atiwat.w@eat.kmutnb.ac.th

Received: 2020-07-09

Revised: 2020-12-21

Accepted: 2021-05-23

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติของวัสดุผสมแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินจากหนังปลานิล (*Oreochromis niloticus*) ขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดรีดออกมาเป็นเส้น extrudate นำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ เอกลักษณะของหมู่ฟังก์ชันในวัสดุผสม สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา ความสามารถในการดูดซับน้ำ รวมถึงเสถียรภาพทางความร้อน พบว่าเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิลมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว โปร่งแสง มีค่า pH เฉลี่ย 5-6 ความเข้มข้นเจลาตินร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยเจลาตินจากหนังปลานิลมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนหลายชนิด เมื่อศึกษาสมบัติเชิงกลพบว่าปริมาณเจลาตินที่ 4-8 phr ในวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินจากหนังปลานิล มีค่าความเค้นสูงสุดและระยะยืดเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการเติมเจลาติน นอกจากนี้ สมบัติเชิงกลหลังจากการทดสอบในสภาวะความชื้นอิ่มตัวยังยวด พบว่าค่าความเค้นสูงสุดของวัสดุผสมที่มีการเติมเจลาตินที่ได้จากหนังปลานิลที่ 10 phr จะมีค่าใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ได้ผ่านการเติมเจลาติน ซึ่งสอดคล้องกับผลของสัณฐานวิทยาจากการทดสอบ SEM นอกเหนือจากนั้น ความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีความอิ่มตัวจากการดูดซับความชื้นที่ระยะเวลา 4 สัปดาห์ รวมถึงเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมที่มีการเติมเจลาตินที่ 4-8 phr ส่งผลทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของสูงสุดมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น แสดงให้เห็นถึงเจลาตินที่สกัดจากหนังปลานิลสามารถเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมได้

คำสำคัญ: วัสดุผสม เจลาตินจากหนังปลานิล แป้งข้าวเจ้า

ABSTRACT

This research aimed to study blended materials based on rice flour and gelatin extracted from Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) by extrusion processing. The analysis of the blended materials examined the physical properties, functional group characteristics, mechanical properties, morphological properties, water uptake measurement, and thermal stability. The results indicated that after extraction of the Nile Tilapia skin gelatin, the solution was white liquid, translucent, pH 5 – 6, and 2.00% concentration by weight. There were many amino acids in the extracted solution from the Nile Tilapia skin gelatin. At 4-8 phr of extracted gelatin in the blended materials, the tensile strength and elongation increased when compared with the rice flour. Furthermore, the mechanical properties after testing in the saturated relative humidity found that at 10 phr of extracted gelatin in the blended materials, the value of tensile strength was nearly the rice flour correspond to the morphological properties from SEM. Otherwise, water absorption increased with the immerse time and saturation of the water at 4 weeks. The thermal stability results showed that the maximum degradation temperature tends to increase at 4-8 phr of extracted gelatin in the blended materials. The evidence of the gelatin extracted from Nile Tilapia could be improved the thermal stability in the materials.

Keyword: blended materials, fish gelatin, rice flour

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีขยะพลาสติกประมาณปีละ 27 ล้านตัน ซึ่งสามารถนำไปรีไซเคิลได้เพียง 5.8 ล้านตันเท่านั้น โดยมีการกำจัดได้อย่างถูกต้องตามหลักสิ่งแวดล้อม 9.57 ล้านตัน และที่เหลือกว่า 10 ล้านตันจะเข้าสู่สิ่งแวดล้อม (Pollution Control Department, 2017) ซึ่งปัญหาข้างต้นหากมีการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้พลาสติกโดยมีการใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติ จะเป็นการลดปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้หนึ่งในพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้มาจากพอลิเมอร์จากธรรมชาติ เช่น เจลาตินจากการแปรรูปของคอลลาเจนในเกล็ดปลา หนังปลา กระดูกหมู หนังหมู ฯลฯ โดยมีงานวิจัยที่นำเจลาตินที่ผสมกับแป้งสาลี (Ottenhof & Farhat, 2004) เนื่องจากแป้งสาลีมักถูกแทนซึ่งมีความสามารถในการเข้ากันได้กับสารจำพวกโปรตีน นอกเหนือจากนั้นการนำแอลบูมินซึ่งเป็นโปรตีนจากไข่ขาวมาผสมเพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ในการขึ้นรูปของวัสดุผสม (Yoksan et al., 2017) และยังมีงานวิจัยที่นำแป้งสาคูมาผสมกับเจลาติน โดยแผ่นฟิล์มเจลาตินเมื่อขึ้นรูปจะมีเส้นใยขนาดเล็กอยู่ภายในโครงสร้างทำให้วัสดุผสมมีความแข็งแรงมากขึ้น (Al-Hassan & Norziah, 2011) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตเจลาตินจากเกล็ดปลากะพงขาว พบว่าการแช่เกล็ดปลากะพงขาวในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1.0 เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมงและแช่ในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 0.8 เป็นเวลา 2.5 ชั่วโมง รวมถึงสกัดที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ลักษณะของเจลาตินที่ได้มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีโดยเฉพาะสีที่มีความใสมาก (Kachenpukdee et al., 2006) รวมถึงยังมีการศึกษา

สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของเจลาตินสกัดจากหนังปลาน้ำจืดสามชนิด คือ ปลาตะเพียน ปลาสร้อย และ ปลาตุ๋นด้วยกระบวนการ liming พบว่า หนังปลาตะเพียนสามารถสกัดเจลาตินได้มากที่สุด มีค่าเท่ากับ 37.97% และมีปริมาณความชื้นสูง อีกทั้งยังมีการศึกษาถึงความเหนียว (Toughness) ของเจลาตินซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณของ proline และ hydroxyproline ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่พบในเจลาติน (Jamilah et al., 2011) และยังมีการศึกษาการใช้กรดที่แตกต่างกันในการสกัดเจลาตินโดยเปรียบเทียบความสามารถของกรดที่ใช้ในการสกัดเจลาตินจากหนังปลา Dover sole ระหว่างกรดแลกติกและกรดแอสซิติค และศึกษาถึงร้อยละของเจลาตินที่ได้ องค์ประกอบของกรดอะมิโน การกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุล ความแข็งแรงของเจล สมบัติวิสโคอิลาสติก ความสามารถในการบิดเป็นเกลียว และปรากฏการณ์การรวมกลุ่มกัน โดยพบว่าการใช้กรดแลกติกที่ความเข้มข้น 25 mM แทนกรดแอสซิติคจะได้ปริมาณเจลาตินที่ดีกว่า ในทางกลับกันการใช้กรดแลกติกความเข้มข้น 50 mM จะให้ปริมาณเจลาตินที่ได้จากการทำให้โมเลกุลเล็กลงด้วยน้ำค่อนข้างมาก ความสามารถในการบิดเป็นเกลียวต่ำ ความแข็งแรงของเจลต่ำ และสมบัติวิสโคอิลาสติกต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเจลาตินที่ได้จากการเตรียมโดยใช้กรดแลกติก จะทำให้เกิดการกระเจิงแสงได้มากกว่าการเตรียมเจลาตินที่ใช้กรดแอสซิติค (Giménez et al., 2005) นอกเหนือจากนั้น เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มที่ทำจากเจลาตินของหนังหมู ที่ขึ้นรูปด้วยวิธี cast film และ extrusion พบว่า extruded film จะมี tensile strength ต่ำ แต่ elongation และการซึมผ่านของไอน้ำที่สูงกว่า cast film (Gómez-Guillén et al., 2009) แต่เนื่องจากข้อห้ามทางศาสนาอิสลามที่ต้องห้ามบริโภคหมู ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการสกัดเจลาตินที่ได้จากหนังปลา เพื่อนำมาประโยชน์ทางด้านบรรจุภัณฑ์และอุตสาหกรรมทางการแพทย์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และ สมบัติทางความร้อนของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากหนังปลานิลด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีดเพื่อนำไปใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ต่อไป

วิธีการ

1. การสกัดเจลาตินจากหนังปลานิล

นำหนังปลาจำนวน 200 กรัม ที่ได้จากกระบวนการแปรรูปปลานิลและเก็บในสภาวะแช่แข็งที่อุณหภูมิ -4°C มาทำการสกัดเจลาติน โดยล้างน้ำสะอาดเป็นระยะเวลา 20 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นหั่นหนังปลาเป็นชิ้นเล็ก ๆ และนำไปกำจัดไขมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คาร์บอนेटที่ปริมาณ 1.25 กรัม กับน้ำแข็งปริมาณ 200 กรัม ในน้ำกลั่นปริมาตร 1 ลิตร จากนั้น โดยการแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.4% (w/v) เพื่อสกัดโปรตีนที่ไม่ใช่คอลลาเจนออกที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำหนังปลาออกแล้วล้างให้สะอาดด้วยน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำหนังปลาที่ผ่านการล้างน้ำสะอาดไปทำการสกัดด้วยกรดแลกติกความเข้มข้น 0.4% (v/v) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ล้างให้สะอาดด้วยน้ำเป็นเวลา 1 ชั่วโมง เจลาตินจะถูกสกัดออกจากหนังปลาโดยการแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 300 มิลลิลิตร ที่มีการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70°C เติมน้ำเกลือเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที จากนั้นทำการกรองเอาหนังปลาออกในขณะร้อน สังเกตลักษณะปรากฏของสารละลายเจลาติน วัดค่า pH ของเจลาตินที่สกัดได้ Kachenpukdee et al. (2006) และหาปริมาณเจลาตินที่ได้จากการสกัดด้วยวิธีการระเหยแห้ง

2. การเตรียมวัสดุผสม

นำแป้งข้าวเจ้าซึ่งมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 17-21 (Yomyat, 2020) ผสมกับกลีเซอรอล นวดให้

เข้ากันเป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วจึงเติมสารละลายเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิลตามสัดส่วนที่ได้แสดงในตารางที่ 1 จากนั้นนวดให้เข้ากันโดยไม่ให้โมเลกุลแป้งและเจลาตินจับตัวกันเป็นก้อน และนำมาป้อนเข้าเครื่องอัดรีด โดยใช้อุณหภูมิตั้งแต่ Feed zone ถึง Metering Zone ในช่วง 90-120 °C และใช้ความเร็วรอบการหมุนสกรูเป็น 60 รอบต่อนาที จะได้วัสดุผสมออกมาในรูปของเส้น extrudate และนำไปทดสอบและวิเคราะห์ผลต่อไป

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณของสารและวัตถุดิบที่ใช้ในแต่ละสูตรการผสม

สูตร	สัญลักษณ์	ปริมาณ แป้งข้าวเจ้า (phr)	ปริมาณเจลาติน ในของผสม (phr)	ปริมาณ กลีเซอรอล (phr)	ปริมาณน้ำ (phr)
1	RF/G0	100	0	30	30
2	RF/G2	100	2	30	30
3	RF/G4	100	4	30	30
4	RF/G6	100	6	30	30
5	RF/G8	100	8	30	30
6	RF/G10	100	10	30	30

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะปรากฏของสารละลายเจลาติน และวัดค่า pH ของสารละลายเจลาตินโดยใช้กระดาษยูนิเวอร์แซลอินดิเคเตอร์ และหาปริมาณเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิลในสารละลายโดยการระเหยแห้ง

3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิลและเจลาตินสำเร็จรูปโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยวิเคราะห์ในช่วงเลขคลื่น 4000-450 cm^{-1} ใช้อัตราการสแกน 4 Scans โดยมีการตัด Background ของสิ่งแวดล้อม (น้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์)

3.3 วิเคราะห์สมบัติเชิงกล โดยใช้เครื่อง Universal Testing Machine โดยใช้อัตราในการดึง extrudate ที่ 10 มิลลิเมตรต่อนาที และใช้โหลดเซลล์ที่ 5 กิโลนิวตัน โดยในแต่ละสูตรทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ตัวอย่างที่ใช้ในการดึง และทำการทดสอบที่สภาวะหลังจากการขึ้นรูป หลังจากน้ำหนักของ extrudate คงที่ และหลังจากการทดสอบในสภาวะอิมมัวงยวดที่ความชื้นสัมพัทธ์ 70%R.H.

3.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) โดยวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของวัสดุหลังน้ำหนักของ extrudate คงที่ และ ลักษณะรอยแตกหักจากการทดสอบแรงดึงของ extrudate ที่กำลังขยาย 1000x เพื่อดูความสามารถในการเข้ากันได้ของวัสดุผสมระหว่างแป้งกับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล

3.5 วิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมในตู้ควบคุมความชื้นที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์ 70%R.H. โดยทำการชั่งน้ำหนักของวัสดุผสมทุกวันเป็นระยะเวลา 5 สัปดาห์

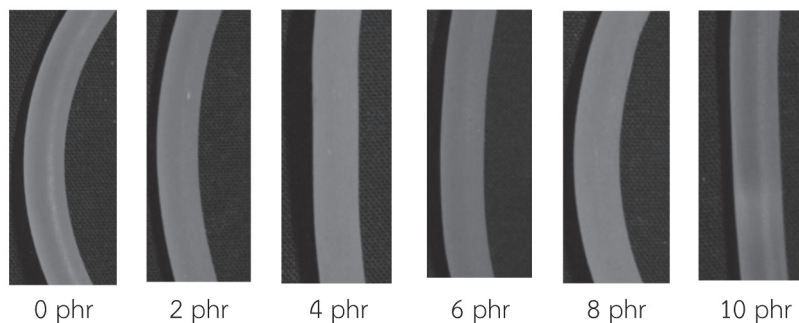
3.6 วิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนด้วยเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) โดยทำการทดสอบตั้งแต่อุณหภูมิ 50 ถึง 700 °C ที่อัตราการให้ความร้อน 10°C/min ในสภาวะบรรยากาศไนโตรเจน

ผลการทดลองและวิจารณ์

เมื่อสกัดเจลาตินจากหนังปลานิลด้วยกรดแล็กติก จะได้สารละลายดังภาพที่ 1 พบว่าลักษณะปรากฏเป็นของเหลวสีขาวขุ่น โปร่งแสง มีกลิ่นคาวปลา และเมื่อทำการทดสอบค่า pH จะอยู่ในช่วงประมาณ 5-6 นอกจากนั้นเมื่อทำการหาปริมาณของเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล พบว่าสารละลายเจลาตินมีความเข้มข้นเฉลี่ยร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก เมื่อพิจารณาลักษณะปรากฏของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากหนังปลานิลพบว่า ลักษณะของวัสดุผสมที่ได้เป็นเส้นที่มีสีเหลืองอ่อน โปร่งแสง พื้นผิวเรียบ ในทุกสัดส่วนของการผสม ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 1 ลักษณะปรากฏของสารละลายเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล

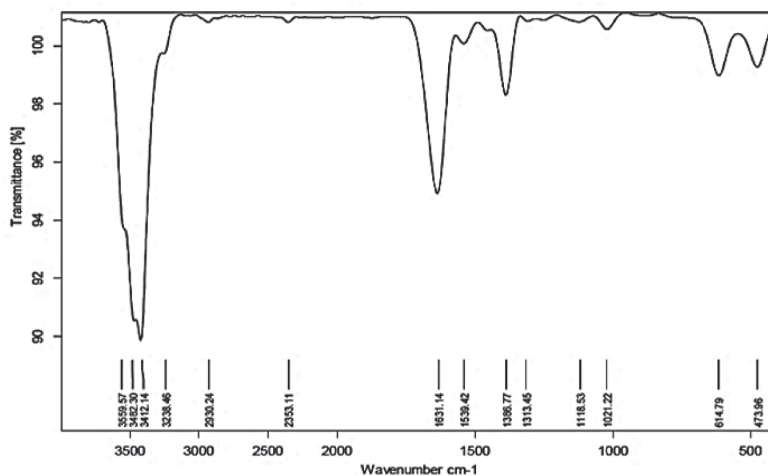


ภาพที่ 2 ลักษณะปรากฏของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล

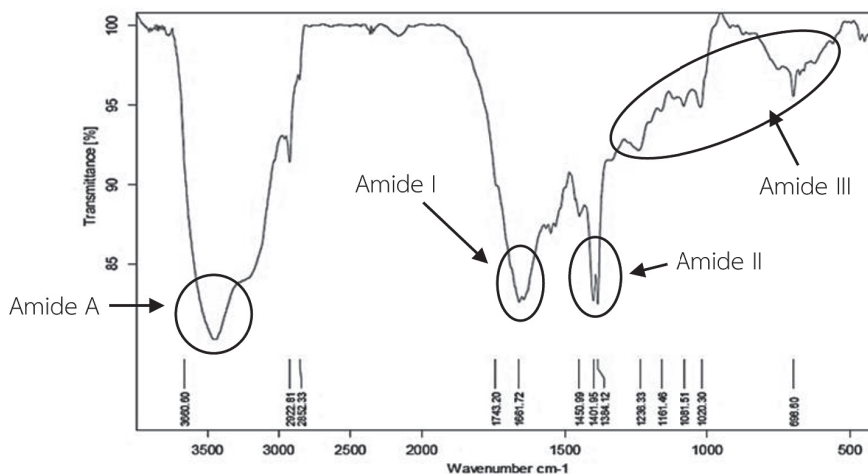
การพิสูจน์เอกลักษณ์ของเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิลและเจลาตินสำเร็จรูปโดยใช้เทคนิค FTIR

ภาพที่ 3 แสดงเอกลักษณ์ของเจลาตินสำเร็จรูปที่ได้ตามท้องตลาด โดยทางผู้วิจัยได้ทำเลือกเจลาตินสำเร็จรูป ยี่ห้อ McGrarrett Fish Gelatin ที่มีปริมาณเจลาตินที่ได้จากปลา (INS 428) 100% พบว่า ที่ตำแหน่ง $3560-3412\text{ cm}^{-1}$ แสดงเอกลักษณ์ของหมู่ Amide Type A (N-H Group) ซึ่งแสดงถึงดีกรีการเกิดการเชื่อมขวางระหว่างโครงสร้างของเจลาตินในสายโซ่ (Zhang et al., 2013) นอกเหนือจากนั้นยังพบว่าที่ตำแหน่งเลขคลื่น 1631 cm^{-1}

แสดงเอกลักษณ์ของหมู่ Carbonyl Stretching ($C=O$) ในโครงสร้างของเอไมด์ (Amide) (Tongdeesoontorn et al., 2012) และยังพบตำแหน่งเลขคลื่นที่ 1386 และ 1313 cm^{-1} ที่แสดงถึง $-CH_2-$ bending in plane (Zaher et al., 2009) รวมถึงตำแหน่งเลขคลื่น 1118 และ 1021 cm^{-1} แสดงเอกลักษณ์ของ $C-O-C$ antisymmetric bridge stretching (Rhim et al., 1999) นอกจากนั้นยังมีตำแหน่งเลขคลื่น 614 cm^{-1} แสดงถึงเอกลักษณ์ของโครงสร้าง Skeletal Stretching (Muyonga et al., 2004) แต่เมื่อพิจารณาเอกลักษณ์ของเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล ตามภาพที่ 4 พบว่า มีส่วนประกอบของกรดอะมิโนหลายชนิด Al-Hassan & Norziah (2011) ทำให้พบการสั่นของหมู่เอไมด์ทั้งหมด 4 ช่วงตำแหน่ง ได้แก่ $3360-2300\text{ cm}^{-1}$, 1661 cm^{-1} , $1450-1401\text{ cm}^{-1}$ และ $1236-698\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งแสดงเอกลักษณ์ของโครงสร้าง Amide A, Amide I, Amide II และ Amide III (Ran et al., 2017) นั้นเป็นการยืนยันว่ายังมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนที่หลายชนิดที่ได้จากการสกัดเจลาตินจากหนังปลานิล



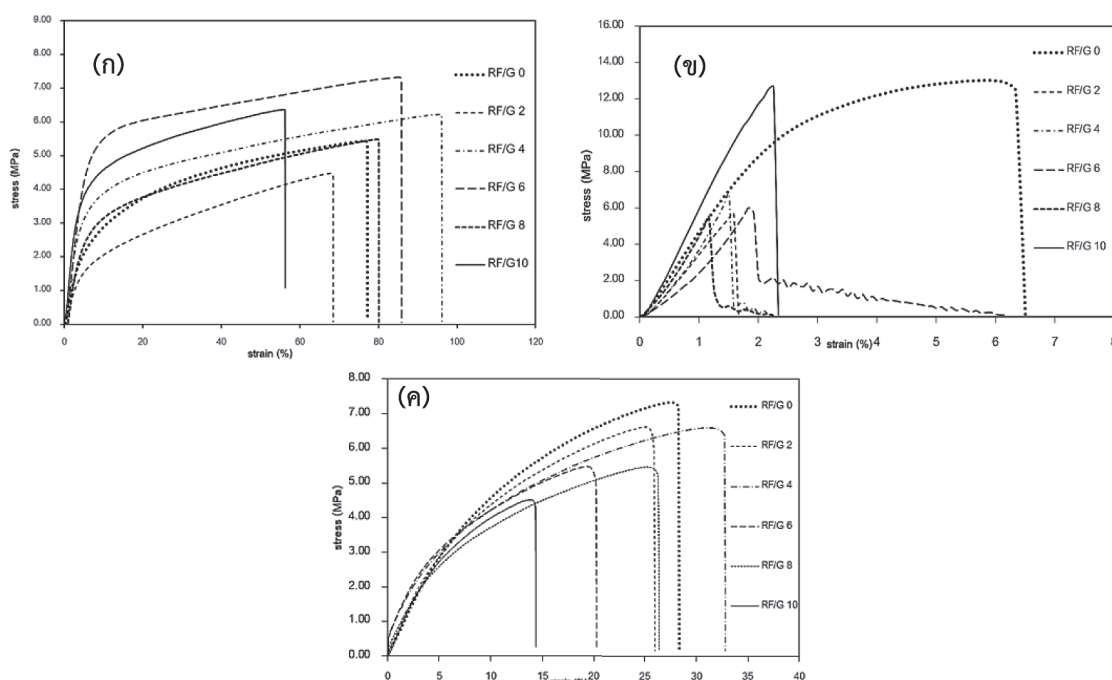
ภาพที่ 3 FTIR fingerprint ของเจลาตินสำเร็จรูป



ภาพที่ 4 FTIR fingerprint ของเจลาตินที่สกัดจากหนังปลานิล

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินที่สกัดจากหนังปลานิล

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินในสัดส่วนที่ต่างกันหลังจากการขึ้นรูป ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก) พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ได้เติมเจลาติน จะมีค่าความเค้นสูงสุดอยู่ที่ 5.2 MPa และมีระยะยืดที่ 78% และเมื่อพิจารณาปริมาณเจลาตินที่สัดส่วน 2 phr กลับพบว่าค่าความเค้นสูงสุดและระยะยืดมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการเติมเจลาติน ในทางตรงข้ามเมื่อเติมปริมาณเจลาตินที่สัดส่วน 4-8 phr พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดและระยะยืดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่งและมีแนวโน้มที่ลดลงอีกครั้งเมื่อปริมาณเจลาตินที่สัดส่วน 10 phr นั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณเจลาตินในโครงสร้างของวัสดุผสมมีผลต่อสมบัติเชิงกล โดยที่ปริมาณเจลาตินต่ำ ๆ โครงสร้างของโมเลกุลแป้งจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ระหว่างกัน ทำให้โมเลกุลเจลาตินไม่สามารถแทรกตัวระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลแป้ง จึงทำให้เกิดการแยกเฟสเกิดขึ้น Zhang et al. (2013) ทำให้เห็นร่องรอยของการยืดออกของโมเลกุลแป้งที่บริเวณพื้นผิวได้อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นฐานวิทยาศาสตร์ แต่เมื่อปริมาณเจลาตินที่เหมาะสม (4-8 phr ของเจลาตินในวัสดุผสม) จะไปทำให้เกิดการฟอร์มตัวระหว่างโครงสร้างหมู่ไฮดรอกซิลในแป้ง (OH Group) และ โครงสร้างของหมู่เอไมด์ (N-H Group) ในโครงสร้างของเจลาติน จะทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างแป้งและเจลาตินที่ดี จึงทำให้ค่าความเค้นสูงสุด และ ระยะยืดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อปริมาณเจลาตินเพิ่มมากขึ้น แรงยึดเหนี่ยวภายในโครงสร้างของเจลาตินจะมีอิทธิพลที่เหนือกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างของเจลาตินและแป้ง จึงทำให้แนวโน้มของค่าความเค้นสูงสุด และระยะยืดมีแนวโน้มที่ลดลง (Xu et al., 2005)



ภาพที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดของวัสดุผสม

ระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล

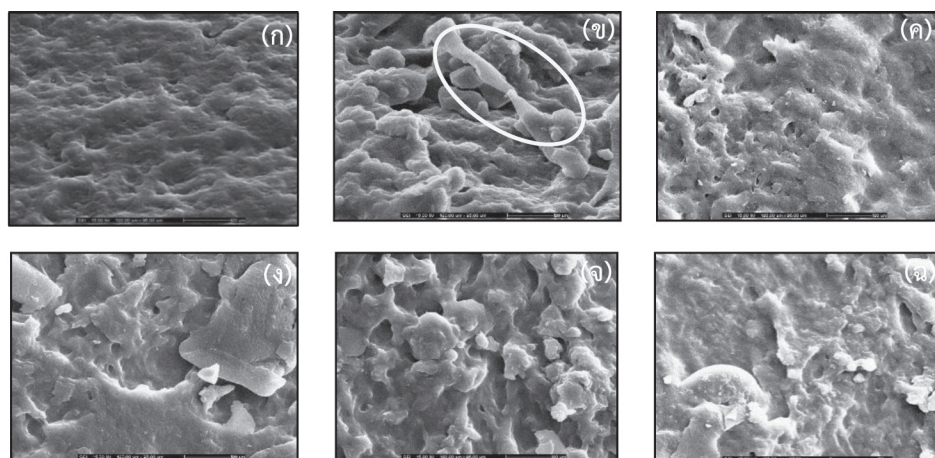
(ก) ในสภาวะหลังการขึ้นรูป (ข) หลังจากน้ำหนักของ extrudate คงที่ (ค) ในสภาวะที่มีความชื้นอิ่มตัวยิ่งยวด

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินในสัดส่วนที่ต่างกันหลังจากน้ำหนักของ extrudate คงที่ โดยการนำ extrudate ผ่านการอบและชั่งน้ำหนักจนกว่าตัวอย่างจะมีน้ำหนักที่คงที่ตามภาพที่ 5 (ข) พบว่า แนวโน้มของระยะยืดของวัสดุผสมทุกสูตรมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับหลังการขึ้นรูป เนื่องจากน้ำที่เกิดการระเหยออกไปทำให้โครงสร้างของสายโซ่แป้งและเจลาตินเกิดการเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่า น้ำสามารถช่วยให้เกิดปรากฏการณ์ Plasticization ในโครงสร้างของวัสดุผสม ซึ่งน้ำทำหน้าที่เป็น Plasticizer ทำให้สายโซ่โมเลกุลของวัสดุผสมเกิดการเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น (Arvanitoyannisa et al., 1998) และเมื่อพิจารณาค่าความเค้นสูงสุดกลับพบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการเติมเจลาตินและวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับหลังจากการขึ้นรูป นั้นแสดงให้เห็นว่าเกิดแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มสูงขึ้นระหว่างโมเลกุลแป้งและเจลาติน เนื่องจากน้ำที่ระเหยออกจากโครงสร้างไปทำให้สายโซ่ของแป้งและเจลาตินเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ที่มากขึ้น ทำให้สายโซ่เกิดการ Pack ตัวได้ดีขึ้น จึงส่งผลทำให้ค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อพิจารณาวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินหลังจากการระเหยแห้ง พบว่า แนวโน้มค่าความเค้นสูงสุดและระยะยืดมีแนวโน้มที่ต่ำลง เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการเติมเจลาติน นั้นแสดงให้เห็นว่า เจลาตินไปทำให้วัสดุผสมมีความเปราะมากขึ้น หลังจากการระเหยแห้ง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโครงสร้างของโมเลกุลแป้งและเจลาตินที่เกิดแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้น หลังจากการระเหยน้ำออก ยกเว้นสัดส่วนของแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมเจลาตินที่ 10 phr มีแนวโน้มของค่าความเค้นสูงสุดใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ได้ผ่านการเติมเจลาติน

เมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินในสัดส่วนที่ต่างกันหลังจากการทดสอบสถานะความชื้นอิ่มตัวด้วยดิ่ง ตามภาพที่ 5 (ค) พบว่า มีแนวโน้มของระยะยืดเพิ่มสูงขึ้น แต่กลับมีแนวโน้มของค่าความเค้นที่ลดต่ำลงอีกครั้งหนึ่ง นั้นแสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของน้ำจะเข้าไปแทรกระหว่างโครงสร้างของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาติน ทำให้สายโซ่ของแป้งและเจลาตินเกิดการเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของแป้งและเจลาตินมีสมบัติความมีขั้วสูง (Hydrophilic) ทำให้สามารถดูดซับความชื้นในสภาวะการทดสอบได้ง่าย จึงส่งผลทำให้ระยะยืดมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น และปลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแป้งและเจลาติน จึงทำให้ค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มที่ลดลง (Dias et al., 2010)

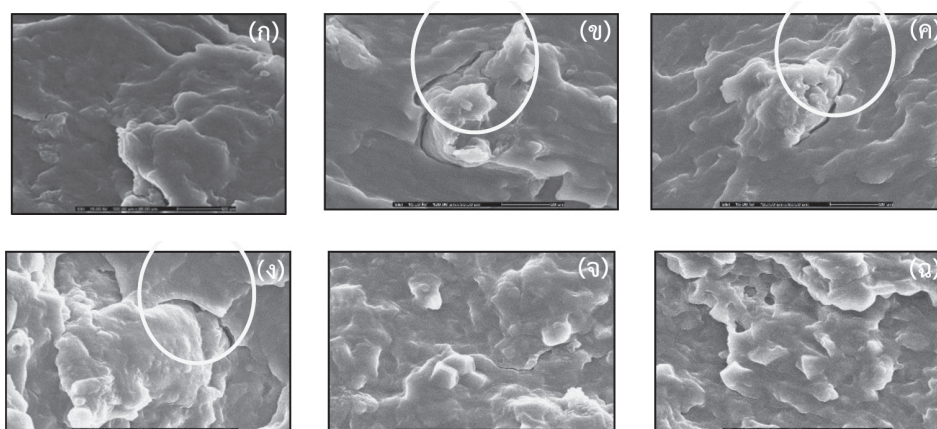
ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินที่สกัดจากหนังปลานิล

เมื่อพิจารณาลักษณะของสัณฐานวิทยาจากบริเวณพื้นผิวของ extrudate ตามภาพที่ 6 พบว่า ผิวของเส้น extrudate ของวัสดุแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผสมเจลาตินจากหนังปลานิล มีความราบเรียบ เป็นเนื้อเดียวกันสม่ำเสมอ ดังภาพที่ 6 (ก) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณเจลาตินลงในวัสดุ ดังแสดงในภาพ 6 (ข)-(ฉ) พบว่า ผิวของเส้น extrudate มีความขรุขระและมีกระจายตัวทั่วบริเวณ โดยที่วัสดุผสมที่มีปริมาณเจลาตินต่ำ ๆ จะสังเกตเห็นได้ว่าบางส่วนเกิดลักษณะพื้นผิวที่ยื่นออกมาจากเส้น extrudate นั้นแสดงให้เห็นถึงการแยกเฟสระหว่างโมเลกุลของแป้งและเจลาติน



ภาพที่ 6 ลักษณะทางพื้นผิวของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล
หลังน้ำหนักของ extrudate คงที่ที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ก) RF/G0 (ข) RF/G2 (ค) RF/G4 (ง) RF/G6 (จ) RF/G8 (ฉ) RF/G10

เนื่องจากการหดตัวที่แตกต่างกันของโมเลกุลแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินในระหว่างกระบวนการผสมด้วยเครื่อง extrusion โดยที่ปริมาณ 2 phr ดังแสดงในภาพที่ 6 (ข) จะเห็นรูปร่างการยืดออกของโมเลกุลแป้ง ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าโมเลกุลแป้งจะเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ระหว่างกัน Zhang et al. (2013) แต่เมื่อปริมาณเจลาตินที่มากขึ้น จะส่งผลทำให้รูปร่างการยืดออกมีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อพิจารณาการปริมาณเจลาตินที่ 10 phr ดังแสดงในภาพที่ 6 (ฉ) พบว่า มีความเข้ากันระหว่างแป้งและเจลาตินที่มากขึ้น และมีความเรียบมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่าความเค้นสูงสุดที่มีแนวโน้มใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการเติมเจลาตินหลังจากการทดสอบสมบัติเชิงกลหลังจากน้ำหนักของ extrudate คงที่

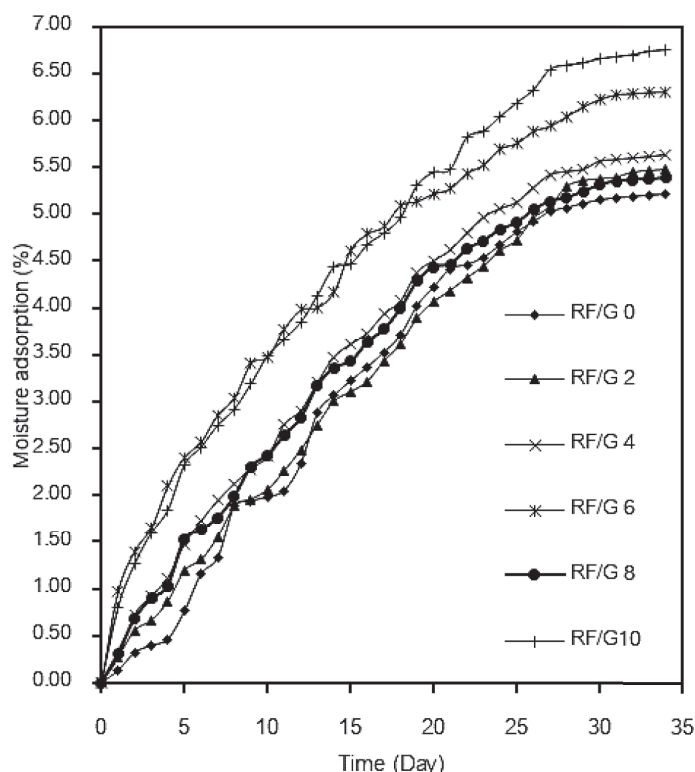


ภาพที่ 7 ลักษณะรอยแตกหักจากการทดสอบแรงดึงของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาติน
ที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิลที่กำลังขยาย 1000 เท่า
(ก) RF/G0 (ข) RF/G2 (ค) RF/G4 (ง) RF/G6 (จ) RF/G8 (ฉ) RF/G10

เมื่อพิจารณาลักษณะของสัณฐานวิทยาจากรอยแตกหักหลังจากการทดสอบ ตามภาพที่ 7 พบว่าร่องรอยการยื่นออกจากการแตกหักมีแนวโน้มที่ลดลง เมื่อปริมาณเคราตินในวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นั้นแสดงให้เห็นถึงวัสดุมีความเปราะหลังจากการเติมเคราตินลงไปวัสดุผสม นอกเหนือจากนั้น เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวหลังจากการทดสอบการแตกหัก จะแสดงให้เห็นว่า เฟสของวัสดุผสมระหว่างแป้งและเคราตินที่สัดส่วน 10 phr มีลักษณะเฟสเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ค่าความเค้นสูงสุดมีแนวโน้มใกล้เคียงกับแป้งที่ไม่ผ่านการเติมเคราติน

ผลการทดสอบค่าความสามารถในการดูดซับความชื้นของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล

จากภาพที่ 8 แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นกับเวลาของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล โดยเมื่อมีการเติมเจลาตินลงไปวัสดุผสมจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับความชื้นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก โครงสร้างของแป้งซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล และ โครงสร้างของเจลาตินที่มีหมู่เอไมด์ ซึ่งมีความเป็นขั้วสูง (Stortz & Marangoni, 2011) ทำให้สามารถดูดซับความชื้นได้มากขึ้น เพิ่มความสามารถในการดูดซับความชื้นสูงในวัสดุผสมมากขึ้น โดยเมื่อสังเกตเปอร์เซ็นต์น้ำหนักของวัสดุผสมเริ่มมีค่าคงที่ในช่วงประมาณวันที่ 28 นั้นแสดงให้เห็นถึงวัสดุมีความอิ่มตัวจากการดูดซับความชื้น นอกเหนือจากนั้นแป้งที่ไม่ผ่านการเติมเจลาตินมีความสามารถในการดูดความชื้นที่ค่อนข้างต่ำกว่าวัสดุผสมที่มีการเติมเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล

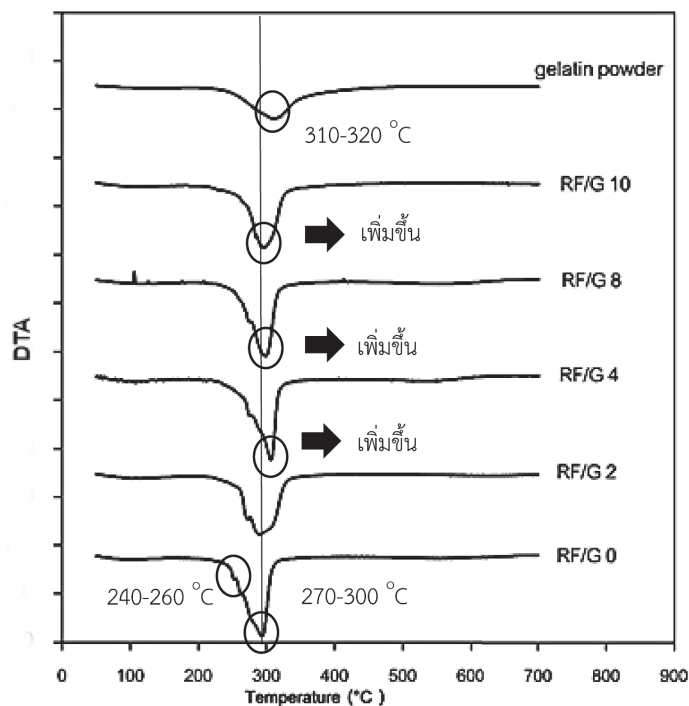


ภาพที่ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นกับเวลาของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล

ผลการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล

จากภาพที่ 9 แสดง DTA thermogram ของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล พบว่าแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการเติมเจลาตินที่ได้จากหนังปลานิล มีอุณหภูมิในการสลายตัวอยู่ 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงประมาณ 240-260 °C เป็นการสลายตัวของสารระเหยบางชนิดที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่สูงในโครงสร้างของแป้ง และช่วง 270-300 °C ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีการสลายตัวสูงสุด แสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของโครงสร้างอะไมโลเพกติน (Amylopectin) ที่มีโครงสร้างเป็นแบบแอลฟาเฮลิคซ์ (α -Helix) (Wanwaja et al., 2019) และเมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการสลายตัวของเจลาตินสำเร็จรูป ยี่ห้อ McGarrett Fish Gelatin พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดอยู่ในช่วง 310-320 °C ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการสลายตัวของพันธะเปปไทด์ในโครงสร้างของเจลาตินที่ได้จากการสกัดจากหนังปลานิล (Kakkar et al., 2014)

นอกเหนือจากนั้น เมื่อพิจารณาวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล พบว่าอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดของวัสดุผสมที่มีการเจลาตินที่ 4-8 phr มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น นั้นแสดงให้เห็นว่าปริมาณเคราตินที่เหมาะสมไปทำให้เสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิลมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของหมู่ไฮดรอกซิลในแป้ง (OH Group) และโครงสร้างของหมู่เอไมด์ (N-H Group) ในโครงสร้างของเจลาตินเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกันในระดับโครงสร้างจุลภาค ทำให้วัสดุผสมมีเสถียรภาพทางความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล



ภาพที่ 9 DTA thermogram ของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้ากับเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล

สรุป

เจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล เมื่อนำไปหาปริมาณของเจลาติน พบว่า สารละลายเจลาตินที่ได้มีความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก โดยเมื่อเปรียบเทียบกับเอกลักษณ์ จากผลการทดสอบ FTIR ของเจลาตินที่สกัดเทียบกับเจลาตินสำเร็จรูป ยี่ห้อ McGrarrett Fish Gelatin พบว่า เจลาตินที่สกัดได้มีองค์ประกอบของกรดอะมิโนหลายชนิด นอกเหนือจากนั้น เมื่อสังเกตลักษณะปรากฏของวัสดุผสมระหว่างแป้งข้าวเจ้าและเจลาตินที่สกัดได้จากหนังปลานิล หลังจากการขึ้นรูปเป็นเส้น extrudate พบว่า เส้นที่มีสีเหลืองอ่อน โปร่งแสง พื้นผิวเรียบ และเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลพบว่า ปริมาณเจลาตินที่สัดส่วน 4-8 phr ในวัสดุผสมจะแสดงค่าความเค้นสูงสุด และระยะยืดที่มากกว่าวัสดุที่เป็นแป้งข้าวเจ้าที่ไม่มีการผสมเจลาตินจากหนังปลานิล ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณวิทยาที่ได้จากการทดสอบบริเวณพื้นผิวของเส้น extrudate และเมื่อทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมหลังจากนำหนักของ extrudate คงที่พบว่า แนวโน้มของระยะยืดของวัสดุผสมทุกสูตรมีแนวโน้มที่ลดลง และแนวโน้มของค่าความเค้นสูงสุดในสัดส่วนของแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมเจลาตินที่ 10 phr มีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้าที่ไม่ผ่านการเติมเจลาติน ซึ่งสอดคล้องกับสัญญาณวิทยาที่พบว่ามีความเข้ากันระหว่างแป้งและเจลาตินที่มากขึ้น เรียบมากขึ้น อีกทั้งเมื่อทำการทดสอบเปอร์เซ็นต์การดูดความชื้น พบว่า ทุกสูตรของวัสดุมีแนวโน้มที่เปอร์เซ็นต์การดูดความชื้นสูงขึ้น และจะเริ่มอืดตัวด้วยความชื้นที่ระยะเวลา 28 วัน และเมื่อทำการทดสอบเสถียรภาพทางความร้อนของวัสดุผสม พบว่า สัดส่วนของแป้งข้าวเจ้าที่มีการเติมเจลาตินที่ 4-8 phr ส่งผลทำให้อุณหภูมิในการสลายตัวของสูงสุดของวัสดุผสมมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

ข้อเสนอแนะสำหรับการทำงานวิจัยในอนาคต

1. ควรมีการศึกษาการใช้เจลาตินที่สกัดได้ร่วมกับแป้งชนิดอื่น เช่น แป้งสาคุ แป้งมันสำปะหลัง ฯลฯ
2. ควรศึกษาการสกัดเจลาตินจากหนังปลาชนิดอื่น ๆ หรือ จากส่วนประกอบอื่น ๆ ที่อยู่ในสิ่งมีชีวิต
3. ควรมีวิธีการเก็บรักษาวัตถุดิบที่ใช้ในการสกัดเจลาตินให้เหมาะสม เนื่องจากเกิดปัญหาทางด้านกลิ่นและการขึ้นราของวัสดุผสมได้
4. หาแนวทางในการศึกษาวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Al-Hassan, A. A., & Norziah, M. H. (2011). Starch-gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 108-117.
- Arvanitoyannisa, I., Nakayama, A., & Aiba, S. (1998). Edible films made from hydroxypropyl starch and gelatin and plasticized by polyols and water. *Carbohydrate Polymers*, 36(2-3), 105-119.
- Dias, A. B., Müller, C.M.O., Larotonda, F.D.S., & Laurindo, J.B. (2010). Biodegradable films based on rice starch and rice flour. *Journal of Cereal Science*, 51(2), 213-219.
- Giménez, B., Turnay, J., Lizarbe, M. A., Montero, P., & Gómez-Guillén, M. C. (2005). Use of lactic acid for extraction of fish skin gelatin. *Food Hydrocolloids*, 19(6), 941-950.

- Gómez-Guillén, M. C., Pérez-Mateos, M., Gómez-Estaca, J., López-Caballero, E., Giménez, B., & Montero, P.(2009). Fish gelatin:a renewable material for developing active biodegradable films. **Trends in Food Science & Technology**, 20(1), 3-16.
- Jamilah, B., Tan, K. W., Umi Hartina, M. R., & Azizah, A. (2011). Gelatins from three cultured freshwater fish skins obtained by liming process. **Food Hydrocolloids**, 25(5), 1256-1260.
- Kachenpukdee, N., Siriporn, P., & Jewpraditkul, A. (2006). **Production of Gelatin from Scales of White Snapper (Lates calcarifer)**, 468-480 (in Thai).
- Kakkar, P., Madhan, B., & Shanmugam, G. (2014). Extraction and characterization of keratin from bovine hoof:A potential material for biomedical applications.**Springerplus**.doi: 10.1186/2193-1801-3-596
- Muyonga, J.H., Cole, C.G.B., & Duodu, K.G. (2004). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopic study of acid soluble collagen and gelatin from skins and bones of young and adult Nile perch (Lates niloticus). **Food Chemistry**, 86(3), 325-332.
- Ottenhof, M.A., & Farhat, I. A. (2004). The effect of gluten on the retrogradation of wheat starch. **Journal of Cereal Science**, 40(3), 269-274.
- Pollution Control Department. (2017). **Thailand Waste Management Situation Report 2016**. Retrieved, from <http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER3/ DRAWER056/GENERAL/ DATA0000/00000689.PDF> [2017, 9 June.] (in Thai)
- Ran, J., Hu, J., Chen, L., Shen, X., & Tong, H. (2017). Preparation and characterization of gelatin/ hydroxyapatite nanocomposite for bone tissue engineering. **Polymer composites**, 38(8), 1579-1590.
- Rhim, J. W., Wu, Y., Weller, C. L., & Schnepf, M. (1999). Physical Characteristics of a Composite Film of Soy Protein Isolate and Propyleneglycol Alginate. **Journal of Food Science**, 64(1), 149-152.
- Stortz, T. A., & Marangoni, A. G. (2011). Heat resistant chocolate. **Trends in Food Science & Technology**, 22(5), 201-214.
- Tongdeesoontorn, W., Mauer, L. J., Wongruong, S., Sriburi, P., & Rachtanapun, P. (2012). Mechanical and Physical Properties of Cassava Starch-Gelatin Composite Films. **International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials**, 61(10), 778-792.
- Wanwaja, P., Nu-Yang, P., & Wiriya-amornchai, A. (2019). Influence of Amount of Keratin from Human Hair with Modified Tapioca Starch. **Burapha Science Journal**, 24(2), 458-470.
- Xu, Y.X., Kim, K.M., Hanna, M.A., & Nag, D. (2005). Chitosan–starch composite film: preparation and characterization. **Industrial Crops and Products**, 21(2), 185-192.
- Yoksan, R., Sane, A., Watcharaporn, A., & Watcharaporn K. (2017). **Bio-based plastic from Thai economic plants**. Retrieved, from http://www3.rdi.ku.ac.th/exhibition/52/ 03-foods/ rungrong/ food_00.html. [2017, 9 June.] (in Thai)

- Yomyat, S. (2020). **What flour is used for baking?** Retrieved, from <http://biology.ipst.ac.th/?p=3266> [2020, 24 November.] (in Thai)
- Zaher, K., Kolli, E.M., Riahi, F., & Doufnoune, R.(2009). Preparation and Characterization of Hydrocolloid Biopolymer-Based Films for.**International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials**, 58(12), 665-680.
- Zhang, N., Liu, H., Yu, L., Liu, X., Zhang, L., Chen, L., & Shanks, R. (2013). Developing gelatin-starch blends for use as capsule materials. **Carbohydrate Polymers**, 92(1), 455-461.
- =====