แผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกจากสารไอโซไธโอไซยาเนตในลำต้นแก่ผักน้ำเบตง เพื่อควบคุม *Escherichia coli* สนับสนุนการยืดอายุอาหาร และยกระดับความปลอดภัยอาหาร

ชยุตรา แก้วกำเนิด, ธมนวรรณ ช่วยนุกูล, ชิดชนนี แซ่เซ, สิรินาถ ทองทวี, สุกัญญา ปัญญาวิศิษฏ์กุล, และ สุธี จุ้งลก*

เบตง วีระราษฎร์ประสาน 19 ถนนรวมวิทย์ ตำบลเบตง อำเภอเบตง จังหวัดยะลา ประเทศไทย
**Corresponding author: gaschem4159@kbyala.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัจจุบันภาคการเกษตรมีการใช้ปุ๋ยคอกและปุ๋ยอินทรีย์อย่างแพร่หลายเพื่อเพิ่มผลผลิตและฟื้นฟูความอุดมสมบูรณ์ของดิน อย่างไรก็ตามแนวปฏิบัติดังกล่าวอาจเป็นช่องทางนำพาจุลชีพก่อโรคเข้าสู่ผลผลิตทางการเกษตร โดยเฉพาะ *Escherichia coli* ซึ่งสามารถปนเปื้อนผ่านดิน น้ำ และกระบวนการเก็บเกี่ยว ส่งผลกระทบโดยตรงต่อความปลอดภัยของผู้บริโภคและเร่งการเสื่อมคุณภาพของอาหารสด ในขณะเดียวกัน การพึ่งพาบรรจุภัณฑ์พลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว แม้ช่วยยืดอายุอาหารในระยะสั้น แต่กลับก่อให้เกิดปัญหาไมโครพลาสติกสะสมในสิ่งแวดล้อมและห่วงโซ่อาหาร ซึ่งสะท้อนถึงความจำเป็นในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ทางเลือกที่สามารถแก้ปัญหาได้ทั้งด้านความปลอดภัยอาหารและสิ่งแวดล้อมควบคู่กัน

โครงงานนี้มุ่งพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกจากสารไอโซไธโอไซยาเนตที่สกัดจากลำต้นแก่ของผักน้ำเบตง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการบริโภค โดยออกแบบให้วัสดุสามารถทำหน้าที่มากกว่าการเป็นเพียงชั้นกั้นทางกายภาพ แต่มีบทบาทในการยับยั้งจุลชีพและชะลอการเกิดออกซิเดชันในระดับโมเลกุล ผลการวิเคราะห์พบว่าสารสกัดมีปริมาณไอโซไธโอไซยาเนตเฉลี่ย 10.95 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และสามารถยับยั้งการเจริญของ *Escherichia coli* ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีขนาดวงยับยั้งเชื้อในช่วง 11–15 มิลลิเมตร สะท้อนถึงศักยภาพในการควบคุมจุลชีพก่อโรคที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยอาหาร

แผ่นฟิล์มชีวภาพที่พัฒนาขึ้นจากเจลาตินและกลีเซอรอลมีสมบัติย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ไม่ก่อให้เกิดไมโครพลาสติกตกค้าง และสามารถชะลอการเสื่อมคุณภาพของอาหารได้อย่างมีนัยสำคัญ การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในลักษณะนี้จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าทรัพยากร ลดของเสีย และยกระดับการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) โดยเฉพาะด้านการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน และกรอบเศรษฐกิจ BCG (Bio–Circular–Green Economy) โดยสรุป นวัตกรรมนี้เป็นแนวทางบูรณาการที่เชื่อมโยงความปลอดภัยอาหารเข้ากับความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อม และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ในอนาคต

คำสำคัญ: ไอโซไธโอไซยาเนต / แผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุก / *Escherichia coli* / ฤทธิ์ต้านจุลชีพ / ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน / บรรจุภัณฑ์ยั่งยืน

Active biodegradable film from isothiocyanates extracted from mature stems of Betong aquatic plants for controlling *Escherichia coli*, extending food shelf life, and enhancing food safety

Chayutha Keawkemned, Thamonwan Chuaynukoon, Chitchonni Sae-se, Sirinat Thongtawee, Sukanya Panyavisitkul, and Suthee Junglok*

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

Abstract

Currently, organic fertilizers and manure are widely used in agricultural practices to enhance crop yield and maintain soil fertility. However, these practices may serve as potential sources of pathogenic contamination in agricultural products, particularly *Escherichia coli*, which can be introduced through soil, water, and harvesting processes. This contamination poses significant risks to food safety and accelerates the deterioration of fresh produce. Meanwhile, the extensive use of single-use plastic packaging, although effective in short-term preservation, contributes to the accumulation of microplastics in the environment and food chain, highlighting the need for sustainable and functional alternatives.

This study aims to develop an active biodegradable film incorporating isothiocyanates extracted from mature stems of Betong aquatic plants, which are typically considered agricultural waste. The developed material is designed to function beyond a passive barrier by exhibiting antimicrobial and antioxidative properties. The results indicated that the extract contained an average isothiocyanate concentration of 10.95 µg/mL and demonstrated effective inhibition against *Escherichia coli*, with inhibition zones ranging from 11 to 15 mm, confirming its potential in controlling foodborne pathogens.

The resulting film, composed of gelatin and glycerol, exhibited biodegradability without generating microplastic residues and showed the ability to delay food deterioration. The utilization of agricultural waste as a bioactive component not only enhances resource efficiency but also aligns with the principles of Circular Economy, Sustainable Development Goals (SDGs), and the Bio–Circular–Green (BCG) Economy model. Overall, this innovation demonstrates strong potential as a sustainable food packaging alternative that integrates food safety with environmental responsibility.

Keywords: Isothiocyanates / Active biodegradable film / *Escherichia coli* / Antimicrobial activity / Antioxidant activity / Sustainable packaging

1. บทนำ

อาหารสด โดยเฉพาะผักที่บริโภคโดยไม่ผ่านความร้อน เป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีความอ่อนไหวต่อการปนเปื้อนทางจุลชีววิทยาอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ในกระบวนการเพาะปลูกที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์หรือปุ๋ยคอก แม้จะช่วยปรับปรุงโครงสร้างดินและเพิ่มธาตุอาหาร แต่ก็อาจเป็นแหล่งสะสมของจุลชีพก่อโรค ซึ่งสามารถถ่ายทอดสู่ผลผลิตทางการเกษตรได้โดยตรง หนึ่งในจุลชีพที่ได้รับความกังวลคือ *Escherichia coli* ซึ่งสามารถเพิ่มจำนวนได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นและสารอาหารเพียงพอ และเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยของผู้บริโภค [1]

แม้ว่าการใช้บรรจุภัณฑ์พลาสติกจะช่วยลดการสัมผัสกับสิ่งปนเปื้อนภายนอกได้ระดับหนึ่ง แต่แนวทางดังกล่าวทำหน้าที่เพียงเป็นเกราะป้องกันเชิงกายภาพ มิได้มีบทบาทในการควบคุมการเจริญของจุลชีพภายในระบบ อีกทั้งยังสร้างภาระด้านสิ่งแวดล้อมจากวัสดุที่ย่อยสลายได้ยาก โดยเฉพาะปัญหาไมโครพลาสติกที่สะสมในสิ่งแวดล้อม จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เชิงรุก (active packaging) ที่สามารถยับยั้งจุลชีพและชะลอกระบวนการเสื่อมสภาพของอาหารได้ในตัววัสดุเอง

สารในกลุ่มไอโซไธโอไซยาเนต ซึ่งพบในพืชตระกูลกะหล่ำ ได้รับความสนใจจากงานวิจัยจำนวนมาก เนื่องจากหมู่ฟังก์ชัน –N=C=S สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไทออลของกรดอะมิโนในโปรตีนจุลชีพ ส่งผลให้เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพลังงานและการสังเคราะห์องค์ประกอบของผนังเซลล์ทำงานผิดปกติ กลไกดังกล่าวนำไปสู่ความไม่สมดุลของระบบรีดอกซ์ภายในเซลล์ เพิ่มระดับอนุมูลอิสระ และยับยั้งการแบ่งตัวของจุลชีพ [1],[3]

นอกจากฤทธิ์ต้านจุลชีพแล้ว สารกลุ่มไอโซไธโอไซยาเนตยังแสดงศักยภาพในการต้านออกซิเดชัน โดยสามารถลดการเกิดลิพิดเปอร์ออกซิเดชันและควบคุมสมดุลรีดอกซ์ในระบบอาหาร ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการคงสภาพสี กลิ่น และคุณค่าทางโภชนาการ [1] การรวมคุณสมบัติต้านจุลชีพและต้านออกซิเดชันไว้ในวัสดุเดียวกันจึงเป็นแนวทางที่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากพื้นฐานดังกล่าว โครงงานนี้จึงมุ่งพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ผสานสารออกฤทธิ์กลุ่มไอโซไธโอไซยาเนต เพื่อให้วัสดุมีบทบาทมากกว่าการเป็นชั้นกั้นทางกายภาพ แต่สามารถควบคุมจุลชีพและชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันในระดับโมเลกุล แนวทางนี้ไม่เพียงช่วยเพิ่มความปลอดภัยอาหาร แต่ยังสนับสนุนการพัฒนาวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับแนวคิดความยั่งยืนในระยะยาว

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อสกัดและศึกษาคุณสมบัติของสารไอโซไธโอไซยาเนตจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงสำหรับควบคุมการปนเปื้อนของจุลชีพก่อโรคในอาหาร โดยเฉพาะ *Escherichia coli* ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญด้านความปลอดภัยอาหาร

2. เพื่อศึกษาศักยภาพของสารออกฤทธิ์ในการยับยั้งจุลชีพ และประเมินความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมคุณภาพของอาหาร

3. เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้สารสกัดดังกล่าวเป็นองค์ประกอบเชิงรุกในการพัฒนาแผ่นฟิล์มชีวภาพที่ปลอดภัยต่อการใช้งานด้านอาหาร เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยไม่ก่อให้เกิดไมโครพลาสติกตกค้าง

3. ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาการสกัดสารออกฤทธิ์กลุ่มไอโซไธโอไซยาเนตจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตง โดยกำหนดขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ วิธีการสกัด และการเก็บรักษาสารสกัดภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

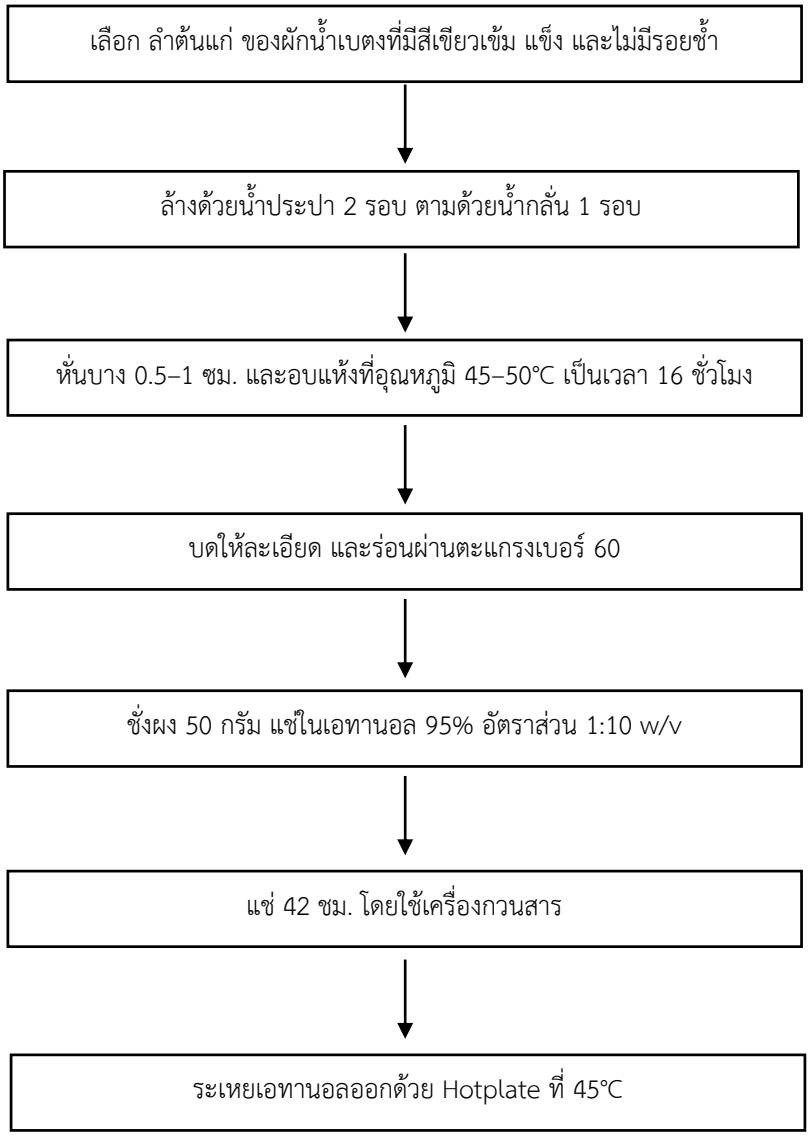
2. ทดสอบฤทธิ์ต้านจุลชีพของสารสกัดต่อ *Escherichia coli* ภายใต้สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการ

3. ประเมินความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัด เพื่อวิเคราะห์ศักยภาพในการชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมคุณภาพของอาหาร

4. วิธีการศึกษา

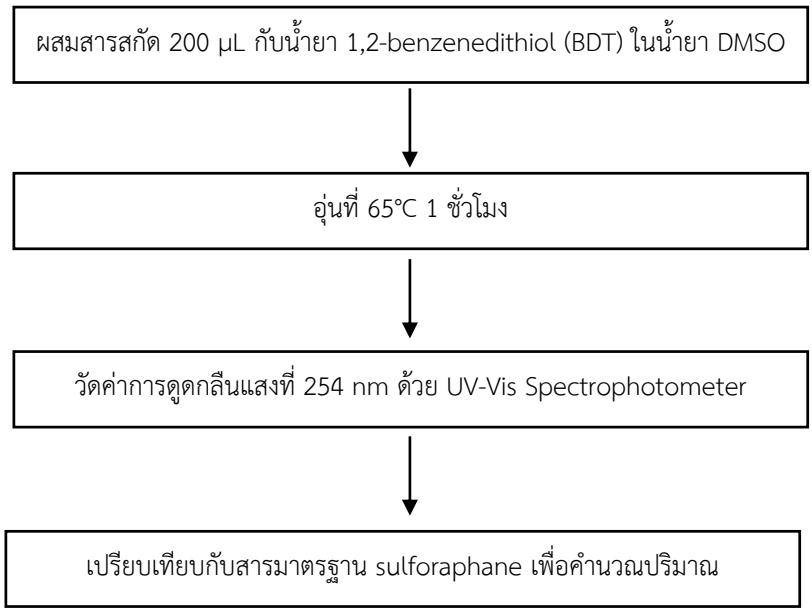
4.1 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

4.1.1 ขั้นตอนการสกัดสารจากผักน้ำ



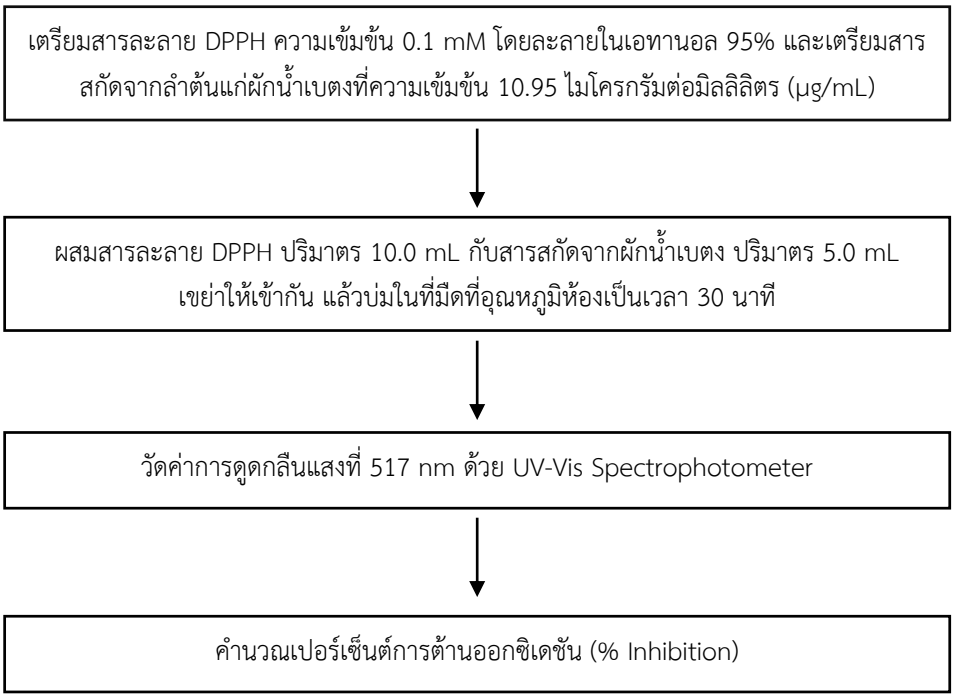
แผนผัง : ขั้นการสกัดสารจากผักน้ำ

4.1.2 ทดสอบปริมาณสารไอโซไธโอไซยาเนต



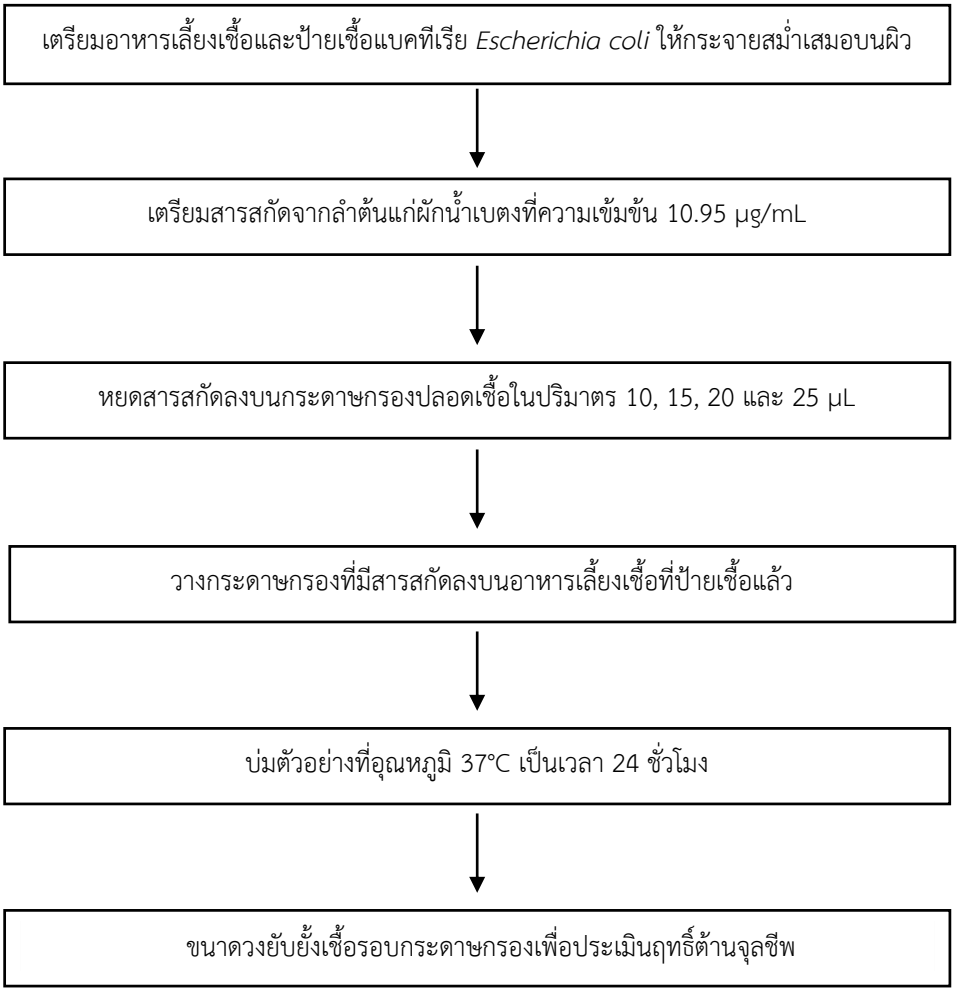
แผนผัง : ทดสอบปริมาณสารไอโซไธโอไซยาเนต

4.1.3 การทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน



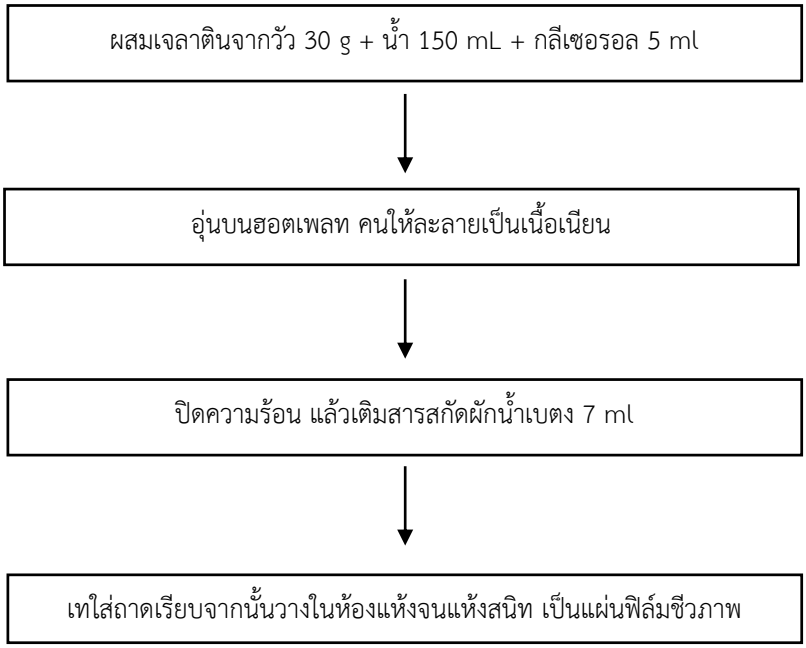
แผนผัง : การทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน

4.1.4 การทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์



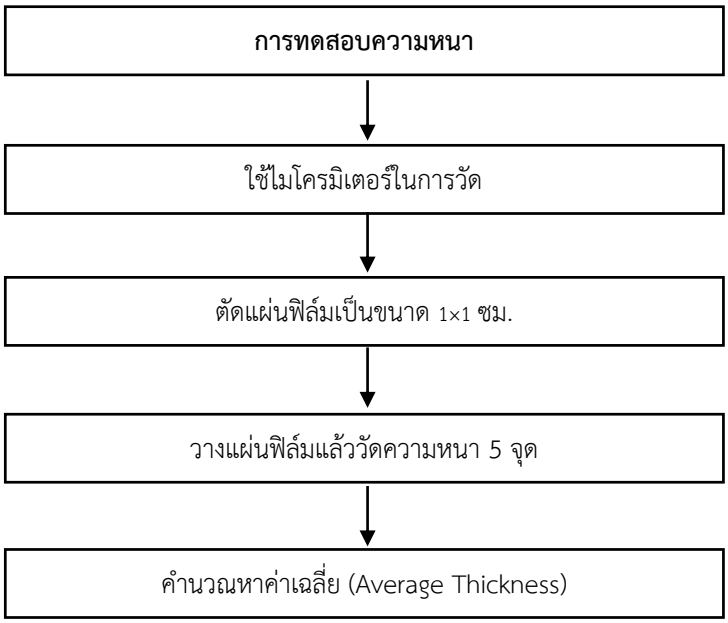
แผนผัง : การทดสอบฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์

4.1.5 การเตรียมแผ่นฟิล์มชีวภาพเจลาตินผสมสารสกัด

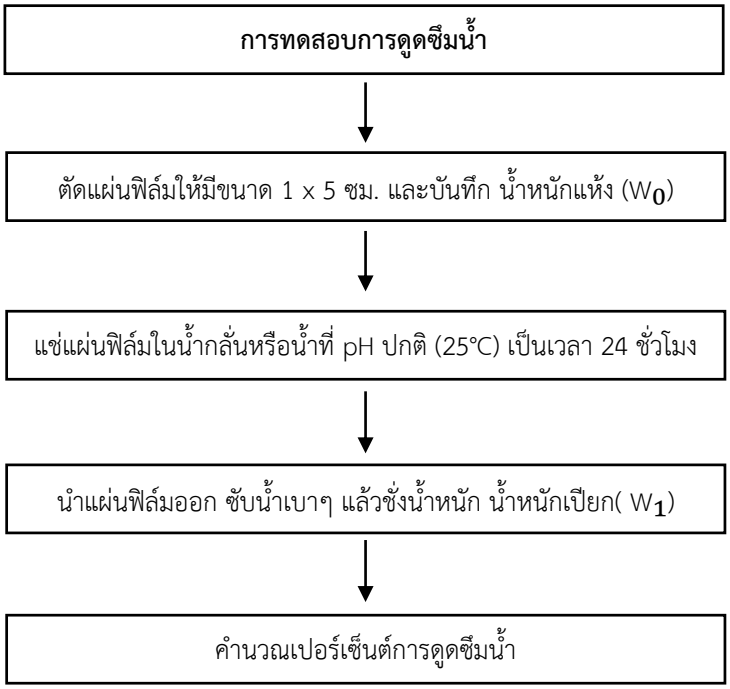


แผนผัง : การเตรียมแผ่นฟิล์มชีวภาพเจลาตินผสมสารสกัด

4.1.6 ทดสอบประสิทธิภาพทางกายภาพของแผ่นฟิล์ม



แผนผัง : การทดสอบความหนา



แผนผัง : ทดสอบประสิทธิภาพทางการดูดซึมน้ำ

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

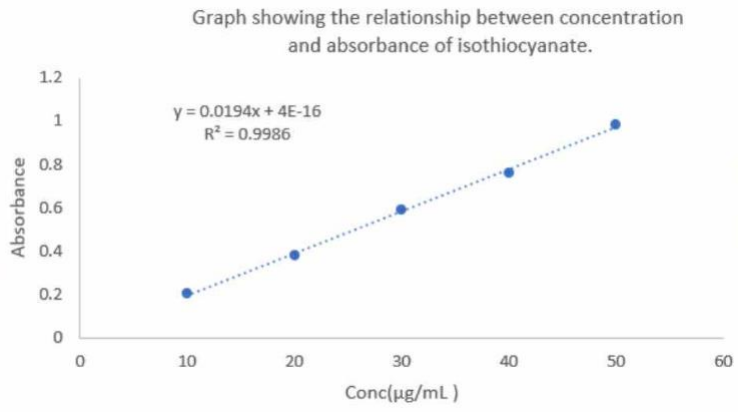
5.1 ผลของการทดสอบสารไอโซไธโอไซยาเนต

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นของสารไอโซไธโอไซยาเนต (µg/mL) กับ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 256 นาโนเมตร ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV–Visible Spectrophotometerโดยใช้ ซัลโฟราเฟรน (Sulforaphane) เป็นสารมาตรฐานอ้างอิง ในการสร้างกราฟมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 1

จากตารางที่ 1 พบว่าค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารอย่างเป็นสัดส่วน แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่ดี สามารถนำสมการเส้นตรงจากกราฟมาตรฐานมาใช้คำนวณปริมาณสารไอโซไธโอไซยาเนตในตัวอย่างได้อย่างเหมาะสม เมื่อวิเคราะห์สารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงที่เจือจางในอัตราส่วน 1:40 พบว่ามีค่าการดูดกลืนแสงเท่ากับ 0.146 ซึ่งเมื่อเทียบกับกราฟมาตรฐานของซัลโฟราเฟรน คิดเป็นความเข้มข้นของสารไอโซไธโอไซยาเนตประมาณ 10.95 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

ตารางที่ 1 ตารางผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอโซไธโอไซยาเนต

ชื่อสารตัวอย่าง	ความยาวคลื่นที่ใช้ (นาโนเมตร)	อัตราการเจือจาง	ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance)	ความเข้มข้นที่คำนวณได้ (ไมโครกรัม/มิลลิลิตร)
ไอโซไธโอไซยาเนต	256	1:40	0.416	10.95



รูปที่1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่าการดูดกลืนแสงของไอโซไธโอไซยาเนต

กราฟมาตรฐานดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (R^2) อยู่ในระดับสูง แสดงถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของวิธีการวิเคราะห์ และยืนยันว่าลำต้นแก่ของผักน้ำเบตงซึ่งเป็นของเหลือหลังการบริโภค มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระดับที่สามารถตรวจวัดได้จริง และมีศักยภาพเพียงพอสำหรับการนำไปศึกษาฤทธิ์ต้านจุลชีพและพัฒนาเป็นแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกในขั้นตอนต่อไป

5.2 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านจุลชีพต่อ *Escherichia coli*

การทดสอบฤทธิ์ต้านจุลชีพของสารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงต่อแบคทีเรีย *Escherichia coli* ดำเนินการโดยวิธี paper disc diffusion method โดยใช้สารสกัดในปริมาตรที่แตกต่างกัน ได้แก่ 10, 15, 20 และ 25 ไมโครลิตร เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 ไมโครลิตร) จากนั้นวัดขนาดวงยับยั้งเชื้อหลังการบ่มเชื้อ แสดงดังรูปที่ 2

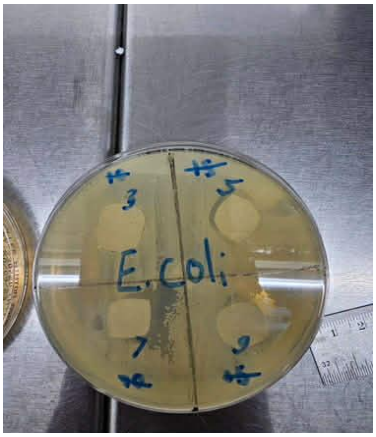
จากตารางที่ 2 พบว่าชุดควบคุมไม่ปรากฏวงยับยั้งเชื้อ แสดงให้เห็นว่าอาหารเลี้ยงเชื้อและตัวทำละลายไม่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญของ *Escherichia coli* ขณะที่สารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียได้อย่างชัดเจน

ตารางที่ 2 ตารางแสดงผลของสารสกัดไอโซไธโอไซยาเนตปริมาณต่างๆในการยับยั้งจุลชีพ

เชื้อทดสอบ	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณวงใส (มิลลิเมตร)				
	ชุดควบคุม	10 ไมโครลิตร	15 ไมโครลิตร	20 ไมโครลิตร	25 ไมโครลิตร
Escherichia coli	0	10.83±1.04	12.35±0.55	13.00±1.73	19.00±2.18

เมื่อพิจารณาผลตามปริมาตรของสารสกัด พบว่า ขนาดวงยับยั้งเชื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้โดยปริมาตร 25 ไมโครลิตรให้ขนาดวงยับยั้งเชื้อสูงที่สุด (19.00 ± 2.18 มิลลิเมตร) สะท้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารออกฤทธิ์กับประสิทธิภาพในการต้านจุลชีพ

ผลการทดลองดังกล่าวยืนยันว่า สารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงมีศักยภาพในการยับยั้ง *Escherichia coli* ซึ่งเป็นแบคทีเรียสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยอาหาร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกเพื่อช่วยลดการปนเปื้อนจุลชีพและยืดอายุการเก็บรักษาอาหารได้



รูปที่ 2 แสดงขนาดวงยับยั้งเชื้อของ *Escherichia coli*

ภายหลังการทดสอบด้วยสารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงในปริมาตร 10, 15, 20 และ 25 ไมโครลิตร เปรียบเทียบกับชุดควบคุม (0 ไมโครลิตร) โดยพบว่าขนาดวงยับยั้งเชื้อมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาตรของสารสกัดที่ใช้สะท้อนถึงศักยภาพของสารออกฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยอาหาร

5.3 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตง

การทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงดำเนินการเพื่อประเมินความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมคุณภาพของอาหารหลังการเก็บเกี่ยว โดยการทดสอบอาศัยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเปรียบเทียบ

$$\%\,\text{Inhibition} = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100$$

โดยที่

- A_{control} = ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม
- A_{sample} = ค่าการดูดกลืนแสงของสารสกัด

จากตารางที่ 3 พบว่าสารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงแสดงฤทธิ์ต้านออกซิเดชันเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด โดยชุดควบคุมไม่แสดงความสามารถในการยับยั้งอนุมูลอิสระ ขณะที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารสกัด ค่าการดูดกลืนแสงลดลงอย่างชัดเจน ส่งผลให้ค่าร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของสารสกัดจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตง

ความเข้มข้นสารสกัด (µg/ml)	% การยับยั้งอนุมูลอิสระ (Mean ± SD)
0 (ชุดควบคุม)	0.00 ± 0.00
2.50	17.84 ± 1.12
5.00	28.96 ± 1.34
7.50	37.52 ± 1.08
10.95	**46.87 ± 1.25**

ความเข้มข้น 10.95 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ให้ค่าการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงที่สุดที่ 46.87 ± 1.25 เปอร์เซ็นต์ สะท้อนถึงศักยภาพของสารออกฤทธิ์ในลำต้นแก่ผักน้ำเบตงในการลดการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการเสื่อมคุณภาพอาหารหลังการเก็บเกี่ยว

ผลการทดลองนี้สนับสนุนว่าสารไอโซไธโอไซยาเนตจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงไม่เพียงมีฤทธิ์ต้านจุลชีพ แต่ยังมีบทบาทในการชะลอการเสื่อมคุณภาพอาหารผ่านกลไกการต้านออกซิเดชัน จึงเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นสารออกฤทธิ์ในแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุก เพื่อการยืดอายุอาหารและเพิ่มความปลอดภัยของอาหาร

5.4 ผลการวัดความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพ

จากตารางที่ 4 การวัดความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกจากสารไอโซไธโอไซยาเนตในตำแหน่งที่แตกต่างกัน จำนวน 5 จุด พบว่าแผ่นฟิล์มมีความหนาเฉลี่ยเท่ากับ 0.121 ± 0.004 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มที่พัฒนาขึ้นมีความหนาสม่ำเสมอ และมีความแปรปรวนต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการใช้งานเป็น บรรจุภัณฑ์อาหาร เนื่องจากช่วยให้การกระจายตัวของสารออกฤทธิ์และสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มมีความคงที่

ตารางที่ 4 ความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกจากสารไอโซไธโอไซยาเนต

จุดที่วัด	ความหนา (มม.)
จุดที่ 1	0.118
จุดที่ 2	0.124
จุดที่ 3	0.121
จุดที่ 4	0.116
จุดที่ 5	0.127
ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	**0.121 ± 0.004**

5.5 การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุก

การย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกที่ผสมสารไอโซไธโอไซยาเนตจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตง ได้รับการประเมินภายใต้สภาวะจำลองที่อุณหภูมิประมาณ 37 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแผ่นฟิล์มเมื่อเวลาผ่านไป คิดเป็นร้อยละของการสูญเสียน้ำหนักตามสมการ

$$Weight\ loss\ (\%) = \frac{W0-W1}{W0} \times 100$$

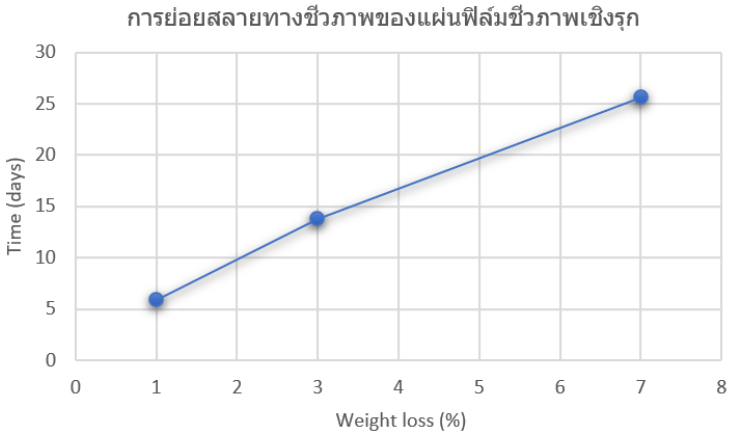
โดยที่

- W_0 คือ น้ำหนักแห้งเริ่มต้นของแผ่นฟิล์ม
- W_1 คือ น้ำหนักแห้งของแผ่นฟิล์มหลังการทดสอบการย่อยสลาย

ผลการทดลองพบว่า แผ่นฟิล์มชีวภาพมีแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ทดสอบ โดยมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 6.2% หลัง 1 วัน, 14.7% หลัง 2 วัน และ 26.4% หลัง 3 วัน แสดงให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มสามารถย่อยสลายได้อย่างค่อยเป็นค่อยไป ไม่เกิดการเสื่อมสภาพอย่างรวดเร็วเกินไป

การย่อยสลายที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับองค์ประกอบของแผ่นฟิล์มที่ใช้วัสดุจากธรรมชาติ ได้แก่ เจลาติน และกลีเซอรอล ซึ่งสามารถถูกจุลชีพในสิ่งแวดล้อมย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งการเติมสารสกัดจากพืชไม่ได้ส่งผลให้โครงสร้างของแผ่นฟิล์มสูญเสียความเสถียรอย่างฉับพลัน

ผลการทดสอบนี้ชี้ให้เห็นว่าแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุกที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพในการใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถลดการตกค้างของวัสดุในธรรมชาติ และไม่ก่อให้เกิดไมโครพลาสติกในระยะยาว สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาที่ยั่งยืน แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นฟิล์มชีวภาพเชิงรุก

5.6 อภิปรายผล

ผลการทดลองยืนยันว่าลำต้นแก่ของผักน้ำเบตงสามารถเป็นแหล่งของสารไอโซไธโอไซยาเนตที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของ *Escherichia coli* ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยขนาดวงยับยั้งเชื้ออยู่ในช่วง 11–15 มิลลิเมตร และเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารสกัด สะท้อนลักษณะการออกฤทธิ์แบบขึ้นกับความเข้มข้น (dose-dependent) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานเกี่ยวกับฤทธิ์ต้านจุลชีพของสารในกลุ่มกลูโคซิโนเลตและไอโซไธโอไซยาเนตในพืชตระกูลกะหล่ำ [1] ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าวัสดุเหลือทิ้งจากระบบเกษตรสามารถคง “ประสิทธิภาพเชิงชีวภาพ” ได้ในระดับที่เทียบเคียงกับแหล่งวัตถุดิบมาตรฐาน

ในเชิงกลไก สารไอโซไธโอไซยาเนตสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไทออลของโปรตีน ส่งผลให้เอนไซม์สำคัญของจุลชีพถูกยับยั้งและกระบวนการเมแทบอลิซึมเสียสมดุล นำไปสู่การหยุดการเจริญเติบโตของเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับงานที่อธิบายบทบาทของสารกลุ่มนี้ต่อการยับยั้งเอนไซม์และจุลชีพ [3] เมื่อพิจารณาในระดับการประยุกต์ใช้ แนวทางการผสานสารออกฤทธิ์ดังกล่าวลงในแผ่นฟิล์มชีวภาพยังสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ต้านจุลชีพจากพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถยืดอายุอาหารได้ [2]

จุดเด่นของงานวิจัยนี้อยู่ที่การ “ยกระดับของเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เป็นวัสดุเชิงหน้าที่” ซึ่งไม่เพียงคงประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยอาหาร แต่ยังลดภาระของเสียและการพึ่งพาพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียว เมื่อเชื่อมโยงในมิติสิ่งแวดล้อม

แนวทางนี้ช่วยลดทั้ง food waste และ plastic waste ในระบบเดียวกัน สอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนและทิศทางการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ยั่งยืน [4] อย่างไรก็ตาม ประเด็นด้านความคงทนของวัสดุภายใต้ความชื้นและอุณหภูมิที่แปรผันยังเป็นข้อจำกัดที่ควรพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถนำไปใช้ได้จริงในระดับครัวเรือนและอุตสาหกรรมขนาดย่อมในอนาคต

6. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการสกัดและประเมินศักยภาพของสารไอโซไธโอไซยาเนตจากลำต้นแก่ของผักน้ำเบตง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พบว่าวัตถุดิบดังกล่าวสามารถเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถตรวจวัดปริมาณไอโซไธโอไซยาเนตได้อย่างชัดเจน สะท้อนถึงศักยภาพในการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์เชิงหน้าที่และลดการสูญเสียทรัพยากรในภาคการเกษตร

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านจุลชีพด้วยวิธี paper disc diffusion แสดงให้เห็นว่าสารสกัดมีความสามารถในการยับยั้งการเจริญของ *Escherichia coli* โดยขนาดวงยับยั้งเชื้อเพิ่มขึ้นตามปริมาตรที่ใช้ และให้ค่าสูงสุดที่ 25 ไมโครลิตร ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์กับประสิทธิภาพในการต้านจุลชีพ

ในด้านฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารสกัดและแผ่นฟิล์มชีวภาพที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถในการชะลอกระบวนการออกซิเดชันในระดับที่เหมาะสม ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการลดการเสื่อมคุณภาพของอาหาร โดยเฉพาะการลดการเกิดลิพิดเปอร์ออกซิเดชัน อันเป็นปัจจัยหลักของการเสื่อมสภาพด้านกลิ่นและคุณค่าทางโภชนาการ ขณะเดียวกันผลการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่าแผ่นฟิล์มมีการสูญเสียน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาอย่างต่อเนื่อง แสดงถึงสมบัติการย่อยสลายที่สอดคล้องกับแนวคิดวัสดุเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

โดยสรุป สารไอโซไธโอไซยาเนตจากลำต้นแก่ผักน้ำเบตงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นองค์ประกอบเชิงรุกสำหรับวัสดุบรรจุภัณฑ์อาหารที่สามารถควบคุมจุลชีพและชะลอการเสื่อมคุณภาพของอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ควบคู่กับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ในลักษณะนี้จึงสอดคล้องกับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) สนับสนุนเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDGs) และกรอบเศรษฐกิจ BCG (Bio–Circular–Green Economy)

ในเชิงการนำไปใช้จริง วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อได้เปรียบด้านต้นทุน เนื่องจากเป็นของเหลือทิ้งที่หาได้ในท้องถิ่น และกระบวนการสกัดสามารถปรับใช้กับเทคนิคพื้นฐานที่ไม่ซับซ้อน จึงมีแนวโน้มต่อการขยายขนาดการผลิต (process scalability)
ได้ในระดับครัวเรือนหรืออุตสาหกรรมขนาดย่อม ทั้งนี้ แม้ยังต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมในด้านความคงทนของวัสดุและการควบคุมคุณภาพในระดับอุตสาหกรรม แต่ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพในการต่อยอดสู่การใช้งานเชิงพาณิชย์ได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

[1] Aires, A., Mota, V. R., Saavedra, M. J., Rosa, E. A. S., & Bennett, R. N. (2009). The antimicrobial effects of glucosinolates and their respective isothiocyanates on bacteria and fungi. Food Control, 20(9), 857–863. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.11.005

[2] Dutta, P. K., Tripathi, S., Mehrotra, G. K., & Dutta, J. (2009). Perspectives for chitosan based antimicrobial films in food applications. Food Chemistry, 114(4), 1173–1182. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.11.047

[3] Luciano, F. B., & Holley, R. A. (2009). Enzymatic inhibition and the antimicrobial activity of isothiocyanates against Aspergillus species. Journal of Food Protection, 72(3), 563–568.

[4] ทีมวิจัยม.จอมบึง. (2023,May,9). พัฒนาแผ่นฟิล์มทานได้จากโปรตีนไฮโดรไลเซส แถมยืดอายุอาหาร–สินค้าเกษตรได้ 4 เดือน. สืบค้นจาก https://www.thaipackmagazine.com/activity/protein-hydrolysate/