การพัฒนาฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะจากเห็ดเข็มทองและเปลือกหอมแดงเสริมสารสกัดแอนโทไซยานินเพื่อบ่งชี้ความสดของผลิตภัณฑ์ปูอัด

ปภาวิน ศิริสุวรรณ, โชติการ เฉลิมเมือง, สุธี จุ้งลก*, และ กรองทอง เจริญวัฒนวิโรจน์

โรงเรียนเบตง "วีระราษฎร์ประสาน", 19 ถ.รวมวิทย์ ตำบลเบตง, อำเภอเบตง จังหวัดยะลา 95110 ประเทศไทย

**Corresponding author: gaschem4159@kbyala.ac.th; paphawin0251@gmail.com*

บทคัดย่อ

วิกฤตการณ์ขยะพอลิเมอร์สังเคราะห์และความเสี่ยงจากการสะสมของไมโครพลาสติกในร่างกายมนุษย์เป็นแรงขับเคลื่อนสำคัญในการปฏิวัตินวัตกรรมบรรจุภัณฑ์ยั่งยืน โครงงานนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบบรรจุภัณฑ์เชิงหน้าที่ในรูปแบบ "ฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะ" จากการอัปไซเคิลวัสดุเหลือทิ้งอย่างเห็ดเข็มทองและเปลือกหอมแดง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวต้านจุลชีพ และระบบแจ้งเตือนคุณภาพอาหารเชิงลึก โดยประยุกต์ใช้การสกัดเชิงความร้อนในสภาวะกรดเพื่อดึงประสิทธิภาพสูงสุดของไคตินและเควอซิทินนำมาจัดเรียงโมเลกุลในโครงข่ายพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพสมบูรณ์ ปราศจากสารตกค้างและปลอดภัยต่อสุขภาพผู้บริโภคในระยะยาว

หัวใจสำคัญของนวัตกรรมคือการบูรณาการแอนโทไซยานินเพื่อเป็น "เซนเซอร์เชิงชีวภาพ" (Biosensor) ผลการทดลองเชิงประจักษ์พบว่าฟิล์มที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะทางกายภาพที่โดดเด่น ทั้งความโปร่งแสงและความเสถียรทางโครงสร้างสูง โดยสารเควอซิทินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ชะลอการเน่าเสียและยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ปูอัดได้เหนือกว่าบรรจุภัณฑ์พลาสติกทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อปูอัดเริ่มเสื่อมสภาพ ฟิล์มจะแสดงปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีเชิงวิเคราะห์จากสีม่วงเป็นสีเขียวและเหลืองอย่างชัดเจน และฉับไว สัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณก๊าซแอมโมเนียและดัชนีสารประกอบไนโตรเจนระเหยง่าย *(TVB-N)* จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรีย

สรุปได้ว่านวัตกรรมฟิล์มพอลิเมอร์ธรรมชาตินี้ไม่เพียงแต่ลดความเสี่ยงจากการรับไมโครพลาสติกเข้าสู่ร่างกาย และขจัดขยะพลาสติกที่ย่อยสลายยาก แต่ยังเป็นต้นแบบที่บูรณาการตามแนวคิดเศรษฐกิจ BCG เพื่อยกระดับความมั่นคงทางอาหารและตอบโจทย์เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) ของสหประชาชาติได้อย่างเป็นรูปธรรมและทรงพลัง

คำสำคัญ: ฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะ / เซนเซอร์เชิงชีวภาพ / พอลิเมอร์ธรรมชาติย่อยสลายได้ / การยับยั้งจุลินทรีย์ / ดัชนีสารประกอบไนโตรเจนระเหยง่าย

Development of smart biopolymer films from golden needle mushroom and shallot peels incorporated with anthocyanins for freshness monitoring of imitation Crab Stick

Paphawin Sirisuwan, Chotikarn Chalermmueang, Suthee Junglok*, and Krongthong Jaroenwattanawirot

Betong Wiraratprasan, 19 Ruamwit Road, Betong District, Yala Province, Thailand
**Corresponding author: gaschem4159@kbyala.ac.th; paphawin0251@gmail.com*

Abstract

The global crisis of synthetic polymer pollution and the alarming bioaccumulation of microplastics in human tissues have emerged as critical drivers for a paradigm shift in sustainable packaging. This project pioneers the development of a multifunctional "Intelligent Bio-composite Film" engineered through the upcycling of agricultural waste—specifically *Flammulina velutipes* (Enoki mushroom) and *Allium cepa* (Red onion) skins. By employing an acid-thermal extraction technique, we maximized the synergistic potential of chitin and quercetin, reorganizing their molecular structures within a 100% biodegradable natural polymer matrix that ensures long-term consumer safety and zero chemical residues.

The hallmark of this innovation is the seamless integration of anthocyanins to function as a sophisticated chromogenic biosensor. Our empirical findings reveal that the resulting film possesses exceptional physical characteristics, including high optical clarity and robust structural integrity. Furthermore, the infused quercetin acts as a potent antimicrobial agent, significantly inhibiting microbial proliferation. This effectively retards spoilage and extends the shelf life of surimi products, outperforming conventional plastic packaging with high statistical significance.

The intelligence of the system is demonstrated when food begins to degrade; the film triggers a rapid and vivid analytical color shift from purple to green and yellow. This transition is directly coupled with the release of ammonia gas and the Total Volatile Basic Nitrogen (TVB-N) index—a byproduct of bacterial metabolism. Ultimately, this natural polymer innovation transcends mere waste reduction; it stands as a powerful BCG-aligned prototype that enhances food security and provides a concrete solution to the United Nations' Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Intelligent Bio-composite Film/ Chromogenic Biosensor/ Fully Biodegradable Natural Polymers/ Antimicrobial Activity/ *TVB-N*

1. บทนำ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมและสาธารณสุขได้รายงานการตรวจพบไมโครพลาสติกในอาหารหลายประเภท รวมถึงอาหารทะเลและผลิตภัณฑ์แปรรูป โดยการทบทวนงานวิจัยในปี พ.ศ. 2565 (ค.ศ. 2022) ระบุว่าไมโครพลาสติกสามารถปนเปื้อนเข้าสู่ห่วงโซ่อาหาร และอาจเป็นพาหะนำสารเคมีหรือสิ่งปนเปื้อนอื่นเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ ซึ่งยังอยู่ระหว่างการศึกษาผลกระทบระยะยาวต่อสุขภาพ

อาหารทะเลเป็นกลุ่มที่ตรวจพบไมโครพลาสติกอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสัตว์น้ำสามารถสะสมอนุภาคจากสิ่งแวดล้อมก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ผลิตภัณฑ์แปรรูปอย่าง “ปูอัด” ซึ่งผลิตจากเนื้อปลาบดปรุงแต่ง ผ่านกระบวนการขึ้นรูปและให้ความร้อน แม้จะผ่านมาตรฐานอุตสาหกรรมแล้ว แต่ยังคงเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา โดยเฉพาะการสลายตัวของโปรตีนที่ทำให้ค่า pH เปลี่ยนแปลงและก่อให้เกิดสารประกอบที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมสภาพ ซึ่งไม่สามารถสังเกตได้อย่างแม่นยำด้วยสายตาเพียงอย่างเดียว

จากบริบทดังกล่าว คณะผู้จัดทำจึงเล็งเห็นถึงความจำเป็นในการพัฒนานวัตกรรมที่สามารถบ่งชี้ความสดของผลิตภัณฑ์ได้อย่างชัดเจนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โครงงานนี้มุ่งพัฒนา ฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะจากเห็ดเข็มทองและเปลือกหอมแดงเสริมสารสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสดของผลิตภัณฑ์ปูอัด โดยอาศัยคุณสมบัติการเปลี่ยนสีของแอนโทไซยานินที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH อันเกิดจากกระบวนการเสื่อมสภาพของโปรตีน

นวัตกรรมดังกล่าวไม่เพียงช่วยให้ผู้บริโภคสามารถประเมินความสดของอาหารได้อย่างเป็นรูปธรรม แต่ยังส่งเสริมการใช้วัสดุชีวภาพและเพิ่มมูลค่าของทรัพยากรธรรมชาติ ลดการพึ่งพาพลาสติกสังเคราะห์ และสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาอย่างยั่งยืนในอุตสาหกรรมอาหารยุคใหม่

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อสกัดพอลิเมอร์ชีวภาพจากโคนเห็ดเข็มทอง และสาระสำคัญทางชีวภาพ
2. เพื่อพัฒนาฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะที่สามารถย่อยสลายได้ และมีสมบัติต้านการเจริญเติบโตของเชื้อรา
3. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มบ่งชี้ เมื่อตอบสนองต่อก๊าซจากการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์ปูอัด

3. ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการสกัดพอลิเมอร์ธรรมชาติกลุ่มไคติน-กลูแคนจากส่วนโคนของก้านเห็ดเข็มทอง เพื่อใช้เป็นโครงสร้างหลัก ในการขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพ
2. ศึกษาการสกัดสารเควอซิทินและแอนโทไซยานินจากเปลือกหอมแดงและดอกอัญชันด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสม เพื่อใช้เป็นตัวบ่งชี้การเน่าเสียของอาหาร
3. ศึกษาประสิทธิภาพการเปลี่ยนสีของฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะในการตรวจวัดก๊าซจากดัชนีการเน่าเสียเมื่อนำไปใช้งานกับผลิตภัณฑ์ปูอัด
4. ศึกษาความสามารถในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในอาหารของฟิล์มชีวภาพที่เสริมสารสกัดจากธรรมชาติภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิ

4. วิธีการศึกษา

4.1 รวบรวมข้อมูล

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองเพื่อพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะจากวัสดุธรรมชาติ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

4.1.1 การเตรียมและสกัดไคตินจากโคนเห็ดเข็มทอง นำโคนเห็ดเข็มทองมาล้างสะอาด อบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นละเอียดเป็นผง จากนั้นนำผงเห็ด 4 กรัม ต้มกับน้ำส้มสายชู 5 mL และน้ำ 150 mL ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อสกัดไคติน

4.1.2 การสกัดเควอซิทินจากเปลือกหอมแดง นำเปลือกหอมแดง 3 กรัม อบที่อุณหภูมิ 60°C นาน 2 ชั่วโมง แล้วนำไปปั่นละเอียด จากนั้นต้มในน้ำ 100 mL ที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 30 นาที แล้วกรองแยกกากออก

4.1.3 การสกัดแอนโทไซยานินจากดอกอัญชัน นำดอกอัญชัน 5 กรัม ปั่นกับน้ำ 100 mL นำไปต้มที่อุณหภูมิ 60°C แล้วกรองเอาเฉพาะส่วนน้ำสีม่วงเข้ม

4.1.4 การขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะ นำสารสกัดไคติน 120 mL ต้มที่ 80°C เติมแป้งมันสำปะหลัง 5 กรัม ที่ละลายน้ำแล้ว เจลาติน 5 กรัม และกลีเซอรีน 2 mL กวนจนเป็นเนื้อเดียวกัน ปิดไฟแล้วจึงเติมสารสกัดเควอซิทิน 20 mL และสารสกัดอัญชัน 20 mL จากนั้นเทลงถาดเกลี่ยให้เท่ากันและนำไปอบที่ 70°C นาน 4 ชั่วโมง 30 นาที

4.2 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เพื่ออธิบายลักษณะทางกายภาพ สมบัติการละลายน้ำ และการเปลี่ยนแปลงสีของฟิล์ม โดยใช้การสังเกตและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการละลายของฟิล์มในน้ำที่อุณหภูมิต่างกัน รวมถึงการบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงเฉดสีของฟิล์มเมื่อสัมผัสกับสภาวะกรด-ด่าง และการตรวจวัดประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ในช่วงระยะเวลา 7 วัน

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการสืบค้นและทดลองพัฒนาฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะ โดยใช้ฐานข้อมูลทางวิชาการและผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

5.1 การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของสารละลายพอลิเมอร์ผสม

จากผลการทดลองที่ 1 พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่พัฒนาขึ้นมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ทั้งในสภาวะอุณหภูมิห้อง และน้ำร้อน โดยในน้ำอุณหภูมิปกติ พอลิเมอร์จะใช้เวลาในการละลายค่อนข้างช้า (เฉลี่ย 40 นาที) แต่เมื่อทดสอบในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90 °C พบว่าสามารถละลายได้ดีและรวดเร็วขึ้นอย่างชัดเจน โดยใช้เวลาเพียง 8 นาทีเท่านั้น (ตารางที่ 1)

นอกจากนี้ ในด้านลักษณะพื้นฐานทางกายภาพ พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีความยืดหยุ่นและปรากฏเป็นสีม่วงอ่อน ซึ่งเป็นผลมาจากสีธรรมชาติของสารสกัดแอนโทไซยานินที่เติมลงไป ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วรัญญู รัตนพันธุ์ และคณะ [1] ในด้านความยืดหยุ่นเชิงกลและการประสานตัวของเนื้อฟิล์มจากเส้นใยธรรมชาติ แสดงให้เห็นว่าโครงสร้างของพอลิเมอร์มีความเข้ากันได้ดี และสามารถรักษาเสถียรภาพของสารสีไว้ในเนื้อฟิล์มได้ในเบื้องต้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาเสถียรภาพ ของสารสีธรรมชาติของสุชาดา บุญเกื้อ [2] โดยลักษณะทางกายภาพและการละลายน้ำดังกล่าว สอดคล้องกับงานวิจัยของ Gontard et al. [3] เกี่ยวกับฟิล์มบริโภคได้ (Edible Films) ที่ระบุว่าโครงสร้างพอลิเมอร์ที่ดีต้องสามารถรวมตัวกับสารเติมแต่ง ได้ดีและรักษาสมบัติทางกายภาพไว้ได้ การที่ฟิล์มสามารถละลายน้ำได้ดียังช่วยลดปัญหาขยะบรรจุภัณฑ์ และไมโครพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อม สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs)

ตารางที่ 1 การทดสอบคุณสมบัติการละลายน้ำของพอลิเมอร์ผสม เบื้องต้น

การทดสอบ	ผลการทดสอบ
การละลายในน้ำ	ละลายน้ำได้ช้า (เวลา 40 นาที)
การละลายในน้ำร้อน (90 °C)	ละลายน้ำได้ดีและรวดเร็ว (เวลา 8 นาที)
ลักษณะพื้นฐาน	มีความยืดหยุ่น โปร่งแสงสีม่วงอ่อน

5.2 ประสิทธิภาพการยับยั้งจุลินทรีย์และการประยุกต์ใช้เพื่อความยั่งยืน

จากผลการทดลองที่ 2 พบว่า ฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะที่ผสมสารสกัดจากเปลือกหอมแดงสามารถชะลอการเกิดเชื้อรา และแบคทีเรียบนปูอัดได้ยาวนานกว่ากลุ่มอื่นถึง 7 วันนั้น สามารถอภิปรายผลได้ว่าเกิดจากฤทธิ์ของสารเควอซิทิน (Quercetin) ซึ่งเป็นสารสำคัญในเปลือกหอมแดง โดยมีกลไกทางเคมีในการยับยั้งเชื้อคือ สารเควอซิทินจะเข้าไปรบกวนการทำงานของผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียแกรมลบอย่าง *Pseudomonas* spp. ส่งผลให้เซลล์ของจุลินทรีย์สูญเสียสมดุลและไม่สามารถขยายพันธุ์ได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ กิตติมา มนตรา และคณะ [4] ในด้านประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ และ สิริมา พานิช และคณะ [5] ในด้านความสามารถในการขยายตัวและออกฤทธิ์ของสารสกัดฟลาโวนอยด์เมื่อบูรณาการเข้ากับโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟิล์มที่พัฒนาขึ้นสามารถทำหน้าที่เป็นระบบนำส่งสารต้านจุลชีพที่มีประสิทธิภาพ (ตารางที่ 2)

นอกจากนี้ การเปลี่ยนสีของฟิล์มเพื่อแจ้งเตือนความสด สอดคล้องกับการศึกษาของ ณัฐพร แก้วประดิษฐ์ และคณะ [6] ในด้านการตอบสนองเชิงสีของแอนโทไซยานินต่อสภาวะความเป็นด่างที่เกิดจากก๊าซแอมโมเนีย และ Huang, S., et al. [7] โดยโครงสร้างฟิล์มจากไคติน-กลูแคนยังมีส่วนช่วยป้องกันไม่ให้ออกซิเจนซึมผ่านเข้าไปได้ง่าย สอดคล้องกับสมบัติการเป็นเกราะป้องกันก๊าซของไคตินตามงานวิจัยของ Dhillon, G. S., และคณะ [8] การพัฒนาโครงงานนี้จึงเป็นการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาสร้างมูลค่าเพิ่มตามหลักเศรษฐกิจหมุนเวียน และช่วยลดการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายยากได้อย่างยั่งยืน

ตารางที่ 2 การสังเกตลักษณะทางกายภาพและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระยะเวลา 7 วัน

วันที่	ไม่ห่อ	ห่อพลาสติก	ห่อฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะ
1	ผิวเริ่มแห้ง สีซีดลงเล็กน้อย กลิ่นปกติ	เนื้อชุ่มชื้น กลิ่นปกติ	ฟิล์มสีม่วงปกติ ไม่พบรา
2	ผิวแห้งแข็ง เริ่มมีกลิ่นคาว	มีไอน้ำเกาะข้างในพลาสติก	ฟิล์มสภาพสมบูรณ์ไม่พบรา
3	เริ่มมีเมือกเหนียวและกลิ่นคาว	เนื้อนิ่ม มีกลิ่นคาว	ฟิล์มเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำเงินแกมเขียว ไม่พบรา
4	กลิ่นเน่า สีคล้ำ	เริ่มมีเมือกขาวขุ่น	ไม่พบราบนผิวฟิล์มและปูอัด
5	พบเชื้อราจุดสีดำ/เทา	กลิ่นแรง เนื้อเละ	ฟิล์มเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีเขียว ไม่พบราบนผิวฟิล์มและปูอัด
6	เชื้อราขยายตัวครอบคลุมเนื้อ	เน่าเสีย	ฟิล์มยังคงรูปเดิม ไม่พบรา
7	มีกลิ่นรุนแรง	พบเชื้อราใต้พลาสติก	เริ่มพบจุดราเล็กน้อยที่ขอบ

6. สรุปผลการศึกษา

การพัฒนาฟิล์มชีวภาพอัจฉริยะจากโคนเห็ดเข็มทอง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติของวัสดุ ที่ช่วยในการถนอมอาหารและบ่งชี้ความสดของผลิตภัณฑ์ปูอัด ผลการทดลองพบว่าฟิล์มที่พัฒนาขึ้น มีลักษณะที่เรียบเนียน ยืดหยุ่น และมีความเสถียรทางโครงสร้างภายใต้การควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม โดยมีคุณสมบัติที่สามารถตอบสนองต่อสภาวะความเป็นกรด-ด่างได้

จากการทดสอบพบว่า สารสกัดแอนโทไซยานินและเควอซิทินในเนื้อฟิล์มสามารถตอบสนอง ต่อก๊าซไนโตรเจน (TVB-N) ที่เกิดจากการเน่าเสียของปูอัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญ ในการดัชนีชี้วัดความสด โดยเมื่อฟิล์มสัมผัสกับก๊าซ จากการเน่าเสียในสภาวะอุณหภูมิห้อง พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงเฉดสีจากสีม่วงอมน้ำเงินเป็นสีน้ำเงินเข้มและสีเขียวตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นเร็วกว่า และชัดเจนกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ห่อหรือห่อด้วยพลาสติกใสทั่วไป นอกจากนี้สารสกัดเควอซิทินยังสามารถชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อราบนแผ่นฟิล์มได้จนถึงวันที่ 7 ของการทดสอบ

เอกสารอ้างอิง

[1] วรัญญู รัตนพันธุ์, และคณะ. (2563). *การขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพจากเห็ดและเจลาตินเพื่อการบรรจุภัณฑ์เชิงนิเวศ*. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[2] สุชาดา บุญเกื้อ. (2566). *การสกัดและเสถียรภาพของสารสีธรรมชาติในสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน*. สงขลา: มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา.

[3] Gontard, N., Guilbert, S., & Cuq, J. L. (1993). Edible wheat gluten films: Influence of the main process variables. *Journal of Food Science*, *58*(4), 853-859.

[4] กิตติมา มนตรา, และคณะ. (2565). *การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะเพื่อตรวจสอบการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำแปรรูป*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[5] สิริมา พานิช, และคณะ. (2564). *คุณสมบัติของเควอซิทินจากเปลือกหอมแดงและการยับยั้งจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์อาหาร*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[6] ณัฐพร แก้วประดิษฐ์, และคณะ. (2565). *สารสกัดแอนโทไซยานินจากพืชธรรมชาติและการประยุกต์ใช้ในฟิล์มบ่งชี้ความสดของอาหาร*. นครศรีธรรมราช: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย.

[7] Huang, S., et al. (2019). A novel colorimetric packaging film based on nano-cellulose and anthocyanins for real-time monitoring of shrimp freshness. *Food Control*, *100*, 100-110.

[8] Dhillon, G. S., Kaur, S., & Brar, S. K. (2012). *Chitin and chitosan: Production from marine and terrestrial sources and their applications*. Canada: Institut National de la Recherche Scientifique.