บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

4.1 การปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก *Spodoptera litura* จากสารแต่งกลิ่นสังเคราะห์และเลียนแบบธรรมชาติ

4.1.1 ผลิตต้นแบบฟีโรโมนสูตรใหม่ที่มีประสิทธิภาพดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักสูงกว่าสูตรเดิม โดยใช้ส่วนผสมหลักแตกต่างกัน 3 ตำรับ ได้แก่ (1) ผสม Benzaldehyde 200 µl กับ Dipropylene glycol 2 µl (2) ผสม Cis-3-Hexenyl acetate 200 µl กับ Dipropylene glycol 2 µl และ (3) ผสม Allyl Isothiocyanate 200 µl กับ Dipropylene glycol 2 µl โดยแต่ละตำรับเตรียมเม็ดดูดน้ำหอม 7 เม็ด บรรจุในจุกพลาสติกและหยดสารผสมปริมาตรรวม 202 µl ลงบนเม็ดดูดน้ำหอมเพื่อเป็นต้นแบบฟีโรโมนสำหรับทดสอบประสิทธิภาพการดึงดูด (ภาพที่ 4.1.1)

ภาพที่ 4.1.1 ต้นแบบฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักสูตรใหม่

4.1.2 ศึกษาอายุเก็บรักษาต้นแบบฟีโรโมนสูตรใหม่ จำนวน 3 ตำรับ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วและกลุ่มที่ยังไม่เปิดใช้งาน ทั้งนี้ตัวอย่างฟีโรโมนได้ถูกส่งวิเคราะห์ปริมาณสารออกฤทธิ์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography (GC) ให้กับบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง พร้อมทดสอบประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักในห้องปฏิบัติการ สวพส. ผ่านการจำลองการกระจายกลิ่นในอุโมงค์ลม วางแผนทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ 3 ซ้ำ และเปรียบเทียบกับสูตรเดิม โดยบันทึกข้อมูลปริมาณสารออกฤทธิ์ของทั้ง 3 สูตรต่อเนื่อง และจำนวนผีเสื้อหนอนกระทู้ผักที่ถูกดึงดูดภายใน 1 ชั่วโมง จากการสังเกตด้วยตาเปล่า

ผลศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารออกฤทธิ์ของต้นแบบฟีโรโมนสูตรที่ประกอบด้วย Benzaldehyde และ Dipropylene glycol พบว่ากลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วและยังไม่เปิดใช้งาน มีค่าปริมาณสารออกฤทธิ์ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 6 เดือน โดย Benzaldehyde มีค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ย 30.30% (w/w) และลดลงเล็กน้อยเหลือ 29.11% (w/w) ในกลุ่มที่เปิดใช้งานแล้ว ส่วนกลุ่มที่ยังไม่เปิดใช้งานลดลงจาก 30.05% (w/w) เป็น 29.61% (w/w) ขณะที่ Dipropylene glycol มีค่าคงที่มากกว่า โดยเปลี่ยนแปลงช่วงระหว่าง 67.48-66.64% (w/w) ทั้ง 2 กลุ่ม ทั้งนี้ค่าความแปรปรวนสัมพัทธ์ (CV) อยู่ระดับต่ำ

มาก (<0.3%) แสดงถึงความสม่ำเสมอของข้อมูลและความเสถียรของสูตรฟีโรโมน ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าสูตรที่ใช้ Benzaldehyde ร่วมกับ Dipropylene glycol มีเสถียรภาพทางเคมีสูงระยะเวลาเก็บรักษาอย่างน้อย 6 เดือน ทั้งสภาพเปิดใช้งานและยังไม่เปิดใช้งาน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Li et al. (2021) ที่รายงานว่า Benzaldehyde มีความคงตัวต่ออุณหภูมิและการระเหยเมื่ออยู่ในระบบที่มีตัวทำละลายโพลิออล เช่น Dipropylene glycol ซึ่งช่วยลดการสูญเสียสารระเหยผ่านการเกิดออกซิเดชัน นอกจากนี้ผลการคงตัวของฟีโรโมนในรูปแบบดูดซับด้วยวัสดุพาราฟินหรือพอลิเมอร์ยังได้รับการยืนยันจากงานของ Chen et al. (2022) ว่าสามารถรักษาการปลดปล่อยกลิ่นได้ต่อเนื่องและยืดอายุการใช้งานของสารล่อแมลงได้

โดยสรุป ต้นแบบฟีโรโมนสูตรที่ประกอบด้วย Benzaldehyde มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในภาคสนาม เนื่องจากคงคุณสมบัติทางเคมีและปริมาณสารออกฤทธิ์ได้ดีภายใต้สภาวะเก็บรักษานานกว่า 6 เดือน ทั้งนี้ควรมีทดสอบเพิ่มเติมในสภาพภาคสนามจริงเพื่อยืนยันประสิทธิภาพการคงตัวและการดึงดูดแมลงภายใต้สภาพอุณหภูมิและความชื้นที่หลากหลายยิ่งขึ้น รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.1

ตารางที่ 4.1.1 ปริมาณสารออกฤทธิ์และสารรักษาสภาพของต้นแบบฟีโรโมนสูตร Benzaldehyde ผสม Diplopylene glycol ที่ระยะเก็บรักษาหลังผลิต 0 ถึง 6 เดือน

อายุเก็บรักษา (เดือน)	ปริมาณสาร % (w/w)			
	แบบเปิดใช้งานแล้ว		แบบยังไม่เปิดใช้งาน	
	Benzaldehyde[1/]	Diplopylene glycol[1/]	Benzaldehyde[1/]	Diplopylene glycol[1/]
0	30.30 a	67.38 a	30.05 a	67.48 a
1	30.06 a	67.37 a	29.99 a	67.36 a
2	29.82 a	67.35 a	29.94 a	67.05 a
3	29.58 a	67.34 a	29.88 a	66.83 a
4	29.42 a	67.40 a	29.76 a	66.86 a
5	29.34 a	67.35 a	29.68 a	66.65 a
6	29.11 a	67.41 a	29.61 a	66.64 a
CV (%)	0.27	0.12	0.19	0.10
$LSD_{0.05}$	19.17	19.35	13.67	15.74

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลศึกษาความคงตัวของต้นแบบฟีโรโมนสูตรที่ประกอบด้วย Cis-3-Hexenyl acetate และ Dipropylene glycol พบว่าทั้งกลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วและยังไม่เปิดใช้งานมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารออกฤทธิ์ระดับต่ำตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 6 เดือน โดยกลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วมีค่าความเข้มข้นของ Cis-3-Hexenyl acetate ลดลงจาก 50.34% (w/w) เหลือ 48.25% (w/w) ส่วนกลุ่มที่ยังไม่เปิดใช้งาน

ลดลงเพียงเล็กน้อยจาก 51.11% (w/w) เป็น 50.60% (w/w) ขณะที่ Dipropylene glycol มีความคงตัวสูง โดยมีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเฉลี่ยเพียง ±0.3% ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา ซึ่งค่าความแปรปรวนสัมพัทธ์ (CV) อยู่ช่วง 0.10-0.17% แสดงถึงความสม่ำเสมอและความน่าเชื่อถือของข้อมูล จากผลดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า สูตรฟีโรโมนที่ใช้ Cis-3-Hexenyl acetate มีความคงตัวดีภายใต้สภาวะการเก็บรักษา 6 เดือน โดยเฉพาะเมื่อใช้ Dipropylene glycol เป็นสารชะลอการระเหย ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยลดการระเหยและการออกซิเดชันของสารประกอบเอสเทอร์ในสภาพอุณหภูมิห้อง (Zhang et al., 2022) ทั้งนี้การลดลงเล็กน้อยของ Cis-3-Hexenyl acetate ในกลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วอาจเกิดจากการระเหยบางส่วนหรือการสลายตัวแบบช้าในอากาศ ซึ่งเป็นลักษณะปกติของสารประกอบกลุ่ม Green Leaf Volatiles (GLVs) ตามที่รายงานโดย Wang et al. (2023) ว่าสารประเภทนี้มีความไวต่อแสงและอุณหภูมิ แต่สามารถรักษาความคงตัวได้ดีหากอยู่ในระบบตัวชะรอการระเหยที่มีความหนืดสูง เช่น Dipropylene glycol

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ Dipropylene glycol เป็นองค์ประกอบร่วมของสูตร Cis-3-Hexenyl acetate มีส่วนช่วยเสริมเสถียรภาพของสารออกฤทธิ์ ทำให้สูตรฟีโรโมนมีศักยภาพสูงในการคงประสิทธิภาพการปล่อยกลิ่น เหมาะสมต่อการนำไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ล่อผีเสื้อหนอนกระทู้ผักภาคสนาม อย่างไรก็ตามควรทดสอบเพิ่มเติมในสภาวะอุณหภูมิและความชื้นแปรผันเพื่อยืนยันความคงตัวภายใต้การใช้งานจริง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.2

ตารางที่ 4.1.2 ปริมาณสารออกฤทธิ์และสารรักษาสภาพของต้นแบบฟีโรโมนสูตร Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Diplopylene glycol ที่ระยะเก็บรักษาหลังผลิต 0 ถึง 6 เดือน

อายุเก็บรักษา (เดือน)	ปริมาณสาร % (w/w)			
	แบบเปิดใช้งานแล้ว		แบบยังไม่เปิดใช้งาน	
	Cis-3-Hexenyl acetate[1/]	Diplopylene glycol[1/]	Cis-3-Hexenyl acetate[1/]	Diplopylene glycol[1/]
0	50.34 a	45.68 a	51.11 a	46.67 a
1	49.94 a	45.65 a	51.01 a	46.52 a
2	49.54 a	45.66 a	50.92 a	46.57 a
3	49.14 a	45.65 a	50.82 a	46.52 a
4	45.87 a	45.58 a	50.75 a	46.52 a
5	48.75 a	45.60 a	50.72 a	46.48 a
6	48.25 a	45.62 a	50.60 a	46.38 a
CV (%)	0.16	0.10	0.12	0.17
$LSD_{0.05}$	18.05	11.23	14.85	18.10

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลศึกษาความคงตัวของต้นแบบฟีโรโมนสูตรที่ประกอบด้วย Allyl Isothiocyanate (AITC) ผสมกับ Dipropylene glycol แสดงให้เห็นว่าทั้งกลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วและยังไม่เปิดใช้งาน มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณสารออกฤทธิ์ระดับต่ำอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาเก็บรักษา 6 เดือน โดยกลุ่มที่เปิดใช้งานแล้วมีปริมาณ AITC ลดลงจาก 30.17% (w/w) เหลือ 28.82% (w/w) ส่วนกลุ่มที่ยังไม่เปิดใช้งานลดลงจาก 30.11% (w/w) เหลือ 29.07% (w/w) ขณะที่ปริมาณของ Dipropylene glycol มีความคงตัวสูงมาก โดยเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยไม่เกิน 0.3% (w/w) ของทั้ง 2 กลุ่ม ทั้งนี้ค่าความแปรปรวนสัมพัทธ์ (CV) ต่ำกว่า 0.35% แสดงถึงความสม่ำเสมอของข้อมูลและเสถียรภาพของสูตรเชิงสถิติ ผลวิเคราะห์ชี้ว่า AITC มีความคงตัวดีเมื่อผสมกับ Dipropylene glycol ซึ่งช่วยลดการระเหยและการสลายตัวของ Isothiocyanate ภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยเฉพาะระบบกักเก็บที่จำกัดการสัมผัสกับอากาศ การลดลงเพียงเล็กน้อยของปริมาณ AITC ในกลุ่มเปิดใช้งานแล้วเป็นไปตามธรรมชาติของสารประกอบกำมะถันระเหยง่ายที่ไวต่อความชื้นและออกซิเจน (Liu et al., 2023) อย่างไรก็ตามการคงตัวของสูตรมีระดับที่ใกล้เคียงกันระหว่างกลุ่มเปิดใช้งานและยังไม่เปิดใช้งาน แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ Dipropylene glycol ต่อการรักษาสภาพของสารออกฤทธิ์ ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยลดการสูญเสียผ่านการระเหยและชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Nguyen and Park, 2022)

โดยสรุป ต้นแบบฟีโรโมนสูตรที่ประกอบด้วย AITC และ Dipropylene glycol แสดงให้เห็นถึงความคงตัวของสารออกฤทธิ์ช่วงเวลาเก็บรักษา 6 เดือน ทั้งสภาวะเปิดใช้งานและยังไม่เปิดใช้งาน จึงถือว่าเป็นสูตรที่มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นสารล่อแมลงเชิงพาณิชย์ ทั้งนี้ควรมีการประเมินเพิ่มเติมภายใต้สภาวะภาคสนาม เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิสูงและรังสี UV ต่อความคงตัวของสารประกอบ AITC เพื่อให้ได้ข้อมูลสนับสนุนเชิงประยุกต์เพิ่มเติม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.3

ตารางที่ 4.1.3 ปริมาณสารออกฤทธิ์และสารรักษาสภาพของต้นแบบฟีโรโมนสูตร Allyl Isothiocyanate (AITC) ผสม Diplopylene glycol ที่ระยะเก็บรักษาหลังผลิต 0 ถึง 6 เดือน

อายุเก็บรักษา (เดือน)	ปริมาณสาร % (w/w)			
	แบบเปิดใช้งานแล้ว		แบบยังไม่เปิดใช้งาน	
	AITC[1/]	Diplopylene glycol[1/]	AITC[1/]	Diplopylene glycol[1/]
0	30.17 a	65.17 a	30.11 a	67.37 a
1	29.93 a	65.16 a	30.05 a	67.15 a
2	29.69 a	65.14 a	30.00 a	66.94 a
3	29.45 a	65.13 a	29.94 a	66.83 a
4	29.32 a	65.08 a	29.81 a	66.83 a
5	29.12 a	65.02 a	29.28 a	66.81 a
6	28.82 a	65.00 a	29.07 a	66.72 a
CV (%)	0.34	0.10	0.28	0.10
$LSD_{0.05}$	23.92	15.53	19.54	15.33

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลทดสอบประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักในอุโมงค์ลมของต้นแบบฟีโรโมนทั้ง 3 สูตร เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรเดิม พบว่าฟีโรโมนสูตรใหม่ทั้งหมดมีประสิทธิภาพการดึงดูดสูงกว่าหรือใกล้เคียงกับสูตรเดิมช่วงระยะเวลาเก็บรักษา 0-6 เดือน โดยเฉพาะสูตรที่ผสม Benzaldehyde กับ Dipropylene glycol มีอัตราการดึงดูดเฉลี่ยสูงสุดตลอดการทดลอง โดยมีค่าการดึงดูดสูงถึง 72.84% ในเดือนที่ 6 ซึ่งมากกว่าสูตรเดิมที่มีค่าเฉลี่ยเพียง 58.23% ในเดือนเดียวกัน แสดงให้เห็นว่าฟีโรโมนสูตรนี้มีความเสถียรของกลิ่นและความสามารถในการดึงดูดแมลงสูงที่สุด ขณะที่สูตร Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol และ AITC ผสม Dipropylene glycol มีแนวโน้มการดึงดูดลดลงเล็กน้อยหลังเดือนที่ 4 แต่ยังคงอยู่ระดับที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากสูตรเดิมบางช่วงเวลา โดยเฉพาะสูตร Cis-3-Hexenyl acetate ซึ่งยังคงมีค่าการดึงดูดเฉลี่ยมากกว่า 66% ในเดือนที่ 6 อย่างไรก็ตาม สูตรที่ใช้ AITC พบว่าค่าการดึงดูดลดลงชัดเจนในเดือนที่ 5 (55.26%) ก่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเดือนที่ 6 ซึ่งอาจเกิดจากความผันผวนของการระเหยของสารประกอบกำมะถันที่ไวต่ออุณหภูมิและความชื้น (Wang et al., 2022)

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟีโรโมนสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol ให้ประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักสูงสุดและมีความคงตัวของกลิ่นดีที่สุด ตลอดระยะเวลาเก็บรักษา ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Chen et al. (2023) ที่ระบุว่าสารกลุ่มอัลดีไฮด์ โดยเฉพาะ Benzaldehyde มีบทบาทในการกระตุ้นการตอบสนองทางเคมีประสาทของแมลงจำพวกหนอนกระทู้ผัก และสามารถคงความเข้มข้นของกลิ่นได้ยาวนานเมื่อผสมสารชะลอการระเหย เช่น Dipropylene glycol นอกจากนี้การใช้ระบบจำลองอุโมงค์ลมยังช่วยให้สามารถประเมินการกระจายกลิ่นและพฤติกรรมการบินเข้าหาแหล่งฟีโรโมนได้อย่างแม่นยำ (López et al., 2021) สรุปได้ว่าฟีโรโมนสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol มีศักยภาพสูงสุดสำหรับการพัฒนาเชิงพาณิชย์ เนื่องจากมีความคงตัวสูงและประสิทธิภาพการดึงดูดแมลงเด่นชัด รองลงมาคือสูตร Cis-3-Hexenyl acetate และสูตร AITC ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวสนับสนุนแนวทางการใช้สารประกอบกลิ่นธรรมชาติร่วมกับตัวทำละลายโพลิออลเพื่อเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพของฟีโรโมนด้านการควบคุมแมลงศัตรูพืช รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.4 และภาพที่ 4.1.2

ตารางที่ 4.1.4 การดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักของต้นแบบฟีโรโมนแต่ละสูตรในอุโมงค์ลม ที่อายุเก็บรักษา 0 ถึง 6 เดือน

อายุเก็บรักษา (เดือน)	การดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก (%)			
	สูตรเดิม[1/]	Benzaldehyde + Diplopylene glycol[1/]	Cis-3-Hexenyl acetate + Diplopylene glycol[1/]	AITC + Diplopylene glycol[1/]
0	65.85 abcdef	**71.74 ab**	64.29 bcdef	69.00 abcde
1	59.12 fg	**70.51 abc**	59.24 fg	72.33 ab
2	62.56 cdefg	**68.23 abcde**	67.73 abcde	64.29 bcdef
3	61.12 efg	**64.95 abcdef**	62.33 cdefg	68.52 abcde

อายุเก็บรักษา (เดือน)	การดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก (%)			
	สูตรเดิม[1/]	Benzaldehyde + Diplopylene glycol[1/]	Cis-3-Hexenyl acetate + Diplopylene glycol[1/]	AITC + Diplopylene glycol[1/]
4	65.66 abcdef	**69.72 abcd**	61.02 efg	65.88 abcdef
5	65.02 abcdef	**64.15 bcdef**	62.13 defg	55.26 g
6	58.23 fg	**72.84 a**	66.14 abcdef	61.22 efg
CV (%)			0.06	
$LSD_{0.05}$			8.23	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ภาพที่ 4.1.2 ผีเสื้อหนอนกระทู้ผักสำหรับทดสอบและอุโมงค์ลม

4.1.3 คัดเลือกวิธีใช้ตำรับต้นแบบฟีโรโมนสูตรใหม่ จำนวน 3 ตำรับ โดยออกแบบการทดลองแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ 3 ซ้ำ 3 กรรมวิธี เพื่อประเมินระยะห่างในการติดตั้งกับดัก (10, 15 และ 20 เมตร) และระยะเวลาเปลี่ยนกับดัก (7, 14 และ 28 วัน) ก่อนนำไปเปรียบเทียบกับวิธีควบคุมของเกษตรกรและกับดักที่ไม่มีฟีโรโมน การเก็บข้อมูล ประกอบด้วย จำนวนผีเสื้อหนอนกระทู้ผักที่ติดกับดักแต่ละช่วงเวลา ระดับความเสียหายของพืช รวมถึงต้นทุนการใช้สารป้องกันกำจัดต่อหน่วยพื้นที่ ทั้งนี้จะนำผลวิเคราะห์ทางสถิติมาใช้เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์การค้าประเภทเดียวกันเพื่อคัดเลือกต้นแบบฟีโรโมนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด 2 ตำรับสำหรับการทดสอบภาคสนามในขั้นตอนต่อไป

ผลทดลองเปรียบเทียบระยะติดตั้งกับดักฟีโรโมนสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol ในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี พบว่าทุกระยะห่างของการติดตั้งให้ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักใกล้เคียงกัน โดยมีค่าการดึงดูดเฉลี่ย 59.67-65.50% และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตาม ระยะห่าง 20 เมตร ให้ค่าการดึงดูดสูงสุด (65.50%) ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งกับดักในระยะห่างพอเหมาะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการดักจับแมลงได้โดยไม่กระทบต่อพื้นที่ครอบคลุมของกลิ่นฟีโรโมนมากนัก ผลดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Kumar et al. (2023) ที่พบว่าการจัดระยะติดตั้งกับดักฟีโรโมนช่วง 15-25 เมตร

ช่วยเพิ่มการกระจายของกลิ่นและลดการทับซ้อนของรัศมีการดึงดูด มีผลให้สามารถควบคุมประชากรแมลงศัตรูได้มากขึ้น นอกจากนี้ Li et al. (2021) ยังระบุว่าการใช้ Benzaldehyde เป็นส่วนประกอบหลักของสูตรฟีโรโมนมีความสามารถแพร่กระจายกลิ่นในอากาศได้ดีและยังคงเสถียรภาพในระยะติดตั้งที่ห่างออกไปจากแหล่งพืชอาศัย เมื่อพิจารณาระดับความเสียหายของผักกาดขาวปลี พบว่าทุกระยะการติดตั้ง ความเสียหายมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการดึงดูดของฟีโรโมนเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างจำนวนแมลงที่ถูกดักจับกับความเสียหายของพืช (Hernández et al., 2022) ทั้งนี้ระยะติดตั้ง 20 เมตร มีแนวโน้มเหมาะสมที่สุดในเชิงเศรษฐกิจและประสิทธิภาพการใช้งานต่อพื้นที่ 1 ไร่ เนื่องจากใช้จำนวนกับดักเพียง 9 จุด แต่ยังคงให้ผลการดึงดูดสูงสุด

โดยสรุป การติดตั้งกับดักฟีโรโมนสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol ระยะ 20 เมตร เป็นระยะที่เหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะการทดลอง เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักสูง ลดความเสียหายของพืช และสามารถลดต้นทุนการติดตั้งเมื่อเทียบกับระยะที่ใกล้กว่า รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.5

ตารางที่ 4.1.5 ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักและความเสียหายต่อผักกาดขาวปลีเปรียบเทียบระยะติดตั้งกับดักฟีโรโมน สูตร Benzaldehyde ผสม Diplopylene glycol

ระยะติดตั้ง (เมตร)	จำนวน (กับดัก) พื้นที่ทดสอบ 1 ไร่	ผลการดึงดูด (%)[1/]
10	16	61.73 a
15	9	59.67 a
20	4	65.50 a
	CV (%)	0.19
	$LSD_{0.05}$	37.30

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลศึกษาการเปรียบเทียบระยะเวลาเปลี่ยนฟีโรโมนของกับดักสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol ที่ระยะติดตั้ง 20 เมตร ในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี พบว่าทุกกรรมวิธีให้ผลดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยช่วง 58.68-72.09% ซึ่งถือว่าอยู่ระดับสูงตลอดระยะเวลาเก็บข้อมูล ทั้งนี้ กรรมวิธีที่เปลี่ยนฟีโรโมนทุก 14 วัน ให้ค่าการดึงดูดสูงสุด (72.09%) ในช่วงแรกของการทดสอบ ขณะที่กรรมวิธีที่ไม่เปลี่ยนฟีโรโมนตลอด 28 วัน ยังคงให้ค่าการดึงดูดเฉลี่ย 65.29% ช่วงสุดท้าย แสดงถึงความคงตัวของฟีโรโมนสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol ที่สามารถปลดปล่อยกลิ่นได้ระยะยาว ผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Chen et al. (2023) ที่รายงานว่า Benzaldehyde เป็นสารประกอบกลุ่มอัลดีไฮด์ที่สามารถคงความเข้มข้นของกลิ่นได้ยาวนานภายใต้การควบคุมอัตราการระเหยด้วยตัวทำละลายประเภทโพลิออล เช่น Dipropylene glycol ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสานที่ช่วยลดอัตราการ

สูญเสียของสารระเหย และส่งผลให้สามารถคงประสิทธิภาพการดึงดูดแมลงได้ต่อเนื่องกว่า 3-4 สัปดาห์ นอกจากนี้ Torres et al. (2022) ยังยืนยันว่าการคงประสิทธิภาพของกับดักฟีโรโมนเป็นเวลานานช่วยลดความถี่ในการเปลี่ยนวัสดุฟีโรโมนโดยไม่ลดประสิทธิภาพการควบคุมแมลงศัตรู ทำให้ต้นทุนการจัดการภาคเกษตรลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนฟีโรโมนทุก 14 วัน เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะการทดลอง เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดึงดูดสูงสุดโดยไม่เพิ่มต้นทุนแรงงานหรือวัสดุไม่จำเป็น ขณะเดียวกันการไม่เปลี่ยนฟีโรโมนตลอด 28 วัน ยังคงให้ผลการดึงดูดระดับที่ยอมรับได้ แสดงถึงประสิทธิภาพของสูตร Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol ในสภาพการใช้งานภาคสนาม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.6

ตารางที่ 4.1.6 ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักที่ระยะติดตั้ง 20 เมตร เปรียบเทียบระยะเวลาเปลี่ยนฟีโรโมนในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี สูตร Benzaldehyde ผสม Diplopylene glycol

กรรมวิธี	ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก (%)[1/]		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
เปลี่ยนทุก 7 วัน	61.25 a	61.00 a	61.00 a
เปลี่ยนทุก 14 วัน	72.09 a	58.68 a	59.00 a
28 วัน ไม่เปลี่ยนฟีโรโมน	66.80 a	65.73 a	65.29 a
CV (%)		0.15	
$LSD_{0.05}$		20.84	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลทดสอบการติดตั้งกับดักฟีโรโมนสูตร Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol ในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี พบว่าทุกระยะห่างการติดตั้งให้ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักระดับปานกลาง โดยมีค่าการดึงดูดเฉลี่ย 53.03-59.07% และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้ระยะติดตั้ง 15 เมตร ให้ค่าการดึงดูดสูงสุด (59.07%) จากผลดังกล่าวสามารถกล่าวได้ว่า สูตร Cis-3-Hexenyl acetate มีประสิทธิภาพการดึงดูดแมลงต่ำกว่าสูตร Benzaldehyde อาจเนื่องมาจากความไวต่ออุณหภูมิและการสลายตัวของสาร Cis-3-Hexenyl acetate เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมภาคสนาม (Zhang et al., 2022) นอกจากนี้โครงสร้างทางเคมีของสารประกอบกลุ่ม Green Leaf Volatiles (GLVs) ส่วนใหญ่มีอัตราการระเหยสูงและเกิดออกซิเดชันได้ง่าย ทำให้ความเข้มข้นของกลิ่นลดลงอย่างรวดเร็ว (Wang et al., 2023) อย่างไรก็ตามการใช้ Dipropylene glycol เป็นตัวทำละลายยังคงช่วยคงกลิ่นระยะหนึ่ง ทำให้การดึงดูดแมลงยังคงอยู่ระดับที่ยอมรับได้

โดยสรุป ผลการทดลองชี้ว่าการติดตั้งกับดักฟีโรโมนสูตร Cis-3-Hexenyl acetate ระยะ 15 เมตร ให้การดึงดูดสูงสุด แต่ไม่แสดงผลในการลดความเสียหายของพืชอย่างมีนัยสำคัญ จึงอาจเหมาะสมในฐานะเป็นอุปกรณ์ติดตามความหนาแน่นของแมลง มากกว่าการใช้ควบคุมโดยตรงภาคสนาม และควรปรับปรุงสูตรเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของกลิ่นและยืดระยะเวลาการปล่อยสารออกฤทธิ์ให้ยาวนานขึ้น รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.7

ตารางที่ 4.1.7 ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักและความเสียหายต่อผักกาดขาวปลีเปรียบเทียบระยะติดตั้งกับดักฟีโรโมน สูตร Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Diplopylene glycol

ระยะติดตั้ง (เมตร)	จำนวน (กับดัก) พื้นที่ทดสอบ 1 ไร่	ผลการดึงดูด (%)[1/]
10	16	53.03 a
15	9	59.07 a
20	9	54.50 a
	CV (%)	0.16
	$LSD_{0.05}$	28.70

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลทดสอบระยะเวลาเปลี่ยนฟีโรโมนของกับดักสูตร Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol ที่ระยะติดตั้ง 20 เมตร ในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี พบว่าทุกกรรมวิธีให้ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าการดึงดูดเฉลี่ยระหว่าง 43.90-62.17% ทั้งนี้กรรมวิธีที่เปลี่ยนฟีโรโมนทุก 14 วัน มีค่าดึงดูดสูงสุดช่วงแรก (61.81%) แต่ลดลงชัดเจนในสัปดาห์ที่ 4 (43.90%) แสดงถึงการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์เมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่กรรมวิธีที่ไม่เปลี่ยนฟีโรโมนตลอด 28 วัน ยังคงให้ค่าการดึงดูดเฉลี่ยค่อนข้างคงที่ (59.04-59.02%) อาจเกี่ยวกับความคงตัวของกลิ่น แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Wang et al. (2023) ซึ่งระบุว่าสารประกอบกลุ่ม Green Leaf Volatiles (เช่น Cis-3-Hexenyl acetate) มีอัตราการระเหยสูงและเสื่อมสภาพเร็วภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง แต่การใช้ตัวทำละลายชนิด Glycol ช่วยลดอัตราการระเหยและคงการปล่อยกลิ่นต่อเนื่อง นอกจากนี้ Zhang et al. (2022) รายงานว่า Dipropylene glycol สามารถทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการปลดปล่อยสาร Volatile ให้คงที่ ทำให้ประสิทธิภาพของกับดักยังอยู่ระดับที่ยอมรับได้ทั้งที่ไม่ได้เปลี่ยนฟีโรโมน อย่างไรก็ตามการลดลงของประสิทธิภาพในกรรมวิธีที่เปลี่ยนทุก 14 วัน ช่วงปลายการทดลอง อาจเกิดจากการสูญเสียสารออกฤทธิ์ระหว่างการเปลี่ยนซองบรรจุใหม่บ่อยครั้ง ซึ่งลดความต่อเนื่องของการปล่อยกลิ่น (Li and He, 2021)

โดยสรุป ระยะเวลาเปลี่ยนฟีโรโมนที่เหมาะสมสำหรับสูตร Cis-3-Hexenyl acetate คือ 28 วัน หรือการไม่เปลี่ยนฟีโรโมนภายในรอบเดือน เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการดึงดูดเสถียรและคงตัวที่สุด ทั้งยังช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาและแรงงานการเปลี่ยนกับดักบ่อยครั้ง อย่างไรก็ตามการปรับปรุงสูตรเพื่อเพิ่มความคงตัว

ของสาร Cis-3-Hexenyl acetate ภายใต้สภาวะภาคสนามยังเป็นประเด็นที่ควรดำเนินการต่อเนื่องในขั้นตอนพัฒนาเชิงอุตสาหกรรม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.8

ตารางที่ 4.1.8 ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักที่ระยะติดตั้ง 20 เมตร เปรียบเทียบระยะเวลาเปลี่ยนฟีโรโมนในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี สูตร Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Diplopylene glycol

กรรมวิธี	ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก (%)[1/]		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน
เปลี่ยนทุก 7 วัน	55.05 a	50.15 a	51.02 a
เปลี่ยนทุก 14 วัน	61.81 a	60.12 a	43.90 a
28 วัน ไม่เปลี่ยนฟีโรโมน	59.04 a	62.17 a	59.02 a
CV (%)		0.17	
$LSD_{0.05}$		21.06	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลทดลองการติดตั้งกับดักฟีโรโมนสูตร Allyl Isothiocyanate (AITC) ผสม Dipropylene glycol ในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี พบว่าทุกระยะห่างการติดตั้งให้ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักระดับปานกลางถึงต่ำ โดยมีค่าการดึงดูดเฉลี่ยระหว่าง 42.22-53.03% และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยระยะ 15 เมตร ให้ค่าการดึงดูดสูงสุด (53.03%) ขณะที่ระยะ 20 เมตร ทั้งที่ใช้จำนวนกับดักเท่ากับระยะ 15 เมตร แต่ให้ค่าการดึงดูดต่ำกว่า (44.32%) ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าระยะติดตั้งที่ห่างเกินไปอาจทำให้ความเข้มข้นของกลิ่นลดลงจนไม่สามารถดึงดูดแมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Liu et al. (2023) ซึ่งระบุว่า AITC เป็นสารประกอบกำมะถันระเหยง่ายที่ไวต่ออุณหภูมิและความชื้น ส่งผลให้ความเข้มข้นของกลิ่นลดลงรวดเร็วภายใต้สภาพภาคสนาม และมีรัศมีการกระจายกลิ่นจำกัดเมื่อเทียบกับสารกลุ่มอัลดีไฮด์ นอกจากนี้การใช้ Dipropylene glycol ยังมีส่วนช่วยชะลอการระเหยได้บางส่วน แต่ไม่สามารถป้องกันการสลายตัวทางเคมีของ AITC เมื่อสัมผัสออกซิเจนในระยะเวลานาน (Nguyen and Park, 2022) ผลที่ได้จึงชี้ให้เห็นว่าสูตรฟีโรโมนที่มี AITC มีความไวต่อสิ่งแวดล้อมและมีระยะการทำงานที่จำกัดกว่าอีก 2 สูตร (Benzaldehyde และ Cis-3-Hexenyl acetate)

โดยสรุป การติดตั้งกับดักฟีโรโมนสูตร AITC ระยะ 15 เมตร ให้ผลการดึงดูดและลดความเสียหายของพืชได้ดีกว่าระยะอื่น โดยไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ให้สมดุลระหว่างประสิทธิภาพการดักจับและความคุ้มค่าด้านจำนวนกับดักที่ใช้ ทั้งนี้ควรพิจารณาการปรับปรุงสูตรโดยเพิ่มสารประสานหรือตัวดูดซับเพื่อยืดอายุการปล่อยกลิ่นและเพิ่มความคงตัวของสาร AITC สำหรับการใช้งานภาคสนาม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.9

ตารางที่ 4.1.9 ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักและความเสียหายต่อผักกาดขาวปลีเปรียบเทียบระยะติดตั้งกับดักฟีโรโมน สูตร Allyl Isothiocyanate ผสม Diplopylene glycol

ระยะติดตั้ง (เมตร)	จำนวน (กับดัก) พื้นที่ทดสอบ 1 ไร่	ผลการดึงดูด (%)[1/]
10	16	42.22 a
15	9	53.03 a
20	9	44.32 a
	CV (%)	0.30
	$LSD_{0.05}$	43.17

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลศึกษาการเปลี่ยนระยะเวลาการเปลี่ยนฟีโรโมนของกับดักสูตร Allyl Isothiocyanate (AITC) ผสม Dipropylene glycol ที่ระยะติดตั้ง 20 เมตร ในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี พบว่าทุกกรรมวิธีให้ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักระดับปานกลาง โดยมีค่าการดึงดูดเฉลี่ยระหว่าง 39.04-55.43% และไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยกรรมวิธีที่เปลี่ยนฟีโรโมนทุก 7 วัน ให้ค่าการดึงดูดสูงสุด (55.43%) ในสัปดาห์ที่ 2 ของการทดสอบ ขณะที่กรรมวิธีที่ไม่เปลี่ยนฟีโรโมนตลอด 28 วัน ให้ค่าการดึงดูดต่ำที่สุด (39.04%) ช่วงสุดท้ายของการเก็บข้อมูล ข้อมูลชี้ว่าสูตรฟีโรโมนที่มีส่วนผสมของ AITC มีประสิทธิภาพลดลงต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งสอดคล้องกับคุณสมบัติของสารประกอบกำมะถันที่มีความระเหยสูงและสลายตัวได้รวดเร็วภายใต้สภาพอุณหภูมิและความชื้นภาคสนาม แนวโน้มนี้สอดคล้องกับรายงานของ Liu et al. (2023) ที่พบว่า AITC มีความไม่เสถียรต่อความร้อนและแสง ส่งผลให้ปริมาณสารออกฤทธิ์ลดลงภายในเวลาไม่กี่วันหลังการปลดปล่อย ขณะที่ Nguyen and Park (2022) ระบุว่า Dipropylene glycol สามารถช่วยชะลอการระเหยของสารได้บางส่วน แต่ไม่สามารถยืดอายุการใช้งานของสารประเภท Isothiocyanate ได้เกิน 2 สัปดาห์ภายใต้สภาวะภาคสนามทั่วไป ดังนั้นการลดลงของประสิทธิภาพการดึงดูดกรรมวิธีที่ไม่เปลี่ยนฟีโรโมนจึงเป็นผลจากการสูญเสียสารออกฤทธิ์หลักไปตามเวลา

โดยสรุป การเปลี่ยนฟีโรโมนสูตร AITC ทุก 7-14 วัน เป็นระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดเพื่อรักษาประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักให้อยู่ระดับสูงต่อเนื่อง การไม่เปลี่ยนฟีโรโมนเป็นระยะเวลา 28 วัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลงชัดเจนและอาจไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานภาคสนาม ทั้งนี้การพัฒนาสูตรเพิ่มเติมโดยการเพิ่มตัวประสานหรือเทคโนโลยีควบคุมการปลดปล่อยกลิ่น เช่น microencapsulation หรือ polymer matrix อาจช่วยยืดอายุการทำงานของสาร AITC ได้ (Torres et al., 2023) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.10

ตารางที่ 4.1.10 ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักที่ระยะติดตั้ง 20 เมตร เปรียบเทียบระยะเวลาเปลี่ยนฟีโรโมนในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี สูตร Allyl Isothiocyanate ผสม Diplopylene glycol

กรรมวิธี	ผลการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก (%)[1/]		
	7 วัน	14 วัน	28 วัน

เปลี่ยนทุก 7 วัน	50.02 abc	55.43 a	49.31 abcd
เปลี่ยนทุก 14 วัน	45.63 abcd	53.68 ab	45.01 bcd
28 วัน ไม่เปลี่ยนฟีโรโมน	42.00 cd	45.43 abcd	39.04 d
CV (%)		0.10	
$LSD_{0.05}$		10.34	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

จากการผลทดลองในห้องปฏิบัติการและการประเมินอายุการเก็บรักษาดังกล่าวข้างต้น ได้คัดเลือกฟีโรโมนต้นแบบที่มีศักยภาพสูงสุด 2 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol และสูตรที่ 2 Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol โดยใช้เกณฑ์การพิจารณา 3 ประการ คือ

(1) ความคงตัวของสารออกฤทธิ์ ต้องคงปริมาณสารสำคัญได้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 95 ภายหลังเก็บรักษา 6 เดือน

(2) ประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักในอุโมงค์ลม ซึ่งต้องให้ผลตอบสนองของแมลงสูงกว่าสูตรเดิมในระดับนัยสำคัญทางสถิติ

(3) ความเหมาะสมด้านการใช้งานจริงภาคสนาม โดยพิจารณาทั้งต้นทุนการผลิต ความปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม และความเป็นไปได้ในระบบเกษตรตามมาตรฐาน GAP

ดำเนินการทดสอบภาคสนามโดยคัดเลือก 2 พื้นที่เป้าหมาย ได้แก่ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงทุ่งหลวง (ผักกาดขาวปลี) และสถานีเกษตรหลวงอินทนนท์ (กะหล่ำปลีหัวใจ) จ.เชียงใหม่ ข้อมูลสภาพแวดล้อมบริเวณแปลงปลูกพบว่า ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงทุ่งหลวง เป็นพื้นที่ตั้งอยู่บนที่สูงระดับกลางของ อ.แม่วาง ที่ระดับความสูงประมาณ 800-1,000 เมตรจากระดับน้ำทะเล มีลักษณะภูมิอากาศแบบ เย็นชื้นบนพื้นที่สูง ช่วงเดือนสิงหาคม-กันยายน 2568 อยู่ระยะปลายฤดูฝน โดยมีอุณหภูมิกลางวันเฉลี่ย 24-28°C และกลางคืน 18-22°C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยสูงกว่า 80% และมีฝนตกเฉลี่ยประมาณ 18-20 วัน/เดือน ปริมาณฝนรวมเฉลี่ย 200-220 mm/เดือน สภาพอากาศโดยรวมเหมาะสมต่อการปลูกพืชผักตระกูลกะหล่ำและคงประสิทธิภาพของฟีโรโมนช่วงการทดสอบภาคสนาม ส่วนสถานีเกษตรหลวงอินทนนท์ ตั้งอยู่บนพื้นที่สูงกว่า 1,000 เมตรจากระดับน้ำทะเล มีลักษณะภูมิอากาศแบบ เย็นชื้นตลอดปี โดยเฉพาะช่วง สิงหาคม-กันยายน 2568 ที่อยู่ในฤดูฝนตอนปลาย มีอุณหภูมิกลางวันเฉลี่ย 26-28°C และกลางคืน 19-21°C ความชื้นสัมพัทธ์สูงมากระหว่าง 90-95% และมีฝนตกเกือบทุกวัน (ความน่าจะเป็นฝนรายวันประมาณ 80-90%) ปริมาณฝนเฉลี่ยต่อเดือนอยู่ 220-250 mm สภาพแวดล้อมดังกล่าวสนับสนุนการปลดปล่อยฟีโรโมนในระดับคงที่และช่วยลดการระเหยเร็วของสารออกฤทธิ์

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าฟีโรโมนสูตรใหม่ทั้ง 2 สูตร ให้ประสิทธิภาพเหนือกว่าสูตรเดิมอย่างมีนัยสำคัญหลายด้าน โดยเฉพาะฟีโรโมนสูตรใหม่ที่ 1 (Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol) สามารถดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักสูงสุดทุกช่วงเวลา (68.21-61.02% ที่ศูนย์ฯ ทุ่งหลวง และ 69.12-65.02% ที่สถานีฯ อินทนนท์) พร้อมลดความเสียหายของพืชได้เหลือเพียง 35.09-35.03% ส่วนฟีโรโมนสูตรใหม่ที่ 2 (Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol) ให้ประสิทธิภาพการดึงดูดระดับปานกลาง (51.00-56.00%) แต่ยังสูงกว่าสูตรเดิมและการใช้กับดักเปล่าทุกช่วงเวลา ข้อมูลแสดงว่าการใช้ Dipropylene glycol เป็นตัวประสาน

มีบทบาทในการควบคุมการระเหยของสารระเหยจำพวกเอสเทอร์และช่วยยืดอายุการทำงานของฟีโรโมน (Zhang et al., 2022) อย่างไรก็ตามความไวต่ออุณหภูมิของ Cis-3-Hexenyl acetate ยังทำให้ประสิทธิภาพลดลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง (Wang et al., 2023)

การเปรียบเทียบเชิงกลไกพบว่า Benzaldehyde ซึ่งเป็นสารกลุ่มอัลดีไฮด์มีพันธะคาร์บอน-ออกซิเจนที่เสถียรกว่า ส่งผลให้เกิดการระเหยช้ากว่าและสามารถคงระดับกลิ่นได้ยาวนานกว่าเอสเทอร์ (Chen et al., 2023) ประกอบกับ Dipropylene glycol ซึ่งมีสมบัติ hygroscopic ช่วยดูดซับความชื้นและคงเสถียรภาพของกลิ่น ทำให้การปลดปล่อยฟีโรโมนมีความต่อเนื่องและยาวนานกว่า 28 วันของภาคสนาม ด้านความเสียหายของพืชทั้ง 2 สูตร สามารถลดความเสียหายจากหนอนกระทู้ผักลงได้เฉลี่ยร้อยละ 15-25 เมื่อเทียบกับสูตรเดิมและวิธีการของเกษตรกร สอดคล้องกับแนวทางของ Torres et al. (2023) ที่แสดงให้เห็นว่าการใช้ฟีโรโมนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของระบบการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) สามารถลดการใช้สารเคมีกำจัดแมลงได้โดยไม่ลดประสิทธิภาพการควบคุมประชากรแมลง และเพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ใช้และสิ่งแวดล้อม

ผลวิเคราะห์ต้นทุนการใช้ในพื้นที่จริงพบว่า ฟีโรโมนสูตรใหม่มีต้นทุนเฉลี่ย 162.90-197.37 บาท/ไร่ ซึ่งต่ำกว่าสูตรเดิมถึงกว่า 10 เท่า (1,866.24 บาท/ไร่) และต่ำกว่าวิธีของเกษตรกรซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงจากการใช้สารเคมี จึงเป็นอีกทางเลือกที่คุ้มค่าและเหมาะสมต่อการใช้ระบบเกษตร GAP ที่มุ่งลดต้นทุนการผลิตและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่ทดลอง พบว่าพื้นที่สถานีเกษตรหลวงอินทนนท์ ให้ค่าการดึงดูดเฉลี่ยสูงกว่าทุ่งหลวงเล็กน้อย อาจเนื่องมาจากสภาพภูมิอากาศเย็นและมีความชื้นสัมพัทธ์สูง ซึ่งช่วยลดการระเหยของฟีโรโมนและยืดระยะเวลาการปล่อยกลิ่น (Wang et al., 2023) ขณะที่พื้นที่ศูนย์ฯ ทุ่งหลวง ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่ามีแนวโน้มให้ผลลดลงเล็กน้อยช่วงปลายการทดลอง

โดยสรุป ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ฟีโรโมนสูตรใหม่ที่ 1 (Benzaldehyde + Dipropylene glycol) มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริงระบบเกษตร GAP ทั้งด้านประสิทธิภาพการดึงดูด ความคงตัวกลิ่น การลดความเสียหายของพืช และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ขณะที่สูตรที่ 2 (Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol) ยังคงเป็นสูตรที่มีศักยภาพรองลงมา เหมาะต่อการประยุกต์ใช้ในพื้นที่อุณหภูมิต่ำหรือระบบเฝ้าระวังแมลงแบบต่อเนื่อง การพัฒนาต่อยอดขั้นตอนถัดไปจึงควรมุ่งสู่การปรับปรุงอัตราการปล่อยสารให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศต่างๆ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1.11-4.1.12

ตารางที่ 4.1.11 ประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักในแปลงปลูกผักกาดขาวปลี ระบบเกษตร GAP พื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงทุ่งหลวง เปรียบเทียบสูตรการผลิตต้นแบบฟีโรโมน ระยะ 7, 14 และ 28 วัน หลังทดสอบ

กรรมวิธี	ระยะติดตั้ง (เมตร)	ระยะ 7 วัน หลังการทดสอบ[1/]	ระยะ 14 วัน หลังการทดสอบ[1/]	ระยะ 28 วัน หลังการทดสอบ[1/]	% ความเสียหาย[1/]	ต้นทุน (บาท/ไร่)
ฟีโรโมนสูตรเดิม	15	51.21 c	49.52 c	51.14 c	49.65 a	1,866.24
วิธีการของเกษตรกร	-		-	-	28.90 c	1,590.00
กับดักไม่มีฟีโรโมน	20	36.43 d	30.08 d	30.33 d	49.52 a	146.70
ฟีโรโมนสูตรใหม่ 1	**20**	**68.21 a**	**56.05 bc**	**61.02 ab**	**35.09 bc**	162.90
ฟีโรโมนสูตรใหม่ 2	20	55.14 bc	51.73 bc	53.80 bc	42.31 ab	197.37
CV (%)			0.08		0.10	
$LSD_{0.05}$			9.50		10.02	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 4.1.12 ประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักในแปลงปลูกกะหล่ำปลีหัวใจ ระบบเกษตร GAP พื้นที่สถานีเกษตรหลวงอินทนนท์ เปรียบเทียบสูตรการผลิตต้นแบบฟีโรโมน ระยะ 7, 14 และ 28 วัน หลังทดสอบ

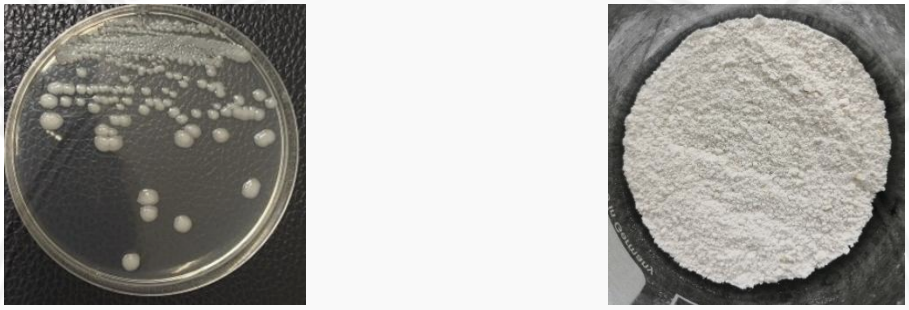
กรรมวิธี	ระยะติดตั้ง (เมตร)	ระยะ 7 วัน หลังการทดสอบ[1/]	ระยะ 14 วัน หลังการทดสอบ[1/]	ระยะ 28 วัน หลังการทดสอบ[1/]	% ความเสียหาย[1/]	ต้นทุน (บาท/ไร่)
ฟีโรโมนสูตรเดิม	15	60.33 bc	50.32 d	51.09 d	38.67 ab	1,866.24
วิธีการของเกษตรกร			-	-	23.33 c	666.00
กับดักไม่มีฟีโรโมน	20	30.11 ef	22.24 f	31.01 e	48.00 a	146.70
ฟีโรโมนสูตรใหม่ 1	**20**	**69.12 a**	**65.51 ab**	**65.02 ab**	**35.03 b**	162.90
ฟีโรโมนสูตรใหม่ 2	20	55.23 cd	60.12 bc	55.42 cd	40.56 ab	197.37
$LSD_{0.05}$			0.07		0.11	
CV (%)			7.96		10.66	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2 การปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ด้วยเทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชั่น

4.2.1 ผลิตต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคสูงจากปีงบประมาณ พ.ศ. 2567

<u>ตำรับเดิม</u> เพาะเลี้ยงแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 ในอาหารเหลวสูตรแป้งถั่วเหลืองผสมธาตุอาหารรอง K_2HPO_4, $MnCl_2{\cdot}4H_2O$, $FeSO_4{\cdot}7H_2O$ และ $ZnSO_4{\cdot}7H_2O$ ปรับ pH 6 เลี้ยงที่ 35 °C นาน 72 ชั่วโมง เขย่า 180 รอบ/นาที จากนั้นผสมสารแขวนลอยจุลินทรีย์กับวัสดุรองรับ Corn starch ผสม Talcum สัดส่วน 1:1 (ปริมาตร/น้ำหนัก) อบแห้งที่ 40 °C นาน 24 ชั่วโมง แล้วบดจนได้ผงชีวภัณฑ์ (ภาพที่ 4.2.1)

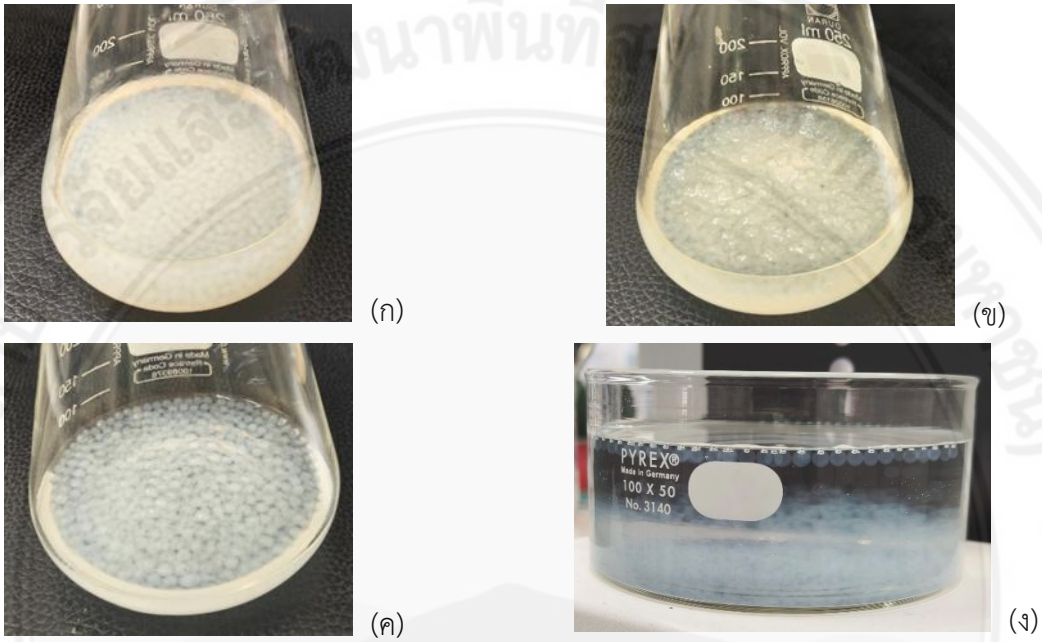


ภาพที่ 4.2.1 ต้นแบบชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ตำรับเดิม สูตรผง (ขวา) และลักษณะโคโลนีของแบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลท 28 (ซ้าย)

<u>สูตรใหม่ตำรับที่ 1</u> เพาะเลี้ยงแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 ในอาหารเหลวสูตรเดิมที่เสริมสารกระตุ้นและสารเคลือบผนังเซลล์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ Glucose, Nitrogen, Soy protein, Gelatin และ Corn starch จากนั้นนำสารแขวนลอยแบคทีเรียที่ได้ผสมกับวัสดุรองรับ CMC, Maltodextrin, Corn starch และ Zinc sulphate สัดส่วน 2:3 (ปริมาตร/น้ำหนัก) อบแห้งที่ 40 °C นาน 24 ชั่วโมง แล้วบดจนได้ผงชีวภัณฑ์ (ภาพที่ 4.2.2)

ภาพที่ 4.2.2 ต้นแบบชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ตำรับใหม่ สูตรผง

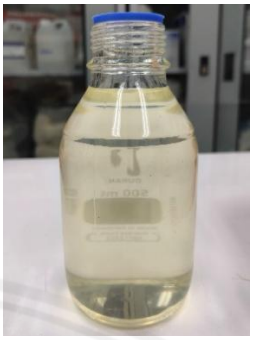
สูตรใหม่ตำรับที่ 2 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 ในอาหารเหลวสูตรเดิมที่เสริมสารกระตุ้นและสารเคลือบผนังเซลล์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ Glucose, Nitrogen, Soy protein, Gelatin และ Corn starch จากนั้นนำสารแขวนลอยแบคทีเรียที่ได้ไปทำ Encapsulation ให้เกิดเป็นเม็ดเจลด้วยสารไฮโดรคอลลอยด์ โดยใช้สารจากพืช (Sodium alginate) จากสัตว์ (Gelatin) หรือจากการสังเคราะห์ (Carboxymethyl cellulose; CMC) ภายใต้สภาวะควบคุม (ภาพที่ 4.2.3)



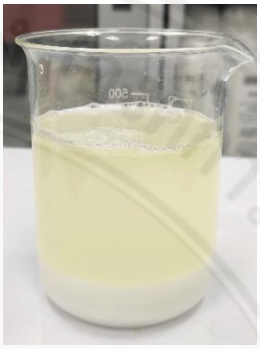
ภาพที่ 4.2.3 ต้นแบบชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ตำรับใหม่ สูตรเม็ดเจล (ก) Sodium alginate (ข) Gelatin ผสม Sodium alginate สัดส่วนที่ 1 (ค) Gelatin ผสม Sodium alginate สัดส่วนที่ 2 และ (ง) CMC ผสม Sodium alginate

สูตรใหม่ตำรับที่ 3 เพาะเลี้ยงแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 ในอาหารเหลวสูตรเดิมที่เสริมสารกระตุ้นและสารเคลือบผนังเซลล์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ ได้แก่ Glucose, Nitrogen, Soy protein, Gelatin และ Corn starch จากนั้นนำสารแขวนลอยแบคทีเรียที่ได้ไปเติมธาตุอาหาร (Mg, Ca หรือ N) และสารเคลือบผนังเซลล์ (Sodium alginate หรือ Gum arabic) (ภาพที่ 4.2.4)

(ก)


(ข)

(ค)

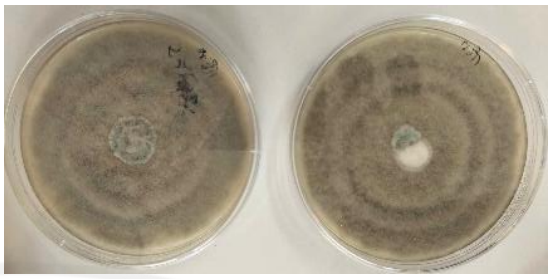

(ง)

ภาพที่ 4.2.4 ต้นแบบชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ตำรับใหม่ สูตรเหลว (ก) Magnesium ผสม Calcium (ข) Sodium alginate ผสม Gum arabic ผสม Nitrogen (ค) Nitrogen ผสม Magnesium และ (ง) Calcium ผสม Sodium alginate ผสม Gum arabic

4.2.2 ศึกษาอายุเก็บรักษาต้นแบบผงชีวภัณฑ์สูตรใหม่ จำนวน 3 ตำรับ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) เปิดใช้งาน และ (2) ยังไม่เปิดใช้งาน ตรวจสอบความอยู่รอดทุก 3 เดือน ด้วยวิธี Serial dilution และ Drop plate บน NA และทดสอบการยับยั้งเชื้อด้วยวิธี Dual culture แบบสุ่มสมบูรณ์ 3 ซ้ำ เปรียบเทียบกับสูตรเดิม

การแยกและพิสูจน์เชื้อราสาเหตุโรคราสีเทา

เก็บตัวอย่างผลและลำต้นพริกหวานที่แสดงอาการเน่าจากแปลงเกษตรกรในพื้นที่ (1) ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยส้มป่อย (2) โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงป่ากล้วย และ (3) โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงถ้ำเวียงแก เพื่อนำมาแยกเชื้อราสาเหตุโรคบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA (Potato Dextrose Agar) ผลการตรวจสอบและพิสูจน์ความเป็นเชื้อสาเหตุโรคพืชตามหลักของ Koch's Postulates จำนวน 4 ขั้นตอน ได้แก่ การแยกเชื้อ การเพาะเลี้ยงในสภาพบริสุทธิ์ การทดสอบกับพืชอาศัย และการแยกเชื้อซ้ำจากพืชทดลอง พบว่าเชื้อราที่แยกได้คือ *Botrytis cinerea* ที่มีโคโลนีของเชื้อบน PDA มีสีเทาถึงน้ำตาลอ่อน ลักษณะเป็นปุยนุ่มคล้ายกำมะหยี่ เมื่อสร้างสปอร์หนาแน่นจะมีสีเทาเข้ม Conidia มีรูปร่างกลมหรือรี ผนังบาง สีใสถึงเทาอ่อน ส่วน Conidiophore เป็นเส้นยาวตรงหรือแตกแขนงเล็กน้อยปลายรวมตัวคล้ายพวงองุ่น (Grape-like clusters) ซึ่งเป็นตำแหน่งเกิด Conidia เส้นใย Mycelium มีสีขาวถึงเทาอ่อนลักษณะ Septate และสามารถสร้าง Sclerotia สีดำ ขนาดเล็ก รูปร่างกลมหรือรี จากการคัดเลือกได้ 7 ไอโซเลท โดย Bo5 เป็นสายพันธุ์ที่มีความรุนแรงสูงสุด และถูกนำไปใช้ในการศึกษาขั้นตอนต่อไป (ภาพที่ 4.2.5)



ภาพที่ 4.2.5 ลักษณะอาการโรคราสีเทาและโคโลนีบนอาหารเลี้ยงเชื้อของรา *Botrytis cinerea* พริก

ประสิทธิภาพและความคงตัวของชีวภัณฑ์สูตรใหม่ระหว่างการเก็บรักษา

สูตรใหม่ตำรับที่ 1 ชนิดผง

ผลการตรวจสอบความมีชีวิตของแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 บันทึกผลวันที่ 5 ในชีวภัณฑ์สูตรใหม่หลังผลิตทันทีมีความเข้มข้นของหัวเชื้อ จำนวน 2.10×10^{9} cfu/ml มีความชื้นร้อยละ 10 ค่ายับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราสาเหตุโรค 87.50% และมีต้นทุนการผลิตระดับห้องปฏิบัติการอยู่ที่ 85 บาท/กิโลกรัม โดยคำนวณเฉพาะค่าสารที่ใช้ในการทดลองยังไม่รวมค่าแรงงาน อุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายอื่นที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ข้อมูลระยะเก็บรักษา 3 เดือน พบว่ามีจำนวนเซลล์จุลินทรีย์ 3.35×10^{8} cfu/ml (ยังไม่เปิดใช้งาน) และ 4.18×10^{8} cfu/ml (หลังเปิดใช้งาน) โดยมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *B. cinerea* เท่ากับ 84.00 และ 84.50% ตามลำดับ ส่วนหลังเก็บรักษา 6 เดือน ปริมาณจุลินทรีย์ลดลงเหลือ 2.0×10^{6}-2.6×10^{6} cfu/ml และประสิทธิภาพการยับยั้งลดลงเหลือ 75.00-76.00% ขณะที่ระยะ 9 เดือน จำนวนจุลินทรีย์ลดลงอย่างชัดเจนเหลือ 3.50×10^{5}-2.80×10^{5} cfu/ml และประสิทธิภาพการยับยั้งเหลือ 63.50-65.00% แสดงว่าการเก็บรักษานานขึ้นมีผลต่อความมีชีวิตของเซลล์และความสามารถในการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรค ทั้งนี้ต้นแบบชีวภัณฑ์หลังผลิตทันที (สูตรเดิม) มีความเข้มข้นของหัวเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 จำนวน 2.10×10^{9} cfu/ml มีความชื้นร้อยละ 11 ค่ายับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราสาเหตุโรค 85.00% และมีต้นทุนวัสดุรองรับ 50 บาท/กิโลกรัม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.1

การลดลงอย่างชัดเจนของจำนวนเซลล์มีชีวิตและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราในชีวภัณฑ์หลังการเก็บรักษา 6-9 เดือน มีแนวโน้มเกิดจากกระบวนการทำแห้งและเงื่อนไขการเก็บรักษายังไม่เหมาะสมต่อ “ความมีชีวิต” ของแบคทีเรียปฏิปักษ์ ทั้งนี้ได้มีการเติมสารกระตุ้นการสร้างผนังเซลล์และสารเคลือบผนังเซลล์แล้ว ข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า การอบแห้งแบบลมร้อน (Hot-air drying) เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เชื้อแบคทีเรียไม่มีสปอร์เกิดการบาดเจ็บ (Sublethal injury) จากการคายน้ำอย่างรวดเร็วและความเครียดจากการขาดน้ำ ซึ่งส่งผลให้การอยู่รอดลดลงมากระหว่างการเก็บรักษา (Berninger et al., 2018) นอกจากนี้การใช้วัสดุรองรับที่ไม่ใช่ระบบห่อหุ้มเต็มรูป (Non-encapsulated powder matrix) อาจจะป้องกันความเสียหายได้ช่วงสั้น แต่ไม่เพียงพอสำหรับการเก็บระยะยาว เพราะเชื้อยังถูกกระทบจากออกซิเจน ความชื้น และอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง (Chaparro-Rodríguez et al., 2023) ส่งผลให้อายุเก็บรักษาที่ยังรักษาประสิทธิภาพได้ไม่ถึง 12 เดือน

ตารางที่ 4.2.1 จำนวนเซลล์จุลินทรีย์และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Botrytis cinerea* ของชีวภัณฑ์สูตรใหม่ตำรับที่ 1 ระหว่างการเก็บรักษา

ระยะเวลาเก็บรักษา (เดือน)	สภาวะการทดสอบ	สูตร[2/]	ความเข้มข้นเชื้อ (cfu/ml)[1/]	% การยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค *B. cinerea*[1/]
3	ยังไม่เปิดใช้งาน	เดิม	3.23×10^8 a	83.50 b
		ใหม่	3.35×10^8 a	84.00 a
	เปิดใช้งานแล้ว	เดิม	3.30×10^8 a	82.75 c
		ใหม่	4.18×10^8 a	84.50 a
	CV (%)		0.33	0.21
	$LSD_{0.05}$		1.96	0.82
6	ยังไม่เปิดใช้งาน	เดิม	2.80×10^5 b	75.00 b
		ใหม่	2.00×10^6 a	76.00 a
	เปิดใช้งานแล้ว	เดิม	2.65×10^5 b	74.50 bc
		ใหม่	2.60×10^6 a	75.00 b
	CV (%)		0.93	0.51
	$LSD_{0.05}$		0.51	0.84
9	ยังไม่เปิดใช้งาน	เดิม	1.20×10^5 c	64.50 b
		ใหม่	3.50×10^5 a	65.00 a
	เปิดใช้งานแล้ว	เดิม	2.80×10^5 ab	63.50 c
		ใหม่	2.80×10^5 ab	63.50 c
	CV (%)		0.42	0.22
	$LSD_{0.05}$		1.03	1.26

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]วัสดุรองรับหัวเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ สูตรเดิม Corn starch 300 g ผสม Talcum 700 g และสูตรใหม่ CMC 100 g ผสม Maltodextrin 200 g Corn starch 600 g และ Zinc sulphate 100 g

<u>สูตรใหม่ตำหรับที่ 2 ชนิด Encapsulation</u>

ผลทดลองแสดงให้เห็นว่าสูตรการห่อหุ้ม (Encapsulation) มีผลต่อจำนวนจุลินทรีย์มีชีวิต (cfu/ml) และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Botrytis cinerea* อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$) โดยสูตรที่ 2 ซึ่งใช้ Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g ในน้ำ 200 ml ให้ค่าจำนวนจุลินทรีย์เฉลี่ยสูงสุด (5.8×10^{10} cfu/ml) และมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราสูงสุด (89.85%) แตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่สูตรที่ 3 ซึ่งใช้ Gelatin 5 g และ Sodium alginate 2 g ให้ค่า 2 ตัวแปรต่ำสุด ผลทดลองสอดคล้องกับรายงานของ Jumazhanova et al. (2023) ซึ่งพบว่าการใช้สารผสมระหว่างโปรตีน

และโพลิแซ็กคาไรด์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมช่วยเพิ่มอัตราการรอดของจุลินทรีย์ได้มากกว่า 1 log cfu/ml เมื่อเทียบกับการใช้สารเดี่ยว เนื่องจากโปรตีนทำหน้าที่เป็นสารเคลือบที่คงความชุ่มชื้นและลดการสูญเสียน้ำระหว่างการอบแห้ง ในขณะที่ Sodium alginate ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์สร้างโครงสร้างเจลที่คงรูปและช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพของเซลล์ระหว่างการเก็บรักษา ตรงกับ Letocha et al. (2024) ที่รายงานว่าโครงสร้างเจลของ Alginate-Gelatin มีสมบัติทางความยืดหยุ่นสูง ช่วยลดความเสียหายของผนังเซลล์จากการคายน้ำและอุณหภูมิ นอกจากนี้การผสม Gelatin กับ Alginate ยังมีผลต่อการกระจายตัวของเซลล์ภายในเม็ดบีด ทำให้เกิดการกักเก็บเซลล์แบบกระจายสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อความคงตัวของชีวภัณฑ์ และส่งผลให้มีการปลดปล่อยเซลล์จุลินทรีย์อย่างช้าและต่อเนื่องในสภาพแวดล้อมของพืช ซึ่งช่วยยืดระยะเวลาการออกฤทธิ์ของชีวภัณฑ์และเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *B. cinerea* ได้ดีกว่าสูตรที่ใช้สารเดี่ยวหรือโครงสร้างเจลที่แข็งเกินไป ในทางตรงกันข้ามสูตรที่ 3 และ 4 ซึ่งใช้ Gelatin หรือ CMC สัดส่วนสูง พบว่ามีจำนวนเซลล์มีชีวิตต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุอาจมาจากการสร้างเมทริกซ์ที่หนาแน่นเกินไป ทำให้การแพร่ของออกซิเจนและสารอาหารเข้าสู่เซลล์ลดลง รวมทั้งทำให้การปลดปล่อยเซลล์หลังการห่อหุ้มช้าลง

เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิต พบว่าสูตรที่ 2 ให้ผลทางชีวภาพดีที่สุด แต่มีต้นทุนสูงถึง 4,799 บาท/กิโลกรัม เมื่อเทียบกับสูตร 1 และ 4 ที่มีต้นทุนต่ำกว่า (3,156 และ 3,651 บาท/กิโลกรัม) ดังนั้นการเลือกใช้สูตรจึงควรพิจารณาความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพทางชีวภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ สำหรับการผลิตระดับอุตสาหกรรม ซึ่งอาจปรับลดสัดส่วนของโปรตีนหรือผสมสารช่วยต้นทุนต่ำ เช่น Maltodextrin หรือ Gum arabic เพื่อคงประสิทธิภาพใกล้เคียงเดิมแต่ลดค่าใช้จ่าย (Agriopoulou et al., 2024) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.2

ตารางที่ 4.2.2 ผลของสูตร Encapsulation ต่อจำนวนจุลินทรีย์มีชีวิต ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Botrytis cinerea* และต้นทุนการผลิตของชีวภัณฑ์สูตรใหม่ตำรับที่ 2

สูตร	ส่วนประกอบ Encapsulation (เม็ดบีด)	Serial Dilution (cfu/ml)[1/]	% การยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค [1/]	ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม[2/])
1	Sodium alginate 3.3 g/น้ำ 200 ml	$4.5x10^9$ b	85.65 b	3,156
2	**Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g/ น้ำ 200 ml**	**$5.8x10^{10}$ a**	**89.85 a**	**4,799**
3	Gelatin 5 g ร่วมกับ Sodium alginate 2 g/ น้ำ 200 ml	$3.12x10^8$ c	80.50 c	4,800
4	CMC 3.3 g/น้ำ 200 ml (core) ร่วมกับ Sodium alginate 3.3 g/น้ำ 200 ml	$2.64x10^9$ b	83.20 c	3,651
	CV (%)	0.45	0.12	-

สูตร	ส่วนประกอบ Encapsulation (เม็ดบีด)	Serial Dilution (cfu/ml)[1/]	% การยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค [1/]	ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม[2/])
$LSD_{0.05}$		0.51	0.36	-

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

การทดลองเปรียบเทียบสูตรห่อหุ้ม (Encapsulation) เม็ดบีด 4 สูตร พบว่าช่วงเวลา 48 และ 72 ชั่วโมง สูตรที่ 2 (Gelatin 6.6 g ผสม Sodium alginate 1 g) ให้ค่าการเจริญและการคงอยู่ของแบคทีเรียสูงที่สุดทุกตัวแปร ได้แก่ ค่า OD 48 และ 72 ชั่วโมง เท่ากับ 1.8 และ 1.6 ตามลำดับ จำนวนเซลล์โดย Haemacytometer 336 และ 468 cell/ml จำนวนจุลินทรีย์มีชีวิต (Serial dilution) 4.2×10^{9} และ 6.1×10^{11} cfu/ml และจำนวนเซลล์ที่ทนความร้อน (Heating) 2.0×10^{6} และ 2.1×10^{7} cfu/ml ซึ่งสูงกว่าสูตร 1 (3.7×10^{9} และ 5.8×10^{11} cfu/ml) และแตกต่างจากสูตร 3 (3.1×10^{7} และ 5.2×10^{8} cfu/ml) และสูตร 4 (2.1×10^{7} และ 5.0×10^{8} cfu/ml) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ทางตรงกันข้าม สูตร 3 และ สูตร 4 ให้ค่าต่ำสุดและอยู่ในกลุ่มเดียวกัน (B) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของเม็ดบีดมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโตและการคงอยู่ของแบคทีเรีย โดยเฉพาะชนิดและสัดส่วนของสารห่อหุ้มที่ใช้ ผลทดสอบสอดคล้องกับรายงานของ Letocha et al. (2024) ที่พบว่าการใช้เมทริกซ์ผสมระหว่างโปรตีนและโพลิแซ็กคาไรด์ เช่น Gelatin ร่วมกับ Sodium alginate ช่วยเพิ่มความอยู่รอดของจุลินทรีย์ภายใต้ภาวะความร้อนและการเก็บรักษา ได้ดีกว่าสารเดี่ยว เนื่องจาก Gelatin สร้างฟิล์มบางรักษาความชุ่มชื้น ในขณะที่ Sodium alginate สร้างโครงสร้างเจลที่คงตัวสูง ช่วยลดการสูญเสียความมีชีวิตของเซลล์ ทั้งนี้การห่อหุ้มแบบหลายชั้น (Multilayer encapsulation) ยังถูกยืนยันว่าช่วยรักษาความมีชีวิตของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าแบบชั้นเดียว (Agriopoulou et al., 2024) อย่างไรก็ตามมีประเด็นที่ควรพิจารณาเพิ่มเติม คือ สูตร 2 ให้ผลดีที่สุด แต่มีต้นทุนการผลิตสูง (4,799 บาท/กิโลกรัม) ใกล้เคียงสูตร 1 (3,156 บาท/กิโลกรัม) และสูตร 4 (3,651 บาท/กิโลกรัม) ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดต่อการผลิตระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากต้องพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ร่วมด้วย นอกจากนี้ สูตร 3 และ 4 ที่จัดอยู่กลุ่ม B แต่ก็ยังมีความแตกต่างจากสูตร 2 อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งด้านจำนวนเซลล์และความทนความร้อน แสดงว่ายังมีโอกาสในการปรับปรุงองค์ประกอบของเม็ดบีดให้เหมาะสม เช่น ลดความหนาแน่นของเจล ปรับสัดส่วนโปรตีน-โพลิแซ็กคาไรด์ หรือเลือกสารเคลือบที่ส่งเสริมการถ่ายเทสารอาหารและออกซิเจนเข้าสู่เซลล์

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า องค์ประกอบของเม็ดบีดมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของแบคทีเรียปฏิปักษ์ ทั้งด้านการเจริญและการทนต่อภาวะความร้อน โดยเฉพาะการใช้ Gelatin ร่วมกับ Sodium alginate ซึ่งให้ผลดีที่สุด แต่การเลือกใช้สูตรระดับการผลิตจริงจำเป็นต้องพิจารณาความสมดุลระหว่าง “ประสิทธิภาพทางชีวภาพ” และ “ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์” ควบคู่กัน อย่างไรก็ตามได้คัดเลือก

Encapsulation สูตร 2 ไปดำเนินการต่อเนื่องจากให้ค่าการเจริญ จำนวนจุลินทรีย์มีชีวิต และความทนความร้อนสูงสุดทุกตัวแปร และยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* ได้สูงสุด (89.85%) แตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) องค์ประกอบของเม็ดบีดที่ผสม Gelatin ซึ่งสร้างฟิล์มบางรักษาความชื้น และ Sodium alginate ที่สร้างโครงสร้างเจลคงตัวสูง ช่วยปกป้องเซลล์จากความร้อนและการสูญเสียน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้จุลินทรีย์คงอยู่ได้ยาวนานกว่า (Li et al., 2022; Letocha et al., 2024; Zhang et al., 2024) แม้ต้นทุนการผลิตสูงกว่า แต่มีศักยภาพสูงสุดในการเป็นสูตรต้นแบบสำหรับการพัฒนาต่อไปทั้งด้านความคงตัวและประสิทธิภาพทางชีวภาพ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.3

ตารางที่ 4.2.3 ผลของสูตร Encapsulation เม็ดบีดต่อการเจริญ จำนวนจุลินทรีย์มีชีวิต และความทนความร้อนของแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 28 หลังการเลี้ยง 48 และ 72 ชั่วโมง

สูตร[2/]	OD (nm)[1/]		Haemacytometer (cell/ml)[1/]		Serial Dilution (cfu/ml)[1/]		Heating (cfu/ml)[1/]	
	48 hr	72 hr	48 hr	72 hr	48 hr	72 hr	48 hr	72 hr
1	1.8 a	1.6 a	328 b	454 b	3.7×10^{9} b	5.8×10^{11} b	1.2×10^{6} b	2.0×10^{7} b
2	**1.8 a**	**1.6 a**	**336 a**	**468 a**	**4.2×10^{9} a**	**6.1×10^{11} a**	**2.0×10^{6} a**	**2.1×10^{7} a**
3	1.7 b	1.5 b	322 b	354 b	3.1×10^{7} b	5.2×10^{8} b	4.9×10^{3} b	1.6×10^{6} b
4	1.7 b	1.5 b	213 b	332 b	2.1×10^{7} b	5.0×10^{8} b	4.9×10^{3} b	1.5×10^{6} b
CV (%)	0.12	0.12	0.23	0.20	0.15	0.18	0.11	0.12
$LSD_{0.05}$	0.1	0.1	10.1	15.0	0.7	0.5	0.9	0.2

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]สูตร 1 Sodium alginate 3.3 g/น้ำ 200 ml สูตร 2 Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g/น้ำ 200 ml สูตร 3 Gelatin 5 g ร่วมกับ Sodium alginate 2 g/น้ำ 200 ml และสูตร 4 CMC 3.3 g/น้ำ 200 ml (core) ร่วมกับ Sodium alginate 3.3 g/น้ำ 200 ml

เม็ดบีด (Gel bead) ที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมสม่ำเสมอ ขนาดใกล้เคียงกัน เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มิลลิเมตร สีขาวขุ่นถึงฟ้าอ่อน ผิวเรียบเนียน ไม่มีการแตกหรือยุบตัวภายหลังการตกตะกอนในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) โครงสร้างของเม็ดบีดมีความโปร่งแสงเล็กน้อย

ผลทดลองแสดงให้เห็นว่าชีวภัณฑ์รูปแบบ Encapsulation (สูตรที่ 2) มีจำนวนจุลินทรีย์มีชีวิตและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อระยะเวลาเก็บรักษาเพิ่มจาก 3 เดือนเป็น 6 เดือน โดยช่วงเก็บรักษา 3 เดือน ให้ค่าความเข้มข้นจุลินทรีย์เฉลี่ย 4.55×10^{6} cfu/ml (ยังไม่เปิดใช้งาน) และ 4.20×10^{6} cfu/ml (เปิดใช้งานแล้ว) พร้อมค่าการยับยั้งเชื้อรา 79.00-79.50% ซึ่งอยู่กลุ่ม a ขณะที่ระยะเก็บรักษา 6 เดือนลดลงเหลือ 5.00×10^{5}-4.60×10^{5} cfu/ml และค่าการยับยั้งเพียง 65.00-65.50% จัดอยู่กลุ่ม b แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพทางชีวภาพของชีวภัณฑ์ลดลงตามอายุเก็บรักษาอย่างชัดเจน

การลดลงของจำนวนจุลินทรีย์อาจเกิดจากความเสื่อมสภาพของโครงสร้างเม็ดบีด เมื่อเวลาผ่านไป ส่งผลให้สมบัติการกักเก็บความชื้นและการแลกเปลี่ยนออกซิเจนภายในลดลง ซึ่งส่งผลต่อการอยู่รอดของเซลล์ ทั้งนี้สูตรประกอบด้วย Gelatin และ Sodium alginate ซึ่งช่วยสร้างโครงสร้างห่อหุ้มที่คงตัวและป้องกันการสูญเสียน้ำได้ดีในระยะแรก (Bhatia et al., 2021; Li et al., 2022) แต่เมื่อเก็บรักษานานกว่า 3 เดือน โครงสร้างเจลอาจเกิดการแตกตัวบางส่วนหรือหดตัว (Syneresis) ทำให้ความชื้นลดลงและค่า Water activity (aw) อยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมต่อการอยู่รอดของแบคทีเรียปฏิปักษ์ (Borgogna et al., 2020) นอกจากนี้การลดลงของประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* ยังสอดคล้องกับจำนวนเซลล์ที่ลดลง โดยจุลินทรีย์ที่เหลือรอดอาจมีการลดลงของ Metabolic activity หรือความสามารถในการสร้างสารปฏิชีวนะ (Antifungal metabolites) เมื่ออยู่ในสภาวะเก็บรักษานาน (García-Cayuela et al., 2023) ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์ของ Gelatin และ Alginate มีคุณสมบัติช่วยลดความเสียหายจากอุณหภูมิและการอบแห้ง แต่ยังมีข้อจำกัดด้านความคงตัวเชิงโครงสร้าง

ข้อเสนอแนะเพื่อพัฒนาสูตรต่อไป ได้แก่ การเติมสารป้องกันการสูญเสียความชื้น เช่น Trehalose หรือ Skim milk powder เพื่อรักษาสมดุลน้ำในเม็ดบีด และการปรับอัตราส่วนโปรตีนต่อ Polysaccharide ให้เหมาะสมต่อสภาวะเก็บรักษา (Zhang et al., 2024) รวมถึงการทดสอบรูปแบบการอบแห้งอื่น เช่น Freeze-drying หรือ Fluidized-bed drying ซึ่งมีรายงานว่าสามารถเพิ่มอัตราการอยู่รอดของจุลินทรีย์ในสูตร Encapsulation ได้สูงกว่าแบบ Air-drying (Chen et al., 2021)

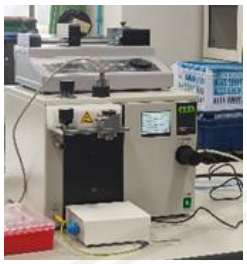
โดยสรุป การห่อหุ้มด้วย Gelatin ร่วมกับ Sodium alginate มีศักยภาพสูงในช่วงเก็บรักษาระยะสั้น (≤ 3 เดือน) แต่ความคงตัวลดลงหลัง 6 เดือน การปรับสูตรเพื่อเพิ่มความคงตัวของโครงสร้างเม็ดบีดจึงเป็นแนวทางสำหรับการยืดอายุชีวภัณฑ์ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.4 และภาพที่ 4.2.6

ตารางที่ 4.2.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของจุลินทรีย์มีชีวิตและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *Botrytis cinerea* ของชีวภัณฑ์รูปแบบห่อหุ้ม (Encapsulation สูตรที่ 2) ภายหลังการเก็บรักษาในสภาวะต่างๆ

ระยะเวลาเก็บรักษา (เดือน)	สภาวะการทดสอบ	สูตร[2/]	ความเข้มข้นเชื้อ (cfu/ml)[1/]	% การยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค *B. cinerea*[1/]
3	ยังไม่เปิดใช้งาน	2	4.55×10^6 a	79.00 a
	เปิดใช้งานแล้ว		4.20×10^6 a	79.50 a
	CV (%)		0.96	0.50
	$LSD_{0.05}$		1.56	0.82
6	ยังไม่เปิดใช้งาน	2	5.00×10^5 b	65.00 b
	เปิดใช้งานแล้ว		4.60×10^5 b	65.50 b
	CV (%)		0.54	0.64
	$LSD_{0.05}$		1.32	0.87

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]สูตร 2 Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g/น้ำ 200 ml



ภาพที่ 4.2.6 เครื่อง Gel-bead encapsulation system และลักษณะของเม็ดบีด สูตร 2

สูตรใหม่ตำหรับที่ 3 ชนิดน้ำ

สูตรที่ 3 (Nitrogen 15 ml ผสม Magnesium 25 g) ให้จำนวนจุลินทรีย์มีชีวิตเฉลี่ยสูงที่สุด (6.50×10^9 cfu/ml) และมีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* สูงสุด (88.90%) แตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แสดงให้เห็นว่า การใช้ Nitrogen ร่วมกับ Magnesium ช่วยส่งเสริมการเจริญและการคงอยู่ของจุลินทรีย์ในชีวภัณฑ์ เนื่องจาก Nitrogen เป็นธาตุสำคัญสำหรับการสังเคราะห์โปรตีนและกรดนิวคลีอิก ขณะที่ Magnesium มีบทบาทกระตุ้นเอนไซม์และรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างเซลล์ (Rani et al., 2022) ในทางตรงกันข้าม สูตรที่ 1 ซึ่งใช้เฉพาะธาตุ Magnesium ผสม Calcium และให้ค่าต่ำสุดทั้งด้านจำนวนจุลินทรีย์ (3.23×10^6 cfu/ml) และประสิทธิภาพการยับยั้ง (75.00%) ซึ่งอาจเกิดจากการขาดแหล่งคาร์บอนหรือสารช่วยคงสภาพเซลล์ในวัสดุรองรับ ทำให้จุลินทรีย์สูญเสียความมีชีวิตระหว่างกระบวนการเตรียมและเก็บรักษา สูตรที่ 2 และ 4 ซึ่งมีการใช้สาร Polysaccharide (Sodium alginate และ Gum arabic) ให้ผลปานกลาง อยู่กลุ่ม B-C โดย Sodium alginate และ Gum arabic มีคุณสมบัติเป็นสารสร้างเจลและฟิล์มบาง ช่วยลดการสูญเสียน้ำและป้องกันความเสียหายของเซลล์บางส่วน แต่ยังไม่สามารถคงความมีชีวิตของเชื้อได้เท่ากับสูตรที่มีธาตุอาหารเสริม เช่น Nitrogen

เมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิต พบว่าสูตรที่ 3 มีต้นทุนสูงสุด (39.65 บาท/ลิตร) แต่ให้ผลด้านชีวภาพดีที่สุด ขณะที่สูตรที่ 4 มีต้นทุนต่ำสุด (20.15 บาท/ลิตร) แต่ประสิทธิภาพต่ำกว่า จึงควรพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ของการผลิต โดยอาจปรับลดปริมาณ Nitrogen หรือใช้ Polymer ราคาต่ำแทนบางส่วน เพื่อให้สมดุลระหว่าง “ประสิทธิภาพ” และ “ต้นทุน” อย่างไรก็ตามได้คัดเลือกวัสดุรองรับชนิดน้ำ สูตร 3 ไปดำเนินการต่อเนื่องจากให้ผลสูงสุดทั้งจำนวนจุลินทรีย์มีชีวิต (6.50×10^9 cfu/ml) และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* (88.90%) ซึ่งแตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าสูตรนี้สามารถคงความมีชีวิตและความสามารถต้านเชื้อราได้ดีที่สุด เป็นผลจากบทบาทของ Nitrogen ที่ช่วยสร้างโปรตีนและกรดนิวคลีอิก และ Magnesium ที่ช่วยรักษาเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์และการทำงานของเอนไซม์ ส่งผลให้เชื้อมีความทนทานต่อสภาวะเครียดสูงกว่า ทั้งนี้มีต้นทุนการผลิตสูงกว่าสูตรอื่น แต่ให้ผลทางชีวภาพชัดเจนกว่า จึงเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบเชิงอุตสาหกรรม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.5

ตารางที่ 4.2.5 ผลของสูตรวัสดุรองรับชนิดเหลวต่อจำนวนจุลินทรีย์มีชีวิตและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *Botrytis cinerea* ของชีวภัณฑ์สูตรใหม่ตำรับที่ 3

สูตร	ส่วนประกอบ	Serial Dilution (cfu/ml)[1/]	% การยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค [1/]	ต้นทุนค่าสาร (บาท/ลิตร)[2/]
1	Magnesium 25 g ผสม Calcium 25 g	$3.23x10^6$ d	75.00 b	32.00
2	Sodium alginate 12.5 g ผสม Gum arabic 12.5 g ผสม Nitrogen 25 g	$2.65x10^8$ b	75.55 b	35.25
3	**Nitrogen 15 ml ผสม Magnesium 25 g**	**$6.50x10^9$** a	**88.90** a	**39.65**
4	Calcium 15 g ผสม Sodium alginate 7.5 g ผสม Gum arabic 12.5 g	$2.36x10^7$ c	75.25 bc	20.15
	CV (%)	0.71	0.64	-
	$LSD_{0.05}$	0.89	0.92	-

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ผลทดสอบอายุเก็บรักษาชีวภัณฑ์สูตรน้ำต้นแบบ (สูตร 3) ระยะ 3 เดือน พบว่าจำนวนจุลินทรีย์เฉลี่ยยังคงอยู่ระดับสูง ($3.23x10^6$-$3.55x10^6$ cfu/ml) และค่าการยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* อยู่ในช่วง 65.00-65.25% โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงว่าชีวภัณฑ์ยังคงความมีชีวิตและฤทธิ์ต้านเชื้อได้ดีหลังเก็บรักษาระยะสั้น ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสูตรที่ประกอบด้วย Nitrogen และ Magnesium ช่วยเพิ่มความคงตัวของเซลล์จุลินทรีย์ในสภาวะเก็บรักษา Nitrogen มีบทบาทด้านการสังเคราะห์โปรตีนและกรดนิวคลีอิก ขณะที่ Magnesium ช่วยรักษาเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์และการทำงานของเอนไซม์ (Rani et al., 2022) ผลทดสอบสอดคล้องกับรายงานของ Santos-Terán (2024) ที่พบว่า จุลินทรีย์ที่ห่อหุ้มในสารละลายแร่ธาตุและเก็บภายในอุณหภูมิควบคุม สามารถคงความมีชีวิตได้สูงระยะ 1-3 เดือน และมีประสิทธิภาพชีวภาพใกล้เคียงกับช่วงเริ่มต้น รวมทั้งงานของ Vijayaram et al. (2024) ที่ระบุว่าการใช้สารอาหารพื้นฐานร่วมกับสารช่วยคงสภาพโครงสร้างเซลล์ เช่น แร่ธาตุ โพลิเมอร์ธรรมชาติ ช่วยเพิ่มความคงตัวของแบคทีเรียของรูปแบบชีวภัณฑ์ได้ดีระยะสั้น อย่างไรก็ตามการเก็บรักษาเพียง 3 เดือน ยังไม่สามารถยืนยันความเสถียร ซึ่งอาจมีการลดลงของเชื้อเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากการเสื่อมสภาพของสารอาหารและการสูญเสียความชื้นภายในระบบ ดังนั้นจึงควรดำเนินการทดสอบต่อระยะ 6 และ 9 เดือน รวมทั้งปรับปรุงสูตรโดยเติมสารคงสภาพเซลล์ เช่น Trehalose หรือ Gum arabic เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา (Bagdat et al., 2024) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.6 และภาพที่ 4.2.7

ตารางที่ 4.2.6 ผลการเก็บรักษาความมีชีวิตและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *Botrytis cinerea* ของชีวภัณฑ์ชนิดน้ำ สูตร 3

ระยะเวลาเก็บรักษา (เดือน)	สภาวะการทดสอบ	สูตร[2/]	ความเข้มข้นเชื้อ (cfu/ml)[1/]	% การยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค *B. cinerea*[1/]
3	ยังไม่เปิดใช้งาน	3	3.23×10^6 a	65.00 a
	เปิดใช้งานแล้ว		3.55×10^6 a	65.25 a
	CV (%)		0.12	0.02
	$LSD_{0.05}$		0.21	0.13

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]สูตร 3 Nitrogen 15 ml ผสม Magnesium 25 g

ภาพที่ 4.2.7 ตัวอย่างต้นแบบชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ชนิดน้ำ

4.2.2 คัดเลือกวิธีใช้ตำรับต้นแบบผงชีวภัณฑ์สูตรใหม่ แบ่งเป็น (1) สภาพห้องปฏิบัติการ และ (2) สภาพแปลงทดสอบ (กระถางทดสอบ/โรงเรือน) โดยประเมินชีวภัณฑ์ต้นแบบจำนวน 3 ตำรับ ซึ่งแตกต่างกันทั้งปริมาณการใช้ (50, 100 หรือ 150 g ต่อน้ำ 20 ลิตร) และความถี่การฉีดพ่น (ทุก 3, 5 หรือ 7 วัน) การทดลองวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 3 ซ้ำ อย่างน้อย 7 กรรมวิธี ประกอบด้วย ชุดควบคุมไม่ฉีดพ่นสาร สารเคมีการค้าตามฉลาก ชีวภัณฑ์การค้าตามฉลาก ชีวภัณฑ์สูตรเดิม (ตามอัตราที่ให้ผลดีมาก่อน) และต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ตำรับที่ 1-3 ตามอัตราทดสอบ สำหรับสภาพห้องปฏิบัติการจะเตรียมสารแขวนลอยตามอัตราสารต่อน้ำ 20 ลิตร แล้วฉีดพ่นบนส่วนของพืชที่ได้รับเชื้อสาเหตุโรคโดยการเจาะเชื้อ (Inoculation) ส่วนสภาพแปลงทดสอบจะคัดเลือกเฉพาะอัตราและความถี่ที่ให้ผลดีที่สุดจากขั้นตอนในห้องปฏิบัติการ นำไปฉีดพ่นทั้งต้นในกระถางหรือในแปลงปลูกที่มีประวัติโรคระบาดรุนแรงช่วงติดผลอ่อน (มิถุนายน-ตุลาคม) บันทึกข้อมูลวันที่เริ่มพบโรค ระดับการเกิดโรคเชิงปริมาณและคุณภาพ หลังการฉีดพ่น ประเมินซ้ำตามช่วงเวลาที่กำหนดทั้งในห้องปฏิบัติการและแปลง ใช้ค่าก่อนฉีดพ่นคำนวณเปอร์เซ็นต์ควบคุมโรค วิเคราะห์ผลทางสถิติ เปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์การค้า คำนวณต้นทุน และคัดเลือก 2 ตำรับที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าที่สุด

ผลการทดสอบประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ต้นแบบในสภาพห้องปฏิบัติการ พบว่า ชุดควบคุมซึ่งไม่ได้รับการฉีดพ่นสารใด แสดงอาการของโรคหลังจากได้รับเชื้อวันที่ 1 โดยมีระดับการเกิดโรคสูงสุด (ระดับ 5) และความรุนแรงของโรค 100% ส่วนการใช้สารเคมีการค้ากลุ่มฟอสโฟนิกแอซิส (อัตรา 50 มิลลิลิตรต่อน้ำ 20 ลิตร ฉีดพ่นทุก 7 วัน) ให้ผลการควบคุมโรคดีที่สุด โดยไม่พบอาการของโรคและมีค่าความรุนแรงเท่ากับ 0% ขณะที่ชีวภัณฑ์การค้าไตรโคเดอร์มา (200 กรัมต่อน้ำ 20 ลิตร ฉีดพ่นทุก 7 วัน) และชีวภัณฑ์สูตรเดิมให้ผลใกล้เคียงกัน โดยพบอาการวันที่ 2 ระดับการเกิดโรคเท่ากับ 2 และมีความรุนแรง 50%

สำหรับชีวภัณฑ์ต้นแบบสูตรใหม่ พบว่าตำรับ 1 และ 3 มีผลควบคุมโรคใกล้เคียงกับสูตรเดิม โดยลดความรุนแรงได้ร้อยละ 45 ขณะที่ตำรับ 2 ซึ่งเป็นสูตร Encapsulation ด้วย Gelatin และ Sodium alginate แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในกลุ่มชีวภัณฑ์ต้นแบบ โดยลดความรุนแรงของโรคเหลือเพียง 30% ทั้งนี้ระดับการเกิดโรคยังคงอยู่ที่ ระดับ 2 เช่นเดียวกับสูตรอื่น ข้อมูลชี้ให้เห็นว่าการห่อหุ้มเชื้อด้วยวัสดุ Encapsulation อาจช่วยเพิ่มความคงตัวและการปลดปล่อยจุลินทรีย์อย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้สามารถยับยั้งการพัฒนาอาการของโรคได้ดีกว่าการใช้สูตรทั่วไป ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ He et al. (2021) ที่ระบุว่าการปรับปรุงสูตรชีวภัณฑ์มีผลต่อประสิทธิภาพการออกฤทธิ์และความสามารถในการอยู่รอดของเชื้อ และเป็นไปในทิศทางเดียวกับ Williams et al. (2025) ซึ่งพบว่าการใช้เทคนิค Encapsulation ด้วยสารพอลิเมอร์ธรรมชาติช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการป้องกันโรคพืชของจุลินทรีย์ควบคุมโรคได้อย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุป ข้อมูลผลทดสอบในสภาพห้องปฏิบัติการแสดงแนวโน้มที่ดี แต่ยังจำเป็นต้องประเมินในสภาพแปลงจริง เพื่อยืนยันความคงที่ของผลภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนมากกว่า ทั้งนี้ Collinge et al. (2022) รายงานว่าประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ภาคสนามจะลดลงจากผลของอุณหภูมิ ความชื้น และการสัมผัสแสงแดดโดยตรง จึงควรใช้ข้อมูลจากการทดลองภาคสนามประกอบการคัดเลือกสูตรต้นแบบขั้นสุดท้ายเพื่อความถูกต้องและสอดคล้องกับสภาพการใช้จริง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.7

ตารางที่ 4.2.7 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของต้นแบบชีวภัณฑ์ในการควบคุมโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* พริกภายหลังการปลูกเชื้อสาเหตุโรคสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี	รายละเอียด	ความเสียหาย		
		วันที่แสดงอาการหลังปลูกเชื้อสาเหตุโรค	ระดับการเกิดโรค (0-5)	ความรุนแรงของโรค (%)[1/]
1	ไม่ฉีดพ่นสารใด (ชุดควบคุม)	1	5	100 a
2	สารเคมีการค้า ฟอสโฟนิกแอซิส (อัตราการใช้ 50 ml/20 L ทุก 7 วัน)	5	0	0 e
3	ชีวภัณฑ์การค้า ไตรโคเดอร์มา (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	2	2	50 b

กรรมวิธี	รายละเอียด	ความเสียหาย		
		วันที่แสดงอาการหลังปลูกเชื้อสาเหตุโรค	ระดับการเกิดโรค (0-5)	ความรุนแรงของโรค (%)[1/]
4	ชีวภัณฑ์สูตร Corn Starch 300 g และ Talcum 700 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 3 วัน)	2	2	50 b
5	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 1 CMC 100 g ผสม Maltodextrin 200 g Corn starch 600 g และ Zinc sulphate 100 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	2	2	45 c
6	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 2 Encapsulation Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	2	1	30 d
7	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 3 สูตรน้ำ Nitrogen 15 ml ผสม Magnesium 25 g (อัตราการใช้ 200 ml/20 L ทุก 7 วัน)	2	2	45 c
	CV (%)			0.62
	$LSD_{0.05}$			0.89

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลทดลองในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า ชุดควบคุมที่ไม่ได้รับการฉีดพ่นสารใด แสดงอาการของโรควันที่ 1 มีระดับการเกิดโรคสูงสุด (ระดับ 5) และความรุนแรง 100% ซึ่งยืนยันได้ว่าสภาพทดลองส่งผลต่อการระบาดของโรคอย่างเหมาะสม ส่วนการใช้สารเคมีการค้ากลุ่มฟอสโฟนิกแอซิส (อัตรา 50 มล./20 ลิตร ฉีดทุก 7 วัน) ให้ผลดีที่สุด โดยไม่พบอาการของโรคและมีความรุนแรง 0% ขณะที่ชีวภัณฑ์การค้า (ไตรโคเดอร์มา อัตรา 200 g/20 L ฉีดทุก 7 วัน) และชีวภัณฑ์สูตรเดิมให้ผลใกล้เคียงกัน โดยพบอาการวันที่ 2 ระดับการเกิดโรค 2 และความรุนแรง 50%

สำหรับชีวภัณฑ์ต้นแบบสูตรใหม่ พบว่าตำรับ 1 และ 3 ลดความรุนแรงได้ประมาณ 45% ใกล้เคียงกับสูตรเดิม ส่วนตำรับ 2 ซึ่งใช้เทคนิค Encapsulation ด้วย Gelatin และ Sodium alginate ลดความรุนแรงได้ดีที่สุดในกลุ่มชีวภัณฑ์ต้นแบบ เหลือเพียง 30% ทั้งนี้ระดับการเกิดโรคลดลงเหลือระดับ 1 ต่างจากสูตรอื่นที่อยู่ระดับ 2 แสดงว่าเทคนิคฟอร์มูเลชันมีบทบาทในการเพิ่มประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่พบว่าการเลือกและจัดรูปแบบเชื้อจุลินทรีย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพการควบคุมโรค (Majumdar, 2023) และ

แนวโน้มการใช้จุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตพืช (PGPR) ในการควบคุมโรคพืชมีการขยายตัวอย่างมากในช่วงปี 2019-2023 (Espinosa-Palomeque et al., 2025)

ข้อมูลผลทดสอบสภาพแปลง พบว่าชุดควบคุมแสดงอาการวันที่ 1 ระดับ 5 และความรุนแรง 100% เช่นเดียวกับสภาพห้องปฏิบัติการ แสดงให้เห็นว่าภาคสนามอยู่ในสภาวะส่งผลต่อการระบาดของโรคอย่างชัดเจน ส่วนสารเคมีการค้าให้ผลดีมาก โดยวันที่เริ่มแสดงอาการเป็นวันที่ 3 ระดับการเกิดโรค 1 และความรุนแรง 10% เมื่อเทียบกับชีวภัณฑ์การค้าและสูตรเดิมซึ่งมีความรุนแรงอยู่ที่ 55-60% ตำรับใหม่ 1 และ 3 ให้ค่าความรุนแรงอยู่ที่ 65% และ 45% ตามลำดับ แต่ตำรับ 2 ยังคงเป็นสูตรที่มีประสิทธิภาพสูงสุดภาคสนาม โดยลดความรุนแรงเหลือ 40% และระดับการเกิดโรคลดเหลือ 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานทบทวนที่ชี้ว่าการใช้กลยุทธ์ eco-smart กับจุลินทรีย์ควบคุมโรคพืชอาจช่วยลดการพึ่งพาสารเคมีได้ (Hegde and Kumar, 2025) ทั้งนี้ผลการทดลองสภาพห้องปฏิบัติการและสภาพแปลงทดสอบชี้ตรงกันว่าตำรับ 2 มีศักยภาพสูงสุดในการควบคุมโรค อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ดังกล่าวยังไม่สามารถเทียบเท่ากับสารเคมีการค้าได้บางกรณี จึงเป็นความท้าทายการใช้ชีวภัณฑ์ภาคสนาม โดยเฉพาะความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการสัมผัสแสง รวมถึงการคงตัวของเชื้อระหว่างเก็บรักษาและหลังฉีดพ่น (Stukenbrock and Gurr, 2024; Verma et al., 2024)

โดยสรุป ได้คัดเลือกตำรับที่ 2 และตำรับที่ 1 เพื่อเข้าสู่การทดสอบขั้นต่อไปในสภาพแปลงปลูกร่วมกับเกษตรกร โดยตำรับที่ 2 ทำหน้าที่เป็นสูตรต้นแบบเชิงเทคโนโลยีที่ให้ประสิทธิภาพควบคุมโรคสูงสุดภายใต้การควบคุมทางเทคนิค ส่วนตำรับที่ 1 ทำหน้าที่เป็นสูตรต้นแบบเชิงความคุ้มค่า ซึ่งมีศักยภาพการถ่ายทอดสู่การใช้เชิงการค้าจริงระดับเกษตรกร ทั้งนี้แนวทางการทดสอบแบบคัดเลือก “สูตรประสิทธิภาพสูง” ควบคู่กับ “สูตรคุ้มทุนสูง” สอดคล้องกับหลักการพัฒนาชีวภัณฑ์สมัยใหม่ที่เน้นทั้งประสิทธิผลทางชีวภาพและความยอมรับได้เชิงเศรษฐกิจของระบบการผลิต รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.8

ตารางที่ 4.2.8 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของต้นแบบชีวภัณฑ์ในการควบคุมโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* พริกภายหลังการปลูกเชื้อสาเหตุโรคสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี	รายละเอียด	ความเสียหาย		
		วันที่แสดงอาการหลังเริ่มทดสอบ	ระดับการเกิดโรค (0-5)	ความรุนแรงของโรค (%)[1/]
1	ไม่ฉีดพ่นสารใด (ชุดควบคุม)	1	5	100 A
2	สารเคมีการค้า ฟอสโฟนิกแอซิส (อัตราการใช้ 50 ml/20 L ทุก 7 วัน)	3	1	10 e
3	ชีวภัณฑ์การค้า ไตรโคเดอร์มา (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	2	2	55 c

กรรมวิธี	รายละเอียด	ความเสียหาย		
		วันที่แสดงอาการหลังเริ่มทดสอบ	ระดับการเกิดโรค (0-5)	ความรุนแรงของโรค (%)[1/]
4	ชีวภัณฑ์สูตรเดิม Corn Starch 300 g และ Talcum 700 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 3 วัน)	2	2	60 bc
5	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 1 CMC 100 g ผสม Maltodextrin 200 g Corn starch 600 g และ Zinc sulphate 100 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	2	2	65 b
6	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 2 Encapsulation Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	2	1	40 d
7	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 3 สูตรน้ำ Nitrogen 15 ml ผสม Magnesium 25 g (อัตราการใช้ 200 ml/20 L ทุก 7 วัน)	2	2	45 de
	CV (%)			0.91
	$LSD_{0.05}$			1.10

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

4.2.3 ทดสอบยืนยันผลการใช้ตำรับผงต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ จำนวน 2 ตำรับ ภายใต้สภาพแปลงปลูกร่วมกับเกษตรกร 2 พื้นที่ ได้แก่ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยส้มป่อย จ.เชียงใหม่ และโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงถ้ำเวียงแก จ.น่าน โดยวางแผนแบบสุ่มบล็อกสมบูรณ์ จำนวน 3 ซ้ำ 5 กรรมวิธี ประกอบด้วย ชุดควบคุม (วิธีปฏิบัติของเกษตรกร) ชีวภัณฑ์สูตรเดิม และชีวภัณฑ์ต้นแบบสูตรใหม่ตำรับที่ 1 และ 2 ซึ่งคัดเลือกจากผลการทดลองก่อนหน้า การบันทึกข้อมูล ได้แก่ ระดับและความรุนแรงของโรคทุก 7 วันหลังการฉีดพ่น ต้นทุนการใช้สารต่อหน่วยพื้นที่ และปัจจัยแวดล้อมภายในแปลงปลูก เพื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแต่ละวิธีการกับแนวทางการปฏิบัติของเกษตรกร

ข้อมูลสภาพแวดล้อมบริเวณพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยส้มป่อย ตั้งอยู่บนระดับความสูงมากกว่า 1,000 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง มีอุณหภูมิกลางวันประมาณ 33-35 °C กลางคืน 24-26 °C ความชื้นสัมพัทธ์ ประมาณ 75-80% ฝนตก ประมาณ 16-19 วัน/เดือน ส่วนพื้นที่ โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงถ้ำเวียงแก ตั้งอยู่ระดับความสูงในช่วงประมาณ 600-700 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง มี

ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 77% บางช่วงมีค่าสูงถึง 85% โดยเฉพาะปลายฤดูฝน อุณหภูมิกลางวัน 31-35 °C กลางคืน 23-26 °C ทั้งนี้ฝนตกมากกว่า 20 วัน/เดือน และฝนตกชุกมากกว่าปีที่ผ่านมา

ผลการทดสอบภาคสนามภายใต้สภาพแปลงปลูกร่วมกับเกษตรกรพบว่า วิธีการปฏิบัติตามปกติของเกษตรกรซึ่งเน้นการใช้สารเคมีควบคุมโรค เช่น ฟอสโฟนิกแอซิส (อัตราการใช้ 50 ml/20 L) ฉีดพ่นทุก 7 วัน (ชุดควบคุม) ส่งผลให้พืชเริ่มแสดงอาการของโรคภายใน 10-15 วัน หลังเริ่มทดสอบ โดยมีระดับการเกิดโรคอยู่ที่ 1 และความรุนแรงเฉลี่ย 75% ต้นทุนการจัดการ 180 บาท/โรงเรือน/เดือน สื่อถึงการใช้สารเคมีให้ผลควบคุมโรคในระดับที่ยอมรับได้เชิงปฏิบัติ แต่ยังมีต้นทุนสูงเมื่อเทียบกับบางกรรมวิธีของงานทดลองเดียวกัน เมื่อใช้ชีวภัณฑ์การค้า (ไตรโคเดอร์มา; *Trichoderma*) อัตรา 200 g/20 L ทุก 7 วัน พบว่าโรคเริ่มแสดงอาการเร็วขึ้น ภายใน 5-10 วัน ระดับการเกิดโรค 2 และความรุนแรง 70% ต้นทุน 250 บาท/โรงเรือน/เดือน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าชีวภัณฑ์การค้าเพียงอย่างเดียวไม่ได้ให้ประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการใช้สารเคมี ทั้งด้านการยืดระยะปลอดอาการและต้นทุนต่อหน่วยพื้นที่

ในทางตรงกันข้าม ชีวภัณฑ์สูตรเดิม (CMC ผสม Maltodextrin ผสม Corn starch ผสม Zinc sulphate อัตรา 200 g/20 L ฉีดพ่นทุก 3 วัน) และต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 1 (สูตรเดียวกันแต่ฉีดพ่นทุก 7 วัน) ให้ผลเทียบเคียงกัน โดยเริ่มพบอาการภายใน 5-10 วัน ระดับการเกิดโรค 2 และความรุนแรงเฉลี่ย 50% (กลุ่ม BC) แต่มีต้นทุนต่ำกว่ามาก เพียง 85 บาท/โรงเรือน/เดือน แสดงถึงความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และความเป็นไปได้สูงในการประยุกต์ใช้จริง เนื่องจากสามารถลดความถี่การฉีดพ่นโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพการควบคุมโรค สำหรับต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 2 ซึ่งเป็นสูตร Encapsulation (Gelatin ร่วมกับ Sodium alginate) ให้ผลแตกต่างบางส่วน โดยเริ่มพบอาการโรคช้ากว่าเล็กน้อย ภายใน 7-10 วัน ระดับการเกิดโรค 2 ความรุนแรง 55% (กลุ่ม B และแตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p \leq 0.05$) แต่มีต้นทุนสูงถึง 4,799 บาท/โรงเรือน/เดือน ทั้งนี้ข้อมูลทั่วไปสรุปว่าสูตร Encapsulation ได้รับการยอมรับว่าสามารถเพิ่มความคงตัวและการปลดปล่อยเชื้ออย่างต่อเนื่องในสภาพแวดล้อมจริง (Hegde and Kumar, 2025; Verma et al., 2024) แต่จากผลทดสอบพบว่าความได้เปรียบเชิงประสิทธิภาพยังไม่เด่นชัดที่จะชดเชยต้นทุนที่สูงมาก

เมื่อพิจารณาร่วมกัน 3 เกณฑ์หลัก ได้แก่ (1) ระยะเวลาจนเริ่มพบอาการโรค (2) ระดับและความรุนแรงของโรค และ (3) ต้นทุนการใช้สารต่อหน่วยพื้นที่ต่อเดือน พบว่าตำรับ 1 ให้สมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความคุ้มค่าที่เหมาะสมที่สุด ขณะที่ตำรับ 2 เป็นสูตรที่มีศักยภาพเชิงเทคโนโลยีสูงแต่ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน ดังนั้นจึงคัดเลือกตำรับ 1 (สูตรคุ้มทุนและเหมาะกับการใช้จริง) และตำรับ 2 (สูตรศักยภาพสูงทางเทคโนโลยี) เพื่อนำไปทดสอบต่อระดับแปลงเกษตรกรเปรียบเทียบพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมแตกต่างกันเพื่อยืนยันผลเชิงภาคสนามและประเมินความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ภายใต้ระบบการผลิตจริง (Espinosa-Palomeque et al., 2025) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.2.9 และภาพที่ 4.2.8

ตารางที่ 4.2.9 ผลการประเมินประสิทธิภาพการจัดการโรคและต้นทุนการใช้ชีวภัณฑ์ต้นแบบภายใต้สภาพแปลงปลูกร่วมกับเกษตรกร

กรรมวิธี	ปริมาณการใช้	ความเสียหาย[2/]			
		วันที่แสดงอาการหลังเริ่มทดสอบ	ระดับการเกิดโรค (0-5)	ความรุนแรงของโรค (%)[1/]	ต้นทุนค่าสาร (บาท)/โรงเรือน/เดือน[3/]
1	ชุดควบคุม (วิธีการของเกษตรกร) สารเคมีการค้า ฟอสโฟนิกแอซิส (อัตราการใช้ 50 ml/20 L ทุก 7 วัน)	10-15	1	75 a	180
2	ชีวภัณฑ์การค้า ไตรโคเดอร์มา (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	5-10	2	70 a	250
3	ชีวภัณฑ์สูตรเดิม Corn Starch 300 g และ Talcum 700 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 3 วัน)	5-10	2	50 bc	85
4	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 1 CMC 100 g ผสม Maltodextrin 200 g Corn starch 600 g และ Zinc sulphate 100 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	5-10	2	50 bc	85
5	ต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่ ตำรับ 2 Encapsulation Gelatin 6.6 g ร่วมกับ Sodium alginate 1 g (อัตราการใช้ 200 g/20 L ทุก 7 วัน)	7-10	2	55 b	4,799
	CV (%)			0.98	
	$LSD_{0.05}$			1.23	

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]บันทึกข้อมูลความเสียหายทุก 7 วัน หลังฉีดพ่นสาร และเก็บต่อเนื่อง อย่างน้อย 3 ครั้ง โดยระดับการเกิดโรค (0-5) หมายถึงค่าคะแนนที่ใช้ประเมินความรุนแรงของอาการโรคบนพืช ตั้งแต่ 0 = ไม่พบอาการ ถึง 5 = อาการรุนแรงมาก (> 75 % ของพื้นที่ผลหรือใบแสดงอาการ) ส่วนความรุนแรงของโรค (%) คือ ร้อยละของพื้นที่หรืออวัยวะพืชที่แสดงอาการโรค คำนวณจากผลรวมของคะแนนเทียบกับคะแนนสูงสุดทั้งหมด เพื่อใช้ประเมินความเสียหายรวมและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของกรรมวิธีต่าง

[3/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ภาพที่ 4.2.8 ตัวอย่างโรงเรือนปลูกพริกหวานของเกษตรกรที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพต้นแบบชีวภัณฑ์สูตรใหม่

4.3 การเพิ่มคุณภาพชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด ด้วยเทคโนโลยีปกป้องเซลล์จุลินทรีย์จากความร้อน

4.3.1 คัดเลือกและผลิตตำรับต้นแบบผงชีวภัณฑ์สูตรใหม่

เตรียมหัวเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 บนอาหารแข็ง NA คัดเลือกสูตรอาหารเหลวที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อระยะ stationary phase โดยวางแผนการทดลองแบบ CRD จำนวน 3 ซ้ำ ภายใต้ pH 6 อุณหภูมิ 35°C เขย่า 180 รอบต่อนาที นาน 72 ชั่วโมง บันทึกค่า OD จำนวนเซลล์ และ cfu/ml เพื่อเลือกสูตรที่ให้มวลชีวภาพสูงสุด จากนั้นศึกษาผลของสารปกป้องเซลล์ต่อการรอดชีวิตของเชื้อภายใต้สภาวะการทำแห้ง 21 กรรมวิธี แบ่งเป็น กลุ่มสารกระตุ้นการสร้างผนังเซลล์ และสารเคลือบผนังเซลล์ ประเมินค่า OD จำนวนสปอร์ ปริมาณเชื้อ และอัตราการรอดชีวิตหลังให้ความร้อน 80°C นาน 15 นาที นำสารแขวนลอยจุลินทรีย์ที่มีมวลชีวภาพและอัตราการรอดชีวิตสูงสุดมาผลิตเป็นผงชีวภัณฑ์ เปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับ 7 กรรมวิธี (สูตรเดิมและสูตรใหม่) ด้วยเทคนิคอบลมร้อน (40-50°C) และพ่นฝอย (Spray dryer) ก่อนประเมินปริมาณเชื้อ ความชื้น ผลผลิตและต้นทุนการผลิตระดับห้องปฏิบัติการ ผงชีวภัณฑ์ต้นแบบอย่างน้อย 15 ตำรับจะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อ *Cercospora* spp. ด้วยวิธี Dual culture และคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง พร้อมศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี เช่น สี ลักษณะผง กลิ่น ค่า pH การละลายน้ำ และการเกิดตะกอน เพื่อคัดเลือกสูตรที่มีความคงตัว ละลายน้ำดี และเหมาะสมต่อการใช้ภาคสนาม

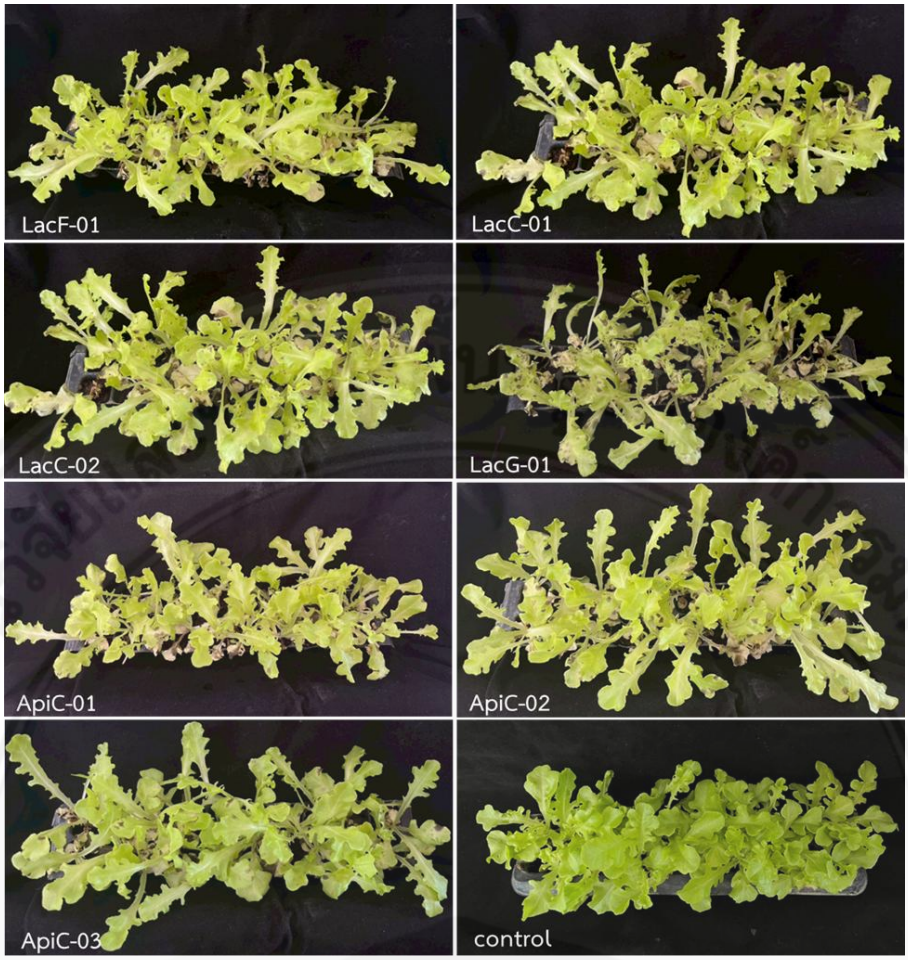
ผลการเก็บรวบรวมตัวอย่างใบสลัดที่มีอาการใบจุดจากศูนย์พัฒนาโครงการหลวงทุ่งหลวง จ.เชียงใหม่ เพื่อนำมาแยกเชื้อราสาเหตุโรค พบว่าใบตัวอย่างทั้งหมดสามารถแยกเชื้อราด้วยวิธี tissue transplanting ได้พบการเจริญของเส้นใยเชื้อราออกจากชิ้นพืช จากนั้นจึงคัดแยกให้ได้เชื้อบริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ทดสอบต่อไป จากตัวอย่างใบสลัด 4 ตัวอย่าง และใบเซเลอรี่ 2 ตัวอย่าง สามารถแยกเชื้อราสาเหตุโรคทั้งหมด 7 ไอโซเลท ได้แก่ LacF-01, LacC-01, LacC-02, LacG-01, ApiC-01, ApiC-02 และ ApiC-03 โดยเมื่อเลี้ยงบนอาหารเลี้ยง PDA อายุ 14 วัน พบว่าลักษณะโคโลนีค่อนข้างกลม ขอบหยัก เส้นใยเจริญหนาแน่นฝังตัวลงในอาหารเลี้ยง และมีรอยนูนหรือรอยยุบบริเวณกลางโคโลนี เส้นใยใสไม่มีสี มีผนังกั้น และไม่พบการสร้างสปอร์ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะของ *Cercospora* spp. ที่ส่วนใหญ่มีเส้นใยโปร่งใสและเจริญแบบ Vegetative เมื่ออยู่ในสภาวะอาหารเลี้ยงเชื้อทั่วไป

ผลทดสอบความสามารถในการก่อโรค (Pathogenicity test) พบว่า เชื้อราทั้ง 7 ไอโซเลท สามารถก่ออาการใบจุดบนต้นสลัดกรีนโอ้คอายุ 30 วัน โดยมีระดับความรุนแรงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ไอโซเลท LacG-01 เป็นเชื้อที่มีความรุนแรงสูงสุด โดยมีค่าดัชนีการเกิดโรค 3.70 และเปอร์เซ็นต์การเกิดโรค 92.50 รองลงมาคือ LacC-02 ที่มีค่าดัชนี 2.00 และเปอร์เซ็นต์ 50.00 ส่วนไอโซเลทที่แยกจากเซเลอรี่ (ApiC-01, ApiC-02 และ ApiC-03) สามารถก่อโรคบนต้นสลัดได้ แต่มีความรุนแรงต่ำอย่างมีนัยยะเมื่อเทียบกับไอโซเลทที่แยกจากสลัด จึงคัดเลือกไอโซเลท LacG-01 เป็นเชื้อมาตรฐานสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพชีวภัณฑ์ในขั้นตอนต่อไป

ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าเชื้อ *Cercospora* spp. จากแหล่งอาศัยต่างชนิดมีความแตกต่างในความสามารถก่อโรค อาจเนื่องมาจากความจำเพาะของพืชอาศัย (Host specificity) และการปรับตัวทางพันธุกรรมของเชื้อราให้เข้ากับพืชโฮสต์ที่ต่างกัน (van Dyk et al., 2021) นอกจากนี้การที่ไอโซเลท LacG-01 แสดงความรุนแรงสูงสุด สื่อถึงความเหมาะสมของปัจจัยสรีรวิทยาและโครงสร้างทางสัณฐานของเชื้อที่เอื้อต่อการเข้าทำลายใบสลัดภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นของห้องปฏิบัติการ สอดคล้องกับรายงานของ Al Araj et al. (2022) ที่พบว่าเชื้อ *Cercospora* สามารถก่อโรคได้อย่างรุนแรงภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูงและอุณหภูมิระหว่าง 25-30 °C

อย่างไรก็ตามการไม่พบการสร้างสปอร์ของเชื้อในระยะการเลี้ยงบน PDA ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ส่งผลต่อการจำแนกชนิดทางสัณฐานวิทยา เนื่องจากการสร้างสปอร์เป็นลักษณะสำคัญของการยืนยันชนิด *Cercospora* spp. จึงควรมีการกระตุ้นให้เชื้อสร้างสปอร์ในสภาวะเฉพาะ เช่น การใช้แหล่งอาหารที่มีสารกระตุ้นการสร้างโคนิดิโอหรือสภาพแสงที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการจำแนกชนิด นอกจากนี้การทดสอบความสามารถในการก่อโรคในยังไม่ได้ทำการยืนยันเชื้อซ้ำจากพืชที่เกิดอาการ ซึ่งเป็นขั้นตอนของ Koch's postulates ที่ใช้ยืนยันว่าเชื้อที่แยกได้เป็นสาเหตุแท้จริงของโรค ดังนั้นการทดลองระยะต่อไปควรเสริมการตรวจยืนยันเชื้อด้วยวิธีทางโมเลกุล เช่น การวิเคราะห์ลำดับยีน ITS หรือ TEF-1α เพื่อยืนยันชนิดของเชื้อราอย่างถูกต้องและเชื่อมโยงผลกับการก่อโรค รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.3.1-4.3.2 และตารางที่ 4.3.1

ภาพที่ 4.3.1 ลักษณะอาการโรคใบจุดสลัดและใบจุดเซเลอรี่ (ซ้าย) และโคโลนีเชื้อราสาเหตุโรค (ขวา)



ภาพที่ 4.3.2 อาการโรคใบจุดสลัดหลังปลูกเชื้อรา *Cercospora* sp. 5 วัน บนต้นสลัดกรีนโอ้ค

ตารางที่ 4.3.1 ดัชนีและเปอร์เซ็นต์การเกิดโรคหลังปลูกเชื้อรา 5 วัน

เชื้อราสาเหตุโรค	ดัชนีการเกิดโรค[1/]	% ดัชนีการเกิดโรค[1/]
LacF-01	1.60 c	40.00 c
LacC-01	1.65 c	41.25 c
LacC-02	2.00 b	50.00 b
LacG-01	3.70 a	92.50 a
ApiC-01	1.00 d	25.00 d
ApiC-02	0.95 d	25.00 d
ApiC-03	1.00 d	23.75 d
CV (%)	30.82	30.82

$LSD_{0.05}$	0.33	8.19

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

เชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ *Bacillus amyloliquefaciens* ไอโซเลท B18 ถูกเลี้ยงบนอาหาร NB ภายใต้สภาวะเขย่า 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 28 ± 2 ℃ เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นปรับความเข้มข้นของหัวเชื้อให้ได้ 10^9 cfu/ml โดยใช้เครื่อง Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (O.D. = 0.2) เพื่อนำไปทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคใบจุดสลัดที่แสดงอาการรุนแรงสูงสุด การทดสอบใช้วิธี dual culture technique โดยมีชุดควบคุมที่ไม่มีเชื้อแบคทีเรีย บ่มที่ 28 ± 2 ℃ และบันทึกผลหลัง 7 และ 14 วัน วัดรัศมีโคโลนีเชื้อราสาเหตุโรค และคำนวณเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญของเส้นใย (Percent inhibition of radial growth: PIRG)

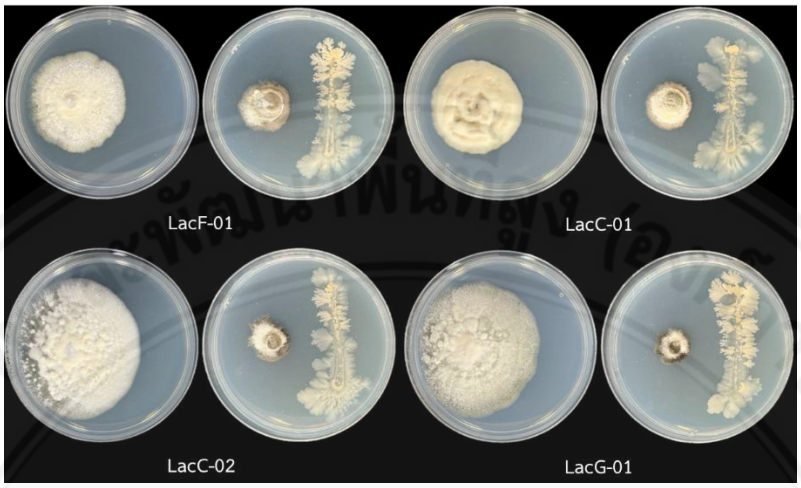
ผลทดสอบพบว่าเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราสาเหตุโรคไอโซเลท LacC-02 ได้ โดยอายุ 7 วัน มีค่าสูงสุด 84.16% รองลงมาคือ LacF-01 มีค่า 81.61% LacC-01 80.30% และ LacG-03 79.64% ขณะที่อายุ 14 วัน พบว่า LacG-03 ถูกยับยั้งสูงสุด 77.11% รองลงมาคือ LacC-01 และ LacC-02 เท่ากับ 75.41% และ LacF-01 71.43% ตามลำดับ ผลดังกล่าวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ข้อมูลค่าการยับยั้งที่สูงกว่า 70% ของทุกไอโซเลท สื่อถึงประสิทธิภาพของแบคทีเรียปฏิปักษ์ในการผลิตสารเมตาโบไลต์รองที่มีฤทธิ์ยับยั้งรา เช่น Lipopeptides กลุ่ม Iturin Fengycin และ Surfactin ซึ่งมีรายงานว่ามีผลต่อการทำลายเยื่อหุ้มเซลล์และยับยั้งการงอกของสปอร์เชื้อราสกุล *Cercospora* และเชื้อราอื่น (Yang et al., 2022; Li et al., 2023) รวมทั้งสอดคล้องกับแนวโน้มจากงานของ Nguyen et al. (2024) ที่รายงานว่า *B. amyloliquefaciens* สามารถลดการเจริญของเชื้อ *Cercospora beticola* บนอาหาร PDA ได้มากกว่า 80% หลังบ่ม 7 วัน ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่พบในงานวิจัย ทั้งนี้เปอร์เซ็นต์การยับยั้งที่ลดลงเล็กน้อยเมื่อครบ 14 วัน อาจเกิดจากการลดลงของสารต้านเชื้อราหรือการเจริญซ่อมของเส้นใยเชื้อราระยะหลัง ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของการทดสอบแบบ *in vitro* (Basha et al., 2021) อย่างไรก็ตามผลโดยรวมแสดงให้เห็นแนวโน้มคงที่ของฤทธิ์ยับยั้งระดับสูง แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 มีศักยภาพเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นชีวภัณฑ์ควบคุมโรคใบจุด *Cercospora* ของพืชสลัด รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.2 และภาพที่ 4.3.3

ตารางที่ 4.3.2 เปอร์เซ็นต์การยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคใบจุดสลัดด้วยเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus amyloliquefaciens* ไอโซเลท B18

ไอโซเลท	**% การยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรค[1/]**	
เชื้อราสาเหตุโรค	**7 วัน**	**14 วัน**
LacF-01	81.61 ab	71.43 b
LacC-01	80.30 b	75.41 a
LacC-02	84.16 a	75.41 a
LacG-03	79.64 b	77.11 a
CV (%)	2.78	3.41

$LSD_{0.05}$	3.71	2.78

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.3.3 ประสิทธิภาพของ *Bacillus amyloliquefaciens* ไอโซเลท B18 ต่อการยับยั้งเส้นใยเชื้อรา *Cercospora* sp. อายุ 14 วัน

ผลการเพาะเลี้ยงแบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลท B18 ในอาหารเหลว 2 สูตร คือ สูตรกากน้ำตาล และสูตรผงถั่วเหลือง พบว่าอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลให้มวลชีวภาพและจำนวนเซลล์สูงกว่าสูตรผงถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ทุกช่วงเวลา โดยค่าการเจริญวัดจากค่า OD จำนวนเซลล์ด้วย Hemacytometer และปริมาณเชื้อด้วยวิธี Serial dilution spread plate

หลังการเลี้ยงเชื้อ 24-72 ชั่วโมง พบว่าค่า OD ของสูตรกากน้ำตาลเพิ่มจาก 0.235 เป็น 0.361 ขณะที่สูตรผงถั่วเหลืองเพิ่มจาก 0.088 เป็น 0.273 สอดคล้องกับจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจาก 1.42×10^7 เป็น 2.73×10^7 cell/ml และปริมาณเชื้อจาก 6.53×10^8 เป็น 1.54×10^9 cfu/ml ซึ่งมากกว่าสูตรผงถั่วเหลืองทุกช่วงเวลา ทั้งนี้หลังการทดสอบความทนต่อความร้อนที่ 80°C นาน 15 นาที พบว่าเชื้อในสูตรกากน้ำตาลยังมีปริมาณรอดชีวิตสูงกว่า (4.42×10^8 cfu/ml) เมื่อเทียบกับสูตรผงถั่วเหลือง (1.35×10^8 cfu/ml)

ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลเหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลท B18 มากกว่า เนื่องจากกากน้ำตาลมีแหล่งคาร์บอนที่ย่อยง่ายและอุดมด้วยธาตุอาหารรอง เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งส่งเสริมการเจริญและการสร้างสปอร์ของแบคทีเรียสกุล *Bacillus* (Zhao et al., 2023) ขณะที่สูตรผงถั่วเหลืองให้แหล่งไนโตรเจนและโปรตีนสูงแต่มีการย่อยสลายช้ากว่า ทำให้การสร้างมวลชีวภาพและอัตรารอดชีวิตต่ำกว่า สอดคล้องกับรายงานของ Wu et al. (2022) ที่พบว่าอาหารเหลวที่มีแหล่งคาร์บอนเชิงเดี่ยวจากกากน้ำตาลช่วยกระตุ้นการสังเคราะห์สารเมตาโบไลต์รองและการสร้างสปอร์ของ *B. amyloliquefaciens* ได้ดีกว่าแหล่งโปรตีนจากถั่วเหลือง

โดยสรุป อาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลมีความเหมาะสมต่อการผลิตหัวเชื้อมากที่สุด เนื่องจากให้มวลชีวภาพ ปริมาณเชื้อ และอัตราการรอดชีวิตหลังความร้อนสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงเลือกใช้สูตรนี้เป็น

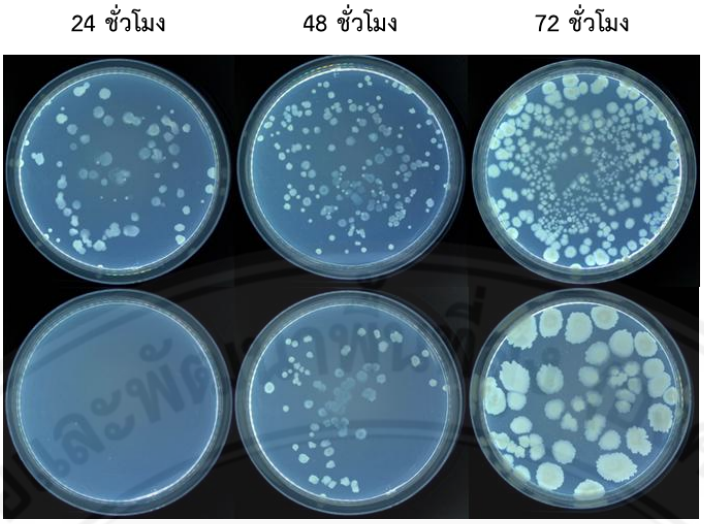
อาหารพื้นฐานในการพัฒนาและศึกษาการเติมสารปกป้องเซลล์ขั้นตอนต่อไป รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.3 และภาพที่ 4.3.4-4.3.5

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Highland Research and Development Institute (Public Organization)

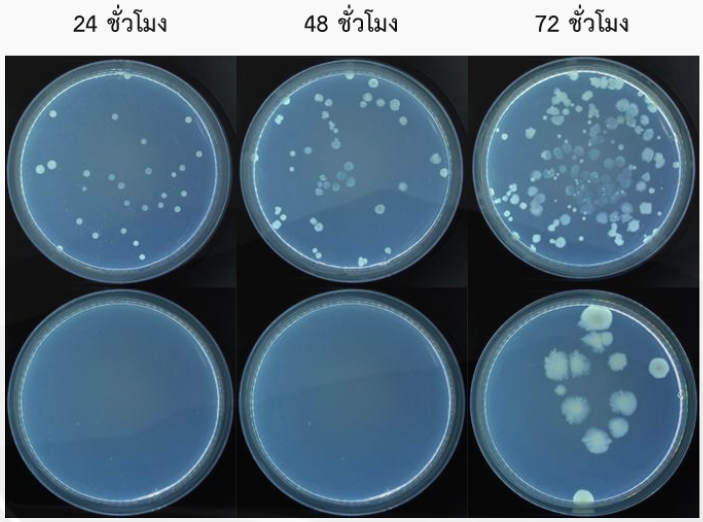
ตารางที่ 4.3.3 มวลชีวภาพแบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลท B18 ในอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลและผงถั่วเหลือง

สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ	OD (nm)[1/]			Hemacytometer (cell/ml)[1/]			Serial Dilution (cfu/ml)[1/]			Heating (cfu/ml) [1/]		
	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr
สูตรกากน้ำตาล	**0.235 a**	**0.301 a**	**0.361 a**	**1.42×10^{7} a**	**2.53×10^{7} a**	**2.73×10^{7} a**	**6.53×10^{8} a**	**7.10×10^{8} a**	**1.54×10^{9} a**	**0**	**3.43×10^{8} a**	**4.42×10^{8} a**
สูตรผงถั่วเหลือง	0.088 b	0.169 b	0.273 b	9.82×10^{6} b	1.31×10^{7} b	1.58×10^{7} b	3.16×10^{8} b	4.63×10^{8} b	7.36×10^{8} b	0	0 b	1.35×10^{8} b
CV (%)	4.27	1.79	2.82	33.41	13.45	1.72	0.57	19.89	13.05	0	17.54	7.35
$LSD_{0.05}$	0.01	0.02	0.02	1.73	1.11	1.59	2.21	2.64	1.31	0	0.68	0.48

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ภาพที่ 4.3.4 ลักษณะโคโลนีเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 เลี้ยงบนอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาล (ก) บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส (ข) นำไป heating 80 องซาเซลเซียส 15 นาที



ภาพที่ 4.3.5 ลักษณะโคโลนีเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 เลี้ยงบนอาหารเหลวสูตรผงถั่วเหลือง (ก) บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส (ข) นำไป heating 80 องซาเซลเซียส 15 นาที

การคัดเลือกชนิดและความเข้มข้นของสารปกป้องเซลล์ที่ช่วยลดความเครียดของเซลล์และเพิ่มความคงตัวระหว่างกระบวนการเพาะเลี้ยงและแปรรูปชีวภัณฑ์จากอุณหภูมิและแรงดันออสโมซิส รักษาสมรรถภาพของเซลล์ในการผลิตสารสำคัญ และเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของเซลล์ระยะเก็บรักษาอยู่ภายใต้แนวคิด “ชุดฟังก์ชัน” การจัดสูตรมีการผสมสารปกป้องเซลล์ 3-5 ชนิด เพื่อให้เกิดการทำงานเสริมฤทธิ์กัน แบ่งตามบทบาทดังนี้ (1) กลุ่มคาร์โบไฮเดรตและพอลิเมอร์เชิงซ้อน (เช่น D-glucose, Maltodextrin, Corn starch, CMC และ Gum arabic) ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานและสร้างโครงสร้างฟิล์มห่อหุ้มเซลล์ ช่วยลดการสูญเสียน้ำและป้องกันการหดตัวของเยื่อหุ้มเซลล์ระหว่างการทำแห้ง (2) กลุ่มโปรตีนและแหล่งไนโตรเจนเชิงซ้อน

(เช่น Whey protein, Soy protein, Gelatin และ ยูเรีย) ทำหน้าที่เป็นสารช่วยคงสภาพโปรตีนของเซลล์และเพิ่มการทนความร้อนในกระบวนการผลิต (3) กลุ่มเกลือแร่และไอออนโลหะ (เช่น $MgSO_4$ และ $Ca(NO_3)_2$) ช่วยรักษาสมดุลออสโมซิสและเสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ อีกทั้งเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ในกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรีย และ (4) กลุ่มโพลีเมอร์สร้างเจลหรือฟิล์มประจุบวก (เช่น ไคโตซาน, CMC, Gelatin และ Gum arabic) ช่วยป้องกันแรงกระแทกทางกายภาพและลดการเกาะกลุ่มของเซลล์ในอาหารเหลว ทำให้การกระจายตัวของเซลล์สม่ำเสมอมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Wang et al. (2023) และ Park and Lee (2022) ที่ชี้ว่าการผสมคาร์โบไฮเดรตกับโปรตีนและเกลือแร่ในสัดส่วนเหมาะสม ช่วยเพิ่มความคงตัวของเซลล์จุลินทรีย์ระหว่างการทำแห้งแบบพ่นฝอยและทำให้เชื้อมีอัตราการรอดชีวิตสูงกว่า 10 เท่า เมื่อเทียบกับการใช้สารเดี่ยว

นอกจากนี้ยังพิจารณาการจัดสูตรตามแนวคิด 3 ประการ ได้แก่ (1) การเปรียบเทียบแบบผสมสารหลายชนิดในสัดส่วนต่างกันและมีผลเสริมฤทธิ์ใกล้เคียงการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เช่น สูตรที่เน้นการปกป้องโครงสร้างเซลล์ด้วยโปรตีน (Whey protein, Soy protein และ Gelatin) คู่กับ Maltodextrin หรือสูตรที่ผสมเกลือแร่กับคาร์โบไฮเดรตเพื่อเพิ่มความทนต่อความเครียดทางออสโมซิส (2) ความคงตัวระหว่างกระบวนการทำแห้งและเก็บรักษา ซึ่งสูตรส่วนใหญ่มี Maltodextrin, CMC, Gum arabic และ Corn starch เป็นส่วนประกอบหลักที่ช่วยสร้างเมทริกซ์ห่อหุ้มเซลล์แบบผสมคาร์โบไฮเดรต-โปรตีน ลดการสูญเสียน้ำและการเปลี่ยนสภาพของเยื่อหุ้มระหว่างกระบวนการทำแห้ง ตรงกับรายงานของ Nguyen et al. (2024) (3) ความเหมาะสมเชิงเศรษฐกิจและการประยุกต์ใช้ สูตรส่วนใหญ่ใช้สารที่หาได้ง่ายและมีจำหน่ายภายในประเทศ เช่น $MgSO_4$, $Ca(NO_3)_2$, CMC, Corn starch, Gum arabic และนมถั่วเหลือง ซึ่งมีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ขณะเดียวกันยังมีบางสูตรที่เพิ่มโปรตีนคุณภาพสูงในปริมาณจำกัด เช่น Whey protein หรือ Gelatin เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทางชีวภาพของสูตรโดยไม่เพิ่มต้นทุนมากนัก รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.4

ตารางที่ 4.3.4 ชนิดและปริมาณสารปกป้องเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 ที่ใส่ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อปริมาตร 500 ml

สูตร	ส่วนประกอบของสูตรสารปกป้องเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์ เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิต ปริมาตร 500 ml	ต้นทุนค่าสาร (บาท)[1/]
1	CMC 0.2 g ผสม Gum Arabic 0.2 g ผสม $MgSo_4$ 0.2 g ผสม Whey protein 0.2 g	1.12
2	D-glucose 0.2 g ผสม Soy protein 0.2 g ผสม Chitosan 0.2 g ผสม Corn starch 0.2 g	0.81
3	Liquid urea 0.5 ml ผสม Soy protein 0.5 g ผสม Maltodextrin 0.5 g	0.97
4	Glucose 0.2 g ผสม $MgSo_4$ 2 g ผสม Gum arabic 0.5 g ผสม Gelatin 1 g ผสม Maltodextrin 1g	4.13
5	CMC 0.2 g ผสม Gum arabic 0.5 g ผสม $MgSo_4$ 1 g ผสม Soy protein 0.5 g	1.62

สูตร	ส่วนประกอบของสูตรสารปกป้องเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์ เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิต ปริมาตร 500 ml	ต้นทุนค่าสาร (บาท)[1/]
6	D-glucose 0.5 g ผสม Whey protein 0.5 g ผสม Chitosan 0.5 g ผสม Corn starch 0.5 g	2.24
7	Glucose 0.5 g ผสม $MgSo_4$ 0.5 g ผสม Gelatin 0.2 g ผสม Corn starch 0.5 g	0.72
8	Whey protein 0.5 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ผสม CMC 0.2 g	1.00
9	Soy protein 0.5 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ผสม CMC 0.2 g	0.76
10	Whey protein 0.25 g ผสม Soy protein 0.25 g ผสม $MgSo_4$ 0.25 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.25 g	1.17
11	Maltodextrin 0.2 g ผสม Glucose 0.1 g ผสม $MgSo_4$ 0.1 g ผสม Gelatin 0.1 g ผสม Corn starch 0.1 g	0.77
12	Whey protein 0.2 g ผสม $MgSo_4$ 0.5 g ผสม CMC 0.2 g	0.93
13	Soy protein 0.2 g ผสม $MgSo_4$ 0.5 g ผสม CMC 0.2 g	0.89
14	Liquid urea 0.5 g ผสม Whey protein 0.2 g ผสม Maltodextrin 0.2 g	0.41
15	CMC 0.2 g ผสม Gum arabic 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.1 g ผสม Soy protein 0.2 g	0.51
16	CMC 0.2 g ผสม Gum arabic 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ผสม Whey protein 0.2 g	0.89
17	Gum arabic 0.2 g ผสม D-glucose 0.2 g ผสม Chitosan 0.2 g ผสม Corn starch 0.2 g	0.69
18	Glucose 0.3 g ผสม Nitrogen 0.3 g ผสม Soy protein 0.5 g ผสม Gelatin 0.3 g ผสม Corn starch 0.2 g	0.39
19	Gelatin 0.2 g ผสม Corn starch 0.1 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g	0.41
20	Gelatin 0.2 g ผสม Corn starch 0.1 g ผสม $MgSo_4$ 0.2 g	0.33
21	Maltodextrin 0.5 g ผสม Soy protein 0.2 g ผสม $MgSo_4$ 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g	0.89

[1/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ผลศึกษาการเติมสารปกป้องเซลล์ในอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลต่อการเจริญและความคงตัวของแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 พบว่าสูตรสารปกป้องเซลล์มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ต่อการเจริญของแบคทีเรีย โดยเฉพาะช่วงการเพาะเลี้ยงระหว่าง 24 ถึง 72 ชั่วโมง ผลวิเคราะห์พบว่า สูตรที่ 14 และสูตรที่ 21 ให้ผลการเจริญสูงสุดทุกช่วงเวลา โดยสูตรที่ 14 ซึ่งประกอบด้วยยูเรีย Whey protein และ Maltodextrin มีค่า OD ที่ 24 ชั่วโมง เท่ากับ 1.750 และยังคงมีการเจริญต่อเนื่องจนถึงชั่วโมงที่ 72 ขณะที่สูตรที่ 21 ซึ่งประกอบด้วย $MgSO_4$, $Ca(NO_3)_2$, Maltodextrin และนมถั่วเหลือง มีค่า OD เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องถึง 0.536 ที่ชั่วโมง 72 ทั้ง 2 สูตร ให้จำนวนเซลล์เฉลี่ยสูงกว่าสูตรอื่นชัดเจน โดยมีค่าจำนวนเซลล์จากการนับด้วย Hemacytometer ช่วง 2.20×10^{8}-9.60×10^{7} cell/ml และค่าจำนวนโคโลนีจากการเจือจางแบบต่อเนื่องสูงถึง 5.30×10^{9} cfu/ml ในช่วงเวลาเดียวกัน เมื่อพิจารณาผลหลังการให้ความร้อนที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่ามีเพียงบางสูตรที่สามารถคงการมีชีวิตของเซลล์ได้ โดยสูตรที่ 21 แสดงค่า

การรอดชีวิตสูงสุดที่ 5.38×10^{9} cfu/ml รองลงมาคือสูตรที่ 14 และ 17 ซึ่งมีค่าช่วง 1.67×10^{8}-3.77×10^{8} cfu/ml ขณะที่สูตรอื่นส่วนใหญ่ไม่พบการเจริญหลังผ่านการให้ความร้อน ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการผสมสารปกป้องเซลล์ที่ประกอบด้วยเกลือแร่ $MgSO_4$ และ $Ca(NO_3)_2$ ร่วมกับคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนจาก Maltodextrin และนมถั่วเหลือง สามารถช่วยคงสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ ลดการรั่วซึมของโปรตอน และลดการเสียสภาพของโปรตีนภายใต้ภาวะเครียดจากความร้อนได้ สอดคล้องกับรายงานของ Park and Lee (2022) และ Nguyen et al. (2024) ซึ่งระบุว่าการใช้ส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเกลือแร่ในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถเพิ่มความคงตัวของเซลล์จุลินทรีย์ระหว่างกระบวนการทำแห้งหรือให้ความร้อน และช่วยให้แบคทีเรียคงความมีชีวิตได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารเดี่ยว ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพดังกล่าวมีแนวโน้มเกิดจากกลไกเสริมฤทธิ์ระหว่างสารแต่ละชนิด ซึ่งช่วยสร้างเมทริกซ์ห่อหุ้มเซลล์ ลดความเสียหายจากการสูญเสียน้ำและแรงดันออสโมซิส

โดยสรุป สารปกป้องเซลล์สูตรที่ 14 และสูตรที่ 21 มีศักยภาพสูงสุดในการส่งเสริมการเจริญและเพิ่มความทนทานต่อความร้อนของแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 จึงคัดเลือกสูตรที่ 21 ซึ่งประกอบด้วย Maltodextrin 0.5 g ผสม Soy protein 0.2 g ผสม $MgSo_4$ 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ไปดำเนินการขั้นตอนต่อไป เนื่องจากสามารถรักษาจำนวนเซลล์ให้คงอยู่ได้สูงสุดหลังผ่านกระบวนการให้ความร้อน แสดงถึงความเหมาะสมของสูตรดังกล่าวในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นองค์ประกอบของหัวเชื้อชีวภัณฑ์เชิงพาณิชย์ ทั้งด้านประสิทธิภาพทางชีวภาพและความคงตัวของกระบวนการผลิตจริง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.5

ตารางที่ 4.3.5 มวลชีวภาพแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท 18 ในอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลเปรียบเทียบการใส่สูตรสารปกป้องเซลล์

สูตร	OD (nm)[1/]			Hemacytometer (cell/ml)[1/]			Serial Dilution (cfu/ml)[1/]			Heating (cfu/ml)[1/]		
	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr
1	0.134 i	0.180 ij	0.144 ij	5.22×10^{7} de	3.00×10^{7} de	2.80×10^{7} fg	0 c	0 d	1.6×10^{8} c	0	0	0
2	0.247 fghi	0.249 h	0.577 efghi	6.01×10^{7} de	4.20×10^{7} bcde	3.40×10^{7} fg	0 c	0 d	1.6×10^{8} c	0	0	0
3	0.360 efgh	0.301 ef	0.128 j	1.32×10^{8} c	2.26×10^{8} a	2.50×10^{8} a	0 c	1.56×10^{8} b	1.1×10^{8} c	0	0	1.10×10^{8} c
4	0.417 def	0.367 b	0.412 bcd	1.82×10^{8} ab	2.80×10^{7} de	2.40×10^{7} fg	0 c	0 d	7.0×10^{7} cd	0	0	0
5	0.468 de	0.312 de	0.174 hij	2.41×10^{7} e	1.40×10^{7} e	1.40×10^{7} g	0 c	0 d	1.8×10^{9} b	0	0	0
6	0.237 fghi	0.124 k	0.195 ghij	1.46×10^{8} bc	1.56×10^{7} e	1.08×10^{8} b	0 c	5.6×10^{7} c	1.33×10^{8} c	0	0	9.33×10^{7} c
7	0.098 i	0.190 i	0.266 efghi	1.46×10^{8} bc	3.80×10^{7} cde	7.60×10^{7} cd	0 c	0 d	0	0	0	0

สูตร	OD (nm)[1/]			Hemacytometer (cell/ml)[1/]			Serial Dilution (cfu/ml)[1/]			Heating (cfu/ml)[1/]		
	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr
8	0.173 hi	0.235 h	0.365 cde	3.00×10^{7} e	2.40×10^{7} de	2.40×10^{7} fg	0 c	0 d	1.0×10^{8} cd	0	0	0
9	**0.217 ghi**	**0.278 g**	**0.421 bc**	**3.00×10^{7} e**	**5.20×10^{7} bcd**	**2.80×10^{7} fg**	**0 c**	**0 d**	**1.1×10^{10} a**	**0**	**0**	**0**
10	0.281 efghi	0.327 cd	0.363 cde	2.40×10^{7} e	2.40×10^{7} de	3.40×10^{7} fg	0 c	0 d	0	0	0	0
11	0.336 efgh	0.103 k	0.150 ij	6.80×10^{7} de	7.00×10^{7} bc	3.80×10^{7} efg	0 c	0 d	0	0	0	0
12	**0.681 c**	**0.124 j**	**0.211 ghij**	**6.00×10^{7} de**	**2.20×10^{7} de**	**2.40×10^{7} fg**	**0 c**	**0 d**	**1.7×10^{8} ab**	**0**	**0**	**0**
13	0.349 efgh	0.191 i	0.226 fghij	3.80×10^{7} de	3.40×10^{7} de	3.00×10^{7} fg	0 c	0 d	0	0	0	0
14	**1.750 a**	**0.284 fg**	**0.318 cdefg**	**2.20×10^{8} a**	**7.60×10^{7} b**	**1.14×10^{8} b**	**3.77×10^{8} b**	**2.8×10^{8} a**	**1.7×10^{8} c**	**0**	**0**	**0**
15	0.564 cd	0.301 ef	0.344 cdef	5.60×10^{7} de	4.00×10^{7} cde	2.40×10^{7} fg	0 c	0 d	1.06×10^{8} c	0	0	0

สูตร	OD (nm)[1/]			Hemacytometer (cell/ml)[1/]			Serial Dilution (cfu/ml)[1/]			Heating (cfu/ml)[1/]		
	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr	24 hr	48 hr	72 hr
16	1.180 b	0.111 k	0.214 ghij	6.00×10^{7} de	2.00×10^{7} de	2.40×10^{7} fg	0 c	0 d	6.0×10^{7} d	0	0	0
17	**0.124 i**	**0.185 ij**	**0.219 fghij**	**6.00×10^{7} de**	**3.60×10^{7} cde**	**4.20×10^{7} efg**	**0 c**	**0 c**	**1.67×10^{8} abc**	**0**	**0**	**1.67×10^{8} b**
18	**0.209 ghi**	**0.235 h**	**0.291 defgh**	**4.40×10^{7} de**	**4.40×10^{7} bcde**	**6.60×10^{7} de**	**0 c**	**0 d**	**1.06×10^{8} c**	**0**	**0**	**1.06×10^{8} c**
19	0.279 efghi	0.296 efg	0.358 cde	8.00×10^{7} d	2.40×10^{7} de	3.00×10^{7} fg	0 c	0 d	1.16×10^{8} bc	0	0	0
20	**0.332 efgh**	**0.337 c**	**0.589 a**	**2.60×10^{7} e**	**3.00×10^{7} de**	**4.60×10^{7} ef**	**0 c**	**0 d**	**1.9×10^{8} bc**	**0**	**0**	**2.33×10^{7} c**
21	**0.396 defg**	**0.477 a**	**0.536 ab**	**2.98×10^{7} e**	**7.00×10^{7} bc**	**9.60×10^{7} bc**	**6.10×10^{8} a**	**2.70×10^{8} a**	**5.30×10^{9} ab**	**0**	**0**	**5.38×10^{9} a**
CV (%)	27.34	5.30	26.45	28.36	36.77	25.59	84.41	125.59	66.37	0	0	61.83
$LSD_{0.05}$	0.18	0.02	0.12	4.40	3.49	2.92	6.5	7.5	1.3	0	0	5.03

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ดำเนินการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียปฏิปักษ์ไอโซเลท B18 เริ่มจากเขี่ยเชื้อบริสุทธิ์จากโคโลนีเดี่ยวบนอาหาร NA เลี้ยงที่อุณหภูมิห้อง 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเชื้อที่ได้มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร NB ปริมาตร 50 ml เขย่าที่ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำสารแขวนลอยที่ได้ไปเพาะเลี้ยงต่อในอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลและสูตรผงถั่วเหลือง ใช้ฟลาสก์ขนาด 1,000 ml ปริมาตร 500 ml/flask จำนวน 2 ซ้ำ/สูตร ภายใต้สภาวะเดียวกัน (150 rpm, 24 ชั่วโมง) ขยายเชื้อในถังหมักขนาด 10 ลิตร ปริมาตรอาหาร 5 L/สูตร เพื่อเตรียมมวลชีวภาพสำหรับกระบวนการทำให้แห้ง ผลการตรวจวัดปริมาณเชื้อด้วยวิธี Serial Dilution Spread Plate พบว่าสูตรอาหารกากน้ำตาลให้ปริมาณเชื้อเฉลี่ยสูงสุด 3.1×10^{10} cfu/ml ซึ่งมากกว่าสูตรผงถั่วเหลือง (2.0×10^{8} cfu/ml) ถึงกว่า 150 เท่า และมีต้นทุนการผลิตต่ำกว่ามาก (2.47 บาทต่อลิตร เมื่อเทียบกับ 14.15 บาท/ลิตร ของสูตรถั่วเหลือง) แสดงให้เห็นว่าสูตรกากน้ำตาลมีความเหมาะสมเชิงเศรษฐกิจและสามารถสร้างมวลชีวภาพได้สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ข้อมูลแสดงให้เห็นว่ากากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีความพร้อมในการย่อยสลายและสามารถกระตุ้นการสร้างมวลชีวภาพของ *Bacillus s*pp. โดยมีการรายงานแนวโน้มสอดคล้องกันกับ Patel et al. (2022) และ Liu et al. (2023) ซึ่งพบว่าการใช้กากน้ำตาลในอาหารเลี้ยงแบคทีเรียสายพันธุ์ *Bacillus* สามารถเพิ่มอัตราการเจริญและการสร้างสปอร์ได้สูงกว่าแหล่งอาหารที่ใช้โปรตีนจากถั่วเหลืองหรือกากถั่วเหลือง ทั้งนี้เนื่องจากกากน้ำตาลประกอบด้วยน้ำตาลรีดิวซ์และแร่ธาตุจำเป็นที่มีบทบาทต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมและการสังเคราะห์เอนไซม์ จึงคัดเลือกอาหารสูตรกากน้ำตาลไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไป

ผลการคัดเลือกสูตรวัสดุรองรับเพื่อเพิ่มการคงตัวและอัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ในการผลิตผงชีวภัณฑ์ระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษา แต่ละสูตรประกอบด้วยส่วนผสมของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และแร่ธาตุในสัดส่วนแตกต่างกัน สามารถจำแนกตามกลไกการทำงานของวัสดุรองรับดังนี้ (1) สูตรที่เน้นคาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อน ได้แก่ สูตรที่ 1-4 ประกอบด้วยส่วนผสมหลัก เช่น แป้งข้าวเจ้า มอลโทเดกซ์ทริน กลูโคส และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อนที่ช่วยสร้างโครงสร้างเมทริกซ์รอบเซลล์จุลินทรีย์ในระหว่างกระบวนการทำแห้ง ช่วยลดความเสียหายของเยื่อหุ้มเซลล์และโปรตีนภายใน (Patel et al., 2023) โดยเฉพาะมอลโทเดกซ์ทรินซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกักเก็บน้ำและสร้างฟิล์มบางห่อหุ้มเซลล์ ส่งผลให้การสูญเสียน้ำช้าลงและเซลล์ยังคงสภาพได้ดีหลังผ่านความร้อน (Nguyen et al., 2024) ทั้งนี้สูตรที่ 3 และ 4 ซึ่งมีส่วนผสมของ $MgSO_4$ และกลูโคส เสริมการคงตัวได้ดีกว่าสูตรที่ใช้เพียงแป้งหรือน้ำตาล เนื่องจากแร่ธาตุ Mg^{2+} มีบทบาทในการรักษาความคงตัวของผนังเซลล์และการทำงานของเอนไซม์ (2) สูตรที่ผสมโปรตีนและเกลือแร่ ได้แก่ สูตรที่ 5 และ 6 ประกอบด้วยโปรตีนจากแหล่งต่างๆ เช่น Peptone, Whey protein และนมผงขาดมันเนย ซึ่งช่วยเพิ่มความหนืดของสารแขวนลอยและทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเปลี่ยนสภาพของโปรตีนในเซลล์แบคทีเรีย (Zhao et al., 2022) การผสมร่วมกับ $MgSO_4$ และ Zinc sulphate ยังช่วยรักษาเสถียรภาพของเยื่อหุ้มและลดการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันภายในเซลล์ ส่งผลให้จุลินทรีย์สามารถคงชีวิตได้สูงภายหลังการทำแห้งและการเก็บรักษา และ (3) สูตรที่ผสมสารเคลือบและโปรตีนเชิงซ้อน ได้แก่ สูตรที่ 7 และ 8 มีส่วนผสมของ CMC, Maltodextrin, Gelatin และโปรตีนจากนมและถั่วเหลือง ซึ่งเป็นกลุ่มสารที่มีคุณสมบัติสร้างโครงสร้างฟิล์มและกักเก็บความชื้นได้ดี CMC ทำหน้าที่เป็นโพลิเมอร์ธรรมชาติช่วยเคลือบ

ผิวเซลล์ ป้องกันการแตกตัวระหว่างการอบแห้ง ส่วนเจลาตินและโปรตีนทำหน้าที่เป็นสารกันกระแทก ช่วยคงรูปร่างและลดความเครียดของเซลล์ (Park and Lee, 2022) ทั้งนี้งานวิจัยหลายฉบับรายงานว่าสูตรที่ผสม CMC และ Maltodextrin ร่วมกับโปรตีนจากถั่วเหลืองให้ประสิทธิภาพการคงชีวิตของเซลล์ *Bacillus* และ *Xanthomonas* สูงกว่า 10^8 cfu/g หลังการอบแห้ง (Wu et al., 2023) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.6

ตารางที่ 4.3.6 สูตรวัสดุรองรับเพื่อเพิ่มการคงตัวและอัตราการรอดชีวิตของเซลล์สำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด

สูตร	ส่วนประกอบ
1	แป้งข้าวเจ้า 89 g, น้ำมันถั่วเหลือง 1 ml และ ซูโครส 10g (สูตรเดิม)
2	Corn Starch 200 g และ Talcum 100 g
3	Maltodextrin 180 g, $MgSO_4$ 10 g, Glucose 10 g และแป้งมันสำปะหลัง 100 g
4	Maltodextrin 200 g, $MgSO_4$ 50 g และ Glucose 50 g
5	แป้งมันสำปะหลัง 100 g, peptone 200 g, Whey protein 10 g, Talcum 5 g และ Zinc sulphate 10 g
6	แป้งมันสำปะหลัง 100 g, Sucrose 10 g, นมผงขาดมันเนย 10 g และ $MgSO_4$ 5 g
7	CMC 50 g, Maltodextrin 100 g, Gelatin 5 g, Whey protein 100 g และ แป้งมันสำปะหลัง 50 g
8	CMC 50 g, Maltodextrin 100 g, Gelatin 5 g, Soy protein 100 g และ แป้งมันสำปะหลัง 50 g

การผลิตผงชีวภัณฑ์จากแบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลท B18 ด้วยวิธีอบลมร้อน 8 สูตร พบว่า ผลผลิตของผงชีวภัณฑ์ทุกสูตรมีค่า 100 กรัม/ปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์ แสดงให้เห็นว่ากระบวนการอบแห้งสามารถเปลี่ยนสารแขวนลอยจุลินทรีย์เป็นผงชีวภัณฑ์ได้อย่างสมบูรณ์ทุกสูตรวัสดุรองรับ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณา “คุณภาพชีวภาพ” และ “ต้นทุนการผลิต” พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในเชิงปฏิบัติ

ผลการทดลองพบว่าสูตรที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย Maltodextrin (200 g), $MgSO_4$ (50 g) และ Glucose (50 g) ให้ปริมาณเชื้อสูงที่สุดที่ 5.64×10^{10} cfu/ml หลังการทำแห้ง รองลงมาคือสูตรที่ 6 (1.98×10^{10} cfu/ml) และสูตรที่ 2 (5.10×10^{9} cfu/ml) ซึ่งมีค่าความชื้นของผงชีวภัณฑ์อยู่ระหว่าง 10-12% ถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาเชื้อมีชีวิต โดยไม่ก่อให้เกิดการเสื่อมสภาพของเซลล์หรือการปนเปื้อนระหว่างการเก็บ (Nguyen et al., 2024) ในขณะที่สูตรที่มีองค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า (สูตรที่ 1) และแป้งมันสำปะหลังร่วมกับโปรตีน (สูตรที่ 5-8) ให้ปริมาณเชื้อต่ำกว่า 10^9 cfu/ml แสดงถึงประสิทธิภาพการคงสภาพของจุลินทรีย์ที่ต่ำกว่า ซึ่งอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของสารพอลิแซ็กคาไรด์ในแป้งที่ไม่สามารถสร้างเมทริกซ์ห่อหุ้มเซลล์ได้แน่นหนาเท่ากับมอลโทเดกซ์ทรินหรือกลูโคส (Wu et al., 2023)

ด้านต้นทุนการผลิต พบว่า สูตรที่ 4 และสูตรที่ 6 แม้มีค่าวัสดุรองรับสูง (90 และ 85 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ) แต่ให้ปริมาณเชื้อมีชีวิตสูงกว่าสูตรอื่นหลายเท่าตัว ส่งผลให้ต้นทุนต่อหน่วยชีวภาพ (cfu/บาท) ต่ำที่สุดเมื่อเทียบเชิงประสิทธิภาพทางเศรษฐศาสตร์ โดยให้ผลผลิตเท่ากันทุกสูตร (100 กรัม/ปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์) แสดงว่าสูตรทั้งสองมีศักยภาพสูงสุดในการใช้เป็นวัสดุรองรับในกระบวนการอบแห้ง

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Park and Lee (2022) และ Patel et al. (2023) ซึ่งระบุว่า การผสมสารให้ความคงตัวประเภทคาร์โบไฮเดรต (เช่น Maltodextrin และ Glucose) ร่วมกับเกลือแร่ (เช่น $MgSO_4$) สามารถช่วยรักษาโครงสร้างเยื่อหุ้มเซลล์ของแบคทีเรีย *Bacillus* และ *Xanthomonas* ได้อย่างมีประสิทธิภาพในระหว่างการทำแห้งแบบอบลมร้อน โดยช่วยลดการสูญเสียโปรตีนภายในและป้องกันการรั่วของเอนไซม์ที่สำคัญต่อการมีชีวิต

โดยสรุป สูตรวัสดุรองรับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตผงชีวภัณฑ์ด้วยวิธีอบลมร้อน คือ สูตรที่ 4 (Maltodextrin ผสม $MgSO_4$ ผสม Glucose) ซึ่งให้ทั้งปริมาณเชื้อสูง ความชื้นระดับปลอดภัย และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ จึงถือเป็นสูตรต้นแบบที่เหมาะสมสำหรับการพัฒนาไปสู่การผลิตระดับกึ่งอุตสาหกรรม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.7

ตารางที่ 4.3.7 ผลการเปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบอบลมร้อน

สูตร	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ความชื้น (%)	ผลผลิต (กรัม/ปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์)	ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม)[2/]
1	$1.04x10^8$ c	11	100	36.00
2	$5.10x10^9$ b	12	100	50.00
3	$2.22x10^7$ d	10	100	55.00
4	**$5.64x10^{10}$ a**	**11**	**100**	**90.00**
5	$3.41x10^8$ c	12	100	60.00
6	**$1.98x10^{10}$ a**	**11**	**100**	**85.00**
7	$4.26x10^8$ c	10	100	65.00
8	$3.98x10^8$ c	12	100	67.00
CV (%)	0.33	-	-	-
$LSD_{0.05}$	3.26	-	-	-

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสูตรวัสดุรองรับ 8 สูตร ด้วยวิธีอบลมร้อน พบว่าสูตรส่วนใหญ่มีลักษณะสีขาวถึงขาวครีม แสดงถึงความบริสุทธิ์ของส่วนผสมและการไม่เกิดการไหม้หรือเปลี่ยนสีจากความร้อนระหว่างกระบวนการอบ ทั้งนี้สูตรที่ 4 และ 7 มีสีขาวครีม ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบของมอลโทเดกซ์ทรินและโปรตีนที่อาจเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด บางส่วนระหว่างการทำแห้ง ส่งผลให้เกิดสีครีมอ่อนโดยไม่กระทบต่อคุณสมบัติการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ (Zhao et al., 2022)

ด้านความสามารถในการละลายน้ำ พบว่าสูตรที่ 1-3 มีค่าระดับการละลายน้ำสูงสุด (ระดับ 4) สื่อถึงความเข้ากันได้ของคาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อน เช่น แป้งข้าวเจ้า กลูโคส และมอลโทเดกซ์ทริน ซึ่งมีโครงสร้างที่สามารถกระจายตัวได้ดีในน้ำ ขณะที่สูตรที่ 4-8 มีระดับการละลายน้ำอยู่ระดับ 3 ซึ่งยังอยู่ในเกณฑ์ที่ดีและเพียงพอต่อการนำไปใช้ละลายน้ำก่อนพ่นในภาคสนาม อย่างไรก็ตามการลดลงของค่าการละลายน้ำในบางสูตรอาจเกิดจากการเติมโปรตีนหรือเกลือแร่ เช่น whey protein หรือ $MgSO_4$ ซึ่งมีแนวโน้มทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้น (Wu et al., 2023)

ในส่วนของลักษณะการเกิดตะกอน พบว่าค่าระดับอยู่ระหว่าง 2-3 โดยสูตรที่มีค่าต่ำ (สูตรที่ 4, 5 และ 7) แสดงถึงความคงตัวของสารแขวนลอยที่ดีกว่า ซึ่งมีความสัมพันธ์กับการใช้สารช่วยคงสภาพ เช่น CMC Maltodextrin และ Gelatin ที่ช่วยลดการตกตะกอนของผงจุลินทรีย์ในสารละลาย (Park and Lee, 2022) สำหรับค่า pH ของสารละลายชีวภัณฑ์หลังละลายน้ำ อยู่ในช่วง 6.45-7.80 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการคงชีวิตของแบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* เนื่องจากเป็นค่ากลางถึงด่างอ่อน (Nguyen et al., 2024) โดยสูตรที่มีค่า pH สูงกว่า 7 เช่น สูตรที่ 6 และ 8 มีแนวโน้มเพิ่มความคงตัวของสปอร์ระหว่างการเก็บรักษา เนื่องจากช่วยลดการเสื่อมสภาพของโปรตีนภายในเซลล์ (Liu et al., 2023)

โดยสรุป สูตรวัสดุรองรับที่มีความเหมาะสมทั้งด้านคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีคือ สูตรที่ 4 และสูตรที่ 7 ซึ่งให้สมดุลระหว่างความสามารถในการละลายน้ำ การคงตัวของสารแขวนลอย และค่า pH ที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ส่งผลให้มีศักยภาพสูงต่อการพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบสำหรับผลิตผงชีวภัณฑ์ระดับอุตสาหกรรม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.8

ตารางที่ 4.3.8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบอบลมร้อน

สูตร	สี	ความสามารถในการละลายน้ำ (ระดับ)	ลักษณะการเกิดตะกอน (ระดับ)	ค่า pH
1	ขาว	4	3	7.50
2	ขาว	4	3	6.45
3	ขาว	4	3	6.80
4	ขาวครีม	3	2	7.40
5	ขาว	3	2	6.90
6	ขาว	3	3	7.80

สูตร	สี	ความสามารถในการละลายน้ำ (ระดับ)	ลักษณะการเกิดตะกอน (ระดับ)	ค่า pH
7	ขาวครีม	3	2	7.35
8	ขาว	3	3	7.58

การเปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับ 8 สูตร ด้วยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของความสามารถในการคงชีวิตของเซลล์จุลินทรีย์ระหว่างสูตรต่างๆ ซึ่งมีความเชื่อมโยงระหว่างส่วนประกอบในวัสดุรองรับกับเสถียรภาพของเซลล์ภายใต้ภาวะความร้อนสูงระหว่างกระบวนการผลิต

ผลการทดลองพบว่า สูตรที่ 5 ซึ่งประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง 100 g, Peptone 200 g, Whey Protein 10 g, Talcum 5 g และ Zinc sulphate 10 g ให้ปริมาณเชื้อสูงสุดที่ 8.16×10^{9} cfu/ml และมีความชื้นของผงชีวภัณฑ์อยู่ในเกณฑ์เหมาะสม (9%) ข้อมูลพบว่าการผสมโปรตีนและเกลือแร่ร่วมกับคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนช่วยเพิ่มความคงตัวของเซลล์จุลินทรีย์ระหว่างการพ่นฝอย เนื่องจากโปรตีน เช่น whey protein และ peptone ทำหน้าที่เป็นสารกันกระแทกที่ช่วยลดการเปลี่ยนสภาพของโปรตีนภายในเซลล์และป้องกันการแตกรั่วของเยื่อหุ้มเซลล์เมื่อสัมผัสกับอุณหภูมิสูง (Zhao et al., 2022; Nguyen et al., 2024) ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังมีคุณสมบัติเป็นโครงสร้างห่อหุ้ม ช่วยกักเก็บความชื้นและลดการสูญเสียน้ำในระหว่างการทำแห้ง อย่างไรก็ตามสูตรดังกล่าวมีต้นทุนค่าวัสดุสูงสุด (3,251.38 บาท/กิโลกรัม) ซึ่งอาจไม่เหมาะสมต่อการผลิตในเชิงอุตสาหกรรม หากพิจารณาเชิงเศรษฐศาสตร์ จำเป็นต้องหาทางปรับลดสัดส่วนโปรตีนหรือแทนที่บางชนิดด้วยสารให้ความคงตัวราคาต่ำ เช่น maltodextrin หรือ whey permeate ซึ่งมีรายงานว่าสามารถให้ผลใกล้เคียงกันในด้านการคงชีวิตของจุลินทรีย์ (Park and Lee, 2022) นอกจากนี้สูตรที่ 2 (ปริมาณเชื้อ 2.30×10^{8} cfu/ml) ซึ่งให้ผลต่ำกว่าสูตรที่ 5 แต่มีต้นทุนต่ำมาก (50 บาท/กิโลกรัม) และมีผลผลิตสูง (73.08 กรัมต่อปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์) ถือเป็นสูตรที่มีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐกิจมากที่สุดเมื่อพิจารณาร่วมกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ขณะที่สูตรอื่น โดยเฉพาะสูตรที่ 3, 4, 6, 7 และ 8 ให้ปริมาณเชื้อหลังพ่นฝอยต่ำกว่า 10^{7} cfu/ml แสดงถึงความเสียหายของเซลล์จากอุณหภูมิและแรงเฉือนสูงระหว่างการพ่นซึ่งอาจเกิดจากขาดสารเคลือบหรือสารกันความร้อนที่เพียงพอ (Wu et al., 2023)

โดยภาพรวม การใช้โปรตีนควบคู่กับคาร์โบไฮเดรตและเกลือแร่ในสูตรวัสดุรองรับช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ได้ดีกว่าการใช้สารเดี่ยว ทั้งนี้การเลือกสูตรที่เหมาะสมควรพิจารณาทั้งประสิทธิภาพทางชีวภาพและต้นทุนการผลิต เพื่อให้ได้ชีวภัณฑ์ที่มีคุณภาพสูงและสามารถผลิตได้ระดับอุตสาหกรรม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.9 และภาพที่ 4.3.6

ตารางที่ 4.3.9 ผลการเปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบพ่นฝอย

สูตร	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ความชื้น (%)	ผลผลิต (กรัม/ปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์)	ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม)[2/]
1	$1.04x10^8$ b	9	66.65	149.00
2	**$2.30x10^8$ b**	**8**	**73.08**	**50.00**
3	$6.11x10^6$ c	9	60.70	580.00
4	$1.25x10^4$ e	10	52.80	833.33
5	**$8.16x10^9$ a**	**9**	**80.50**	**3251.38**
6	$1.56x10^5$ d	9	74.11	152.80
7	$2.34x10^6$ c	8	79.50	434.43
8	$1.56x10^6$ c	9	75.39	476.40
CV (%)	0.20	-	-	-
$LSD_{0.05}$	3.26	-	-	-

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ภาพที่ 4.3.6 ลักษณะต้นแบบชีวภัณฑ์จากแบคทีเรียไอโซเลท B18 หลังการผลิต

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุรองรับ 8 สูตร ด้วยวิธีทำแห้งแบบพ่นฝอย แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณสมบัติพื้นฐานระหว่างสูตรที่มีส่วนประกอบต่างกัน โดยเฉพาะด้านการละลายน้ำ การเกิดตะกอน และค่า pH ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการนำไปใช้ในรูปแบบผลิตภัณฑ์ชีวภัณฑ์ผง

ด้านลักษณะทางกายภาพของผงชีวภัณฑ์ พบว่าสูตรส่วนใหญ่มีสีขาวสะอาด แสดงถึงการคงสภาพของส่วนผสมระหว่างกระบวนการพ่นฝอยโดยไม่มีการไหม้หรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโปรตีน ยกเว้นสูตรที่ 5 ที่มีสีขาวครีม ซึ่งมีส่วนผสมของโปรตีน (Peptone และ Whey protein) และเกลือแร่ (Zinc sulphate) ที่อาจเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด ภายใต้อุณหภูมิสูงของกระบวนการพ่นฝอย (Zhao et al., 2022)

สำหรับความสามารถในการละลายน้ำ พบว่าส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระดับต่ำ (ระดับ 1-2) โดยเฉพาะสูตรที่ 1-4 และ 7-8 ซึ่งละลายน้ำได้ช้า อาจเนื่องจากอนุภาคผงที่ได้จากการพ่นฝอยมีลักษณะผิวเรียบแน่นและขนาดเล็ก ทำให้การซึมผ่านของน้ำลดลง (Nguyen et al., 2024) ในขณะที่สูตรที่ 6 มีค่าการละลายน้ำสูงที่สุด (ระดับ 3) ซึ่งเป็นสูตรที่มีองค์ประกอบของ maltodextrin และ gelatin ทำให้โครงสร้างผงมีความพรุนสูงและช่วยเพิ่มการกระจายน้ำได้ดีกว่า ทั้งยังช่วยลดการจับตัวเป็นก้อนเมื่อสัมผัสความชื้นในอากาศ ส่วนลักษณะการเกิดตะกอน พบว่าสูตรที่ 1, 2, 5 และ 6 มีค่าระดับการเกิดตะกอนต่ำ (ระดับ 1) แสดงถึงความคงตัวของสารแขวนลอยสูง ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปใช้ผสมในสารละลายก่อนพ่นพืช เนื่องจากสามารถกระจายตัวได้สม่ำเสมอและไม่ตกตะกอนรวดเร็ว ขณะที่สูตรที่ 3 และ 8 มีค่าการเกิดตะกอนสูง (ระดับ 3-4) อาจเกิดจากการขาดสารเพิ่มความหนืดหรือสารจับประจุที่ช่วยรักษาการกระจายตัวของอนุภาค เช่น CMC หรือ Gum arabic (Park and Lee, 2022) ในส่วนของค่า pH ของผงชีวภัณฑ์เมื่อทำละลาย พบว่าอยู่ช่วง 6.5-7.8 ซึ่งถือว่าเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตและความคงตัวของแบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* โดยเฉพาะระหว่างการเก็บรักษาและการใช้ภาคสนาม (Wu et al., 2023) สูตรที่มีค่า pH สูงกว่า 7 เช่น สูตรที่ 3 และ 6 มีแนวโน้มช่วยคงเสถียรภาพของสปอร์และลดการเสื่อมสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ในสภาพแวดล้อมที่มีความร้อนหรือความชื้นสูง (Liu et al., 2023)

โดยสรุป สูตรที่ 6 มีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีที่สมดุลที่สุด กล่าวคือมีความสามารถในการละลายน้ำสูง การเกิดตะกอนต่ำ และค่า pH เหมาะสมต่อความมีชีวิตของจุลินทรีย์ จึงเหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นสูตรวัสดุรองรับต้นแบบในกระบวนการผลิตผงชีวภัณฑ์แบบพ่นฝอย ทั้งด้านคุณภาพการใช้งานและความคงตัวระยะยาวของผลิตภัณฑ์ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.3.10

ตารางที่ 4.3.10 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบพ่นฝอย

สูตร	สี	ความสามารถในการละลายน้ำ (ระดับ)	ลักษณะการเกิดตะกอน (ระดับ)	ค่า pH
1	ขาว	1	1	6.81
2	ขาว	1	1	6.54
3	ขาว	1	4	7.80

สูตร	สี	ความสามารถในการละลายน้ำ (ระดับ)	ลักษณะการเกิดตะกอน (ระดับ)	ค่า pH
4	ขาว	1	3	7.12
5	ขาวครีม	2	1	7.10
6	ขาว	3	1	7.56
7	ขาว	1	2	7.40
8	ขาว	1	3	7.42

4.4 การเพิ่มคุณภาพชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* ตระกูลกะหล่ำด้วยเทคโนโลยีปกป้องเซลล์จุลินทรีย์จากความร้อน

4.4.1 คัดเลือกและผลิตตำรับต้นแบบผงชีวภัณฑ์สูตรใหม่

ดำเนินการเตรียมหัวเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลท B6 ที่มีประสิทธิภาพยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคพืชด้วยวิธี Dual culture วางแผนการทดลองแบบ CRD จำนวน 3 ซ้ำ และคัดเลือกสูตรอาหารเหลวที่เหมาะสมต่อการเจริญของเชื้อระยะ stationary phase โดยวัดค่า OD จำนวนเซลล์ (spores/cells/ml) และ cfu/ml จากนั้นศึกษาผลของสารปกป้องเซลล์ (เช่น Maltodextrin, CMC, Gelatin, Chitosan ฯลฯ) ต่อการรอดชีวิตของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะการทำแห้ง และเลือกเทคนิคการทำแห้งที่เหมาะสม ได้แก่ อบลมร้อนและพ่นฝอย เพื่อผลิตผงชีวภัณฑ์โดยเปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับ 7 กรรมวิธี จากนั้นวัดปริมาณเชื้อ ความชื้น ผลผลิต และต้นทุนการผลิตระดับห้องปฏิบัติการ ผงต้นแบบชีวภัณฑ์ที่ได้อย่างน้อย 15 ตำรับ จะถูกนำมาทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราสาเหตุโรคพืชสภาพห้องปฏิบัติการ ด้วยวิธี Dual culture และศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมี เช่น สี ลักษณะผง ค่าความเป็นกรดด่าง การละลายน้ำ และการเกิดตะกอน ตามเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อคัดเลือกสูตรที่มีความคงตัว ละลายน้ำดี และเหมาะสมต่อการนำไปใช้ภาคสนามต่อไป

ผลการเก็บตัวอย่างพืชตระกูลกะหล่ำที่มีอาการโรคขอบใบไหม้จากพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่แฮ จ.เชียงใหม่ และโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงห้วยก้างปลา จ.เชียงราย เพื่อแยกเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรค *Xanthomonas campestris* จากนั้นตรวจสอบเอกลักษณ์ของเชื้อด้วยการสังเกตลักษณะเฉพาะโคโลนี และทดสอบความสามารถในการก่อโรค (pathogenicity test) โดยใช้หลักเกณฑ์ Koch's postulates มีขั้นตอนดังนี้ (1) นำเชื้อแบคทีเรียที่แยกได้ไปทดสอบการก่อโรคบนใบพืชอ่อนที่มีสุขภาพดีในสกุลเดียวกันภายใต้สภาวะควบคุม (2) สังเกตการเกิดอาการโรคขอบใบไหม้ที่มีลักษณะสอดคล้องกับอาการที่พบตามธรรมชาติ (3) แยกเชื้อซ้ำจากพืชที่เกิดอาการหลังการทดสอบ และ (4) ตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของเชื้อโดยเปรียบเทียบกับเชื้อที่แยกได้ขั้นต้น เพื่อยืนยันว่าเป็นเชื้อชนิดเดียวกัน ผลทดสอบพบว่าเชื้อแบคทีเรีย *X. campestris* ทั้ง 4 ไอโซเลท ได้แก่ MHL1, MHL2, HKP1 และ HKP2 ที่แยกได้สามารถก่ออาการโรคขอบใบไหม้บนพืชอาศัยจริง โดยมีระดับความรุนแรงของโรคแตกต่างกันไปตามแต่ละไอโซเลท ทั้งนี้ได้คัดเลือกเชื้อที่มีความรุนสูงสุด (ไอโซเลท MHL2) เป็นเชื้อมาตรฐานสำหรับการทดสอบประสิทธิภาพชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคในขั้นตอนต่อไป

ผลทดลองแสดงให้เห็นว่า สูตรอาหารที่ใช้กากน้ำตาลและถั่วเหลืองเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนมีผลต่อการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ตลอดระยะการเพาะเลี้ยง 1-3 วัน ข้อมูลพบว่าจำนวนเชื้อแบคทีเรียปฏิปักษ์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนจากระดับ 10^8 cfu/ml ในวันแรก เป็นระดับ 10^{11} cfu/ml ภายใน 3 วัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเจริญเติบโตที่รวดเร็วและการปรับตัวที่ดีของเชื้อในสภาพแวดล้อมที่มีสารอาหารเพียงพอ เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งอาหาร พบว่าสูตรถั่วเหลืองให้จำนวนจุลินทรีย์สูงกว่ากากน้ำตาลเล็กน้อยของทุกช่วงเวลา โดยเฉพาะวันที่ 3 มีค่าประมาณ 6.8×10^{11} cfu/ml ขณะที่สูตรกากน้ำตาล 5.2×10^{11} cfu/ml แสดงให้เห็นว่าแหล่งไนโตรเจนเชิงซับซ้อนจากโปรตีนของถั่วเหลืองอาจเอื้อต่อการสังเคราะห์กรดอะมิโนและเอนไซม์ที่จำเป็นต่อการแบ่งเซลล์ของจุลินทรีย์มากกว่า (Bai et al., 2021; Liang et al., 2023) ในขณะที่กากน้ำตาลซึ่งมีน้ำตาลเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อนเป็นองค์ประกอบหลัก อาจกระตุ้นการเจริญระยะต้นได้ดี แต่ขาดองค์ประกอบไนโตรเจนที่เพียงพอระยะยาว (Zhang et al., 2022) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาต้นทุนการผลิต พบว่าสูตรกากน้ำตาลมีต้นทุนค่าสาร 2.47 บาท/ลิตร ต่ำกว่าสูตรถั่วเหลืองที่มีต้นทุน 14.15 บาท/ลิตร โดยจำนวนจุลินทรีย์ที่ได้มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งชี้ถึงศักยภาพการใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนราคาประหยัดสำหรับการผลิตหัวเชื้อระดับห้องปฏิบัติการ ผลวิจัยสอดคล้องกับรายงานของ Mekonnen et al. (2021) ที่พบว่าการใช้กากน้ำตาลร่วมกับแหล่งไนโตรเจนในสัดส่วนที่เหมาะสมสามารถให้ผลผลิตจุลินทรีย์ระดับสูงสามารถลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุป ข้อมูลแสดงให้เห็นว่ากากน้ำตาลและถั่วเหลืองสามารถใช้เป็นสูตรอาหารสำหรับการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่กากน้ำตาลมีข้อได้เปรียบด้านเศรษฐศาสตร์การผลิต ในขณะที่ถั่วเหลืองให้ผลผลิตจุลินทรีย์สูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นสูตรอาหาร ระดับกึ่งอุตสาหกรรมที่เน้นประสิทธิภาพมากกว่าต้นทุน ทั้งนี้ได้คัดเลือกอาหารเหลวสูตรกากน้ำตาลไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไป รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.4.1 ปริมาณจุลินทรีย์และต้นทุนของสูตรอาหารสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ

สูตรอาหาร	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ต้นทุนค่าสาร (บาท/ลิตร)[2/]
	1 วัน	2 วัน	3 วัน	
กากน้ำตาล	2.3×10^8 a	1.5×10^9 ab	5.2×10^{11} a	2.47
ถั่วเหลือง	2.5×10^8 a	3.8×10^9 a	6.8×10^{11} a	14.15
CV (%)	1.24	1.36	1.25	1.69
$LSD_{0.05}$	1.83	1.95	1.11	1.90

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ผลการคัดเลือกสารปกป้องเซลล์ (Protective agents) สำหรับการพัฒนาสูตรชีวภัณฑ์ มีพื้นฐานจากหลักจุลชีววิทยาประยุกต์และเทคโนโลยีการคงสภาพเซลล์ โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของเซลล์ระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษา สารที่ใช้สามารถจำแนกเป็น 4 กลุ่มหลัก ได้แก่ (1) พอลิแซ็กคาไรด์และสารสร้างเจล (2) โปรตีน (3) คาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยวและเชิงซ้อน และ (4) เกลือแร่หรือแหล่งไนโตรเจน ซึ่งแต่ละกลุ่มมีบทบาทเฉพาะในการคงสภาพและเสริมความทนทานของเซลล์

พอลิแซ็กคาไรด์ เช่น CMC, Gum arabic, Chitosan และ Corn starch ทำหน้าที่สร้างเมทริกซ์เคลือบเซลล์ ช่วยลดการสูญเสียน้ำและป้องกันความเสียหายของเยื่อหุ้ม (Bhatia et al., 2021)

โปรตีน เช่น Whey protein, Soy protein และ Gelatin ทำหน้าที่เป็นสารชีวปกป้อง (Bioprotectant) ช่วยรักษาโครงสร้างของเยื่อหุ้มและเอนไซม์ในระหว่างการทำแห้งและการรีไฮเดรต (Li et al., 2022)

คาร์โบไฮเดรต เช่น D-glucose และ Maltodextrin ช่วยเป็นแหล่งพลังงานและเพิ่มความหนืดของสารละลาย เพื่อลดการสูญเสียน้ำและความเครียดของเซลล์ (Liang et al., 2023)

เกลือแร่และไนโตรเจน เช่น $MgSO_4$, $Ca(NO_3)_2$ และ Liquid urea ช่วยปรับสมดุลออสโมติกและคงสภาพเยื่อหุ้มผ่านพันธะกับกลุ่มฟอสเฟตของ Phospholipid (Wang et al., 2021)

การผสมของสารแต่ละกลุ่มตามสูตรทั้ง 21 ชุด สอดคล้องกับแนวคิดการสร้างสมดุลระหว่างการคงตัวทางกายภาพ และการปกป้องทางชีวเคมีของเซลล์ เพื่อยืดอายุการอยู่รอดของแบคทีเรียปฏิปักษ์ ระหว่างกระบวนการผลิตและเก็บรักษา รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.2

ตารางที่ 4.4.2 ส่วนประกอบและต้นทุนค่าสารของสูตรปกป้องเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิตสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ

สูตร	ส่วนประกอบของสูตรสารปกป้องเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์ เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิต ปริมาตร 500 ml	ต้นทุน ค่าสาร (บาท)[1/]
1	CMC 0.2 g ผสม Gum Arabic 0.2 g ผสม $MgSO_4$ 0.2 g ผสม Whey protein 0.2 g	1.12
2	D-glucose 0.2 g ผสม Soy protein 0.2 g ผสม Chitosan 0.2 g ผสม Corn starch 0.2 g	0.81
3	Liquid urea 0.5 ml ผสม Soy protein 0.5 g ผสม Maltodextrin 0.5 g	0.97
4	Glucose 0.2 g ผสม $MgSO_4$ 2 g ผสม Gum arabic 0.5 g ผสม Gelatin 1 g ผสม Maltodextrin 1g	4.13
5	CMC 0.2 g ผสม Gum arabic 0.5 g ผสม $MgSO_4$ 1 g ผสม Soy protein 0.5 g	1.62
6	D-glucose 0.5 g ผสม Whey protein 0.5 g ผสม Chitosan 0.5 g ผสม Corn starch 0.5 g	2.24
7	Glucose 0.5 g ผสม $MgSO_4$ 0.5 g ผสม Gelatin 0.2 g ผสม Corn starch 0.5 g	0.72
8	Whey protein 0.5 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ผสม CMC 0.2 g	1.00
9	Soy protein 0.5 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ผสม CMC 0.2 g	0.76

สูตร	ส่วนประกอบของสูตรสารปกป้องเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์ เพื่อเพิ่มอัตราการรอดชีวิต ปริมาตร 500 ml	ต้นทุน ค่าสาร (บาท)[1/]
10	Whey protein 0.25 g ผสม Soy protein 0.25 g ผสม $MgSO_4$ 0.25 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.25 g	1.17
11	Maltodextrin 0.2 g ผสม Glucose 0.1 g ผสม $MgSO_4$ 0.1 g ผสม Gelatin 0.1 g ผสม Corn starch 0.1 g	0.77
12	Whey protein 0.2 g ผสม $MgSO_4$ 0.5 g ผสม CMC 0.2 g	0.93
13	Soy protein 0.2 g ผสม $MgSO_4$ 0.5 g ผสม CMC 0.2 g	0.89
14	Liquid urea 0.5 g ผสม Whey protein 0.2 g ผสม Maltodextrin 0.2 g	0.41
15	CMC 0.2 g ผสม Gum arabic 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.1 g ผสม Soy protein 0.2 g	0.51
16	CMC 0.2 g ผสม Gum arabic 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g ผสม Whey protein 0.2 g	0.89
17	Gum arabic 0.2 g ผสม D-glucose 0.2 g ผสม Chitosan 0.2 g ผสม Corn starch 0.2 g	0.69
18	Glucose 0.3 g ผสม Nitrogen 0.3 g ผสม Soy protein 0.5 g ผสม Gelatin 0.3 g ผสม Corn starch 0.2 g	0.39
19	Gelatin 0.2 g ผสม Corn starch 0.1 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g	0.41
20	Gelatin 0.2 g ผสม Corn starch 0.1 g ผสม $MgSO_4$ 0.2 g	0.33
21	Maltodextrin 0.5 g ผสม Soy protein 0.2 g ผสม $MgSO_4$ 0.2 g ผสม $Ca(NO_3)_2$ 0.2 g	0.89

[1/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ผลทดลองแสดงให้เห็นว่าสูตรสารปกป้องเซลล์ 21 สูตร มีผลต่อความหนาแน่นเซลล์และความมีชีวิตของแบคทีเรียปฏิปักษ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยรวม ค่า OD (600 nm) และจำนวนเซลล์จาก Hemacytometer มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเลี้ยงจาก 48 ชั่วโมง เป็น 72 ชั่วโมง ซึ่งชี้ถึงการเพิ่มจำนวนของเซลล์ในสภาวะที่มีสารปกป้องที่เหมาะสม สูตรที่มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดคือสูตรที่ 18 (OD = 1.5-1.8) สอดคล้องกับจำนวนเซลล์ที่สูงจาก Hemacytometer (542-615 cell/ml) แสดงให้เห็นถึงการกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ดีระยะแรกของการเพาะเลี้ยง ในส่วนของ Serial dilution (cfu/ml) ซึ่งแสดงจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตจริง พบว่าสูตรที่ 11 และ 18 ให้ค่าจำนวนเชื้อสูงสุดทั้งที่ 48 และ 72 ชั่วโมง (8.0×10^{9}-6.8×10^{11} และ 9.0×10^{9}-6.7×10^{11} cfu/ml ตามลำดับ) และจัดอยู่กลุ่ม a ซึ่งสูงกว่าสูตรส่วนใหญ่อย่างมีนัยสำคัญ ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าสารปกป้องที่ประกอบด้วย โปรตีน (เช่น Whey หรือ Soy protein) ร่วมกับสารพอลิแซ็กคาไรด์ (เช่น Gelatin หรือ Maltodextrin) ช่วยคงความเสถียรของเยื่อหุ้มเซลล์และรักษาสมดุลออสโมติกได้ดี ทำให้จุลินทรีย์ยังคงเจริญและแบ่งตัวต่อเนื่อง (Li et al., 2022; Liang et al., 2023)

เมื่อพิจารณาค่าความทนความร้อน (Heating method) หรือตัวชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างเซลล์หลังผ่านความเครียด พบว่าสูตรที่ 11 และ 18 มีค่าการรอดชีวิตสูงสุด อยู่กลุ่ม A ทั้ง 2 เวลา ขณะที่สูตรที่ 20 ให้ค่าการรอดชีวิตระดับสูง โดยเฉพาะที่ 72 ชั่วโมง ซึ่งจัดอยู่กลุ่ม a แสดงถึงประสิทธิภาพของการใช้โปรตีน

เช่น Whey และ Gelatin ที่ช่วยลดการเสียรูปของโปรตีนของเยื่อหุ้มและเพิ่มการคงสภาพของเอนไซม์ภายในเซลล์ (Bhatia et al., 2021) ขณะที่สูตรที่มี $Ca(NO_3)_2$ และ $MgSO_4$ ในสัดส่วนเหมาะสม เช่น สูตรที่ 20 ยังช่วยเสริมเสถียรภาพของเยื่อหุ้มผ่านการสร้างพันธะกับกลุ่มฟอสเฟตของ Phospholipid (Wang et al., 2021) ทั้งนี้สูตรอื่น ส่วนใหญ่ให้ค่าการอยู่รอดระดับปานกลางถึงต่ำ โดยเฉพาะสูตรที่มี CMC หรือ Gum arabic ชนิดเดียว ซึ่งช่วยลดการสูญเสียน้ำระหว่างการอบแห้ง แต่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าเมื่อไม่มีสารชีวปกป้อง (Bioprotectant) ร่วมอยู่ (Li et al., 2022) ดังนั้นการผสมสารปกป้องหลายชนิดในสัดส่วนที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยที่ช่วยเพิ่มอัตราการรอดชีวิตของแบคทีเรียภายใต้ความเครียดจากกระบวนการผลิต

โดยสรุป ผลทดลองยืนยันว่า สูตรที่ 11, 18 และ 20 เป็นกลุ่มสูตรที่ให้ผลเด่นทั้งด้านจำนวนเซลล์และความทนทานต่อความร้อน โดยแต่ละสูตรมีจุดเด่นเฉพาะดังนี้ *สูตรที่ 11* (Maltodextrin ผสม D-glucose ผสม $MgSO_4$ ผสม Gelatin ผสม Corn starch) ให้สมดุลของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเกลือแร่ ช่วยคงสภาพเซลล์ได้ดี มีจำนวนเชื้อและความทนความร้อนอยู่ระดับสูงสุดกลุ่มหนึ่ง (กลุ่ม a ทั้ง 2 เวลา) ด้วยต้นทุนต่ำ 11.55 บาท/ลิตร เหมาะสำหรับการผลิตระดับห้องปฏิบัติการ *สูตรที่ 18* (D-glucose ผสม Urea ผสม Soy protein ผสม Gelatin ผสม Corn starch) มีแหล่งคาร์บอน โปรตีน และไนโตรเจนที่ช่วยคงเยื่อหุ้มเซลล์และลดความเสียหายจากความร้อน ให้จำนวนเชื้อระดับ 10^9-10^{11} cfu/ml และทนความร้อนได้ดี (กลุ่ม a) ต้นทุน 20.21 บาท/ลิตร เหมาะกับการพัฒนาระดับอุตสาหกรรม และ *สูตรที่ 20* (Gelatin ผสม Corn starch ผสม $MgSO_4$) เป็นสูตรที่มีต้นทุนต่ำสุด 9.53 บาท/ลิตร และให้ค่าความทนความร้อนระดับสูง โดยเฉพาะที่ 72 ชั่วโมง ซึ่งจัดอยู่กลุ่ม a จัดเป็นสูตรที่คุ้มค่าเชิงต้นทุน จากข้อมูลข้างต้น จึงคัดเลือกสูตรที่ 18 Glucose 0.3 g ผสม Nitrogen 0.3 g ผสม Soy protein 0.5 g ผสม Gelatin 0.3 g ผสม Corn starch 0.2 g ไปดำเนินการในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากมีความคงตัวและประสิทธิภาพทางชีวภาพสูงกว่าสูตร 11 อย่างชัดเจนทั้งด้านจำนวนเชื้อ ความทนร้อน และองค์ประกอบที่สนับสนุนความเสถียรของเซลล์ ทั้งนี้มีต้นทุนสูงกว่าเล็กน้อย รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.3

ตารางที่ 4.4.3 ปริมาณและความมีชีวิตของเซลล์แบคทีเรียปฏิปักษ์หลังเติมสารปกป้องเซลล์ที่เวลา 48 และ 72 ชั่วโมง สำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ

สูตร	OD (nm)	Hemacytometer (cell/ml)	Serial Dilution (cfu/ml)[1/]	Heating (cfu/ml)[1/]
1	1.2/1.3	340/513	5.15×10^8 b/6.85×10^{10} a	3.12×10^6 b/4.10×10^7 ab
2	1.1/1.3	412/535	5.32×10^8 b/6.85×10^9 b	3.13×10^6 b/3.98×10^7 b
3	1.0/1.2	395/481	4.42×10^9 ab/5.10×10^{10} ab	2.23×10^6 b/3.96×10^6 c
4	1.3/1.5	447/510	5.10×10^9 a/6.30×10^{10} a	1.35×10^6 b/1.50×10^7 bc
5	1.2/1.4	495/510	3.19×10^8 bc/4.80×10^{10} a	2.42×10^6 b/3.10×10^7 b
6	1.2/1.4	390/483	4.84×10^9 a/5.13×10^{10} ab	2.35×10^6 b/2.12×10^7 bc

สูตร	OD (nm)	Hemacytometer (cell/ml)	Serial Dilution (cfu/ml)[1/]	Heating (cfu/ml)[1/]
7	1.3/1.4	435/515	3.17×10^{8} bc/4.15×10^{9} bc	1.98×10^{6} b/2.89×10^{7} b
8	1.2/1.5	500/505	6.10×10^{8} b/7.10×10^{10} a	2.15×10^{5} c/2.0×10^{4} d
9	1.2/1.5	494/518	6.80×10^{8} b/7.2×10^{10} a	2.30×10^{5} c/2.0×10^{4} d
10	1.3/1.5	414/498	6.95×10^{8} b/7.80×10^{10} a	3.15×10^{6} b/4.19×10^{7} ab
11	1.3/1.6	540/596	8.0×10^{9} a/6.8×10^{11} a	4.0×10^{7} a/4.3×10^{8} a
12	1.4/1.5	543/575	5.48×10^{8} b/6.10×10^{9} b	3.96×10^{6} b/4.15×10^{6} c
13	1.4/1.5	495/592	3.95×10^{7} bc/5.15×10^{9} b	2.98×10^{6} b/4.22×10^{6} c
14	1.3/1.5	430/511	3.84×10^{8} bc/5.85×10^{9} b	1.95×10^{6} b/2.53×10^{7} b
15	1.3/1.4	443/513	4.45×10^{9} a/5.43×10^{10} ab	2.83×10^{5} c/3.5×10^{6} c
16	1.2/1.3	498/550	4.40×10^{9} ab/5.95×10^{11} a	2.42×10^{5} c/3.51×10^{6} c
17	1.4/1.5	490/587	3.85×10^{8} bc/5.12×10^{9} b	1.99×10^{6} b/2.50×10^{7} b
18	1.5/1.8	542/615	9.0×10^{9} a/6.7×10^{11} a	4.3×10^{7} a/4.5×10^{8} a
19	1.3/1.6	495/536	3.56×10^{8} bc/3.9×10^{9} bc	2.43×10^{6} b/3.10×10^{7} b
20	1.4/1.6	398/410	3.58×10^{8} bc/4.18×10^{9} b	1.95×10^{6} b/2.25×10^{8} a
21	1.3/1.6	396/451	4.90×10^{8} b/5.60×10^{9} b	2.84×10^{6} b/3.55×10^{7} ab
CV (%)	0.12/0.23	1.25/1.31	0.81/0.47	1.12/1.32
$LSD_{0.05}$	1.25/1.51	1.11/0.96	1.34/1.13	0.96/0.68

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการคัดเลือกสูตรวัสดุรองรับ ได้สูตรวัสดุรองรับที่เหมาะสม จำนวน 8 สูตร โดยพิจารณาจากองค์ประกอบหลักที่ช่วยส่งเสริมการยึดเกาะ การคงสภาพเซลล์ และคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุหลังการผสม ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความสามารถของการดำรงชีวิตและประสิทธิภาพของเชื้อในชีวภัณฑ์

สูตรที่ 1 ใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัสดุหลัก ผสมกับน้ำมันถั่วเหลืองและซูโครสเป็นสูตรพื้นฐานที่มีคุณสมบัติช่วยดูดซับความชื้นและกระจายเซลล์ได้สม่ำเสมอ เหมาะสำหรับใช้เป็นสูตรอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบกับสูตรพัฒนาใหม่

สูตรที่ 2 ประกอบด้วย Corn starch และ Talcum มีคุณสมบัติเป็นผงละเอียด ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการยึดเกาะของเซลล์และความคงตัวเชิงกายภาพ เหมาะสำหรับกระบวนการทำแห้งแบบผง

สูตรที่ 3 และ *สูตรที่ 4* ใช้ Maltodextrin และ Glucose ร่วมกับ $MgSO_4$ และแป้งมันสำปะหลัง เป็นสูตรที่เน้นการเสริมแหล่งพลังงานและเกลือแร่เพื่อคงความชื้นสมดุล และลดการเสียหายของเซลล์ระหว่างการอบแห้ง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการอยู่รอดของจุลินทรีย์ (Li et al., 2023)

สูตรที่ 5 ใช้แป้งมันสำปะหลังร่วมกับ Peptone, Whey protein, Talcum และ Zinc sulphate มีทั้งแหล่งคาร์บอน โปรตีน และแร่ธาตุที่ช่วยเสริมการฟื้นตัวของเซลล์หลังการเก็บรักษา (Bai et al., 2022)

สูตรที่ 6 ผสมแป้งมันสำปะหลัง Sucrose นมผงขาดมันเนย และ $MgSO_4$ เป็นสูตรที่ให้ความสมดุลด้านคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน ทำให้เนื้อวัสดุมีความเหนียวและยึดเกาะดี เหมาะต่อการห่อหุ้มเซลล์

สูตรที่ 7 และ *สูตรที่ 8* มีองค์ประกอบคล้ายกัน โดยใช้ CMC และ Maltodextrin เป็นโครงสร้างหลักร่วมกับ Gelatin และโปรตีน (Whey หรือ Soy protein) พร้อมแป้งมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มความหนืดและลดการสูญเสียน้ำระหว่างการอบแห้ง ซึ่งช่วยเพิ่มอัตราการอยู่รอดของแบคทีเรียระดับสูง (Chen et al., 2021)

โดยสรุป วัสดุรองรับทั้ง 8 สูตร ได้รับการคัดเลือกจากคุณสมบัติที่ผสานกันระหว่างการคงตัวทางกายภาพ ความสามารถในการดูดซับและห่อหุ้มเซลล์ และความเข้ากันได้กับสารปกป้องชีวภาพ เพื่อใช้ทดสอบหาความเหมาะสมในการดำเนินงานขั้นตอนต่อไป รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.4

ตารางที่ 4.4.4 สูตรวัสดุรองรับเพื่อเพิ่มการคงตัวและอัตราการรอดชีวิตของเซลล์สำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ

สูตร	ส่วนประกอบ
1	แป้งข้าวเจ้า 89 g, น้ำมันถั่วเหลือง 1 ml และซูโครส 10 g (สูตรเดิม)
2	Corn Starch 200 g และ Talcum 100 g
3	Maltodextrin 180 g, $MgSO_4$ 10 g, Glucose 10 g และ แป้งมันสำปะหลัง 100 g
4	Maltodextrin 200 g, $MgSO_4$ 50 g และ Glucose 50 g
5	แป้งมันสำปะหลัง 100 g, peptone 200 g, Whey protein 10 g, Talcum 5 g และ Zinc sulphate 10 g
6	แป้งมันสำปะหลัง 100 g, Sucrose 10 g, นมผงขาดมันเนย 10 g และ $MgSO_4$ 5 g
7	CMC 50 g, Maltodextrin 100 g, Gelatin 5 g, Whey protein 100 g และแป้งมันสำปะหลัง 50 g
8	CMC 50 g, Maltodextrin 100 g, Gelatin 5 g, Soy protein 100 g และแป้งมันสำปะหลัง 50 g

ผลทดสอบวัสดุรองรับ 8 สูตร และทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อน พบว่าปริมาณจุลินทรีย์มีชีวิตอยู่ในช่วง 2.0×10^8-4.52×10^{10} cfu/ml โดยสูตรที่ 4 และ 6 ให้ค่าจำนวนเชื้อสูงกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) อยู่กลุ่ม a ซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบของ Maltodextrin, Glucose และ $MgSO_4$ ที่ช่วยคงสภาพและส่งเสริมการเจริญของเซลล์ ขณะที่สูตรที่ 1 ซึ่งใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัสดุพื้นฐานให้ปริมาณเชื้อต่ำสุด (2.0×10^8 cfu/ml) จัดอยู่กลุ่ม e แสดงถึงประสิทธิภาพที่ด้อยกว่า

ข้อมูลแสดงว่าความชื้นของผงชีวภัณฑ์หลังการทำแห้งมีค่าเฉลี่ยอยู่ช่วง 10-12% ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาชีวภัณฑ์ (ไม่เกิน 12%) เพื่อป้องกันการสูญเสียความมีชีวิตและการเสื่อมสลายของสารชีวโมเลกุล (Bai et al., 2022; Li et al., 2023) โดยสูตรที่ 3 และ 7 มีค่าความชื้นต่ำสุด (10%) รองลงมาคือสูตรที่ 1, 4 และ 6 (11%) ส่วนสูตรที่ 2, 5 และ 8 มีค่าความชื้น 12% ซึ่งยังอยู่ในช่วงมาตรฐานที่ยอมรับได้ ทั้งนี้อาจมีความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเร็วกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่มีค่า

ความชื้นต่ำกว่า ในทิศทางเดียวกัน ผลผลิตของผงชีวภัณฑ์ทุกสูตรมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ที่ประมาณ 1,000 กรัมต่อปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร สูงกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำที่เหมาะสมต่อการผลิตระดับต้น (≥20 กรัม/100 มิลลิลิตร; Chen et al., 2021; Kumar et al., 2020) แสดงให้เห็นว่าทุกสูตรสามารถให้ผลผลิตเชิงปริมาณเพียงพอสำหรับการพัฒนาเป็นต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

เมื่อนำผลทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกัน พบว่าสูตรที่ 4 และ 6 เป็นสูตรที่มีความเหมาะสมมากที่สุดของกลุ่มทดลอง โดยให้ปริมาณเชื้อเฉลี่ย 10^{10} cfu/ml (กลุ่ม a) มีค่าความชื้นตรงเกณฑ์มาตรฐาน (11%) และให้ผลผลิตระดับสูงสอดคล้องกัน (ประมาณ 1,000 กรัม/100 มิลลิลิตร) อย่างไรก็ตามมีต้นทุนค่าสารค่อนข้างสูง (85-90 บาท/กิโลกรัม) แต่เมื่อพิจารณาควบคู่กับประสิทธิภาพทางชีวภาพและความคงตัวของผลิตภัณฑ์ พบว่ามีความคุ้มค่าทางเทคนิค และเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ระดับกึ่งอุตสาหกรรม จึงคัดเลือกสูตร 4 Maltodextrin 200 g, $MgSO_4$ 50 g และ Glucose 50 g ไปดำเนินการต่อในขั้นตอนต่อไป รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.5 และภาพที่ 4.4.1

ตารางที่ 4.4.5 ผลการเปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบอบลมร้อน

สูตร	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ความชื้น (%)	ผลผลิต (กรัม/ปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์)	ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม)[2/]
1	$2.0x10^8$ e	11	1,000	36.00
2	$4.0x10^9$ b	12	1,000	50.00
3	$3.10x10^8$ de	10	1,000	55.00
4	$4.52x10^{10}$ a	11	1,000	90.00
5	$2.36x10^9$ c	12	1,000	60.00
6	$2.10x10^{10}$ a	11	1,000	85.00
7	$4.0x10^8$ d	10	1,000	65.00
8	$4.0x10^8$ d	12	1,000	67.00
$LSD_{0.05}$	3.80	-	-	-
C.V.%	2.37	-	-	-

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ภาพที่ 4.4.1 ลักษณะของตู้อบลมร้อนที่ใช้ในการผลิตต้นแบบชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ และตัวอย่างต้นแบบชีวภัณฑ์ที่ได้

ผลประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุรองรับ 8 สูตร พบว่าสีของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นสีขาวถึงขาวครีม ซึ่งอยู่ระดับที่เหมาะสมต่อการผลิตชีวภัณฑ์ เนื่องจากแสดงถึงกระบวนการอบแห้งที่ไม่รุนแรงและไม่มีการไหม้ของส่วนผสมอินทรีย์ ทำให้ยังคงโครงสร้างและความมีชีวิตของจุลินทรีย์ได้ดี (Bai et al., 2022; Li et al., 2023) โดยสูตรที่ 4 และ 7 มีสีขาวครีมอ่อน ซึ่งอาจเกิดจากส่วนประกอบโปรตีน (Gelatin หรือ Soy protein) ที่ผ่านความร้อนจนเกิดปฏิกิริยา Maillard เล็กน้อย แต่ยังอยู่ระดับที่ยอมรับได้ทางอุตสาหกรรม

ความสามารถในการละลายน้ำ พบว่าทุกสูตรมีค่าระดับอยู่ช่วง 3-4 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีถึงดีมาก โดยเฉพาะสูตรที่ 1-3 ที่ให้ระดับ 4 แสดงถึงการละลายตัวได้รวดเร็วและสมบูรณ์ในน้ำ ภายในเวลาไม่เกิน 5 นาที ซึ่งสอดคล้องกับเกณฑ์มาตรฐานสำหรับชีวภัณฑ์ผงที่ควรมีค่าระดับ ≥3 เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับการพ่นหรือรดน้ำ (Chen et al., 2021) ส่วนสูตรที่มีค่าระดับ 3 เช่น สูตร 4-8 ยังคงละลายได้ดีและอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน เพียงแต่ต้องใช้เวลาในการกระจายตัวนานกว่าเล็กน้อยเนื่องจากมีส่วนประกอบของ Gelatin หรือ CMC ที่เพิ่มความหนืดของสารละลาย

ลักษณะการเกิดตะกอนอยู่ระดับ 2-3 โดยค่าระดับ 2 แสดงถึงการตกตะกอนน้อยและมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นลักษณะที่พึงประสงค์สำหรับชีวภัณฑ์ผงที่ต้องการให้จุลินทรีย์คงอยู่ในรูปสารแขวนลอย (Li et al., 2023) ส่วนสูตรที่ 4, 5 และ 7 มีค่าระดับ 2 แสดงถึงความเสถียรของการแขวนลอยสูง ขณะที่สูตรที่มีค่าระดับ 3 อาจเกิดจากการรวมตัวของโปรตีนบางส่วน เช่น Whey protein หรือ Soy protein แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของทุกสูตรอยู่ช่วง 6.5-7.9 ซึ่งเหมาะสมต่อการคงตัวและการเจริญของแบคทีเรียปฏิปักษ์ส่วนใหญ่ เช่น *Bacillus subtilis* ที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH ระหว่าง 6.0-8.0 (Kumar et al., 2020; Bai et al., 2022) ส่วนสูตรที่ 2 และ 5 มีค่า pH ต่ำกว่าเล็กน้อย (6.5-6.8) ช่วยลดความเสี่ยงของการปนเปื้อนเชื้อรา ขณะที่สูตรที่ 6 มีค่า pH 7.85 ใกล้ขอบบนของช่วงที่เหมาะสม แต่ยังไม่กระทบต่อความอยู่รอดของเซลล์

โดยสรุป การประเมินเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานอ้างอิง พบว่าคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตและการใช้งานชีวภัณฑ์ในแปลงปลูกพืช ได้แก่ สีขาว-ขาวครีม การละลายน้ำระดับ 4-5 การเกิดตะกอนระดับ 1-2 และค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5-7.5 ซึ่งเป็นช่วงที่ช่วยให้ชีวภัณฑ์ละลายและกระจายเชื้อได้ดี มีเสถียรภาพสูง และ

ไม่ส่งผลต่อความมีชีวิตของจุลินทรีย์ (Bai et al., 2022; Chen et al., 2021; Li et al., 2023) ข้อมูลจากผลทดลอง สูตรที่ 4, 5 และ 7 มีคุณสมบัติรวมใกล้เคียงกับช่วงมาตรฐานดังกล่าวมากที่สุด จึงถือว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในกระบวนการผลิตชีวภัณฑ์ระดับกึ่งอุตสาหกรรมและการใช้งานภาคสนาม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.6

ตารางที่ 4.4.6 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบอบลมร้อน

สูตร	สี	ความสามารถในการละลายน้ำ (ระดับ)	ลักษณะการเกิดตะกอน (ระดับ)	ค่า pH
1	ขาว	4	3	7.30
2	ขาว	4	3	6.50
3	ขาว	4	3	7.10
4	ขาวครีม	3	2	7.30
5	ขาว	3	2	6.88
6	ขาว	3	3	7.85
7	ขาวครีม	3	2	7.25
8	ขาว	3	3	7.50

ผลประเมินประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ที่ผลิตด้วยวิธีพ่นฝอย (Spray drying) ขนาด 5 ลิตร จากสูตรวัสดุรองรับ 8 สูตร โดยปรับสภาวะให้เหมาะสม ประกอบด้วย Inlet Temperature 180 °C, Gas Flow 100% และ Liquid Feed Rate 50% และบรรจุในถุงฟอยล์สีเงิน ข้อมูลพบว่าปริมาณจุลินทรีย์มีชีวิตหลังการผลิตมีค่าเฉลี่ยอยู่ช่วง 1.0×10^{4}-7.60×10^{9} cfu/ml โดยสูตรที่ 5 ให้ค่าปริมาณเชื้อสูงสุด (7.60×10^{9} cfu/ml) จัดอยู่กลุ่ม a แสดงให้เห็นถึงความสามารถของส่วนผสมที่มีองค์ประกอบของ Maltodextrin และ Protein ในการคงสภาพและป้องกันเซลล์จากความเสียหายระหว่างการพ่นฝอยได้ดี (Bai et al., 2022; Chen et al., 2021) ขณะที่สูตรที่ 4 ให้ปริมาณเชื้อต่ำสุด (1.0×10^{4} cfu/ml) ซึ่งอาจเนื่องจากขาดสารปกป้องเซลล์ที่ช่วยลดการสูญเสียความชื้นและการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ระหว่างการให้ความร้อนสูงในกระบวนการผลิต

ค่าความชื้นของชีวภัณฑ์หลังการพ่นฝอยอยู่ในช่วง 8.00-10.00% ซึ่งต่ำกว่าหรือใกล้เคียงเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมต่อการเก็บรักษาชีวภัณฑ์ (ควรไม่เกิน 12-15%; Li et al., 2023) ข้อมูลชี้ว่ากระบวนการพ่นฝอยสามารถลดความชื้นของผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสนับสนุนการยืดอายุการเก็บรักษาระยะกลางถึงยาว

ผลผลิตของผงชีวภัณฑ์มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 510-819 กรัมต่อปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร ซึ่งถือว่าสูงเมื่อเทียบกับมาตรฐานขั้นต่ำสำหรับการผลิตระดับกึ่งอุตสาหกรรม (≥20 กรัม/100 มิลลิลิตร; Kumar et al., 2020) โดยสูตรที่ 5 ให้ผลผลิตสูงสุด (819 กรัม) สอดคล้องกับปริมาณเชื้อที่สูงที่สุด (7.60×10^9 cfu/ml) ขณะที่สูตรที่ 4 ให้ผลผลิตต่ำสุด (510 กรัม) และมีปริมาณเชื้ออยู่ในระดับต่ำที่สุดเช่นกัน (1.0×10^4 cfu/ml) แสดงถึงความแตกต่างของประสิทธิภาพการทำแห้งและการคงตัวของเซลล์ระหว่างสูตร

เมื่อนำข้อมูลด้านต้นทุนมาพิจารณาร่วม พบว่าต้นทุนค่าสารมีความแตกต่างกันมากระหว่างสูตร โดยมีค่าอยู่ช่วง 50-3,251.38 บาท/กิโลกรัม โดยสูตรที่ 2 มีต้นทุนต่ำที่สุด (50 บาท/กิโลกรัม) ขณะที่สูตรที่ 5 ซึ่งให้ผลดีที่สุดด้านปริมาณเชื้อและผลผลิต มีต้นทุนสูงมาก (3,251.38 บาท/กิโลกรัม) จึงไม่เหมาะสมต่อการผลิตเชิงพาณิชย์ระยะเริ่มต้น แต่เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นสูตรต้นแบบสำหรับการปรับลดต้นทุนในขั้นต่อไป

โดยสรุป การพิจารณาองค์ประกอบทั้งหมดร่วมกัน พบว่าสูตรที่ 5 ให้ประสิทธิภาพทางชีวภาพสูงสุดด้านปริมาณเชื้อและผลผลิต แต่มีข้อจำกัดด้านต้นทุนสูง ขณะที่สูตรที่ 2 ให้ผลการผลิตระดับปานกลางแต่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากกว่า จึงถือเป็นสูตรที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จริงในแปลงปลูกพืช และอาจใช้เป็นสูตรพื้นฐานสำหรับการปรับปรุงสัดส่วนสารปกป้องเซลล์เพิ่มเติมเพื่อเพิ่มความคงตัว รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.7 และภาพที่ 4.4.2

ตารางที่ 4.4.7 ผลการเปรียบเทียบสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบพ่นฝอย

สูตร	ปริมาณเชื้อ (cfu/ml)[1/]	ความชื้น (%)	ผลผลิต (กรัม/ปริมาตรสารแขวนลอยจุลินทรีย์)	ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม)[2/]
1	$1.80\text{x}10^8$ b	9	650	149.00
2	$3.00\text{x}10^8$ b	8	711	50.00
3	$5.35\text{x}10^7$ c	9	651	580.00
4	$1.0\text{จ}\text{x}10^4$ f	10	510	833.33
5	$7.60\text{x}10^9$ a	9	819	3,251.38
6	$2.00\text{x}10^5$ e	9	752	152.80
7	$3.23\text{x}10^5$ e	8	745	434.43
8	$1.86\text{x}10^6$ d	9	744	476.40
$LSD_{0.05}$	2.10	-	-	-
C.V.%	1.36	-	-	-

[1/]คิดจากค่าเฉลี่ย 3 ซ้ำ และค่าที่ตามด้วยตัวอักษรเหมือนกันในสดมภ์เดียวกันแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเปรียบเทียบโดยวิธี Least Significant Difference ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

[2/]ต้นทุนเบื้องต้นคำนวณจากค่าสารเคมีที่ใช้จริงระดับห้องปฏิบัติการ ทั้งนี้ยังไม่รวมค่าใช้จ่ายด้านแรงงานและอุปกรณ์

ภาพที่ 4.4.2 ลักษณะเครื่องพ่นฝอย (ซ้าย) เครื่องวัดความชื้น (กลาง) ที่ใช้ในการทดผลิต และวิธีนับจำนวนเชื้อแบคทีเรียบนอาหารเลี้ยงเชื้อ

ผลประเมินคุณสมบัติของชีวภัณฑ์ที่ผลิตด้วยวิธีพ่นฝอย 8 สูตรวัสดุรองรับ พบว่าสีของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นสีขาวถึงขาวครีม ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะที่ต้องการในชีวภัณฑ์ผง โดยเฉพาะสูตรที่ 5 มีสีขาวครีมอ่อนซึ่งแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยา Maillard เล็กน้อยจากส่วนประกอบโปรตีน แต่ยังอยู่ในระดับยอมรับได้

ค่าความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์อยู่ระดับ 1-3 เมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานพบว่าส่วนใหญ่อยู่ระดับที่ยอมรับได้ โดยสูตรที่ 1, 2, 3, 4, 7 และ 8 มีค่าระดับ 1 แสดงถึงการละลายน้ำได้รวดเร็วภายใน 1-5 นาที ขณะที่สูตรที่ 5 อยู่ระดับ 2 ต้องใช้เวลาละลายนานขึ้นเล็กน้อย (6-10 นาที) แต่ยังอยู่เกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ส่วนสูตรที่ 6 มีค่าระดับ 3 แสดงให้เห็นว่าการละลายน้ำช้ากว่าสูตรอื่น (11-30 นาที) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับโครงสร้างผงที่หนาแน่นหรือการเกาะตัวของอนุภาคจากกระบวนการพ่นฝอย (Chen et al., 2021) อย่างไรก็ตามสูตรที่มี Whey protein หรือ Maltodextrin มีแนวโน้มให้ค่าการละลายน้ำดีกว่าสูตรที่ใช้คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนอย่างเดียว เนื่องจากโครงสร้างโปรตีนช่วยดูดซับน้ำและแตกตัวได้ง่ายเมื่อสัมผัสความชื้น

ลักษณะการเกิดตะกอนอยู่ระดับ 1-4 โดยส่วนใหญ่มีค่าระดับ 1-2 ซึ่งเป็นลักษณะที่ดีต่อการใช้งานภาคสนาม เพราะแสดงให้เห็นว่าสารแขวนลอยมีความสม่ำเสมอและไม่เกิดการตกตะกอน สูตรที่ 1, 2, 5 และ 6 ให้ค่าระดับ 1 แสดงถึงความเสถียรของการกระจายตัวสูง ในขณะที่สูตรที่ 3 และ 8 มีระดับการตกตะกอนสูงกว่า (ระดับ 3-4) ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับขนาดอนุภาคที่ไม่สม่ำเสมอจากการพ่นฝอยหรือการเกิดการรวมตัวของผงระหว่างการเก็บรักษา

ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของผลิตภัณฑ์อยู่ช่วง 6.46-7.78 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่เหมาะสมต่อการคงสภาพของแบคทีเรียปฏิปักษ์ (*Bacillus* หรือ *Pseudomonas*) ที่ต้องการสภาวะใกล้เป็นกลาง (6.5-7.5) เพื่อรักษาการทำงานของเอนไซม์และโครงสร้างเซลล์ (Kumar et al., 2020; Bai et al., 2022) สูตรที่ 3 มีค่า pH สูงสุด (7.78) ใกล้ขอบบนของช่วงที่เหมาะสม แต่อาจเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพเมื่อเก็บรักษานาน ส่วนสูตรที่ 2 ซึ่งมีค่า pH 6.46 อยู่ระดับเหมาะสมต่อการคงตัวของเชื้อและลดโอกาสการปนเปื้อน

โดยสรุป ชีวภัณฑ์ที่ผลิตด้วยวิธีพ่นฝอยมีสีอยู่ระดับเหมาะสม แต่มีแนวโน้มการละลายน้ำต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย คาดว่าเกิดจากโครงสร้างผงที่หนาแน่นซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของกระบวนการพ่นฝอย อย่างไรก็ตาม สูตรที่ 5 และ 6 มีคุณสมบัติรวมดีที่สุด เนื่องจากให้ค่าการละลายน้ำและการกระจายตัวในน้ำตรงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (ระดับ 2-3) ทั้งนี้สูตรที่ 6 ละลายน้ำช้ากว่าสูตรอื่นเล็กน้อย แต่มีค่าการเกิดตะกอนต่ำ (ระดับ 1) และค่า

pH ใกล้เป็นกลาง (7.43) ซึ่งเหมาะสมต่อการคงสภาพและการนำไปใช้ในแปลงปลูกพืชได้ดี รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.4.8

ตารางที่ 4.4.8 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสูตรวัสดุรองรับสำหรับการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* พืชตระกูลกะหล่ำ ด้วยวิธีทำผงแห้งแบบพ่นฝอย

สูตร	สี[1/]	ความสามารถในการละลายน้ำ (ระดับ)[2/]	ลักษณะการเกิดตะกอน (ระดับ)[3/]	ความเป็นกรดด่าง (pH)[4/]
1	ขาว	1	1	6.78
2	ขาว	1	1	6.46
3	ขาว	1	4	7.78
4	ขาว	1	3	7.00
5	ขาวครีม	2	1	7.12
6	ขาว	3	1	7.43
7	ขาว	1	2	7.35
8	ขาว	1	3	7.40

[1/]ลักษณะสีภายนอก โดยสังเกตด้วยตาเปล่าซึ่งชีวภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติดีจะต้องมีสีสม่ำเสมอ ไม่หมองคล้ำหรือเปลี่ยนสี ปกติจะมีสีอ่อนหรือขาว (ผงแห้ง) ซึ่งแสดงถึงความใหม่ ในทางตรงข้ามการเปลี่ยนสีอาจบ่งชี้ถึงการปนเปื้อนหรือการเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์

[2/]ความสามารถในการละลายน้ำ 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 ละลายน้ำหมด ภายใน 1-5 นาที ระดับ 2 ละลายน้ำหมด ภายใน 6-10 นาที ระดับ 3 ละลายน้ำหมด ภายใน 11-30 นาที ระดับ 4 ละลายน้ำหมด ภายใน 30-60 นาที และระดับ 5 ไม่ละลายน้ำ เกาะตัวเป็นกลุ่มด้านบนผิวน้ำ โดยชีวภัณฑ์ที่ดีควรอยู่ระดับ 1 หรือ 2 หมายถึง สามารถละลายน้ำหมดภายในเวลาไม่เกิน 10 นาที เนื่องจากการละลายน้ำที่รวดเร็วช่วยให้สะดวกต่อการผสมและใช้งานภาคเกษตรกรรม โดยเฉพาะเมื่อต้องใช้กับระบบพ่นสารหรือในพื้นที่ที่ต้องการความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของชีวภัณฑ์ในน้ำ

[3/]ลักษณะการเกิดตะกอน 5 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1 ตกตะกอนหมด ภายในเวลา 12 ชั่วโมง ระดับ 2 ตกตะกอนหมดภายในเวลา 30-60 นาที ระดับ 3 ตกตะกอนหมดภายในเวลา 11-30 นาที ระดับ 4 ตกตะกอนหมดภายในเวลา 5-10 นาที และระดับ 5 ตกตะกอนหมดภายในเวลา 1-5 นาที ทั้งนี้ชีวภัณฑ์ที่ดีควรอยู่ระดับ 1 หรือ 2 หมายถึง มีการตกตะกอนช้าหรือค่อยๆ เกิดขึ้นภายในระยะเวลา 30 นาที ถึง 12 ชั่วโมง ความล่าช้าของการตกตะกอนช่วยให้จุลินทรีย์กระจายตัวในน้ำสม่ำเสมอและนานพอสำหรับการใช้งาน โดยเฉพาะระบบพ่นสารหรือการใช้งานกับแปลงเกษตรที่ต้องการความคงตัวของสารละลาย

[4/]ความเป็นกรดด่าง (pH) โดยจุ่มกระดาษลิตมัส (Merck®) นาน 5 วินาที ลงในเซลล์แขวนลอยต้นแบบชีวภัณฑ์ที่ผสมจนเข้ากัน จากนั้นเทียบสีตามค่ามาตรฐาน

4.5 การประเมินผลสัมฤทธิ์การนำงานวิจัยชีวภัณฑ์และฟีโรโมนไปใช้แก้ไขปัญหาสารเคมีเกษตรบนพื้นที่สูงสำคัญร่วมกับหน่วยงานเครือข่าย

4.5.1 ศึกษาผลยอมรับการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนที่สอดคล้องกับหลักการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานกับกลุ่มพืชตระกูล Solanaceae

<u>กิจกรรมที่ 1</u> ศึกษาผลการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนของโรงชีวภัณฑ์ มูลนิธิโครงการหลวง โดยจัดประชุมชี้แจงและวางแผนร่วมกับเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้อง จากนั้นสำรวจข้อมูลปัญหา วิธีแก้ไข และผลการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนของเกษตรกรศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ จ.เชียงใหม่ และโครงการพัฒนาพื้นที่

สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน จ.เชียงใหม่ เพื่อศึกษาการระบาดของโรคและแมลงศัตรูพืช รวมถึงแนวทางป้องกันและกำจัด

ได้จัดประชุมชี้แจงเพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับแผนการดำเนินงานโครงการ และกำหนดแนวทางการดำเนินงานร่วมกันระหว่างหน่วยงานและเกษตรกรภายในพื้นที่ 2 ครั้ง โดยครั้งแรกเมื่อวันที่ 17 มีนาคม พ.ศ. 2568 ณ โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน มีผู้เข้าร่วม 9 คน ประกอบด้วย เจ้าหน้าที่จากสำนักวิจัย สวพส. เจ้าหน้าที่ประจำพื้นที่ และเกษตรกรตัวแทนกลุ่มผู้ปลูกพืชตระกูล Solanaceae ได้แก่ มะเขือเทศโทมัส มะเขือเทศเชอรี่สีแดง มะเขือเทศเชอรี่สีเหลือง และมะเขือเทศแฟนซี ส่วนการประชุมครั้งที่ 2 จัดเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2568 ณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ มีผู้เข้าร่วม 8 คน ประกอบด้วย เจ้าหน้าที่ของ สวพส. มูลนิธิโครงการหลวง และตัวแทนเกษตรกรผู้ปลูกมะเขือเทศเชอรี่สีแดงและสีเหลือง จากนั้นสำรวจข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับปัญหา วิธีแก้ไข และผลจากการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน โดยใช้แบบสอบถาม ข้อมูลพบว่า เกษตรกรพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือปลูกมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองภายใต้ระบบเกษตร GAP จำแนกเป็นพื้นที่โล่งและโรงเรือน ส่วนเกษตรกรพื้นที่โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝนปลูกมะเขือเทศหลายชนิด ได้แก่ มะเขือเทศโทมัส มะเขือเทศเชอรี่ และมะเขือเทศแฟนซี ภายใต้ระบบเกษตร GAP และเกษตรอินทรีย์ ผลการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนระยะที่ผ่านมาแสดงผลดีด้านการส่งเสริมความแข็งแรง ความเขียวสด และอัตราการเกิดโรคใบไหม้ลดลงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะกรณีการใช้ชีวภัณฑ์ พีพี-ไตรโค และสูตรอื่น เช่น พีพี-บี10 พีพี-บีเค33 พีพี-เบ็บ พีพี-เมทา และน้ำหมัก PP2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการควบคุมโรคและแมลงศัตรูพืช

อย่างไรก็ตาม เกษตรกรยังประสบปัญหาในการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน โดยเฉพาะด้านประสิทธิภาพที่ช้ากว่าสารเคมี การหาซื้อผลิตภัณฑ์ได้ยาก ราคาสูง ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น รวมถึงปัญหาด้านการใช้งาน เช่น การอุดตันของหัวพ่นยา กลิ่นแรงของน้ำหมักสมุนไพร และอายุการเก็บรักษาสั้น ซึ่งส่งผลให้การใช้ไม่ต่อเนื่องและขาดความมั่นใจในประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์

สำหรับแนวทางแก้ไข เกษตรกรเสนอให้เพิ่มประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ให้อยู่ระดับเทียบเท่ากับสารเคมี ปรับปรุงคุณสมบัติด้านกลิ่นและรูปแบบการใช้งานให้สะดวกขึ้น รวมถึงควรมีการจำหน่ายชีวภัณฑ์และฟีโรโมนในราคาที่เหมาะสม พร้อมเพิ่มช่องทางการจัดจำหน่ายให้เข้าถึงง่าย นอกจากนี้ยังควรแนะนำวิธีกรองสารละลายก่อนฉีดพ่นเพื่อลดการอุดตันของหัวพ่น รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.1 และตารางที่ 4.5.1

ภาพที่ 4.5.1 การประชุมชี้แจงและวางแผนดำเนินงานโครงการร่วมกับเจ้าหน้าที่ของ สวพส. มูลนิธิโครงการหลวง และตัวแทนเกษตรกร

ตารางที่ 4.5.1 ข้อมูลปัญหา วิธีแก้ไข และผลการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนที่ได้จากการตอบแบบสอบถามข้อมูลของเกษตรกรสมาชิกศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ และโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน

ข้อมูล	ศูนย์พัฒนาโครงการหลวง/โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวง	
	ศูนย์ฯ แม่ทาเหนือ	โครงการฯ ปางหินฝน
1. ชนิดพืช/ระบบการปลูกพืช	มะเขือเทศเชอรี่สีเหลือง/โล่งแจ้ง-โรงเรือน/GAP	1) มะเขือเทศโทมัส มะเขือเทศเชอร์รี่/โรงเรือน/GAP
		2) มะเขือเทศแฟนซี/โรงเรือน/อินทรีย์
2. ผลจากการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช	หลังใช้ชีวภัณฑ์ พีพี-ไตรโค ต้นพืชมีความแข็งแรง ต้นเขียว และการเกิดโรคใบไหม้ลดลงอย่างชัดเจน[1/]	1) ชีวภัณฑ์มีประสิทธิภาพดีในการป้องกันกำจัดโรคพืชและแมลงศัตรูพืช (พีพี–ไตรโค/พีพี–บี10/พีพี–บีเค33/พีพี–เบ็บ/พีพี–เมทา/น้ำหมัก PP 2-PP3)[1/]
		2) หลังใช้ชีวภัณฑ์ พีพี-ไตรโค ต้นพืชมีความแข็งแรง ต้นเขียว และการเกิดโรคใบไหม้ลดลงอย่างชัดเจน[1/]
3. ปัญหาในการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช	1) ประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ในการควบคุมศัตรูพืชน้อยกว่าการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช[2]	1) ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนมีราคาจำหน่ายสูง ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากต้องใช้ปริมาณมากในแต่ละฤดูกาลปลูก[1/2/]

ข้อมูล	ศูนย์พัฒนาโครงการหลวง/โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวง	
	ศูนย์ฯ แม่ทาเหนือ	**โครงการฯ ปางหินฝน**
	2) หาชีวภัณฑ์และฟีโรโมนยาก จึงทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ต่อเนื่อง ส่งผลให้เห็นผลการควบคุมศัตรูพืชไม่ชัดเจน[2]	2) เกษตรกรไม่มีความมั่นใจในประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ เนื่องจากรูปแบบการใช้เน้นการป้องกันศัตรูพืช จึงกังวลเมื่อมีการแพร่ระบาดของศัตรูพืชแล้ว จะไม่สามารถควบคุมได้ทันท่วงที[2/]
	3) ชีวภัณฑ์ต้องใช้ปริมาณมากในแต่ละฤดูกาลปลูก จึงทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น[2/]	3) ประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์แสดงผลในการควบคุมศัตรูพืชช้ากว่าการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช[2/]
	4) ชีวภัณฑ์ (น้ำหมักสมุนไพร) มีกลิ่นแรงเหม็นฉุน จึงไม่ดึงดูดให้เกษตรกรเลือกใช้[2/]	4) ชีวภัณฑ์มีข้อจำกัดในการใช้มาก ทำให้เกิดความยุ่งยากในการใช้งาน[2/]
	5) อายุการเก็บรักชีวภัณฑ์สั้น ประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็ว[2/]	5) เกิดการอุดตันของหัวพ่นยาเมื่อใช้ชีวภัณฑ์ในรูปแบบฉีดพ่น รวมทั้งหลังการใช้ มีคราบสีขาวตกค้างอยู่บริเวณใบพืช ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช[1/2/]
		6) อายุการเก็บรักชีวภัณฑ์สั้นเกินไป หากซื้อในปริมาณมากเพื่อเก็บไว้ใช้ แต่เมื่อต้องการใช้ชีวภัณฑ์หมดอายุ และหาซื้อใช้ในทันทีไม่ได้ ส่งผลให้การใช้งานไม่ต่อเนื่อง[1/]
4. การแก้ไขปัญหาในการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนในการป้องกันกำจัดศัตรูพืช	1) เพิ่มประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ให้เทียบเท่ากับสารเคมี[2/]	1) จำหน่ายชีวภัณฑ์และฟีโรโมนในราคาที่ถูกลง รวมถึงเพิ่มแหล่งจำหน่ายชีวภัณฑ์และฟีโรโมนที่สามารถเข้าถึงง่ายและหาซื้อได้ทันทีเมื่อต้องการใช้งาน[1/]

ข้อมูล	ศูนย์พัฒนาโครงการหลวง/โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวง	
	ศูนย์ฯ แม่ทาเหนือ	โครงการฯ ปางหินฝน
	2) ปรับปรุงกลิ่นชีวภัณฑ์ (น้ำหมักสมุนไพร) ให้น่าใช้มากขึ้น[2/]	2) กรองสารละลายชีวภัณฑ์ทุกครั้งหลังผสมน้ำ เพื่อลดการอุดตันของหัวพ่น[1/]
จำนวนเกษตรกรที่ให้ข้อมูล	**5**	**6**

[1/]ข้อมูลจากเกษตรกรที่ปลูกในระบบเกษตรอินทรีย์

[2/]ข้อมูลจากเกษตรกรที่ปลูกในระบบ GAP

[3/]เกษตรกรผู้ให้ข้อมูล คือ เกษตรกรผู้เข้าร่วมการประชุมชี้แจงและวางแผนการดำเนินงานโครงการ และเกษตรกรที่จะทำแปลงทดสอบร่วมกับโครงการวิจัยนี้

กิจกรรมที่ 2 เตรียมการถ่ายทอดองค์ความรู้การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนจากผลงานวิจัยของ สวพส. และมูลนิธิโครงการหลวง โดยคัดเลือกเกษตรกรที่มีศักยภาพเป็นวิทยากรท้องถิ่น 2 รายต่อพื้นที่ เพื่อร่วมจัดเวทีแลกเปลี่ยนกับนักวิจัยและเกษตรกร พร้อมจัดทำแปลงสาธิตเปรียบเทียบระหว่างวิธีปฏิบัติเดิมกับวิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน เก็บข้อมูลด้านอัตราและความรุนแรงของโรค ผลผลิต คุณภาพผลผลิต ต้นทุนและรายได้ ทั้งนี้ได้พัฒนาสมรรถนะเกษตรกรวิทยากร 3 ด้าน ได้แก่ (2.1) ความรู้ ด้านโรคและแมลงศัตรูพืช ชีวภัณฑ์ ฟีโรโมน และสารปลอดภัย (2.2) ทักษะ การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนอย่างถูกต้อง เหมาะสม และทันเวลา และ (2.3) ทัศนคติ ที่ดีต่อการใช้ชีวภัณฑ์และการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน ซึ่งหลังการดำเนินงาน มีการสำรวจการยอมรับและความพึงพอใจของเกษตรกรผู้ปลูกพืชตระกูล Solanaceae ระบบเกษตร GAP และ/หรือ เกษตรอินทรีย์ โดยใช้แบบสอบถาม 5 ตอน ครอบคลุมข้อมูลทั่วไป การผลิต การยอมรับเทคโนโลยี ความพึงพอใจ และข้อเสนอแนะ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าความถี่ ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พร้อมแปลผลตามระดับ Likert scale 5 ระดับ และสังเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากคำตอบปลายเปิด

ผลการคัดเลือกเกษตรกรต้นแบบที่มีศักยภาพในการเป็นวิทยากรท้องถิ่น เพื่อถ่ายทอดความรู้ด้านการปลูกผักที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมบนพื้นที่สูง โดยประชุมร่วมกันระหว่างเจ้าหน้าที่ สวพส. มูลนิธิโครงการหลวง และตัวแทนเกษตรกรของพื้นที่ดำเนินการ 2 แห่ง ได้เกษตรกรพื้นที่ละ 2 ราย รวม 4 ราย ซึ่งประสบการณ์ปลูกพืชตระกูล Solanaceae ภายใต้มาตรฐานการผลิตระบบ GAP และมีความพร้อมด้านพื้นที่ปลูก การจัดการแปลง และความเข้าใจหลักการเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม พื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ ได้แก่ นางจตุพร โปธาสุ และนางนิรัชรา เป็งผัด ปลูกมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองในระบบโรงเรือนและพื้นที่โล่ง โดยใช้ระบบน้ำหยดและวัสดุปลูกเป็นหลัก มีการระบาดของศัตรูพืชสำคัญ เช่น แมลงหวี่ขาว หนอนชอนใบ หนอนเจาะผล และหนอนกระทู้ รวมถึงโรคเหี่ยวเขียว โรคใบไหม้ ใบหงิกเหลือง และก้นผลเน่า การจัดการศัตรูพืชมีการใช้ชีวภัณฑ์ เช่น พีพี-ไตรโค บาซิลลัส ซับทิลิส และสารเคมี เช่น เดลทาเมทริน อิมิดาโคลพริด อะบาเมกติน คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์และเมทาแลกซิล นอกจากนี้เกษตรกรบางรายมีการเสริมธาตุอาหารทางใบด้วยแคลเซียมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงของพืช สำหรับบพื้นที่โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน

เกษตรกร 2 ราย ปลูกมะเขือเทศโทมัสในระบบโรงเรือน โดยใช้วัสดุปลูกและระบบน้ำหยดเหมือนกัน พบศัตรูพืชหลัก เช่น แมลงหวี่ขาว หนอนชอนใบ หนอนเจาะผล เพลี้ยอ่อน และโรคพืชหลายชนิด เช่น เหี่ยวเขียว ใบหงิกเหลือง ราน้ำค้าง และโรคที่เกิดจากไวรอยด์ สำหรับการจัดการศัตรูพืช เกษตรกรใช้ชีวภัณฑ์ เช่น บาซิลลัส ซับทิลิส ขณะที่บางรายยังไม่ได้นำชีวภัณฑ์มาใช้ โดยยังคงใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชเป็นหลัก เช่น อะบาเมกติน อะเซทามิพริด คาร์แทปไฮโดรคลอไรด์ ควินโตซีนผสมอีไทรไดอะโซล เมทาแลกซิล รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.2

ตารางที่ 4.5.2 ข้อมูลเบื้องต้นของเกษตรกรและแปลงสาธิต รวมจำนวน 4 ราย ในพื้นที่ดำเนินงาน 2 แห่ง

ข้อมูล	พื้นที่ดำเนินงาน			
	ศูนย์พัฒนาโครงการแม่ทาเหนือ		โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน	
1. เกษตรกร	รายที่ 1	รายที่ 2	รายที่ 1	รายที่ 2
2. วันที่ปลูก ปี 2568	14 พฤษภาคม	18 มิถุนายน[1/]	12 เมษายน	5 เมษายน
3. ชนิดของพืชตระกูล *Solanaceae*	มะเขือเทศเชอรี่สีเหลือง	มะเขือเทศเชอรี่สีเหลือง	มะเขือเทศโทมัส	มะเขือเทศโทมัส
4. ระบบมาตรฐาน	GAP	GAP	GAP	GAP
5. แปลงปลูก/ขนาดพื้นที่รวม	แบบโล่งแจ้ง ขนาด 220 ตรม.	โรงเรือน 1 โรง ขนาด 12 x 15 เมตร	โรงเรือน 5 โรง ขนาด 25 x 30 เมตร	โรงเรือน 12 โรง ขนาด 24 x 60 เมตร
6. ลักษณะการปลูก	ปลูกในวัสดุปลูก	ปลูกในวัสดุปลูก	ปลูกในวัสดุปลูก	ปลูกในวัสดุปลูก
7. ระบบน้ำ	น้ำหยด	น้ำหยด	น้ำหยด	น้ำหยด
8. การระบาดของศัตรูพืช	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) แมลงหวี่ขาว (2) หนอนชอนใบ (3) หนอนเจาะผล (4) หนอนกระทู้	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) แมลงหวี่ขาว (2) หนอนชอนใบ (3) หนอนเจาะผล (4) หนอนกระทู้	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) แมลงหวี่ขาว (2) หนอนชอนใบ (3) หนอนเจาะผล (4) เพลี้ยอ่อน	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) แมลงหวี่ขาว (2) หนอนชอนใบ (3) หนอนเจาะผล (4) เพลี้ยอ่อน
	<u>โรคพืช</u> (1) เหี่ยวเขียว (2) ใบไหม้ (3) ใบหงิกเหลือง	<u>โรคพืช</u> (1) เหี่ยวเขียว (2) รากเน่าโคนเน่า (3) ใบไหม้	<u>โรคพืช</u> (1) เหี่ยวเขียว (2) ใบไหม้ (3) ใบหงิกเหลือง	<u>โรคพืช</u> (1) เหี่ยวเขียว (2) ใบหงิกเหลือง (3) ก้นผลเน่า

ข้อมูล	พื้นที่ดำเนินงาน			
	ศูนย์พัฒนาโครงการแม่ทาเหนือ		โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน	
	(4) ก้นผลเน่า	(4) ใบจุด	(4) ก้นผลเน่า (5) โรคที่เกิดจากไวรอยด์	(4) ราน้ำค้าง
9. การจัดการศัตรูพืชด้วยชีวภัณฑ์และฟีโรโมน	(1) พีพี-ไตรโค (2) บาซิลลัส ซับทิลิส (เจน-แบค)	(1) พีพี-บีเค33 (2) ไตรโคเอดร์มาสด (3) บาซิลลัส ทูริงเยนซิส (ไลท์นิ่งค์)	ไม่ใช้	(1) บาซิลลัส ซับทิลิส (บลูบีเอส)
10. การจัดการศัตรูพืชด้วยสารเคมีป้องกันกำจัดโรคพืชและแมลงศัตรูพืช	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) เดลทาเมทริน (2) อิมิดาโคลพริด (3) อะบาเมกติน	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) อะบาเมกติน (2) อีมาเมกติน เบนโซเอต (3) สไปนีโทแรม (4) ลูเฟนนูลอน ผสม อีมาเมกตินเบนโซเอต	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) ฟลอนิคามิด (2) อะบาเมกติน (3) คาร์แท็บไฮโดรคลอไรด์	<u>แมลงศัตรูพืช</u> (1) อะบาเมกติน (2) อะเซทามิพริด (3) คาร์แทปไฮโดรคลอไรด์
	<u>โรคพืช</u>: (1) คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (2) เมทาแลกซิล	<u>โรคพืช</u>: (1) คอปเปอร์ไฮดรอกไซด์ (2) เมทาแลกซิล (3) ควินโตซีน ผสม อีไตรไดอะโซล (4) ไซมอกซานิล ผสม แมนโคแซบ (5) แมนโคเซบ ผสม เมทาแลกซิล-เอ็ม	<u>โรคพืช</u>: (1) คลอโรทาโลนิล (2) ไซมอกซานิล ผสมแมนโคแซบ (3) ฟลูโอไพแรม ผสม ไตรฟลอกซีสโตรบิน	<u>โรคพืช</u>: (1) ควินโตซีน ผสม อีไตรไดอะโซล (2) เมทาแลกซิล
11. พ่นเสริมธาตุอาหารทางใบ	แคลเซียม	ไม่ใช้	ไม่ใช้	ไม่ใช้

[1/]การปลูกล่าช้ากว่ากำหนด (สัปดาห์ที่ 5 ของเดือนพฤษภาคม) เพราะต้นกล้าตายจากการเข้าทำลายของเชื้อแบคทีเรีย *Ralstonia solanacearum*

ผลการจัดทำแปลงสาธิตการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน ณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ

เป็นการเปรียบเทียบวิธีการจัดการแปลงปลูกมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองระหว่างวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกรกับวิธีใช้ชีวภัณฑ์ในแปลงของเกษตรกร 2 ราย ซึ่งปลูกมะเขือเทศเพื่อจำหน่ายให้ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ ระหว่างเดือนพฤษภาคม-กันยายน พ.ศ. 2568 จากการสัมภาษณ์และตรวจสอบสภาพแปลงปลูกพบว่า พื้นที่ดังกล่าวประสบปัญหาโรคเหี่ยวเขียวต่อเนื่อง จึงมีการเก็บตัวอย่างวัสดุปลูกและน้ำจากทั้ง 2 แปลง เพื่อตรวจการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย *Ralstonia solanacearum* บนอาหารเลี้ยงเชื้อ TZC พบว่าตัวอย่างวัสดุปลูกและน้ำทุกแหล่งมีเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคเหี่ยวเขียวระดับรุนแรง โดยเฉพาะวัสดุปลูกจากแปลงของเกษตรกรรายที่ 2 และน้ำประปาภูเขาซึ่งมีปริมาณเชื้อและความรุนแรงของเชื้อสูงที่สุด เมื่อเทียบแหล่งอื่น กล่าวได้ว่าพื้นที่ปลูกมีความเสี่ยงต่อการระบาดของโรคในระดับสูงตั้งแต่ก่อนเริ่มปลูก

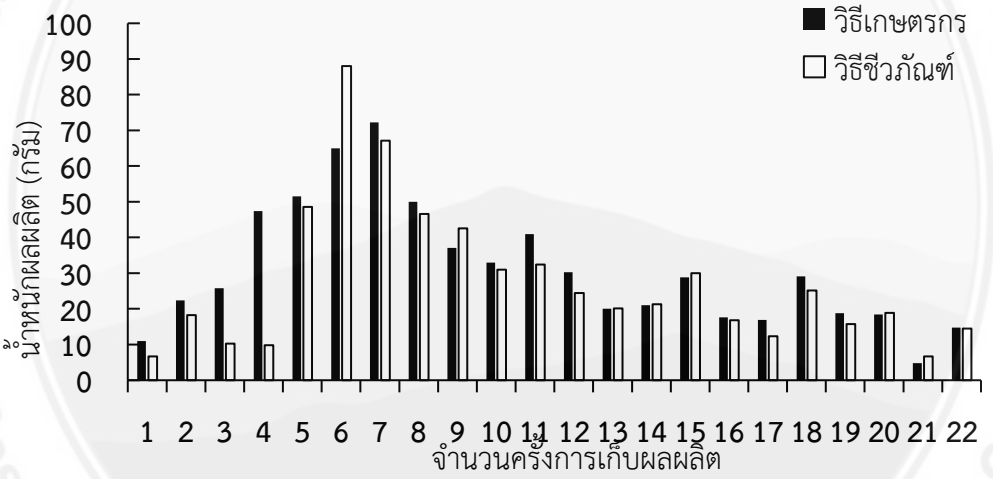
แปลงสาธิตของเกษตรกรรายที่ 1 เป็นแปลงปลูกมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองบนถุงวัสดุปลูกแบบเปิดโล่ง ปูพลาสติกกันวัชพืช ใช้ระบบน้ำหยดและไม้ค้างความสูงประมาณ 1.8 เมตร ปลูกต้นกล้า 2 ต้นต่อถุง เพาะกล้าเมื่อวันที่ 23 เมษายน และย้ายปลูกวันที่ 14 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 โดยกรรมวิธีชีวภัณฑ์มีการแช่ต้นกล้าด้วยชีวภัณฑ์ บี10-อาร์ ก่อนปลูก ร่วมกับการสำรวจศัตรูพืช การจัดการเขตกรรม และการใช้ชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดศัตรูพืชชนิดอื่นภายใต้คำแนะนำของนักวิจัย ตลอดระยะปลูกพบแมลงศัตรูสำคัญ 4 ชนิด ได้แก่ หนอนเจาะสมอฝ้าย หนอนกระทู้ผัก แมลงหวี่ขาว และแมลงวันหนอนชอนใบ ภาพรวมระดับการระบาดไม่รุนแรง ยกเว้นแมลงวันหนอนชอนใบที่พบต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามการใช้ชีวภัณฑ์ร่วมกับการวางกับดักกาวเหนียวในกรรมวิธีชีวภัณฑ์สามารถลดจำนวนและจำกัดการระบาดแมลงหวี่ขาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ จนไม่พบการเข้าทำลายบนต้นมะเขือเทศเมื่อเปรียบเทียบกับกรรมวิธีเกษตรกร

ด้านโรคพืช พบโรคใบจุดมะเขือเทศ ตั้งแต่ระยะ 14 วันหลังย้ายปลูกต่อเนื่องจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยทั้ง 2 กรรมวิธี มีระดับความรุนแรงของโรคเพิ่มขึ้นตามอายุของต้นและสูงสุดในช่วงประมาณ 56 วันหลังย้ายปลูก ทั้งนี้ระดับความรุนแรงในกรรมวิธีเกษตรกรสูงกว่าวิธีชีวภัณฑ์เล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติพบว่าไม่แตกต่างกันทุกระยะการประเมิน สาเหตุหลักมาจากสภาพแปลงที่เป็นพื้นที่เปิดโล่งและฝนตกชุกทำให้เอื้อต่อการแพร่ระบาด นอกจากนี้ เกษตรกรยังคงใช้สารเคมีป้องกันกำจัดโรค เช่น copper hydroxide และ mancozeb ผสม metalaxyl-M ควบคู่กับการใช้ชีวภัณฑ์ไตรโคเดอร์มาเพื่อป้องกันโรคจากเชื้อรา เนื่องจากมะเขือเทศเป็นพืชมูลค่าสูง เกษตรกรมีความกังวลต่อความเพียงพอของชีวภัณฑ์ในการควบคุมโรคและแมลงศัตรูพืช ทำให้ยังไม่สามารถลดการใช้สารเคมีได้อย่างเต็มที่ อีกทั้งยังมีข้อจำกัดด้านทัศนคติและความเชื่อด้านเขตกรรม เช่น การไม่ยอมให้ตัดแต่งใบที่เป็นโรครุนแรง อาจส่งผลต่อการสะสมเชื้อภายในแปลงตลอดฤดูปลูก

ด้านการเจริญเติบโตของมะเขือเทศเชอรี่ พบว่าความสูงต้นทั้ง 2 กรรมวิธี เพิ่มขึ้นต่อเนื่องจากระยะ 7-42 วันหลังย้ายปลูก โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนจำนวนกิ่งต่อต้นและจำนวนช่อดอกต่อต้นช่วงปลายฤดูปลูกพบว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์มีจำนวนกิ่งและช่อดอกน้อยกว่ากรรมวิธีเกษตรกรเล็กน้อย ขณะที่จำนวนใบต่อต้นระยะแรกของการตั้งตัวพบว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์กระตุ้นให้มีจำนวนใบมากกว่าวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญ ก่อนที่เกษตรกรจะตัดแต่งให้มีจำนวนใบใกล้เคียงกันช่วงกลาง-ปลายฤดูปลูก เมื่อพิจารณาด้านผลผลิต พบว่าการให้ผลผลิตของมะเขือเทศเชอรี่ในแปลงมีลักษณะเป็น 3 ช่วง คือ ระยะเริ่มให้

ผลผลิต ระยะให้ผลผลิตสูงสุด และระยะผลผลิตลดลงเมื่อพืชเริ่มแก่ โดยแนวโน้มปริมาณผลผลิตต่อต้นของทั้ง 2 กรรมวิธี มีทิศทางคล้ายคลึงกัน แสดงว่าการจัดการโรคและแมลงภาพรวมอยู่ระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการให้ผลผลิตอย่างรุนแรง

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทน พบว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์มีต้นทุนด้านผลิตภัณฑ์ป้องกันกำจัดศัตรูพืชและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง (เช่น กับดักกาวเหนียว และชีวภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ บี10-อาร์ พีพี-เมทา น้ำหมักสูตรพีพี 2 และไตรโค-อาร์) สูงกว่าวิธีปฏิบัติเดิม ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตรวมต่อฤดูปลูกสูงกว่า ขณะที่ปริมาณผลผลิตรวมจากกรรมวิธีชีวภัณฑ์ต่ำกว่าวิธีปฏิบัติเดิม ทำให้รายได้และกำไรสุทธิของกรรมวิธีชีวภัณฑ์ต่ำกว่ากรรมวิธีเกษตรกร ทั้งนี้เชิงเทคนิคได้เห็นศักยภาพของชีวภัณฑ์ในการช่วยลดประชากรแมลงศัตรูพืชบางชนิดและส่งเสริมการเจริญเติบโตระยะแรก แต่เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับต้นทุนและผลตอบแทนแล้ว ยังต้องมีการปรับปรุงรูปแบบการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน รวมทั้งการบูรณาการกับการจัดการเขตกรรมและการลดการใช้สารเคมีอย่างมีขั้นตอน เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าด้านเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมระดับแปลงเกษตรกร รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.2 และตารางที่ 4.5.3-4.5.4



ภาพที่ 4.5.2 น้ำหนักผลผลิตต่อต้นของมะเขือเทศเชอร์รี่ เปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีเกษตรกร (กราฟแท่งสีดำ) และวิธีชีวภัณฑ์ (กราฟแท่งสีขาว) เมื่อเริ่มเก็บที่ระยะ 58 วันหลังปลูก ของเกษตรกรรายที่ 1

ตารางที่ 4.5.3 ปฏิทินการจัดการแปลงปลูกมะเขือเทศเชอร์รี่สีเหลืองของเกษตรกรรายที่ 1 ระหว่างพฤษภาคม-กันยายน 2568

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
ก่อนย้ายปลูก	dinotefuran (สตาร์เกิลจี)	dinotefuran (สตาร์เกิลจี) บี10-อาร์ แช่ต้นกล้า
1 วัน	quintozene + etridiazole (เทอร์ราคลอร์ ซุปเปอร์–เอ็กซ์)	
3 วัน	dinotefuran (สตาร์เกิลจี)	

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
5 วัน		เบ็บ-อาร์
6 วัน		ไตรโค-อาร์
15 วัน	1) mancozeb+ metalaxyl (ริดโดมิล โกล์) 2) deltamethrin (เดซิส)	
16 วัน		ไตรโค-อาร์
23 วัน	1) copper hydroxide (ฟังกูราน-โอเอช) 2) acetamiprid (โมแลน)	ไตรโค-อาร์
30 วัน	1) mancozeb (ไดเทนเอ็นที เอ็ม) 2) deltamethrin (เดซิส)	
31 วัน		ไตรโค-อาร์
32 วัน		พีพี-เมทา
34 วัน	mancozeb+ metalaxyl (ริดโดมิล โกล์)	น้ำหมักสูตร พีพี 2
37 วัน		พีพี-เมทา
58 วัน	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต
64 วัน	เชื้อราไตรโคเดอร์มา แอสเพอเรลลัม	

ตารางที่ 4.5.4 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช ต้นทุน และผลผลิตมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองของเกษตรกรรายที่ 1 จำนวน 64 ต้น

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
1. ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช		
- dinotefuran (สตาร์เกิลจี)	160 กรัม	160 กรัม
- quintozene ผสม etridiazole (เทอร์ราคลอร์ ซุปเปอร์-เอ็กซ์)	3.06 กรัม	3.06 กรัม
- บี10-อาร์	0 กรัม	37.5 กรัม
- เบ็บ-อาร์	0 กรัม	9.38 กรัม
- ไตรโค-อาร์	0 มิลลิลิตร	3.75 มิลลิลิตร

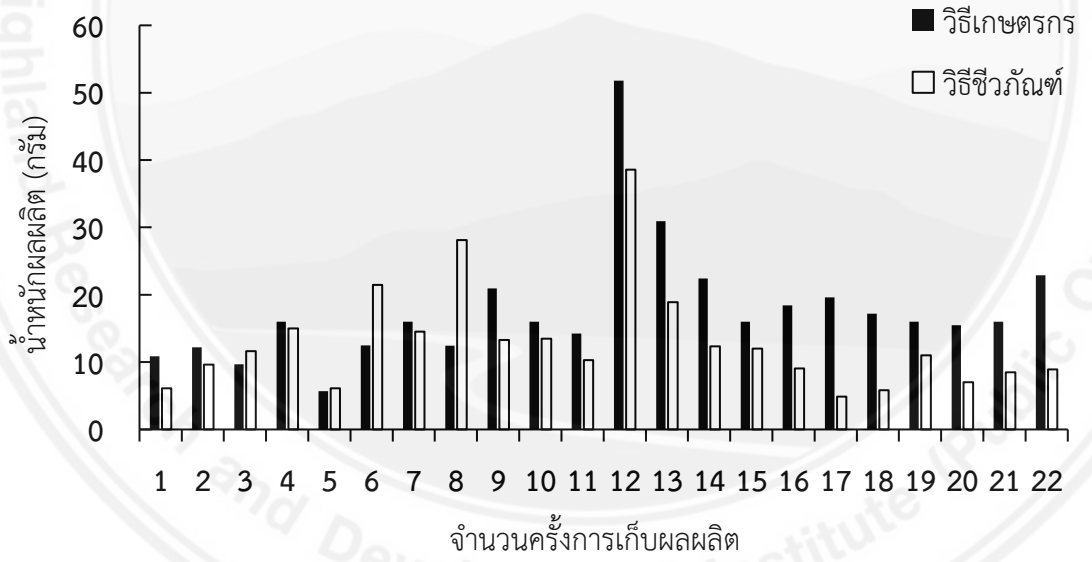
ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
- Mancozeb ผสม metalaxyl (ริดโดมิล โกล์)	3.06 กรัม	3.06 กรัม
- deltamethrin (เดซิส)	1.53 กรัม	1.53 กรัม
- copper hydroxide (ฟังกูราน-โอเอช)	1.53 กรัม	1.53 กรัม
- acetamiprid (โมแลน)	0.77 กรัม	0.77 กรัม
- mancozeb (ไดเทนเอ็นที เอ็ม)	3.06 กรัม	0 กรัม
- พีพี-เมทา	0 กรัม	37.5 กรัม
- น้ำหมักสูตร พีพี 2	0 กรัม	25 กรัม
- เชื้อราไตรโคเดอร์มา แอสเพอเรลลัม	0.15 กรัม	0.15 กรัม
- ไตรโค-อาร์	0 กรัม	3.75 กรัม
2. ต้นทุนที่ใช้ในการผลิต		
- ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช	44.73 บาท	78.84 บาท
- ต้นกล้ามะเขือเทศเชอร์รี่	64 บาท	64 บาท
- เตรียมแปลง	0 บาท	0 บาท
- วัสดุปลูก	13 บาท	13 บาท
- ปุ๋ยน้ำ	288 บาท	288 บาท
- ฮอร์โมน	351 บาท	351 บาท
- ค่าแรงงานเตรียมแปลง	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานปลูก	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานพ่นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานจัดทรงต้น	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานเก็บผลผลิต	21.8 บาท	21.8 บาท
- กับดักกาวเหนียว	0 บาท	30 บาท
รวม	869.73 บาท	933.84 บาท
3. ปริมาณผลผลิตรวม	34.51 กิโลกรัม	27.96 กิโลกรัม
4. รายได้	1,553 บาท	1,258 บาท
5. กำไรสุทธิ	683.27 บาท	324.16 บาท

การจัดทำแปลงสาธิตมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองของเกษตรกรรายที่ 2 ดำเนินการในโรงเรือนหลังคาพลาสติก ลักษณะเปิดโล่งด้านข้าง ใช้ระบบน้ำหยดและการให้ปุ๋ยในรูปสารละลายวันละ 3 ครั้ง โดยปลูกในถุงวัสดุปลูกที่นำกลับมาใช้ซ้ำเป็นครั้งที่ 3 ต่อจากการปลูกมะเขือเทศและแตงกวาญี่ปุ่น ทำให้แปลงมีความเสี่ยงต่อการสะสมเชื้อสาเหตุโรคในวัสดุปลูกตั้งต้น การปลูกเริ่มจากการเพาะกล้าเมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม พ.ศ. 2568 และย้ายปลูกเมื่อวันที่ 18 มิถุนายน พ.ศ. 2568 โดยกรรมวิธีชีวภัณฑ์มีการแช่ต้นกล้าด้วยชีวภัณฑ์บี 10-อาร์ ก่อนปลูก และจัดการแปลงโดยวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกรร่วมกับการสำรวจศัตรูพืช การจัดการเขตกรรม และการใช้ชีวภัณฑ์ภายใต้คำแนะนำของนักวิจัย ตลอดฤดูปลูกไม่พบความเสียหายจากแมลงศัตรูพืชทั้งจากการตรวจสอบกับดักกาวเหนียวและการสังเกตอาการบนต้นพืช เนื่องจากเกษตรกรใช้สารเคมีป้องกันกำจัดแมลงต่อเนื่อง ได้แก่ การโรยสตาร์เกิลจีที่ก้นหลุมก่อนปลูกและฉีดพ่นสารกำจัดแมลงสลับกันทุก 7-10 วัน หลังย้ายปลูกจนถึงระยะออกดอก อย่างไรก็ตาม ด้านโรคพืชพบการเข้าทำลายของโรคเหี่ยวเขียวและโรคราก้ามะหยี่ โดยโรคเหี่ยวเขียวเริ่มระบาดตั้งแต่ระยะออกดอก-ติดผล และลุกลามเพิ่มขึ้น ทำให้มีต้นมะเขือเทศแสดงอาการเหี่ยว รวม 66 ต้น จาก 621 ต้น แบ่งเป็น ต้นของกรรมวิธีเกษตรกร 36 ต้น และกรรมวิธีชีวภัณฑ์ 30 ต้น ถือเป็นความเสียหายระดับรุนแรง ข้อมูลพบการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรีย *Ralstonia solanacearum* ทั้งวัสดุปลูกและระบบน้ำ โดยการระบาดมีลักษณะกระจุกตัวบริเวณจุดที่มีพื้นแปลงต่ำ น้ำขังและดินชื้นแฉะเป็นเวลานาน ทำให้สภาพแวดล้อมเหมาะต่อการเข้าทำลายและแพร่กระจายของเชื้อ ทั้งนี้ได้ราดชีวภัณฑ์บี10-อาร์ อย่างสม่ำเสมอ ลักษณะดังกล่าวแตกต่างจากแปลงของเกษตรกรรายที่ 1 ที่เป็นแปลงเปิดโล่ง พื้นแปลงระบายน้ำได้ดีและได้รับแสงแดดโดยตรง จึงช่วยลดแรงกดดันของโรคได้มากกว่า สำหรับโรคราก้ามะหยี่ พบการระบาดรุนแรงช่วงปลายฤดูปลูก ใกล้ช่วงเก็บเกี่ยวครั้งที่ 9 โดยใบมะเขือเทศมีแผลสีน้ำตาล-เทา ผิวคล้ายกำมะหยี่และลุกลามจนใบไหม้ร่วงจำนวนมาก ทำให้ต้นมะเขือเทศทรุดโทรมทั้งแปลงอย่างเห็นได้ชัด เกษตรกรจึงใช้สารกำจัดเชื้อราอะซอกซีสโตรบิน (อมิสตา) 2 ครั้งห่างกัน 7 วัน ร่วมกับการตัดแต่งกิ่งใบให้โปร่งเพื่อยับยั้งการแพร่ระบาดของเชื้อ ช่วงเวลาดังกล่าวยังมีการเก็บเกี่ยวผลผลิตและบันทึกน้ำหนักตามปกติ แต่ผลผลิตไม่ได้นำไปจำหน่ายเนื่องจากอยู่ในระยะเฝ้าระวังสารตกค้าง จากการระบาดของโรคเหี่ยวเขียวและโรคราก้ามะหยี่ที่มีความรุนแรงและกระทบต่อจำนวนต้นอย่างมาก ทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลระดับความรุนแรงของโรคหรือผลผลิตสะสมมาเปรียบเทียบทางสถิติระหว่าง 2 กรรมวิธีได้อย่างมีนัยสำคัญ

ด้านการเจริญเติบโต พบว่าที่ระยะ 8-50 วันหลังย้ายปลูก ต้นมะเขือเทศในกรรมวิธีชีวภัณฑ์มีความสูงเฉลี่ยมากกว่าวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยความแตกต่างของความสูงแต่ละช่วง มีค่าประมาณร้อยละ 7-12 แสดงถึงศักยภาพของชีวภัณฑ์ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตระยะแรก ส่วนการจัดการกิ่งและใบเกษตรกรตัดแต่งและไว้กิ่ง 2 กิ่งต่อต้นช่วงกลางฤดู และเพิ่มเป็นราว 5 กิ่งต่อต้นช่วงปลายฤดูปลูก ขณะที่จำนวนใบต่อต้นถูกควบคุมโดยการตัดแต่งให้ค่อนข้างใกล้เคียงกันระหว่าง 2 กรรมวิธี ซึ่งบางระยะพบว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์มีจำนวนใบมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อเข้าสู่ช่วงที่โรคระบาดรุนแรง ต้นมะเขือเทศทั้งแปลงมีจำนวนใบลดลงอย่างชัดเจน ส่งผลต่อการสร้างช่อดอก โดยระยะแรกกรรมวิธีชีวภัณฑ์มีจำนวนช่อดอกใกล้เคียงหรือบางช่วงน้อยกว่าวิธีเกษตรกรเล็กน้อย และเมื่อโรคราก้ามะหยี่ระบาดช่วงปลายฤดูปลูก จำนวนช่อดอกในกรรมวิธีชีวภัณฑ์ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เมื่อเทียบกับกรรมวิธีเกษตรกร นอกจากปัจจัยด้านโรคแล้ว

การผลิตยังได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศและการปลูกล่าช้า โดยการย้ายกล้าลงปลูกเลื่อนออกไปประมาณ 25 วันจากกำหนดเดิม เนื่องจากต้นกล้าชุดแรกเสียหายจากพายุฝน ช่วงการติดดอกของมะเขือเทศ (30-45 วันหลังย้ายปลูก) อยู่ช่วงที่สภาพอากาศแปรปรวน มีอากาศร้อนจัดสลับกับพายุฝน ทำให้ดอกร่วงจำนวนมากและไม่พัฒนาเป็นผล ส่งผลให้เมื่อเริ่มเก็บเกี่ยวที่ระยะ 55 วันหลังย้ายปลูก ปริมาณผลผลิตต่อต้นต่ำและไม่สม่ำเสมอ ส่วนใหญ่เพียงประมาณ 10-20 กรัมต่อต้น และบริเวณแปลงที่เป็นพื้นที่ลุ่มต่ำของกรรมวิธีชีวภัณฑ์ซึ่งมีความชื้นสูงและโรคสะสมมาก พบผลผลิตต่ำสุดเพียง 5 กรัมต่อต้น

ด้านเศรษฐศาสตร์ การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนร่วมกับการจัดการของเกษตรกรทำให้ต้นทุนด้านผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืชเพิ่มขึ้นจาก 47.83 บาท เป็น 63.97 บาทต่อ 64 ต้น และทำให้ต้นทุนรวมเพิ่มจาก 585.83 บาท เป็น 611.97 บาท ขณะที่ปริมาณผลผลิตรวมของกรรมวิธีชีวภัณฑ์อยู่ที่ 11.54 กิโลกรัม ต่ำกว่าวิธีปฏิบัติเดิมที่ให้ผลผลิต 17.71 กิโลกรัม ส่งผลให้รายได้จากการจำหน่ายมะเขือเทศของกรรมวิธีชีวภัณฑ์ลดเหลือ 520 บาท เมื่อเทียบกับ 797 บาท ในกรรมวิธีเกษตรกร และกำไรสุทธิของกรรมวิธีชีวภัณฑ์ติดลบ 91.97 บาท ขณะที่กรรมวิธีเกษตรกรยังมีกำไรสุทธิ 211.17 บาท โดยมีข้อสังเกตว่าผลผลิตที่ต่ำในกรรมวิธีชีวภัณฑ์มีสาเหตุจากการระบาดรุนแรงของโรคเหี่ยวเขียวและโรคราก้ามะหยี่ภายใต้สภาพวัสดุปลูกและระบบน้ำที่มีการปนเปื้อนเชื้อและสภาพแปลงที่มีน้ำขัง ซึ่งเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ชีวภัณฑ์อย่างเดียวไม่สามารถชดเชยได้ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.3 และตารางที่ 4.5.5-4.5.6



ภาพที่ 4.5.3 น้ำหนักผลผลิตต่อต้นของมะเขือเทศเชอร์รี่ เปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีเกษตรกร (กราฟแท่งสีดำ) และวิธีชีวภัณฑ์ (กราฟแท่งสีขาว) เมื่อเริ่มเก็บที่ระยะ 55 วันหลังปลูก ของเกษตรกรรายที่ 2

ตารางที่ 4.5.5 ปฏิทินการจัดการแปลงปลูกมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองของเกษตรกรรายที่ 2 ระหว่างมิถุนายน-กันยายน 2568

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
ก่อนย้ายปลูก	dinotefuran (สตาร์เกิลจี)	dinotefuran (สตาร์เกิลจี) บี10-อาร์ แช่ต้นกล้า
4 วัน		บี 10-อาร์
14 วัน		ไตรโค-อาร์
16 วัน	abamectin (แจคเก็ต)	
17 วัน		ไตรโค-อาร์
24 วัน	copper hydroxide (ฟังกูราน-โอเอช)	ฟังกูราน-โอเอช
28 วัน	spinetoram (เอกซอล)	
31 วัน	quintozene ผสม etridiazole (เทอร์ราคลอร์ ซุปเปอร์-เอ็กซ์)	ไตรโค-อาร์ บี 10-อาร์
38 วัน		บี 10-อาร์
45 วัน		บี 10-อาร์
53 วัน		บี 10-อาร์
55 วัน	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต
58 วัน		บี 10-อาร์
60 วัน	*Bacillus subtilis* (ลาร์มิน่า)	
63 วัน		บี 10-อาร์
68 วัน		บี 10-อาร์
71 วัน	azoxystrobin (อมิสตา)	ไตรโค-อาร์
86 วัน		ไตรโค-อาร์

ตารางที่ 4.5.6 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช ต้นทุน และผลผลิตมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองของเกษตรกรรายที่ 2 จำนวน 64 ต้น

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
1. ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช		
- สตาร์เกิลจี	160 กรัม	160 กรัม
- บี 10 - อาร์	0 กรัม	30 กรัม

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
- ฟังกูราน - โอเอช	2.5 กรัม	2.5 กรัม
- *Bacillus subtilis* (ลาร์มิน่า)	6.25 กรัม	6.25 กรัม
- อะซอกซีสโตรบิน (อมิสตา)	0.63 มิลลิลิตร	0.63 มิลลิลิตร
- quintozene ผสม etridiazole (เทอร์ราคลอร์ ซุปเปอร์-เอ็กซ์)	5 กรัม	5 กรัม
- ฟังกูราน - โอเอช	2.5 กรัม	2.5 กรัม
- Spinetoram (เอ็กซอล)	1.5 กรัม	1.5 กรัม
- abamectin (แจคเก็ต)	1.88 กรัม	1.88 กรัม
- ไตรโค-อาร์	0 กรัม	6 กรัม
2. ต้นทุนที่ใช้ในการผลิต		
- ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช	47.83 บาท	63.97 บาท
- ต้นกล้ามะเขือเทศเชอร์รี่	128 บาท	128 บาท
- เตรียมแปลง	0 บาท	0 บาท
- วัสดุปลูก	13 บาท	13 บาท
- ปุ๋ยน้ำ	288 บาท	288 บาท
- ฮอร์โมน	0 บาท	0 บาท
- ค่าแรงงานเตรียมแปลง	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานปลูก	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานพ่นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานจัดทรงต้น	21.8 บาท	21.8 บาท
- ค่าแรงงานเก็บผลผลิต	21.8 บาท	21.8 บาท
- กับดักกาวเหนียว	0 บาท	10 บาท
รวม	585.83 บาท	611.97 บาท
3. ปริมาณผลผลิตรวม	17.71 กิโลกรัม	11.54 กิโลกรัม[1]
4. รายได้	797 บาท	520 บาท
5. กำไรสุทธิ	211.17 บาท	-91.97 บาท

[1]/กรรมวิธีชีวภัณฑ์เกิดโรคเหี่ยวเขียวระบาดรุนแรงส่งผลให้ผลผลิตลดลงต่อเนื่อง

เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพการให้ผลผลิตมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองระหว่างวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกรและวิธีใช้ชีวภัณฑ์ ของแปลงสาธิตทั้ง 2 แปลง ณ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ พบว่าแปลงของเกษตรกรรายที่ 1 มีระดับการจัดการแปลงที่ดีและให้ผลผลิตสูงกว่าชัดเจน โดยมีน้ำหนักผลผลิตเฉลี่ย 30.75 กรัม/ต้น ใน

กรรมวิธีเกษตรกร และ 27.60 กรัม/ต้น ในกรรมวิธีชีวภัณฑ์ ขณะที่แปลงของเกษตรกรรายที่ 2 ให้ผลผลิตเฉลี่ยเพียง 17.87 กรัม/ต้น ในกรรมวิธีเกษตรกร และ 13.02 กรัม/ต้น ในกรรมวิธีชีวภัณฑ์ สอดคล้องกับปริมาณผลผลิตสะสมทั้งฤดูปลูก แปลงของเกษตรกรรายที่ 1 ให้ผลผลิตสะสม 676.60 และ 607.22 กรัม/ต้น กรรมวิธีเกษตรกรและชีวภัณฑ์ตามลำดับ ส่วนแปลงของเกษตรกรรายที่ 2 ให้ผลผลิตสะสมเพียง 393.25 และ 286.57 กรัมต่อต้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาพแปลง วัสดุปลูก การระบาดของโรค และการจัดการเขตกรรมอย่างมีนัยสำคัญ

ผลวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อการระบาดของศัตรูพืชและผลผลิตมะเขือเทศเชอรี่สีเหลือง พบว่าเกิดจากปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม (ฝนตกชุก ความชื้นสูง น้ำขังในแปลง) ร่วมกับการใช้วัสดุปลูกซ้ำและน้ำที่ปนเปื้อนเชื้อ การจัดการแปลงและโรงเรือนที่ไม่เอื้อต่อการระบายอากาศและการลดแหล่งสะสมโรค การใช้ชีวภัณฑ์ร่วมกับสารเคมีในลักษณะที่กระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ ตลอดจนทัศนคติและความเชื่อของเกษตรกรที่ยังเลือกใช้สารเคมีเป็นหลัก และไม่กล้าใช้ชีวภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง ทั้งหมดเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การจัดการศัตรูพืชด้วยชีวภัณฑ์ยังไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควร ข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงระบบการผลิตจึงควรมุ่งเน้นที่ (1) การปรับปรุงระบบน้ำและวัสดุปลูก โดยฆ่าเชื้อวัสดุปลูกก่อนใช้ซ้ำ ตรวจคุณภาพน้ำและจัดการแหล่งน้ำปนเปื้อนร่วมกับการปรับปรุงร่องระบายน้ำไม่ให้เกิดจุดน้ำขัง (2) การปรับปรุงทรงพุ่มมะเขือเทศเชอรี่ให้โปร่งและระบายอากาศดี ด้วยการจัดค้างและตัดแต่งใบ-กิ่งอย่างสม่ำเสมอ (3) การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ชีวภัณฑ์ โดยใช้ระยะป้องกันตั้งแต่ระยะต้นกล้า พ่นสม่ำเสมอทุก 7-10 วัน เลือกชนิดชีวภัณฑ์ให้เหมาะกับเชื้อสาเหตุโรค และหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่มีผลทำลายจุลินทรีย์ช่วงเวลาเดียวกัน (4) การปรับทัศนคติและพฤติกรรมของเกษตรกร ผ่านการจัดแปลงสาธิต เปรียบเทียบผลผลิตจริง และการสร้างแรงจูงใจทางการตลาด เช่น ราคาพิเศษสำหรับผลผลิตปลอดสาร และ (5) การส่งเสริมการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) ที่ผสานการใช้ชีวภัณฑ์ การจัดการดินและน้ำ การหมุนเวียนพืช พันธุ์ต้านทานโรค และศัตรูธรรมชาติร่วมกัน เพื่อลดการพึ่งพาสารเคมีและเพิ่มความยั่งยืนของระบบการผลิตมะเขือเทศเชอรี่สีเหลืองภายในพื้นที่

ผลการจัดทำแปลงสาธิตการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน ณ โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน

คัดเลือกแปลงมะเขือเทศโทมัสของเกษตรกรรายที่ 2 เป็นการเปรียบเทียบวิธีการจัดการแปลงระหว่างวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกรกับวิธีใช้ชีวภัณฑ์ โดยดำเนินการภายในโรงเรือนที่มุงหลังคาพลาสติกและล้อมรอบด้วยสแลนสีเขียว ขนาด 5×30 เมตร ปลูกในถุงวัสดุปลูกเรียงแถวเดี่ยว ใช้ระบบน้ำหยดให้ปุ๋ยและน้ำวันละ 3 ครั้ง ต้นกล้าย้ายปลูกเมื่อวันที่ 5 เมษายน 2568 จากนั้นจัดการแปลงตามวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกรและปฏิบัติตามมาตรการใช้ชีวภัณฑ์ การจัดการเขตกรรม และการสำรวจศัตรูพืชในกรรมวิธีชีวภัณฑ์ ตลอดฤดูปลูกพบแมลงศัตรูพืชหลัก 2 ชนิด ได้แก่ แมลงหวี่ขาวและแมลงวันหนอนชอนใบ โดยแมลงหวี่ขาวพบเกือบทุกระยะการเจริญเติบโต แต่กรรมวิธีชีวภัณฑ์สามารถลดจำนวนแมลงเฉลี่ยต่อต้นได้ต่ำกว่าวิธีเกษตรกรอย่างชัดเจน ทั้งด้านจำนวนตัวต่อต้นและความถี่การพบ สอดคล้องกับข้อมูลจากกับดักกาวเหนียวที่พบว่าจำนวนแมลงหวี่ขาวเฉลี่ยต่อกับดักและจำนวนสะสมลดลงหลังการใช้ชีวภัณฑ์ และการพ่นสารกำจัดแมลงตามปฏิทินการจัดการของแปลง ทั้งนี้บางช่วงจำนวนแมลงอาจกลับเพิ่มขึ้นบ้างตามสภาพแวดล้อมและช่วงเวลา แต่โดยรวมแสดงให้เห็นว่าการผสมผสานชีวภัณฑ์ร่วมกับการจัดการแมลงที่เหมาะสมช่วยควบคุมประชากร

แมลงหวี่ขาวได้ สำหรับแมลงวันหนอนชอนใบพบว่ามีการระบาดต่อเนื่องและมีความรุนแรงสูงกว่าปัญหาแมลงหวี่ขาว โดยพบการเข้าทำลายทุกกรรมวิธีการทดลองเกือบตลอดช่วงอายุของมะเขือเทศโทมัส ความถี่การพบอยู่ระดับสูงเกือบ 100% หลายระยะ และเริ่มลดลงช่วงปลายฤดูปลูกเมื่อมีการตัดแต่งใบที่เป็นโรคและใบเสียหายออกจากแปลง กรรมวิธีชีวภัณฑ์สามารถลดจำนวนแมลงวันหนอนชอนใบบางช่วงเวลาได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่โดยรวมปัญหาข้างต้นยังเป็นข้อจำกัดของการผลิต ต้องอาศัยการจัดการเชิงเขตกรรมและการดูแลแปลงอย่างใกล้ชิดร่วมด้วย

ด้านโรคพืชพบการระบาดของโรคใบไหม้ (Late blight) ตั้งแต่ระยะประมาณ 24 วันหลังย้ายปลูก ซึ่งเป็นช่วงติดดอกออกผล โดยระยะเริ่มต้นทั้ง 2 กรรมวิธี มีระดับความรุนแรงของโรคใกล้เคียงกัน แต่ภายหลังจากที่กรรมวิธีชีวภัณฑ์มีการตัดแต่งใบที่เป็นโรคออกจากแปลงทันทีเมื่อเริ่มพบอาการ และพ่นชีวภัณฑ์ไตรโคเดอร์มา (พีพี-ไตรโค) อย่างสม่ำเสมอทุก 7 วัน พบว่าความรุนแรงของโรคในกรรมวิธีชีวภัณฑ์ลดลงอย่างชัดเจน และต่ำกว่าวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญหลายระยะ ขณะที่กรรมวิธีเกษตรกรมีการตอบสนองล่าช้าช่วงแรก คือยังไม่ตัดแต่งใบที่เป็นโรคทันทีทำให้ระดับความรุนแรงสูงขึ้นก่อนจะลดลงจากการตัดแต่งและใช้สารเคมีป้องกันกำจัดโรค ประกอบกับช่วงสภาพอากาศฝนตกชุกทำให้โรคเกิดซ้ำ แต่กรรมวิธีชีวภัณฑ์ยังคงควบคุมไม่ให้ระดับความรุนแรงของโรคสูงเท่ากรรมวิธีเกษตรกร ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้ชีวภัณฑ์ร่วมกับการจัดการเขตกรรมและการกำจัดส่วนที่เป็นโรคทันท่วงทีสามารถลดความรุนแรงของโรคใบไหม้ได้จริงในระดับแปลง

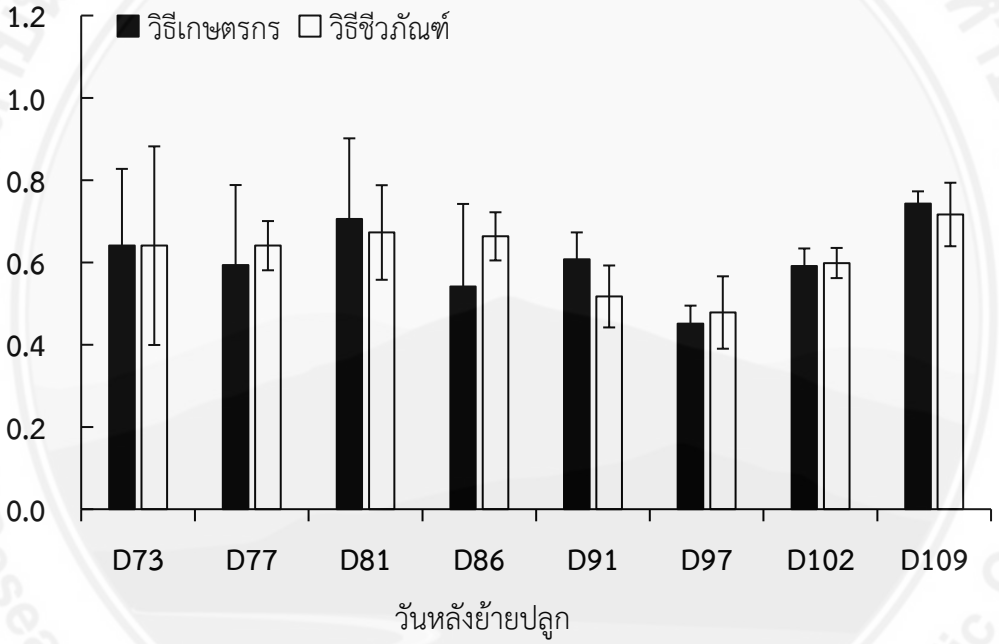
การเจริญเติบโตของมะเขือเทศโทมัส ด้านความสูงพบว่าทั้ง 2 กรรมวิธี มีแนวโน้มการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงช่วงประมาณ 65 วันหลังปลูก จากนั้นความสูงคงที่ตามระดับความสูงของค้าง ภาพรวมการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน โดยวิธีเกษตรกรมีอัตราเพิ่มความสูงเฉลี่ยเพียงเล็กน้อยเหนือกว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์เมื่อพืชเข้าระยะปลาย แต่บางระยะกลางฤดูปลูก เช่น ที่ 37 และ 44 วันหลังย้ายปลูก พบว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์มีความสูงมากกว่าวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญ จากการกระตุ้นการเจริญเติบโตด้วยชีวภัณฑ์ ขณะที่จำนวนใบและการตัดแต่งใบอยู่ภายใต้การจัดการของเกษตรกร ทำให้ความแตกต่างด้านจำนวนใบไม่ถูกนำมาสรุปวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ แต่ภาพรวมพบว่าการดูแลบำรุงให้พืชมีจำนวนใบเพียงพอในระยะก่อนเก็บเกี่ยวช่วยสนับสนุนการสร้างช่อดอกและผลผลิต

ด้านการสร้างช่อดอกพบว่าทั้ง 2 กรรมวิธี มีจำนวนช่อดอกเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง โดยแนวโน้มข้อมูลชี้ให้เห็นว่าวิธีชีวภัณฑ์มีอัตราการเพิ่มจำนวนช่อดอกต่อต้นสูงกว่าวิธีเกษตรกรเล็กน้อยในช่วงสำคัญของการสร้างผลผลิต และมีจำนวนช่อดอกมากกว่ากรรมวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติบางระยะ เช่น ที่ 51-71 วันหลังย้ายปลูก อย่างไรก็ตามเกษตรกรมีการจำกัดจำนวนช่อดอกและจำนวนผลต่อช่อเพื่อให้ขนาดผลเป็นไปตามความต้องการของตลาด จึงมีการตัดแต่งให้เหลือประมาณ 5-6 ช่อดอกต่อต้น และไว้ผล 4-5 ผลต่อช่อ เพื่อป้องกันไม่ให้ต้นโทรมเร็วและควบคุมคุณภาพผลผลิต

เมื่อพิจารณาผลผลิต พบว่าเริ่มเก็บเกี่ยวที่ระยะ 73 วันหลังย้ายปลูก และทยอยเก็บรวม 8 ครั้ง ระหว่าง 73-109 วันหลังปลูก พบว่าน้ำหนักผลผลิตเฉลี่ยต่อต้นของทั้ง 2 กรรมวิธี ไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีค่าประมาณ 0.45-0.74 กิโลกรัม/ต้น แต่ละรอบเก็บ เกิดลักษณะการให้ผลผลิตค่อนข้างสม่ำเสมอช่วงต้นและลดลงเล็กน้อยระยะกลาง ก่อนจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งช่วงปลายฤดูเก็บเกี่ยว น้ำหนักผลผลิตสะสมทั้งฤดูปลูก

เฉลี่ยประมาณ 4.9 กิโลกรัม/ต้นในทั้ง 2 กรรมวิธี แสดงให้เห็นว่าการใช้ชีวภัณฑ์ไม่ได้ลดศักยภาพการให้ผลผลิตของพืช เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกร

การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยให้ได้ผลผลิตรวมเล็กน้อยสูงกว่าวิธีเกษตรกร (315.35 เทียบกับ 311.95 กิโลกรัม) ทำให้รายได้จากการจำหน่ายผลผลิตสูงกว่าเล็กน้อย ขณะที่ต้นทุนการผลิตรวมเพิ่มขึ้นจากการลงทุนชีวภัณฑ์ น้ำหมักพีพีสูตร 3 และกับดักกาวเหนียว ส่งผลให้กำไรสุทธิของกรรมวิธีชีวภัณฑ์สูงกว่าวิธีเกษตรกรระดับที่ใกล้เคียงกัน (ประมาณ 18,671 เทียบกับ 18,567 บาท) ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าภายใต้ระบบการจัดการที่เหมาะสม การใช้ชีวภัณฑ์ร่วมกับมาตรการเขตกรรมและการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานสามารถรักษาระดับผลผลิตและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจไว้ได้ระดับเดียวกับ หรือสูงกว่าวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกร โดยมีข้อได้เปรียบด้านการลดระดับความรุนแรงของโรคและจำนวนแมลงศัตรูพืช โดยเฉพาะแมลงหวี่ขาว ซึ่งเป็นผลดีเชิงสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของระบบการผลิตมะเขือเทศโทมัส รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.4 และตารางที่ 4.5.7-4.5.8



ภาพที่ 4.5.4 น้ำหนักผลผลิตเฉลี่ยต่อต้นของมะเขือเทศโทมัส เปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีเกษตรกร (กราฟแท่งสีดำ) และวิธีชีวภัณฑ์ (กราฟแท่งสีขาว) ที่ระยะ 73-109 วันหลังปลูกของเกษตรกรรายที่ 2

ตารางที่ 4.5.7 ปฏิทินการจัดการแปลงปลูกมะเขือเทศโทมัสของเกษตรกรรายที่ 2 ระหว่างเมษายน-มิถุนายน 2568

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
ก่อนย้ายปลูก	dinotefuran (สตาร์เกิลจี) รองก้นหลุม	dinotefuran (สตาร์เกิลจี) รองก้นหลุม
17 วัน	สารกำจัดแมลง[1/]	บี10-อาร์ ร่วมกับกับดักกาวเหนียว

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
22 วัน	สารกำจัดแมลง[1/]	
23 วัน		บี10-อาร์
31 วัน	emamectinbenzoate (แฮตซ์แบ๊ก)	
35 วัน		น้ำหมักพีพี สูตร 3
38 วัน		บี10–อาร์
41 วัน	สารกำจัดแมลง[1/]	
45 วัน	สารกำจัดแมลง[1/]	
51 วัน		ไตรโค-อาร์
60 วัน	สารกำจัดแมลง[1/]	
66 วัน		1) น้ำหมักพีพีสูตร 3 2) ไตรโค-อาร์
73 วัน	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต

[1/]สารกำจัดแมลงที่ไม่มีฉลาก และเครื่องหมายการค้า

ตารางที่ 4.5.8 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช ต้นทุน และผลผลิตมะเขือเทศโทมัสของเกษตรกรรายที่ 2 จำนวน 64 ต้น

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
1. ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช		
- dinotefuran (สตาร์เกิลจี)	0 กรัม	0 กรัม
- สารกำจัดแมลง	10 กรัม	10 กรัม
- บี10-อาร์	0 กรัม	100 กรัม
- emamectinbenzoate	200 กรัม	200 กรัม
- น้ำหมักพีพีสูตร 3	0 มิลลิลิตร	160 มิลลิลิตร
- ไตรโค-อาร์	0 กรัม	240 กรัม
2. ต้นทุนที่ใช้ในการผลิต		
- ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช	140.83 บาท	198 บาท
- ต้นกล้ามะเขือเทศโทมัส	235 บาท	235 บาท

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
- เตรียมแปลง	133 บาท	133 บาท
- วัสดุปลูก	186 บาท	186 บาท
- ปุ๋ยน้ำ	300 บาท	300 บาท
- ฮอร์โมน	50 บาท	50 บาท
- ค่าแรงงานเตรียมแปลง	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานปลูก	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานพ่นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานแต่งทรงต้น	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานเก็บผลผลิต	133 บาท	133 บาท
- กับดักกาวเหนียว	0 บาท	60 บาท
รวม	1,709.83 บาท	1,827.00 บาท
3. ปริมาณผลผลิตรวม	311.95 กิโลกรัม	315.35 กิโลกรัม
4. รายได้	20,276.75 บาท	20,497.75 บาท
5. กำไรสุทธิ	18,566.92 บาท	18,670.75 บาท

การทดลองแปลงมะเขือเทศโทมัสของเกษตรกรรายที่ 1 ดำเนินการในโรงเรือนมุงพลาสติกล้อมมุ้งตาข่าย ขนาด 5×30 เมตร ปลูกในถุงวัสดุปลูกวางแถวเดี่ยว ระยะระหว่างแถว 1.35 เมตร ใช้ระบบน้ำหยดให้น้ำและปุ๋ยวันละ 3 ครั้ง เพาะกล้าเมื่อวันที่ 22 มีนาคม 2568 และย้ายกล้าลงปลูกวันที่ 12 เมษายน 2568 เปรียบเทียบวิธีปฏิบัติเดิมของเกษตรกรกับวิธีใช้ชีวภัณฑ์ โดยกรรมวิธีชีวภัณฑ์ได้เพิ่มการสำรวจศัตรูพืช การจัดการเขตกรรม และการใช้ชีวภัณฑ์ภายใต้คำแนะนำของนักวิจัย ตลอดฤดูปลูกพบแมลงศัตรู 2 ชนิด ได้แก่ แมลงหวี่ขาวและแมลงวันหนอนชอนใบ โดยจำนวนแมลงหวี่ขาวเฉลี่ยตลอดการทดลองในกรรมวิธีชีวภัณฑ์ต่ำกว่าวิธีเกษตรกรอย่างชัดเจน ซึ่งช่วงแรกพบการระบาดรุนแรง ทำให้เกษตรกรต้องพ่นสารเคมีกำจัดแมลงและเบ็บ-อาร์ ค่อนข้างถี่ พร้อมล้อมมุ้งตาข่ายกันแมลง แต่ยังคงพบแมลงหวี่ขาวต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามหลายระยะการเจริญเติบโต กรรมวิธีชีวภัณฑ์สามารถลดความถี่การพบแมลงหวี่ขาวได้ดีกว่าวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนแมลงวันหนอนชอนใบมีรูปแบบการระบาดเป็นรอบทุกประมาณ 3 สัปดาห์ โดยช่วงต้นฤดูปลูกจนถึงประมาณ 59 วันหลังย้ายปลูก วิธีชีวภัณฑ์สามารถควบคุมจำนวนแมลงวันหนอนชอนใบได้ต่ำกว่าวิธีเกษตรกรต่อเนื่อง ความถี่พบอยู่ระดับสูงในหลายช่วงเวลา สอดคล้องกับการใช้กับดักกาวเหนียวที่พบจำนวนตัวเต็มวัยของแมลงหวี่ขาวลดลงเมื่อมีการใช้น้ำหมักพีพีสูตร 3 และชีวภัณฑ์อื่นร่วมกับมาตรการทางเขตกรรม

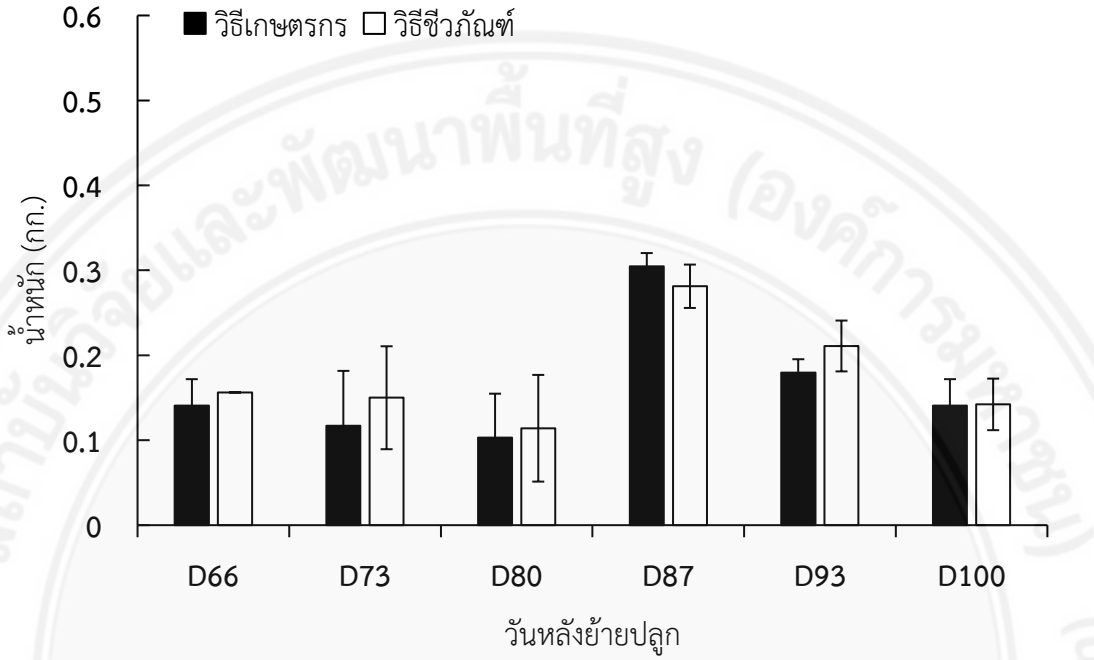
ด้านโรคพืช พบเพียงโรคใบไหม้และใบจุดในระดับต่ำมาก ส่วนใหญ่เกิดที่ใบล่างหรือใบแก่ช่วงต้นฤดูปลูก และเกษตรกรตัดแต่งใบออกอย่างสม่ำเสมอ ทำให้ไม่เกิดการแพร่ระบาดรุนแรง ไม่พบความแตกต่างด้านโรคอย่างชัดเจนระหว่าง 2 กรรมวิธี แสดงให้เห็นว่าการจัดการเขตกรรมที่เข้มงวดของเกษตรกรร่วมกับแนวทางของนักวิจัยสามารถควบคุมโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเกษตรกรมีแนวโน้มยอมรับและพร้อมนำชีวภัณฑ์มาใช้ในระบบการผลิตมากขึ้น

การเจริญเติบโตด้านความสูงพบว่าทั้ง 2 กรรมวิธี เพิ่มความสูงโดยเฉลี่ยวิธีเกษตรกรมีอัตราเพิ่มความสูงต่อวันสูงกว่าวิธีชีวภัณฑ์เล็กน้อย แต่ช่วงกลางฤดูปลูก (โดยเฉพาะที่ 38, 45 และ 52 วันหลังย้ายปลูก) กรรมวิธีชีวภัณฑ์มีความสูงต้นมากกว่าวิธีเกษตรกรอย่างมีนัยสำคัญ ก่อนที่ความสูงของทั้ง 2 กรรมวิธี จะปรับเข้าใกล้กันและคงที่เมื่อเข้าสู่ระยะใกล้เก็บเกี่ยว เนื่องจากมีการตัดแต่งยอดให้พอดีกับความสูงค้าง ด้านจำนวนใบต่อต้นพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุพืช โดยกรรมวิธีชีวภัณฑ์มักมีจำนวนใบมากกว่าวิธีเกษตรกรเล็กน้อย แต่ข้อมูลไม่ได้นำมาวิเคราะห์ความแตกต่างเชิงสถิติอย่างละเอียดเนื่องจากมีการตัดแต่งใบเป็นระยะ ขณะที่จำนวนช่อดอกต่อต้นพบแนวโน้มว่ากรรมวิธีชีวภัณฑ์กระตุ้นการสร้างช่อดอกได้เร็วกว่ามีอัตราการเพิ่มช่อดอกต่อสัปดาห์สูงกว่าวิธีเกษตรกร และมีจำนวนช่อดอกมากกว่าตลอดช่วง 45-80 วันหลังย้ายปลูกอย่างมีนัยยะ

ด้านผลผลิต เกษตรกรเริ่มเก็บเกี่ยวที่ 66 วันหลังย้ายปลูก และเก็บต่อเนื่องรวม 6 ครั้ง ถึง 100 วันหลังปลูก พบว่าน้ำหนักผลผลิตเฉลี่ยต่อต้นแต่ละรอบของทั้ง 2 กรรมวิธี ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ระดับผลผลิตรวมต่ำกว่าแปลงของเกษตรกรรายที่ 2 ประมาณ 3 เท่า เมื่อพิจารณาผลผลิตสะสมพบว่าสามารถเก็บผลผลิตได้เฉลี่ยเพียง 1.02 กิโลกรัม/ต้น ภายใน 34 วัน อย่างไรก็ตามแนวโน้มกรรมวิธีชีวภัณฑ์ให้ผลผลิตสะสมสูงกว่าวิธีเกษตรกรประมาณร้อยละ 6.97 ในเชิงเศรษฐศาสตร์ ต้นทุนการผลิตของกรรมวิธีชีวภัณฑ์จะสูงกว่าวิธีเกษตรกรจากค่าใช้จ่ายชีวภัณฑ์ น้ำหมัก และกับดักกาวเหนียว แต่ผลผลิตรวมและรายได้จากการจำหน่ายผลผลิตสูงกว่า ทำให้กำไรสุทธิของกรรมวิธีชีวภัณฑ์มากกว่าวิธีเกษตรกร (2,039.20 เทียบกับ 1,908.05 บาท) สอดคล้องกับผลจากแปลงของเกษตรกรรายที่ 2 ที่กรรมวิธีชีวภัณฑ์ให้กำไรใกล้เคียงหรือสูงกว่าวิธีเกษตรกรเล็กน้อย ข้อมูลแสดงให้เห็นว่าทั้ง 2 แปลงมีศักยภาพสูงในการผลิตมะเขือเทศโทมัสคุณภาพดีภายใต้ระบบโรงเรือน แต่ยังมีข้อจำกัดจากความชื้นสะสมภายในโรงเรือน การปลูกค่อนข้างหนาแน่น การใช้วัสดุปลูกซ้ำ และการใช้ชีวภัณฑ์ไม่ต่อเนื่องร่วมกับการใช้สารเคมีระยะที่ไม่เหมาะสม ซึ่งลดประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามผลการทดลองแสดงชัดว่าแปลงที่ใช้ชีวภัณฑ์มีจำนวนแมลงหวี่ขาวน้อยกว่าระดับความรุนแรงของโรคใบไหม้ต่ำกว่า และมีปริมาณผลผลิตสะสมและกำไรสุทธิสูงกว่าวิธีเกษตรกรทั้ง 2 แปลง

เมื่อรวมกับการวิเคราะห์ปัจจัยจะเห็นว่าการผลิตมะเขือเทศโทมัสภายในโรงเรือนขึ้นกับสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูง การใช้วัสดุปลูกและระบบน้ำหยดที่อาจก่อให้เกิดการสะสมเชื้อโรค การปลูกหนาแน่นและตัดแต่งทรงพุ่มไม่สม่ำเสมอ การใช้ชีวภัณฑ์หลังการระบาดและใช้ร่วมกับสารเคมีโดยไม่เว้นระยะที่เหมาะสม รวมทั้งพฤติกรรมและความเชื่อของเกษตรกรที่ยังเลือกใช้สารเคมีเป็นหลัก และการปลูกซ้ำในพื้นที่เดิมที่ทำให้เชื้อโรคและแมลงสะสมในแปลง แนวทางการปรับปรุงที่เสนอ ได้แก่ การปรับปรุงการระบายอากาศภายในโรงเรือน ลดความชื้นสะสมและปรับรอบการให้น้ำให้เหมาะสม การปูพื้นและจัดการวัชพืชเพื่อลดการกระเด็นของเชื้อโรคจากดิน การปรับระยะปลูกและตัดแต่งทรงพุ่มให้โปร่ง การใช้ชีวภัณฑ์ในเชิงป้องกันอย่างสม่ำเสมอร่วมกับกับดักแมลง และเว้นระยะ 5-7 วัน ระหว่างการใช้สารเคมีกับชีวภัณฑ์

ตลอดจนเสริมชีวภัณฑ์ในวัสดุปลูกก่อนย้ายปลูก การพัฒนาแปลงสาธิตต่อเนื่องอย่างน้อย 3 ฤดูกาลเพาะปลูก การสร้างวิทยากรท้องถิ่น การสนับสนุนปัจจัยชีวภัณฑ์ระยะเริ่มต้นและการสร้างตลาดรองรับผลผลิต “มะเขือเทศปลอดสาร” เพื่อบริหารความเสี่ยงทางเศรษฐกิจและสร้างแรงจูงใจให้เกษตรกรหันมาใช้ชีวภัณฑ์และระบบการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานอย่างยั่งยืน รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.5 และตารางที่ 4.5.9-4.5.10



ภาพที่ 4.5.5 น้ำหนักผลผลิตเฉลี่ยต่อต้นของมะเขือเทศโทมัส เปรียบเทียบระหว่างกรรมวิธีเกษตรกร (กราฟแท่งสีดำ) และวิธีชีวภัณฑ์ (กราฟแท่งสีขาว) ที่ระยะ 66-100 วันหลังปลูก ของเกษตรกรรายที่ 1

ตารางที่ 4.5.9 ปฏิทินการจัดการแปลงปลูกมะเขือเทศโทมัสของเกษตรกรรายที่ 1 ระหว่างเมษายน-มิถุนายน 2568

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
ก่อนย้ายปลูก	dinotefuran (สตาร์เกิลจี)	dinotefuran (สตาร์เกิลจี)
15 วัน		บี10-อาร์ กับดักกาวเหนียว
17 วัน		บี10-อาร์
18 วัน	cartap hydrochloride (คาร์เวฟ 50)	
20 วัน	บี10–อาร์	น้ำหมักพีพี สูตร 3 เบ็บ-อาร์

อายุพืช	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
24 วัน	cartap hydrochloride (คาร์เวฟ 50) difenoconazole+azoxystrobin (ออติวา)	
25 วัน		ไตรโค-อาร์
35 วัน	cartap hydrochloride (คาร์เวฟ 50)	
45 วัน		
51 วัน		
60 วัน		
66 วัน	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต	เริ่มเก็บเกี่ยวผลผลิต

ตารางที่ 4.5.10 ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช ต้นทุน และผลผลิตมะเขือเทศโทมัสของเกษตรกรรายที่ 1 จำนวน 64 ต้น

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
1. ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช		
- Cartap hydrochloride	150 กรัม	150 กรัม
- Difenoconazole ผสม azoxystrobin	20 กรัม	20 กรัม
- บี10-อาร์	32 กรัม	98 กรัม
- น้ำหมักพีพีสูตร 3	0 มิลลิลิตร	80 มิลลิลิตร
- เบ็บ-อาร์	0 กรัม	150 กรัม
- ไตรโค-อาร์	0 กรัม	60 กรัม
2. ต้นทุนที่ใช้ในการผลิต		
- ผลิตภัณฑ์กำจัดศัตรูพืช	131.45 บาท	182 บาท
- ต้นกล้ามะเขือเทศโทมัส	230.3 บาท	230.3 บาท
- เตรียมแปลง	0 บาท	0 บาท
- วัสดุปลูก	186 บาท	186 บาท
- ปุ๋ยน้ำ	300 บาท	300 บาท
- ฮอร์โมน	50 บาท	50 บาท

ข้อมูล	วิธีปฏิบัติเดิม	วิธีใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน
- ค่าแรงงานเตรียมแปลง	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานปลูก	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานพ่นสารป้องกันกำจัดศัตรูพืช	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานแต่งทรงต้น	133 บาท	133 บาท
- ค่าแรงงานเก็บผลผลิต	133 บาท	133 บาท
- กับดักกาวเหนียว		60 บาท
รวม	1,562.45 บาท	1,673.3 บาท
3. ปริมาณผลผลิตรวม	63.1 กิโลกรัม	67.5 กิโลกรัม
4. รายได้	3,470.5 บาท	3,712.5 บาท
5. กำไรสุทธิ	1,908.05 บาท	2,039.2 บาท

การพัฒนาสมรรถนะของเกษตรกรที่เข้าร่วมโครงการมุ่ง 3 ด้านหลัก คือ ทักษะ ความรู้ และทัศนคติ โดยใช้กระบวนการเรียนรู้แบบมีส่วนร่วมตลอดระยะเวลาดำเนินงานแปลงทดสอบ ได้แก่ การอธิบายหลักการ การสาธิตผ่านแปลง การฝึกปฏิบัติจริง และการซักถามย้อนกลับ เพื่อให้เกษตรกรสามารถทำความเข้าใจ นำไปประยุกต์ใช้ และถ่ายทอดต่อได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับบริบทพื้นที่ของตนเอง

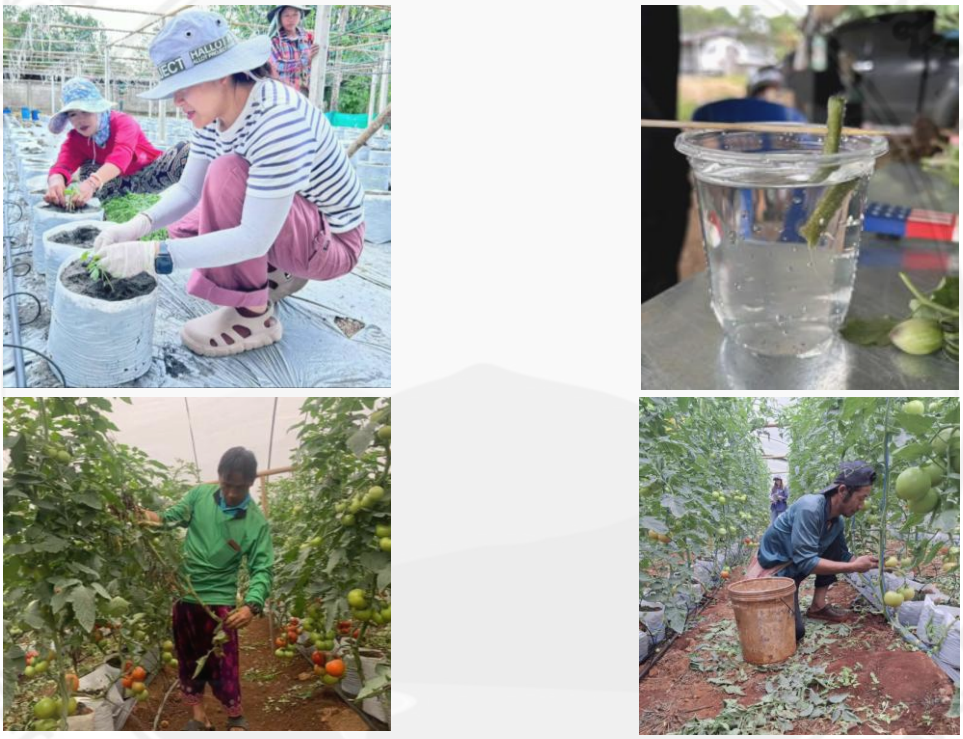
ผลการพัฒนาสมรรถนะของเกษตรกรศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ

การพัฒนาเน้นให้เกษตรกรเข้าใจหลักการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนควบคู่กับการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) โดยเฉพาะโรคใบจุดมะเขือเทศและโรคเหี่ยวเขียว ซึ่งเชื่อมโยงกับการปนเปื้อนเชื้อของวัสดุปลูกและระบบน้ำ นักวิจัยได้สาธิตการสังเกตอาการเริ่มต้นของโรค การเก็บตัวอย่างอย่างถูกวิธี การกำจัดต้นหรือส่วนที่เป็นโรคออกจากแปลง การปรับระยะปลูก และการตัดแต่งกิ่งเพื่อลดความหนาแน่นของทรงพุ่ม ตลอดจนการใช้ชีวภัณฑ์ บี10-อาร์ แช่ต้นกล้าก่อนย้ายปลูกและใช้ต่อเนื่องในระยะป้องกัน ร่วมกับการอธิบายเชิงวิทยาศาสตร์เพื่อปรับเปลี่ยนความเชื่อเดิม เช่น การเก็บใบที่เป็นโรคไว้บนต้น ส่งผลให้เกษตรกรเริ่มตระหนักถึงบทบาทของปัจจัยแวดล้อม การจัดการแปลง และเวลาการใช้ชีวภัณฑ์ที่เหมาะสม และมีการปรับเปลี่ยนแนวทางปฏิบัติจริง เช่น วางแผนฆ่าเชื้อวัสดุปลูก การปรับรูปแบบแปลงเพื่อลดน้ำขัง และการหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีทับซ้อนกับช่วงเวลาที่ใช้ชีวภัณฑ์

ผลการพัฒนาสมรรถนะของเกษตรกรโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน

การพัฒนาสมรรถนะมุ่งเน้นการสร้างความเข้าใจวงจรชีวิตและพฤติกรรมของแมลงศัตรูพืช ได้แก่ แมลงวันหนอนชอนใบและแมลงหวี่ขาว ซึ่งสร้างความเสียหายตั้งแต่ระยะต้นกล้าจนถึงระยะเก็บเกี่ยว และเป็นพาหะนำโรคไวรัส โดยเน้นให้เกษตรกรเห็นความสำคัญของการใช้ตาข่ายกันแมลง การรักษาความสะอาดแปลง การตัดแต่งกิ่งให้โปร่ง และการใช้น้ำหมักพีพี สูตร 3 ร่วมกับการใช้กับดักกาวเหนียวอย่างถูกหลัก แทนความ

เข้าใจเดิมที่มองว่ากับดักสีเหลืองดึงแมลงเข้ามาในแปลงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังถ่ายทอดการใช้ชีวภัณฑ์บี10-อาร์ โรยรอบโคนต้นป้องกันโรคเหี่ยวเขียว และการใช้ไตรโคร-อาร์ ควบคุมโรคที่เกิดจากเชื้อรา ผลการติดตามหลังถ่ายทอดความรู้พบว่า เกษตรกรมีทัศนคติที่ดีขึ้นต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน เริ่มนำชีวภัณฑ์ไปใช้กับพืชอื่นในแปลง และให้ความร่วมมือในการกำจัดต้นที่เป็นโรคออกจากแปลง แต่ยังคงมีความลังเลและใช้ชีวภัณฑ์ควบคู่กับสารเคมี เนื่องจากกังวลต่อความเสี่ยงด้านผลผลิต ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าการสร้างความเชื่อมั่นจำเป็นต้องอาศัยการทำแปลงสาธิตระยะยาวต่อเนื่องหลายฤดูกาล ภายใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เพื่อให้เกษตรกรได้เห็นผลสัมฤทธิ์ของชีวภัณฑ์เชิงประจักษ์ ทั้งด้านประสิทธิภาพการควบคุมศัตรูพืชและผลกระทบเชิงบวกต่อผลผลิต ซึ่งจะเป็นพื้นฐานในการพัฒนาเกษตรกรให้เป็นวิทยากรท้องถิ่นที่สามารถถ่ายทอดองค์ความรู้ด้านการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานสู่ชุมชนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ภาพที่ 4.5.6)



ภาพที่ 4.5.6 ตัวอย่างกิจกรรมถ่ายทอดองค์ความรู้ระหว่างการดำเนินงานแปลงสาธิตร่วมกับเกษตรกร

ผลประเมินการยอมรับและความพึงพอใจของเกษตรกรที่ปลูกพืชตระกูล Solanaceae ต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนภายใต้ระบบการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน สามารถสรุปและอธิบายดังต่อไปนี้

ข้อมูลทั่วไปของเกษตรกร

กลุ่มตัวอย่างเกษตรกร 45 ราย แยกเป็นเกษตรกรพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ 15 ราย และพื้นที่โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน 30 ราย คิดเป็นร้อยละ 33.33 และ 66.67 ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของเกษตรกรในพื้นที่เป้าหมายทั้ง 2 แห่ง อย่างเหมาะสม กลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีสถานะเป็นสมาชิกมูลนิธิโครงการหลวงหรือโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวง คิดเป็น

ร้อยละ 82.22 ขณะที่ร้อยละ 17.78 ไม่ได้เป็นสมาชิกโดยตรง แต่ส่วนมากเป็นสมาชิกในครัวเรือนของผู้ที่เป็นสมาชิกโครงการ ซึ่งกลุ่มตัวอย่างมีความเชื่อมโยงกับระบบการผลิตภายใต้การกำกับของโครงการเป็นอย่างดี

ด้านชาติพันธุ์ กลุ่มเกษตรกรตัวอย่าง ประกอบด้วย คนเมือง/ชนพื้นเมือง ชาวกะเหรี่ยงและชาวม้ง สัดส่วนที่เท่ากัน คือร้อยละ 33.33 มีความหลากหลายทางชาติพันธุ์บนพื้นที่สูง แต่ขณะเดียวกันสื่อว่าทุกกลุ่มชาติพันธุ์มีโอกาสได้รับการส่งเสริมระบบเดียวกัน เกษตรกรส่วนใหญ่ร้อยละ 93.33 อยู่อาศัยในพื้นที่มาตั้งแต่เกิด มีเพียงร้อยละ 6.67 ที่เพิ่งย้ายเข้ามาในพื้นที่ปัจจุบัน โดยเกษตรกรส่วนใหญ่มีความผูกพันและคุ้นเคยกับสภาพพื้นที่และระบบการผลิตของชุมชนตนเองเป็นอย่างดี ด้านเศรษฐกิจ เกษตรกรส่วนใหญ่มีรายได้หลักจากการทำการผลิตทางการเกษตรให้มูลนิธิโครงการหลวงหรือสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง คิดเป็นร้อยละ 84.44 ขณะที่อีกร้อยละ 15.56 มีรายได้หลักจากแหล่งอื่น ได้แก่ การค้าขาย การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และการรับราชการ ข้อมูลแสดงว่าการผลิตผลผลิตทางการเกษตรภายใต้ระบบโครงการหลวงยังคงเป็นฐานรายได้หลักของครัวเรือนในพื้นที่อย่างชัดเจน

ข้อมูลด้านการผลิตพืชตระกูล Solanaceae ของเกษตรกร

ด้านระบบการผลิตพืชตระกูล Solanaceae พบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ปลูกมะเขือเทศเชอรี่ คิดเป็นร้อยละ 86.67 ของกลุ่มตัวอย่าง (39 ราย) โดยกระจายอยู่ทั้งพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือและโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน ขณะที่ร้อยละ 33.33 (15 ราย) ปลูกมะเขือเทศโทมัส ซึ่งทั้งหมดอยู่ในพื้นที่โครงการฯ ปางหินฝน และมีเกษตรกรบางส่วนที่ปลูกทั้ง 2 ชนิด สลับกันตามฤดูและสภาพตลาด ระบบการรับรองมาตรฐานด้านความปลอดภัยพบว่ากลุ่มผู้ปลูกมะเขือเทศเชอรี่ ร้อยละ 92.31 ผลิตภายใต้ระบบ GAP และร้อยละ 7.69 ผลิตในระบบเกษตรอินทรีย์ ส่วนผู้ปลูกมะเขือเทศโทมัส ร้อยละ 93.33 อยู่ภายใต้ระบบ GAP และร้อยละ 6.67 อยู่ระบบเกษตรอินทรีย์ แสดงว่าเกษตรกรส่วนใหญ่มีการผลิตภายใต้มาตรฐานที่สามารถรองรับตลาดคุณภาพและตลาดส่งออก

ระบบการปลูกส่วนใหญ่เป็นการปลูกในโรงเรือน โดยมะเขือเทศเชอรี่ ร้อยละ 76.92 ปลูกในโรงเรือนและร้อยละ 23.08 ปลูกในพื้นที่โล่ง ขณะที่มะเขือเทศโทมัสปลูกในโรงเรือนทั้งหมด คิดเป็นร้อยละ 100 ข้อมูลพบว่าเกษตรกรตระหนักถึงความสำคัญของการควบคุมสภาพแวดล้อมในการผลิตพืชมูลค่าสูง และเป็นเงื่อนไขที่สนับสนุนการนำแนวทางการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานและชีวภัณฑ์มาใช้

ความคิดเห็นและพฤติกรรมการใช้ชีวภัณฑ์ ฟีโรโมน และสารเคมี

การสำรวจพฤติกรรมการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนพบว่า เกษตรกรส่วนใหญ่ร้อยละ 66.67 เคยใช้ชีวภัณฑ์และ/หรือฟีโรโมนมาก่อน โดยเกษตรกรจากศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือทุกคนเคยใช้ ขณะที่พื้นที่โครงการพัฒนาฯ ปางหินฝนมีเพียงครึ่งหนึ่งที่เคยใช้ สื่อถึงความคุ้นเคยกับชีวภัณฑ์ที่แตกต่างกันระหว่างพื้นที่ สำหรับแหล่งที่มาของชีวภัณฑ์และฟีโรโมน พบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่ร้อยละ 70.00 ได้รับจากการส่งเสริมของมูลนิธิโครงการหลวง หรือ สวพส. ขณะที่ร้อยละ 36.67 มีการซื้อชีวภัณฑ์จากร้านค้าการเกษตรทั่วไปเพิ่มเติม เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์สำหรับควบคุมแมลงศัตรูพืชที่ส่งเสริมโดยหน่วยงาน พบว่าสบู่อ่อนเป็นผลิตภัณฑ์ที่ถูกใช้มากที่สุด คิดเป็นร้อยละ 47.62 รองลงมาเป็นผลิตภัณฑ์เบ็บ-อาร์ คิดเป็นร้อยละ 28.57 ขณะที่ด้านโรคพืช ไตรโค-อาร์เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกษตรกรใช้มากที่สุดถึงร้อยละ 71.43 รองลงมาคือเชื้อราไตรโค

เดอร์มาน้ำ ร้อยละ 57.14 และบี10-อาร์ กับพีพี-บีเค33 อย่างละร้อยละ 23.81 แสดงว่าผลิตภัณฑ์ชีวภัณฑ์ที่อยู่ในรูปแบบใช้งานง่ายและได้รับการแนะนำอย่างต่อเนื่องจากเจ้าหน้าที่ มีโอกาสได้รับการยอมรับและนำไปใช้สูง รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.11-4.5.12

ตารางที่ 4.5.11 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามผลิตภัณฑ์สำหรับแมลงศัตรูพืชที่ส่งเสริมโดยมูลนิธิโครงการหลวงหรือสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ที่เคยใช้ (*n* = 21)

ผลิตภัณฑ์สำหรับแมลงศัตรูพืช	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์[1/]
พีพี-เมทา	-	-
เบ็บ-อาร์	6	28.57
พีพี-ฟีโร	-	-
ฟีโร ด้วงหมัดผัก	-	-
ฟีโร แมลงวันแตง	2	9.52
น้ำหมักสมุนไพร	1	4.76
สบู่อ่อน	10	47.62
เมล็ดสะเดาบด	-	-

[1/]ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามได้มากกว่า 1 ข้อ

ตารางที่ 4.5.12 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามผลิตภัณฑ์สำหรับโรคพืชที่ส่งเสริมโดยมูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ที่เคยใช้ (*n* = 21)

ผลิตภัณฑ์สำหรับโรคพืช	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์[1/]
บี10-อาร์	5	23.81
พีพี-บี15	-	-
พีพี-สเตร็บโต	1	4.76
ไตรโค-อาร์	15	71.43
พีพี-บีเค33	5	23.81
เชื้อราไตรโคเดอร์มาน้ำ	12	57.14

[1/]ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามได้มากกว่า 1 ข้อ

ด้านการใช้สารเคมี พบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่เลือกซื้อสารเคมีจากร้านค้าภายในท้องถิ่น คิดเป็นร้อยละ 75.00 และยังมีการใช้สารเคมีจากมูลนิธิโครงการหลวงร้อยละ 30.00 แหล่งข้อมูลคำแนะนำการใช้สารเคมีที่สำคัญที่สุดคือ เจ้าหน้าที่โครงการหลวง/สวพส. (ร้อยละ 42.50) รองลงมาคือ ประสบการณ์ส่วนตัวของเกษตรกรเอง (ร้อยละ 35.00) และคำแนะนำจากร้านค้า/บริษัท (ร้อยละ 30.00) สรุปเบื้องต้นว่าบทบาทของเจ้าหน้าที่ภาคสนามมีความสำคัญต่อรูปแบบการใช้สารเคมีของเกษตรกรอย่างมาก ส่วนชีวภัณฑ์เชิงพาณิชย์จากร้านค้าทั่วไป พบว่าเกษตรกรที่ซื้อสารควบคุมแมลงจากร้านค้า เลือกใช้ผลิตภัณฑ์บาซิลลัส ทูริงเยนซิสทุกคน (ร้อยละ 100.00) และประมาณครึ่งหนึ่งใช้กาวเหนียวดักแมลงร่วมด้วย ขณะที่ด้านสารป้องกันกำจัดโรคพืชพบว่าคอปเปอร์ ไฮดรอกไซด์ได้รับความนิยมสูงสุด (ร้อยละ 90.91) และไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม และบาซิลลัส ซับทิลิส มีการใช้สัดส่วนเท่ากัน (ร้อยละ 45.45) ทำให้เห็นว่าเกษตรกรเริ่มให้ความสำคัญกับการใช้ชีวภัณฑ์เชิงพาณิชย์ควบคู่กับสารเคมีที่ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.13-4.5.14

ตารางที่ 4.5.13 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามสารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืชที่ซื้อเองจากร้านค้าการเกษตรทั่วไป ที่เคยใช้ (*n* = 11)

สารป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช (ชื่อการค้า)	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์[1/]
บาซิลลัส ทูริงเยนซิส	11	100.00
บูเวเรีย บัสเซียน่า	1	9.09
เมทาไรเซียม	1	9.09
ยาสูบ	-	-
กาวน้ำดักแมลง/กาวเหนียวดักแมลง	5	45.45
ไวต์ออยล์/ทรีนออยส์	-	-

[1/]ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามได้มากกว่า 1 ข้อ

ตารางที่ 4.5.14 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามสารป้องกันกำจัดโรคพืชที่ซื้อเองจากร้านค้าการเกษตรทั่วไป ที่เคยใช้ (*n* = 11)

สารป้องกันกำจัดโรคพืช (ชื่อการค้า)	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์[1/]
ไตรโคเดอร์มา ฮาร์เซียนัม	5	45.45
บาซิลลัส ซับทิลิส	5	45.45
คอปเปอร์ ออกซีคลอไรด์	1	9.09
คอปเปอร์ ไฮดรอกไซด์	10	90.91
ซัลเฟอร์	1	9.09

[1/]ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามได้มากกว่า 1 ข้อ

การวิเคราะห์ปริมาณการใช้ปุ๋ย สารเคมี และชีวภัณฑ์ พบว่าระบบการผลิตมะเขือเทศเชอรี่ เกษตรกรใช้วัสดุปลูกเฉลี่ยประมาณ 825 กิโลกรัม/ไร่ ใช้ปุ๋ยน้ำประมาณ 225 ลิตรต่อไร่ และปุ๋ยเม็ดประมาณ 148 กิโลกรัม/ไร่ ขณะเดียวกันใช้สารเคมีกำจัดแมลงและโรคพืชปริมาณเฉลี่ยสูง (ประมาณ 2,775 และ 1,947 ซีซีต่อน้ำ 200 ลิตรต่อไร่ ตามลำดับ) ใช้ฮอร์โมนพืชและชีวภัณฑ์กับแมลงและโรคพืชในปริมาณค่อนข้างสูงเช่นกัน แสดงถึงการจัดการแบบเข้มข้น (intensive) ที่ผสมผสานทั้งปุ๋ย สารเคมี และชีวภัณฑ์ ทั้งนี้ระบบการผลิตมะเขือเทศโทมัสมีรูปแบบที่คล้ายคลึงเช่นกัน โดยมีการใช้วัสดุปลูกเฉลี่ยมากกว่า 950 กิโลกรัม/ไร่ ใช้ปุ๋ยน้ำและสารเคมีในระดับสูง และใช้ชีวภัณฑ์ระดับที่ใกล้เคียงกับผู้ปลูกมะเขือเทศเชอรี่ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.15-4.5.16

ตารางที่ 4.5.15 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการใช้ปุ๋ยและชีวภัณฑ์ในการดูแลผลผลิตมะเขือเทศเชอรี่ (*n* = 35)

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
วัสดุปลูก	กิโลกรัม/ไร่	825.17	339.09
- ปุ๋ยหมัก/มูลสัตว์	กิโลกรัม/ไร่	240.00	113.14
- ขุยมะพร้าว/กาบมะพร้าว/แกลบ	กิโลกรัม/ไร่	809.17	336.67
วัสดุปรับปรุงดิน (ปูนขาว/โดโมท์)	กิโลกรัม/ไร่	27.42	11.10
การให้ปุ๋ยน้ำ (ปุ๋ย A ปุ๋ย B)	ลิตร/ไร่	225.53	189.31
การใส่ปุ๋ยเม็ด	กิโลกรัม/ไร่	147.67	209.36
สารเคมีกำจัดแมลง	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,775.00	1,963.69
สารเคมีกำจัดโรคพืช	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	1,947.50	1,263.82
การใช้ฮอร์โมน	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,256.36	2,048.64
การใช้ชีวภัณฑ์ ป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	911.11	723.61
การใช้ชีวภัณฑ์ ป้องกันกำจัดโรคพืช	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,558.57	1,903.53
การใช้กาวเหนียว	ซีซี/ไร่	1,152.80	787.36

ตารางที่ 4.5.16 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของการใช้ปุ๋ยและชีวภัณฑ์ในการดูแลผลผลิตมะเขือเทศโทมัส (*n* = 15)

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
วัสดุปลูก	กิโลกรัม/ไร่	951.67	227.98
- ปุ๋ยหมัก/มูลสัตว์	กิโลกรัม/ไร่	-	-
- ขุยมะพร้าว/กาบมะพร้าว/วัสดุปลูก	กิโลกรัม/ไร่	951.67	227.98
วัสดุปรับปรุงดิน (ปูนขาว/โดโมท์)	กิโลกรัม/ไร่	10.00	-
การให้ปุ๋ยน้ำ (ปุ๋ย A ปุ๋ย B)	ลิตร/ไร่	307.99	190.13

รายการ	หน่วย	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
การใส่ปุ๋ยเม็ด	กิโลกรัม/ไร่	127.00	103.24
สารเคมีกำจัดแมลง	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,912.50	1,959.14
สารเคมีกำจัดโรคพืช	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,716.67	1,265.51
การใช้ฮอร์โมน	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,618.18	1,409.84
การใช้ชีวภัณฑ์ ป้องกันกำจัดแมลงศัตรูพืช	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	1,000.00	282.84
การใช้ชีวภัณฑ์ ป้องกันกำจัดโรคพืช	ซีซี/น้ำ 200 ลิตร/ไร่	2,300.00	2,960.57
การใช้กาวเหนียว	ซีซี/ไร่	-	–

โดยสรุป พฤติกรรมของเกษตรกรแสดงรูปแบบการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานเชิงปฏิบัติ กล่าวคือ มีการใช้ทั้งสารเคมี ชีวภัณฑ์ของโครงการ และชีวภัณฑ์เชิงพาณิชย์ร่วมกันในระบบเดียว อย่างไรก็ตาม สารเคมียังคงเป็นเครื่องมือหลักในการจัดการศัตรูพืช ขณะที่ชีวภัณฑ์ส่วนใหญ่มีบทบาทในฐานะ “เครื่องมือเสริม” มากกว่าจะเป็นแนวทางหลักในการควบคุมศัตรูพืช

ความรู้ ความเข้าใจ และการยอมรับต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน

การประเมินความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการใช้ชีวภัณฑ์ในกลุ่มเกษตรกรที่เคยใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน จำนวน 30 ราย โดยใช้เกณฑ์คะแนนมากกว่าร้อยละ 80 เป็นตัวชี้วัด พบว่าเกษตรกรร้อยละ 60.00 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับหลักการใช้ชีวภัณฑ์ระดับที่เพียงพอ ขณะที่อีกร้อยละ 40.00 ยังขาดความรู้ความเข้าใจในประเด็นดังกล่าว เมื่อแยกตามพื้นที่พบความแตกต่างอย่างชัดเจน โดยศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ เกษตรกรที่มีความเข้าใจเพียงร้อยละ 46.67 ขณะที่พื้นที่โครงการพัฒนาฯ ปางหินฝน มีเกษตรกรที่มีความเข้าใจถึงร้อยละ 73.33 แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการเสริมสร้างความรู้เชิงทฤษฎีและปฏิบัติในบางพื้นที่อย่างต่อเนื่อง หากพิจารณาตามรายได้หลัก พบว่าเกษตรกรที่มีรายได้หลักจากการผลิตให้มูลนิธิโครงการหลวง/สวพส. มีสัดส่วนผู้ที่มีความเข้าใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์เพียงร้อยละ 56.00 ขณะที่กลุ่มที่มีรายได้หลักจากแหล่งอื่นมีความเข้าใจร้อยละ 80.00 แสดงว่ากลุ่มผู้ผลิตของมูลนิธิโครงการหลวงอยู่ภายใต้ระบบมาตรฐานและได้รับการส่งเสริมอย่างต่อเนื่อง แต่ยังมีช่องว่างด้านความรู้ที่ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.17

ตารางที่ 4.5.17 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามความรู้ความเข้าใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์ที่มูลนิธิโครงการหลวงหรือสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ส่งเสริมในแต่ละรายได้หลักของเกษตรกร (*n* = 30)

ความรู้ความเข้าใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์
มีความรู้ความเข้าใจ	**18**	**60.00**
- รายได้หลักจากการทำการผลิตทางการเกษตรให้มูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (n = 25)	*(14)*	*(56.00)*[2/]
- รายได้หลักจากแหล่งอื่น (n = 5)	*(4)*	*(80.00)*

ขาดความรู้ความเข้าใจ	**12**	**40.00**
- รายได้หลักจากการทำการผลิตทางการเกษตรให้มูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (n = 25)	*(11)*	*(44.00)*
- รายได้หลักจากแหล่งอื่น (n = 5)	*(1)*	*(20.00)*
รวม	**30**[1/]	**100.00**

[1/]กลุ่มเกษตรกรตัวอย่างทั้งหมด 30 คน แบ่งเป็นมีรายได้หลักจากการทำการผลิตทางการเกษตรให้มูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง 25 คน และรายได้หลักจากแหล่งอื่น 5 คน

[2/]ค่าเปอร์เซ็นต์ คำนวณจากจำนวนของเกษตรกรตัวอย่างทั้งหมดในแต่ละรายได้หลักของเกษตรกร

ด้านการยอมรับ พบว่ากลุ่มเกษตรกรที่เคยใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน ร้อยละ 73.33 มีการยอมรับการใช้ชีวภัณฑ์ของมูลนิธิโครงการหลวง/สวพส. ในการจัดการศัตรูพืช ขณะที่ร้อยละ 26.67 ยังไม่เกิดการยอมรับอย่างแท้จริง เมื่อพิจารณาตามพื้นที่พบว่าเกษตรกรแม่ทาเหนือมีอัตราการยอมรับสูงกว่าปางหินฝนอย่างชัดเจน (ร้อยละ 86.67 เทียบกับ 60.00) สำหรับฟีโรโมน เกษตรกรร้อยละ 70.00 ยอมรับการใช้ฟีโรโมน และร้อยละ 30.00 ยังไม่ยอมรับ โดยสัดส่วนการยอมรับฟีโรโมนของทั้ง 2 พื้นที่ อยู่ระดับใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าโดยรวมแล้วเกษตรกรส่วนใหญ่มีทัศนคติที่ค่อนข้างดีต่อชีวภัณฑ์และฟีโรโมน แม้จะยังมีความลังเลในบางกลุ่มก็ตาม รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.18

ตารางที่ 4.5.18 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามการยอมรับต่อการใช้ชีวภัณฑ์ที่มูลนิธิโครงการหลวงหรือสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ส่งเสริมแบ่งตามพื้นที่ดำเนินการ (*n* = 30)

การยอมรับต่อการใช้ชีวภัณฑ์	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์
เกิดการยอมรับ	**22**	**73.33**
- ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ (n = 15)	*(13)*	*(86.67)*[2/]
- โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน (n = 15)	*(9)*	*(60.00)*
ไม่เกิดการยอมรับ	**8**	**26.67**
- ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ (n = 15)	*(2)*	*(13.33)*
- โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน (n = 15)	*(6)*	*(40.00)*
รวม	**30**[1/]	**100.00**

[1/]กลุ่มเกษตรกรตัวอย่างทั้งหมด 30 คน แบ่งเป็นมีรายได้หลักจากการทำการผลิตทางการเกษตรให้มูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง 25 คน และรายได้หลักจากแหล่งอื่น 5 คน

[2/]ค่าเปอร์เซ็นต์ คำนวณจากจำนวนของเกษตรกรตัวอย่างทั้งหมดในแต่ละรายได้หลักของเกษตรกร

ด้านเหตุผลที่ยังคงใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน พบว่าเกษตรกรส่วนใหญ่อธิบายว่าชีวภัณฑ์มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้และผู้บริโภค และเป็นไปตามมาตรฐานการผลิตที่โครงการกำหนด ซึ่งทั้ง 2 เหตุผลได้รับการระบุในสัดส่วนที่สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 64.29 รองลงมาคือเห็นว่ามีประสิทธิภาพการควบคุมศัตรูพืชระดับที่น่าพอใจ (ร้อยละ 46.43) และมีต้นทุนต่ำกว่าสารเคมี (ร้อยละ 39.29) ขณะที่เหตุผลของผู้ที่เลิกใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนชี้ปัญหาที่พบในการขยายผลชีวภัณฑ์ ได้แก่ ประสิทธิภาพด้อยกว่าสารเคมี การใช้งานยุ่งยาก หาซื้อยาก ต้องสั่งผ่านโครงการ ต้องใช้ในปริมาณมาก และไม่สามารถควบคุมการระบาดได้ทันที ซึ่งเป็นประเด็นที่ทำให้เกษตรกรลังเลที่จะเปลี่ยนผ่านจากระบบสารเคมีไปสู่การใช้ชีวภัณฑ์อย่างเต็มรูปแบบ รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.19-4.5.20

ตารางที่ 4.5.19 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามเหตุผลที่ยังคงใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนที่มูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ส่งเสริมอยู่ (*n* = 28)

เหตุผลที่ยังคงใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์[1/]
มีประสิทธิภาพ ออกฤทธิ์เห็นผลดี	13	46.43
ใช้งานง่าย ไม่ยุ่งยาก	4	14.29
มีราคาถูกกว่าสารเคมี ทำให้มีต้นทุนต่ำ	11	39.29
มีความปลอดภัยต่อผู้ใช้และผู้บริโภค	18	64.29
ใช้ตามมาตรฐานการผลิตที่โครงการกำหนด	18	64.29

[1/]ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามได้มากกว่า 1 ข้อ

ตารางที่ 4.5.20 จำนวนและเปอร์เซ็นต์ของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างจำแนกตามเหตุผลที่เลิกใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนที่มูลนิธิโครงการหลวง/สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง ส่งเสริม (*n* = 2)

เหตุผลที่เลิกใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน	จำนวน (คน)	เปอร์เซ็นต์[1/]
ต้องใช้ระยะเวลานานกว่าจะเห็นผล ไม่ทันต่อการระบาด	-	-
ประสิทธิภาพด้อยกว่าการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืช	1	50.00
มีขั้นตอน/เทคนิคและวิธีการใช้งานที่ยุ่งยาก	1	50.00
หาซื้อได้ยาก ต้องสั่งซื้อผ่านทางโครงการฯ	1	50.00
ต้องใช้ในปริมาณมาก ทำให้ต้นทุนสูงกว่าปกติ	1	50.00
ไม่มีความรู้เกี่ยวกับโรคพืชและแมลงศัตรูพืช	-	-
ไม่สามารถกำจัดการระบาดของโรคพืชและแมลงศัตรูได้ทันที	1	50.00

[1/]ข้อมูลจากการตอบแบบสอบถามได้มากกว่า 1 ข้อ

ความพึงพอใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน

การวิเคราะห์ระดับความพึงพอใจของเกษตรกรที่เคยใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน จำนวน 30 ราย พบว่ามีความพึงพอใจโดยรวมอยู่ระดับ “มาก” โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.14 และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.55 เมื่อนำมาจำแนกตามมิติการประเมิน พบว่า *ด้านการผลิต* เกษตรกรมีความพึงพอใจอยู่ระดับ “มาก” (ค่าเฉลี่ย 3.77) โดยเห็นว่าชีวภัณฑ์และฟีโรโมนใช้งานไม่ยุ่งยากนัก มีต้นทุนไม่สูงมากนัก ช่วยเพิ่มคุณภาพผลผลิต ลดปัญหาโรคและแมลงศัตรูพืช ทำให้ผลผลิตไม่มีแผลจากการทำลายของศัตรูพืช และมีระยะเวลาออกฤทธิ์ที่เพียงพอระดับหนึ่ง แต่อาจยังไม่เทียบเท่าสารเคมี *ด้านการตลาด* เกษตรกรมีความพึงพอใจระดับ “มากที่สุด” (ค่าเฉลี่ย 4.29) โดยเห็นว่าการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยลดสารเคมีตกค้างในผลผลิต ช่วยให้มีตลาดรองรับที่แน่นอน สร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้รับซื้อและตลาดส่งออก ช่วยให้เกษตรกรได้รับราคาขายที่สูงขึ้น และทำให้คุณภาพผลผลิตสอดคล้องกับความต้องการของตลาดกลุ่มปลอดสารและตลาดคุณภาพสูง แสดงให้เห็นว่ามิติด้านการตลาดเป็นแรงผลักดันที่สนับสนุนให้เกษตรกรยอมรับชีวภัณฑ์มากกว่ามิติด้านเทคนิคเพียงอย่างเดียว *ด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม* เป็นมิติที่เกษตรกรมีความพึงพอใจสูงที่สุด (ค่าเฉลี่ย 4.35 ระดับ “มากที่สุด”) โดยเกษตรกรเห็นว่าชีวภัณฑ์และฟีโรโมนกำลังเป็นที่นิยมมากขึ้น สามารถช่วยลดสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อม และไม่เป็นอันตรายต่อตัวเกษตรกรเอง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการผลิตและบริโภคที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัยและความยั่งยืนในปัจจุบัน รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.5.21

ตารางที่ 4.5.21 ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และระดับความพึงพอใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนของกลุ่มเกษตรกรตัวอย่างที่เคยใช้ชีวภัณฑ์/ฟีโรโมน (n = 30)

ความพึงพอใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
ความพึงพอใจต่อการใช้งานชีวภัณฑ์ ด้านการผลิต	**3.77**	**0.67**	**มาก**
1. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนไม่มีความยุ่งยาก ง่ายต่อการใช้งาน	4.09	0.90	มาก
2. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนทำให้ผลผลิตมีคุณภาพสูงขึ้น	3.71	0.87	มาก
3. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน ช่วยลดปัญหาโรคพืชและแมลงศัตรูพืชได้	3.64	0.96	มาก
4. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยทำให้ผลผลิตไม่มีแผลจากโรคพืชและแมลงศัตรูพืช	3.71	1.10	มาก
5. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนมีราคา (ต้นทุน) ไม่สูง	3.80	0.94	มาก
6. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพนานเพียงพอ	3.67	0.93	มาก
ความพึงพอใจต่อการใช้งานชีวภัณฑ์ ด้านการตลาด	**4.29**	**0.64**	**มากที่สุด**
1. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้รับซื้อผลผลิต/การส่งออก	4.31	0.87	มากที่สุด
2. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยลดการตกค้างของสารเคมีในผลผลิต	4.40	0.78	มากที่สุด

ความพึงพอใจต่อการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับความพึงพอใจ
3. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยให้เกษตรกรได้รับราคาขายที่สูงขึ้น	4.29	0.89	มากที่สุด
4. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยให้ผลผลิตมีตลาดรองรับที่แน่นอน	4.38	0.81	มากที่สุด
5. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยให้ผลผลิตมีคุณภาพตามที่ตลาดต้องการ	4.09	0.95	มาก
ความพึงพอใจต่อการใช้งานชีวภัณฑ์ ด้านสุขภาพ/สิ่งแวดล้อม	**4.35**	**0.63**	**มากที่สุด**
1. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนไม่มีอันตรายต่อตัวเกษตรกร	3.98	1.01	มาก
2. การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนช่วยลดปริมาณสารเคมีตกค้างในสิ่งแวดล้อมได้	4.49	0.69	มากที่สุด
3. ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนกำลังเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน	4.58	0.66	มากที่สุด
รวม	**4.14**	**0.55**	**มาก**

ปัญหา อุปสรรค และข้อเสนอแนะจากมุมมองของเกษตรกร

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพจากการสอบถามปัญหาและอุปสรรคในการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน พบว่าประเด็นปัญหาหลักสามารถจำแนกได้เป็น 4 ด้าน ได้แก่ ด้านประสิทธิภาพการควบคุมศัตรูพืช ด้านความสะดวกในการใช้งาน ด้านราคาและต้นทุน และด้านองค์ความรู้และปัจจัยอื่น

ด้านประสิทธิภาพ เกษตรกรส่วนใหญ่เห็นว่าชีวภัณฑ์มีการออกฤทธิ์ช้า เห็นผลสัมฤทธิ์ช้า ไม่สามารถควบคุมศัตรูพืชได้ทันท่วงทีในช่วงที่เกิดการระบาดรุนแรง ประสิทธิภาพการควบคุมศัตรูพืชต่ำกว่าสารเคมีทางการเกษตร มีระยะเวลาออกฤทธิ์สั้น และไม่สามารถกำจัดศัตรูพืชได้หมดในการใช้เพียงครั้งเดียว ทำให้เกษตรกรรู้สึกไม่มั่นใจเมื่อต้องพึ่งชีวภัณฑ์เป็นเครื่องมือหลักในการป้องกันความเสียหายต่อผลผลิต

ด้านการใช้งาน เกษตรกรเห็นว่าชีวภัณฑ์มีขั้นตอนการใช้ที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่าสารเคมี มีข้อจำกัดด้านช่วงเวลาที่สามารถพ่นได้ เช่น ต้องพ่นเฉพาะเช้าหรือเย็น และไม่สะดวกในช่วงฝนตก ทำให้เสียเวลาและจำกัดโอกาสในการทำงาน นอกจากนี้ยังต้องใช้ในปริมาณมากต่อครั้ง จึงรู้สึกว่าการใช้งานไม่คล่องตัวเท่ากับสารเคมี

ด้านราคาและต้นทุน เกษตรกรจำนวนมากมองว่าชีวภัณฑ์มีราคาต่อหน่วยค่อนข้างสูง เมื่อรวมกับปริมาณที่ต้องใช้ต่อไร่ ทำให้ต้นทุนการผลิตโดยรวมสูงกว่าการใช้สารเคมี เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้รับ เกษตรกรบางส่วนจึงรู้สึกว่าการใช้ชีวภัณฑ์ยังไม่คุ้มค่า โดยเฉพาะพืชมูลค่าสูงที่มีความเสี่ยงต่อความเสียหายทางเศรษฐกิจสูงหากไม่สามารถควบคุมโรคและแมลงได้อย่างทันท่วงที

สำหรับปัจจัยอื่น เกษตรกรคิดว่าตนเองยังต้องการองค์ความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับโรคพืชและแมลงศัตรูพืช รวมถึงแนวทางการใช้ชีวภัณฑ์ที่ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ ต้องการให้มีการวิจัยและพัฒนาชีวภัณฑ์ที่มีความจำเพาะต่อโรคสำคัญในพื้นที่ โดยเฉพาะโรคเหี่ยวเขียวจากเชื้อแบคทีเรีย นอกจากนี้ยังมีปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์การตลาดที่มีผลต่อการตัดสินใจ กล่าวคือ ผลผลิตที่ใช้สารเคมีมักมีรูปลักษณ์สวยงามกว่า ทำให้

ขายได้ง่ายและบางครั้งได้ราคาดีกว่า ทำให้เกษตรกรบางรายยังคงพอใจและเชื่อมั่นสารเคมีทางการเกษตรที่ใช้อยู่เดิม

ข้อเสนอแนะจากเกษตรกรเกี่ยวกับการส่งเสริมให้เปลี่ยนมาใช้ชีวภัณฑ์อย่างแพร่หลาย จึงมุ่งไปในทิศทางของการพัฒนาชีวภัณฑ์ให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงหรือเทียบเท่าสารเคมี โดยเฉพาะความเร็ว ของการออกฤทธิ์และความต่อเนื่องของผล การปรับลดราคาหรือสนับสนุนด้านต้นทุนช่วงเริ่มต้น การสร้างแรงจูงใจเชิงเศรษฐกิจ เช่น การรับรองตลาดและให้ราคาพิเศษสำหรับผลผลิตที่ใช้ชีวภัณฑ์อย่างต่อเนื่อง การจัดอบรมและแปลงสาธิตเพื่อให้เห็นผลเชิงประจักษ์ และการปรับปรุงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ให้ใช้งานง่ายขึ้น ทนต่อสภาพแวดล้อม และสามารถใช้ได้ยืดหยุ่นในช่วงเวลาต่างๆ ทั้งหมดเป็นเงื่อนไขที่จะช่วยเสริมสร้างความเชื่อมั่นและนำไปสู่การยอมรับและการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนในระบบการผลิตพืชตระกูล Solanaceae

4.5.2 ปรับปรุงแหล่งเรียนรู้การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนภายใต้องค์ประกอบการพัฒนา 7 ด้าน

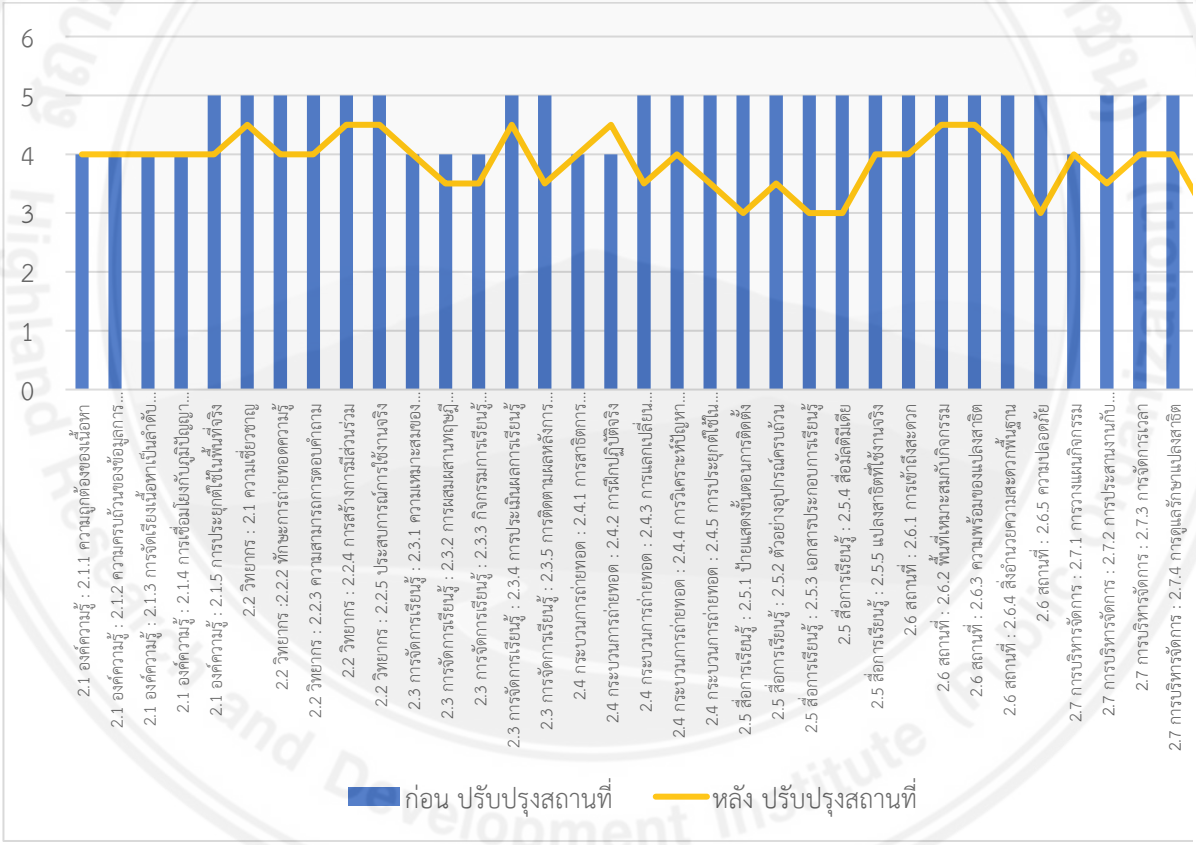
คัดเลือกพื้นที่ต้นแบบถ่ายทอดความรู้ 1 แห่ง ได้แก่ โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงห้วยก้างปลา อ.แม่จัน จ.เชียงราย ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาและเป็นพื้นที่ขับเคลื่อนงานวิจัยของ สวพส. พื้นที่มีแปลงปลูกพืชขนาดใหญ่ ความเสี่ยงการใช้สารเคมีสูง เข้าถึงสะดวก และมีแผนปลูกพืชต่อเนื่อง เหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นแหล่งเรียนรู้ต้นแบบ จากนั้นสำรวจและวางแผนพัฒนาเทียบองค์ประกอบ โดยเน้นการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน ตลอดจนการปลูกพืชตามมาตรฐานเกษตรอินทรีย์/GAP โดยคัดเลือกเกษตรกรทำหน้าที่เป็นวิทยากร มีความรู้จริง ทัศนคติบวก และสามารถถ่ายทอดประสบการณ์ได้ภายใต้กระบวนการเรียนรู้มุ่งเน้นการมีส่วนร่วม เช่น การลงมือทำ การสำรวจภาคสนาม และการเล่าเรื่องจากประสบการณ์จริง ใช้สื่อหลากหลาย เช่น แปลงสาธิต วีดิทัศน์ โมเดล และสื่ออินเทอร์แอคทีฟ เพื่อเสริมความเข้าใจและสร้างแรงจูงใจในการเรียนรู้ ทั้งนี้ได้บูรณาการร่วมกับโครงการขยายผลการใช้ฟีโรโมนดึงดูดด้วงหมัดผักแถบลายแทนสารเคมีในพื้นที่ปลูกผักปลอดภัยบนพื้นที่สูงซึ่งได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

ขอบข่ายการวัดผลประเมินผลการพัฒนาแหล่งเรียนรู้ 7 องค์ประกอบ ได้แก่ (1) ด้านองค์ความรู้ 5 รายการ (2) ด้านวิทยากร 5 รายการ (3) ด้านการจัดการเรียนรู้ 5 รายการ (4) ด้านกระบวนการถ่ายทอด 5 รายการ (5) ด้านสื่อการเรียนรู้ 5 รายการ (6) ด้านสถานที่ 5 รายการ และ (7) การบริหารจัดการ 5 รายการ ค่าคะแนนวิเคราะห์ด้วยค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (Weighted Mean Score) และแปลความหมายของระดับจากค่าเฉลี่ย ได้แก่ ระดับมากที่สุดมีค่าเฉลี่ย 4.21-5.00 ระดับมากมีค่าเฉลี่ย 3.41-4.20 ระดับปานกลางมีค่าเฉลี่ย 2.61-3.40 ระดับน้อยมีค่าเฉลี่ย 1.81-2.60 ระดับน้อยที่สุดมีค่าเฉลี่ย 1.00-1.80

ผลการประเมินก่อนและหลังการปรับปรุงแหล่งเรียนรู้ชี้ให้เห็นว่าคะแนนเฉลี่ยก่อนการปรับปรุงอยู่ที่ประมาณ 4.1 จากมาตราส่วน 5.0 (ร้อยละ 82) ขณะที่คะแนนหลังการปรับปรุงอยู่ที่ประมาณ 3.7 จากมาตราส่วน 5.0 (ร้อยละ 74) แสดงถึงการลดลงเล็กน้อยของการรับรู้ภาพรวมของผู้ประเมินหลังการพัฒนาแหล่งเรียนรู้

เมื่อพิจารณาแต่ละองค์ประกอบ พบว่า ด้าน “สื่อการเรียนรู้” และ “สถานที่” มีการพัฒนาที่ชัดเจน กล่าวคือ หลังการปรับปรุง คะแนนเพิ่มขึ้นจากประมาณ 4.0 (ร้อยละ 80) เป็นประมาณ 4.4 (ร้อยละ 88)

ข้อมูลสื่อว่า การปรับปรุงสิ่งแวดล้อมและอุปกรณ์ประกอบการเรียนรู้ส่งผลเชิงบวกต่อผู้ใช้งาน อย่างไรก็ตาม ด้าน “กระบวนการเรียนรู้” มีคะแนนลดลงจากประมาณ 4.3 (ร้อยละ 86) เหลือประมาณ 3.6 (ร้อยละ 72) เกิดจากความไม่สอดคล้องระหว่างรูปแบบกิจกรรมที่พัฒนาขึ้นใหม่กับลักษณะของกลุ่มเป้าหมาย ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบพื้นที่เรียนรู้และสื่อ เนื่องจากส่งผลต่อพฤติกรรมผู้เรียนและแรงจูงใจในการเรียนรู้ โดย “learning spaces” หรือ “แหล่งเรียนรู้” ที่ออกแบบอย่างเหมาะสมสามารถเสริมสร้างแรงจูงใจภายในของผู้เรียนได้อย่างมีนัยสำคัญ และแนวทางการประเมินแบบองค์รวม (holistic evaluation) ที่คำนึงถึงปัจจัยบริบท/บทบาท/สื่อ/กิจกรรม จะช่วยให้เห็นภาพผลลัพธ์ได้ชัดเจนขึ้น ทั้งนี้ภาพรวมของการปรับปรุงแหล่งเรียนรู้จะส่งผลด้านโครงสร้าง สื่อ และสถานที่ได้ดี แต่องค์ประกอบของการจัดกระบวนการเรียนรู้ยังมีช่องว่างที่ต้องพัฒนา โดยควรปรับการออกแบบกิจกรรมที่ตอบสนองต่อพฤติกรรมผู้เรียน การมีส่วนร่วมของผู้เรียนและความต่อเนื่องของการเรียนรู้ นอกจากนี้ ควรมีระบบติดตามผลหลังการใช้งานเพื่อประเมินผลลัพธ์เชิงลึกรายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.7

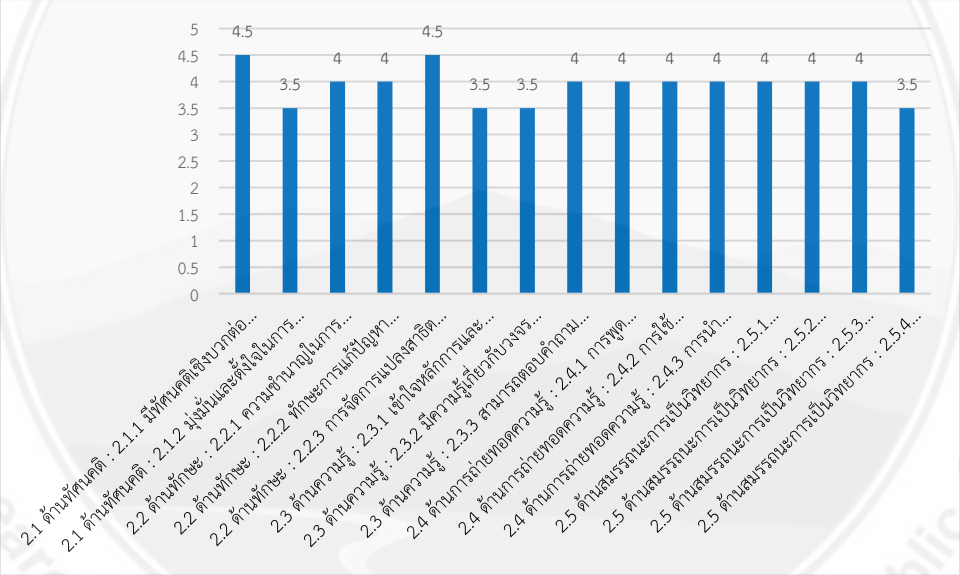


ภาพที่ 4.5.7 ผลวิเคราะห์แบบประเมินความพร้อมสถานที่เรียนรู้

ผลการประเมินเกษตรกรในฐานะวิทยากรแสดงให้เห็นว่าโดยรวมมีศักยภาพอยู่ระดับดีถึงดีมาก โดยค่าคะแนนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 3.5-4.5 คะแนนจากมาตราส่วน 5 ระดับ ข้อมูลชี้ว่าเกษตรกรมีความพร้อมพื้นฐานในการทำหน้าที่ถ่ายทอดความรู้ระดับที่น่าพอใจ ด้านจุดเด่นของเกษตรกรพบว่าเกษตรกรมีประสบการณ์ตรงด้านการปลูกผัก มีการสังเกต ทดลอง และเรียนรู้สิ่งใหม่อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งมีทักษะการถ่ายทอดและการสร้าง

แรงจูงใจซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการถ่ายทอดองค์ความรู้จากประสบการณ์ตรงของผู้ปฏิบัติจริงสามารถสร้างการเรียนรู้ที่มีประสิทธิผลสูงกว่าการเรียนรู้เชิงทฤษฎี เนื่องจากผู้สอนสามารถเชื่อมโยงเนื้อหากับบริบทจริงและถ่ายทอดผ่านตัวอย่างที่จับต้องได้ อย่างไรก็ตาม ด้านที่ควรพัฒนาเพิ่มเติมพบว่าควรเสริม ทักษะการสื่อสารและการพูดในที่สาธารณะ เพื่อให้สามารถถ่ายทอดเนื้อหาได้ชัดเจนและน่าสนใจมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรพัฒนา ความรู้เชิงเทคนิค โดยเฉพาะหลักการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) ซึ่งเป็นหัวใจของการจัดการศัตรูพืชอย่างยั่งยืน การเพิ่มศักยภาพของผู้ถ่ายทอดด้านเทคนิคเฉพาะจะช่วยให้เกษตรกรสามารถสื่อสารหลักวิชาการสู่การปฏิบัติได้อย่างถูกต้องและเกิดผลจริงภาคสนาม

ผลประเมินรายประเด็นพบว่า หัวข้อที่ได้คะแนนสูงสุดคือ “การมีทัศนคติที่ดีและการสร้างแรงบันดาลใจ” และ “ความเข้าใจในกระบวนการเรียนรู้ของผู้ใหญ่” โดยได้คะแนนเฉลี่ย 4.5 คะแนน แสดงถึงความเป็นผู้นำทางความคิดและความสามารถในการสร้างแรงจูงใจ ขณะที่หัวข้อที่ได้คะแนนต่ำสุด 3.5 คะแนน ได้แก่ “การจัดการศัตรูพืชเชิงระบบ” และ “การสื่อสารเชิงบูรณาการ” ซึ่งควรได้รับการส่งเสริมผ่านการอบรมเชิงปฏิบัติการและการเรียนรู้ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.8



ภาพที่ 4.5.8 ผลวิเคราะห์การพัฒนาเกษตรกรในฐานะวิทยากรต้นแบบโดยนักวิจัย

แนวทางพัฒนางานระยะต่อไป แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การพัฒนาและปรับปรุงสถานที่เรียนรู้ประกอบด้วย (1.1) พัฒนาแหล่งเรียนรู้เชิงประจักษ์และสนับสนุนการเรียนรู้ภาคปฏิบัติด้วยการปรับปรุงแปลงสาธิตให้แสดงกระบวนการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) อย่างครบวงจร ติดตั้งป้ายข้อมูลที่ชัดเจนเข้าใจง่าย และมีจุดเรียนรู้เฉพาะด้าน (Learning Station) เพื่อกระตุ้นการสังเกตและทดลองจริง (1.2) เพิ่มสิ่งอำนวยความสะดวกและสื่อประกอบการเรียนรู้ เน้นจัดเตรียมอุปกรณ์สาธิต สื่อมัลติมีเดีย แผ่นป้ายความรู้ และพื้นที่เรียนรู้แบบ Interactive ที่มีรูปแบบหลากหลายและลดการบรรยายเพียงอย่างเดียว (1.3) ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อขยายผลการเรียนรู้ โดยพัฒนาแพลตฟอร์มออนไลน์ วีดิทัศน์สาธิต และอินโฟกราฟิกสำหรับเผยแพร่ความรู้สู่เกษตรกรกลุ่มอื่น พร้อมสร้างระบบการเรียนรู้ที่ต่อเนื่องและเข้าถึงได้ง่าย และ (1.4)

สร้างอัตลักษณ์ของแหล่งเรียนรู้และแผนพัฒนาต่อเนื่อง โดยกำหนดเอกลักษณ์ของแหล่งเรียนรู้ให้สอดคล้องกับศักยภาพของพื้นที่ เช่น เกษตรอินทรีย์หรือเกษตรปลอดภัย พร้อมวางแผนดูแล ปรับปรุง และประเมินผลสม่ำเสมอ เพื่อให้แหล่งเรียนรู้คงความน่าสนใจ (2) การพัฒนาเกษตรกรในฐานะวิทยากร ประกอบด้วย (2.1) เสริมสร้างสมรรถนะด้านการสื่อสารและการนำเสนอความรู้ เน้นเทคนิคการพูด การใช้ภาษาที่เข้าใจง่าย และการสื่อสารเชิงจูงใจ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายทอดองค์ความรู้และสร้างแรงบันดาลใจแก่ผู้เรียน (2.2) เพิ่มพูนความรู้เชิงเทคนิคด้านการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (IPM) ผ่านการจัดอบรมเชิงลึกเกี่ยวกับการใช้ชีวภัณฑ์ ฟีโรโมน และการลดการใช้สารเคมี โดยถ่ายทอดความรู้ที่ถูกต้องทางวิชาการและสอดคล้องกับแนวทางเกษตรยั่งยืน (2.3) ส่งเสริมการจัดการเรียนรู้แบบมีส่วนร่วม (Participatory Learning) จากการออกแบบกิจกรรมที่ให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติจริง ร่วมแลกเปลี่ยนประสบการณ์ และแก้ปัญหาจากสถานการณ์จริง ทำให้เกิดการเรียนรู้เชิงประจักษ์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่ได้เอง (2.4) สร้างเครือข่ายและระบบพี่เลี้ยงวิทยากรเกษตรกรต้นแบบ โดยจัดตั้งเครือข่ายวิทยากรต้นแบบภายในพื้นที่ที่เป็นศูนย์กลางการแลกเปลี่ยนเรียนรู้และการถ่ายทอดองค์ความรู้ รวมทั้งสร้างระบบพี่เลี้ยง (Mentorship) เพื่อการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (2.5) ติดตามและประเมินผลการถ่ายทอดความรู้ รวมทั้งผลลัพธ์ผู้เรียนและศักยภาพของวิทยากรสำหรับใช้เป็นข้อมูลปรับปรุงแผนพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.5.3 ประมวลความก้าวหน้าผลการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ของ ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนตามประกาศของกรมวิชาการเกษตร

1) การพัฒนาระบบสารสนเทศ Web Base Application งานชีวภัณฑ์และฟีโรโมน

(1) การวิเคราะห์และออกแบบโครงสร้างระบบงานและฐานข้อมูล

เริ่มจากศึกษากระบวนการทำงานเดิมของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อทำความเข้าใจขั้นตอนการจัดเก็บ การประมวลผล และการสืบค้นข้อมูลผลงานวิจัยชีวภัณฑ์และฟีโรโมน รวมถึงการระบุปัญหาของกระบวนการทำงานแบบเดิม เช่น การกระจายตัวของข้อมูลในหลายแหล่ง การขาดมาตรฐานการจัดเก็บ และความยากของการค้นหาข้อมูลย้อนหลัง ผลจากการวิเคราะห์ ได้จัดทำแผนภาพกระบวนการทำงาน (System Workflow) เพื่ออธิบายขั้นตอนการไหลของข้อมูล ตั้งแต่การป้อนข้อมูลโดยผู้ดูแล การตรวจสอบความถูกต้อง การจัดเก็บเข้าสู่ฐานข้อมูล และการนำเสนอผลลัพธ์ผ่านระบบเว็บแอปพลิเคชัน นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ความต้องการของผู้ใช้งานแต่ละระดับ ได้แก่ ผู้ใช้ทั่วไป ผู้เชี่ยวชาญ และผู้ดูแลระบบ เพื่อกำหนดขอบเขตของฟังก์ชันการทำงานที่เหมาะสม

ฐานข้อมูล ได้ออกแบบ Relational Database Model โดยใช้หลักการทำให้เป็นมาตรฐาน (Normalization) เพื่อหลีกเลี่ยงข้อมูลซ้ำซ้อนและเพิ่มความยืดหยุ่นในการปรับปรุงระบบอนาคต โดยออกแบบ Entity Relationship Diagram (ERD) เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตารางข้อมูลหลัก เช่น ตารางชีวภัณฑ์ ตารางฟีโรโมน ตารางโรคพืช ตารางแมลงศัตรูพืช และตารางผู้ใช้งาน รวมทั้งตารางเชื่อมโยงระหว่างหน่วยข้อมูล เพื่อให้สามารถแสดงความสัมพันธ์แบบหลายต่อหลาย (Many-to-Many Relationship) ได้อย่างสมบูรณ์ ขณะเดียวกันได้จัดทำ พจนานุกรมข้อมูล (Data Dictionary) เพื่ออธิบายรายละเอียดของข้อมูลแต่ละ

ตาราง เช่น ชื่อฟิลด์ คำอธิบาย ชนิดข้อมูล (Data Type) ขนาดข้อมูล (Field Length) และค่าที่เป็นไปได้ (Value Domain) สำหรับการบำรุงรักษาระบบเป็นไปอย่างมีมาตรฐานและสามารถตรวจสอบย้อนหลังได้ง่าย

การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface Design) ได้จัดทำต้นแบบหน้าจอ (Prototype) ครอบคลุมทั้งส่วนผู้ใช้และผู้ดูแลระบบ เพื่อให้สามารถทดสอบการใช้งานจริงก่อนการพัฒนา โดยต้นแบบเป็นเครื่องมือหลักในการสื่อสารระหว่างทีมพัฒนาและผู้ใช้งาน ทำให้เข้าใจตรงกันด้านลักษณะของข้อมูล รูปแบบการแสดงผล และกระบวนการโต้ตอบกับระบบ

(2) การพัฒนาระบบ

นำผลจากการออกแบบมาดำเนินการพัฒนาระบบจริง โดยเน้นการพัฒนาลักษณะ Web based Application เพื่อให้สามารถเข้าถึงได้จากทุกที่ ทุกเวลา ผ่านอุปกรณ์ที่หลากหลาย โดยไม่จำเป็นต้องติดตั้งโปรแกรมเพิ่มเติม

การพัฒนาระบบใช้หลักการทางวิศวกรรมซอฟต์แวร์ (Software Engineering) ในรูปแบบวงจรชีวิตการพัฒนาแบบปรับปรุงซ้ำ (Iterative Development) โดยเริ่มจากการพัฒนาโมดูลต้นแบบ (Prototype Modules) และทำการทดสอบร่วมกับผู้ใช้งานอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ระบบมีความถูกต้องตามความต้องการจริง ระบบพัฒนาโดยใช้ PHP CodeIgniter Framework ซึ่งเป็นเฟรมเวิร์กที่รองรับสถาปัตยกรรมแบบ Model-View-Controller (MVC) ทำให้การจัดการโค้ดเป็นระบบและง่ายต่อการบำรุงรักษา ใช้ฐานข้อมูล MySQL ของสถาบันเป็นระบบจัดการข้อมูลหลัก ซึ่งรองรับการจัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่และสามารถเชื่อมโยงกับระบบสำรองข้อมูลได้อย่างปลอดภัย

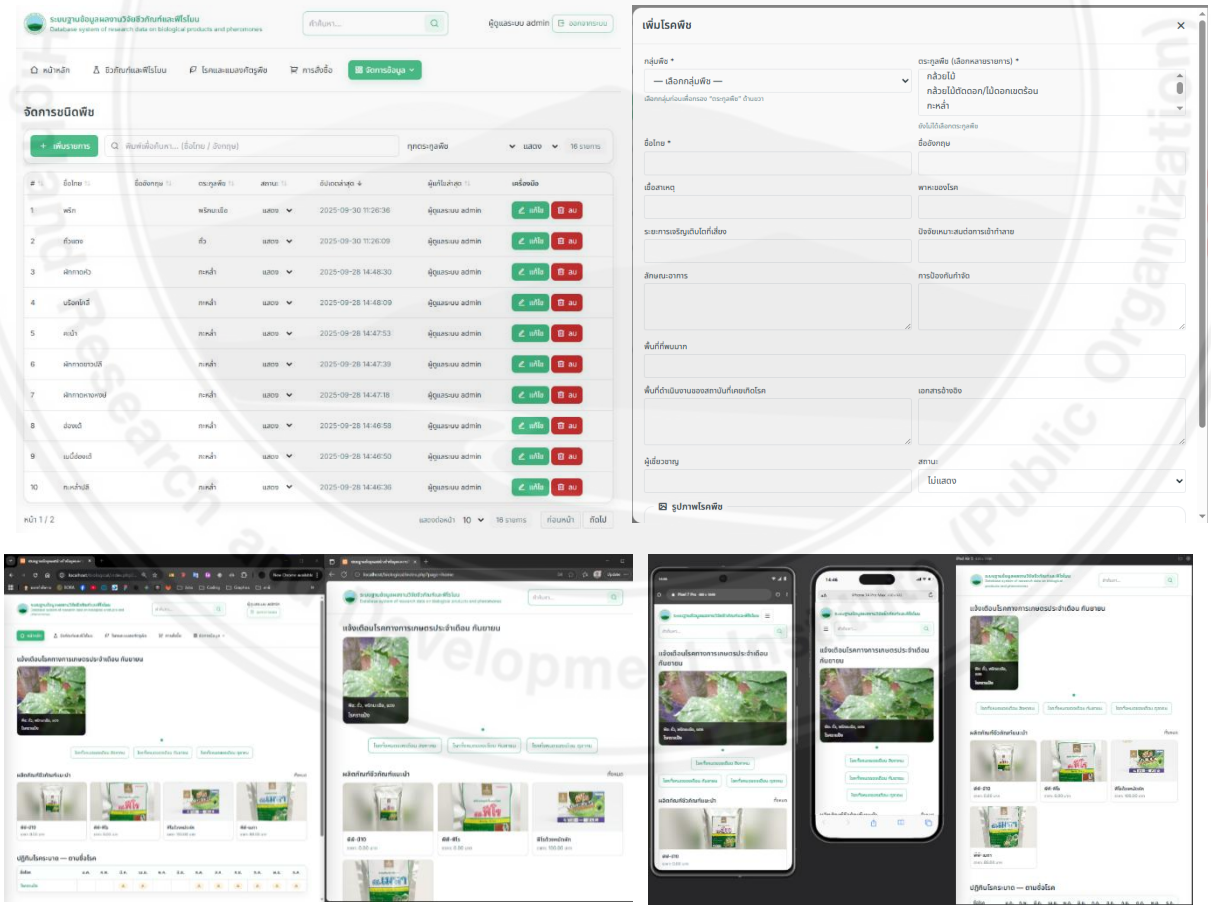
คุณลักษณะของระบบที่พัฒนาแล้ว ประกอบด้วย (2.1) รองรับเบราว์เซอร์หลากหลายชนิด เช่น Google Chrome, Firefox, Microsoft Edge และ Safari โดยแสดงผลเทียบเท่ากันเกือบทั้งหมด (2.2) รองรับอุปกรณ์หลากหลายรูปแบบ (Responsive Web Design) เพื่อให้การใช้งานสะดวกทั้งบนคอมพิวเตอร์ แท็บเล็ต และสมาร์ตโฟน (2.3) ระบบเข้าสู่ระบบแบบปลอดภัย (Secure Login) ผ่านบัญชีผู้ใช้ขององค์กร โดยใช้ Active Directory และกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงตามระดับผู้ใช้งาน (2.4) ระบบแจ้งเตือนข้อผิดพลาดและสถานะการประมวลผล (System Notification) เพื่อให้ผู้ใช้ทราบผลการทำงานแบบเรียลไทม์ (2.5) ระบบบันทึกการเปลี่ยนแปลงข้อมูล (Audit Trail) ที่เก็บข้อมูลวันที่ เวลา และรหัสผู้ใช้งานทุกครั้งที่มีการแก้ไขข้อมูล (2.6) การจัดการข้อมูลส่วนบุคคลตามพระราชบัญญัติคุ้มครองข้อมูลส่วนบุคคล (PDPA) โดยติดตั้งเครื่องมือ Cookie Consent Management และแสดงนโยบายความเป็นส่วนตัวอย่างชัดเจน และ (2.7) ระบบความปลอดภัยทางไซเบอร์ (Cyber Security) ด้วยการเข้ารหัสข้อมูล SSL/TLS ป้องกันการเข้าถึงข้อมูลโดยไม่ได้รับอนุญาต

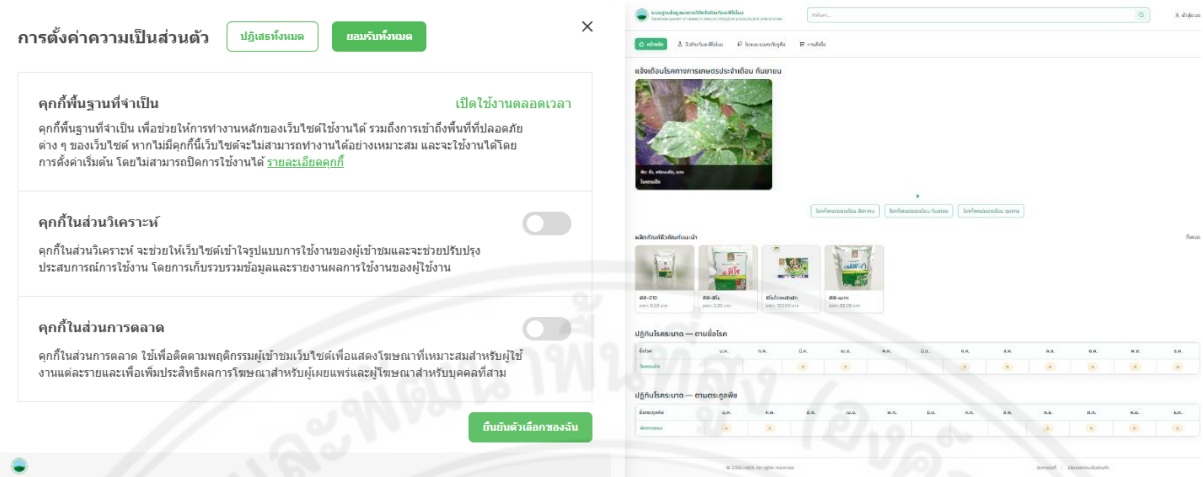
การทดสอบระบบได้ดำเนินการรอบที่ 1 เป็นการทดสอบฟังก์ชันหลัก เช่น การเพิ่ม ลบ แก้ไข และค้นหาข้อมูล ส่วนรอบที่ 2 เป็นการทดสอบความเสถียรของระบบภายใต้การใช้งานจริง พบว่าระบบสามารถทำงานได้ต่อเนื่อง มีการตอบสนองรวดเร็ว และรองรับผู้ใช้งานพร้อมกันได้มากกว่า 20 คน โดยไม่เกิดข้อผิดพลาด

(3) การติดตั้งและทดสอบการทำงานของระบบ

เริ่มจากการทดสอบการทำงานในสภาพแวดล้อมจำลอง เพื่อประเมินความถูกต้องของฟังก์ชันหลัก จากนั้นติดตั้งระบบบนเครื่องแม่ข่ายจริงของสถาบันและกำหนดการเข้าถึงผ่านโดเมนภายใน เพื่อทดสอบภายใต้สภาพแวดล้อมจริงขององค์กร ทั้งนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพของระบบด้านความเร็ว การตอบสนอง และการเข้าถึงฐานข้อมูล รวมทั้งเปิดให้ผู้ใช้งานทุกระดับทดลองใช้งานจริง เพื่อนำข้อเสนอแนะที่ได้รับมาปรับปรุงระบบให้มีความสมบูรณ์และสอดคล้องกับการใช้งานมากที่สุด

ผลการติดตั้งและทดสอบระบบพบว่า ระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ออกแบบ มีความเสถียรและปลอดภัยต่อการใช้งานระดับองค์กร การประมวลผลข้อมูลขนาดใหญ่ทำได้รวดเร็ว และสามารถเข้าถึงข้อมูลได้จากหลายอุปกรณ์โดยไม่มีปัญหา ทั้งนี้ผู้ใช้งานส่วนใหญ่ให้ความเห็นว่าระบบมีโครงสร้างเข้าใจง่าย มีระบบค้นหาที่มีประสิทธิภาพ และตอบสนองความต้องการของหน่วยงานได้ดี นอกจากนี้ได้ติดตามผลการใช้งานจริงและจัดทำ คู่มือการใช้งานระบบ (User Manual) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถศึกษาขั้นตอนการใช้งานด้วยตนเอง การฝึกอบรมพบว่าผู้เข้าร่วมมีความเข้าใจขั้นตอนการใช้งานระบบมากขึ้น สามารถใช้ระบบในการค้นหา จัดการ และบันทึกข้อมูลได้อย่างถูกต้องและคล่องแคล่ว รวมทั้งเสนอแนวทางปรับปรุงเพิ่มเติม เช่น การเพิ่มคำอธิบายประกอบภาพ การจัดหมวดหมู่ข้อมูลให้ชัดเจนขึ้น และการพัฒนาโมดูลสำหรับรายงานสรุปข้อมูลอัตโนมัติ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 4.5.9





ภาพที่ 4.5.9 ตัวอย่างการแสดงผลสำหรับผู้ใช้งาน (Frontend)

2) การติดตามสถานะการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตราย ชนิดที่ 2 ได้แก่ ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนจากผลงานวิจัย ซึ่งผลิตโดยโรงชีวภัณฑ์ มูลนิธิโครงการหลวง (โรงงานต้นแบบ)

- ฟีโรโมนดึงดูดเพลี้ยไฟ *Microcephalothrips abdominalis* ของเบญจมาศ
- ฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนใยผัก *Plutella xylostella* ของพืชตระกูลคะน้า กะหล่ำและผักกาด

ได้จัดทำแผนการดำเนินงาน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมความพร้อมด้านข้อมูลทางวิทยาศาสตร์และเอกสารประกอบการขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ตามระเบียบของกรมวิชาการเกษตร โดยมุ่งเน้นผลิตภัณฑ์ต้นแบบจำนวน 2 รายการ ดังกล่าวข้างต้น ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) ขั้นตอนการเตรียมเอกสารทางวิชาการ โดยรวบรวมข้อมูลจากเอกสารต้นแบบ เช่น แบบฟอร์มคำขอขึ้นทะเบียน รายการข้อมูลผลิตภัณฑ์ร่างฉลาก แผนการทดลองภาคสนาม และรายงานวิจัย เพื่อจัดทำข้อมูลให้ครบถ้วนตามข้อกำหนดของกรมวิชาการเกษตร (2) ขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพของผลิตภัณฑ์ เพื่อยืนยันสารออกฤทธิ์หลักและความเสถียรของฟีโรโมน โดยดำเนินการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรองมาตรฐาน และ (3) ขั้นตอนการจัดทำเอกสารประกอบการยื่นขึ้นทะเบียน ซึ่งรวมถึงแบบฟอร์มการขอขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 การจัดเตรียมข้อมูลด้านประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ผลการดำเนินงานพบว่าการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ของฟีโรโมน ยังอยู่ขั้นตอนการเตรียมเอกสารและการตรวจวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ ดังนี้

(1) ประสานงานและรวบรวมเอกสารต้นแบบ โดยจัดเก็บและศึกษาเอกสารประกอบการขึ้นทะเบียนจากตัวอย่าง 6 รายการ ได้แก่ แบบฟอร์มคำขอขึ้นทะเบียน รายงานผลการวิจัยทางกีฏวิทยา แผนการทดลองภาคสนาม รายการข้อมูลผลิตภัณฑ์ ร่างฉลากผลิตภัณฑ์ และเอกสารข้อมูลเทคนิคของฟีโรโมน เพื่อใช้เป็นแนวทางจัดทำชุดเอกสารสำหรับการยื่นขึ้นทะเบียน

(2) ตรวจวิเคราะห์สารออกฤทธิ์หลักของฟีโรโมน โดยส่งตัวอย่างฟีโรโมนดึงดูดเพลี้ยไฟและฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนใยผักไปยังบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด สาขาเชียงใหม่ เพื่อทดสอบสาร

ออกฤทธิ์หลักโดยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC/MS) ซึ่งเป็นมาตรฐานที่กรมวิชาการเกษตรใช้ในการพิจารณาขึ้นทะเบียน

ฟีโรโมนดึงดูดเพลี้ยไฟ (*Microcephalothrips abdominalis*) ประกอบด้วย

- กลุ่มฟีนอลิก (Phenolic Compounds) มีบทบาทเป็นสารช่วยคงสภาพความเสถียรของสารอื่นในฟีโรโมน ป้องกันการสลายตัวเมื่อสัมผัสอากาศหรือแสง

- กลุ่มเซสควิเทอร์พีน (Sesquiterpenes) เป็นสารระเหยที่มีคุณสมบัติด้านกลิ่นเฉพาะตัว มีผลกระตุ้นพฤติกรรมการเข้าหาของเพลี้ยไฟ โดยเลียนแบบสัญญาณกลิ่นจากพืช

- กลุ่มโมโนเทอร์พีน (Monoterpenes) เป็นสารที่ระเหยง่ายและช่วยเสริมกลิ่นของฟีโรโมน ทำให้เกิดประสิทธิภาพการดึงดูดในระยะใกล้มากขึ้น

ฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนใยผัก (*Plutella xylostella*) ประกอบด้วย

- กลุ่มเอสเทอร์ (Esters) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ให้กลิ่นหอมสดชื่น พบทั่วไปในพืชและผลไม้ ทำหน้าที่เลียนแบบกลิ่นธรรมชาติของพืชอาหารและพืชที่เหมาะต่อการวางไข่ของแมลง

- กลุ่มโมโนเทอร์พีน (Monoterpenes) ที่มีคุณสมบัติให้กลิ่นหอมสดชื่น เสริมการทำงานของฟีโรโมนให้มีประสิทธิภาพการดึงดูดแมลงเป้าหมายสูงขึ้น

ฟีโรโมนทั้ง 2 ชนิด ประกอบด้วยกลุ่มสารระเหยที่ทำงานร่วมกันในลักษณะ “การเสริมฤทธิ์ร่วม (synergistic effect)” ส่งผลให้ฟีโรโมนมีความเสถียรและประสิทธิภาพสูงขึ้น

(3) ติดตามและข้อสรุปเบื้องต้น จากการสอบถามพบว่ายังอยู่ระหว่างเตรียมการเพื่อเสนอต่อที่ประชุมเรื่อง ขอขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ใหม่ต่อกรมวิชาการเกษตร

ภาพรวมความก้าวหน้าของกิจกรรม คิดเป็นร้อยละ 45 โดยอยู่ขั้นตอนการสรุปผลทางห้องปฏิบัติการและการจัดเตรียมแบบฟอร์มใบสำคัญการขึ้นทะเบียน ทั้งนี้ผลการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีดังกล่าวถือเป็นข้อมูลสนับสนุนสำคัญต่อการจัดทำรายงานด้านความปลอดภัยและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์

ปัญหาและอุปสรรคของการดำเนินงาน คือ กระบวนการเตรียมเอกสารและตรวจสอบข้อมูลสำหรับการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ใช้เวลานาน และต้องประสานงานหลายหน่วยงาน ขณะที่การวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ต้องตรวจซ้ำเพื่อยืนยันผลความถูกต้อง

แผนการดำเนินงานระยะต่อไป จะเร่งจัดทำเอกสารประกอบการขึ้นทะเบียนให้ครบถ้วน จัดทำรายงานผลวิเคราะห์เพิ่มเติม และเตรียมการทดสอบภาคสนามร่วมกับผู้เกี่ยวข้องเพื่อยื่นขอขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์อย่างเป็นทางการ (กรณีผ่านความเห็นชอบจากมติที่ประชุม)

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัย

ปัจจุบันความต้องการสินค้าเกษตรปลอดภัยและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ขับเคลื่อนการพัฒนาภาคเกษตรตามยุทธศาสตร์ชาติ 20 ปี ด้านการเติบโตบนคุณภาพชีวิตที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) หรือ สวพส. จึงดำเนินการพัฒนาต้นแบบชีวภัณฑ์และฟีโรโมน เพื่อทดแทนสารเคมีอันตรายในการผลิตพืชเศรษฐกิจบนพื้นที่สูงตามแนวคิด ESG ปีงบประมาณ พ.ศ. 2568 โครงการมุ่งปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตต้นแบบชีวภัณฑ์และฟีโรโมน 4 รายการ ได้แก่ ฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก ชีวภัณฑ์ป้องกันโรคราสีเทา โรคใบจุด และโรคขอบใบไหม้ โดยดำเนินการทดสอบทั้งห้องปฏิบัติการและแปลงปลูกของเกษตรกรพื้นที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงและโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวง ขอบเขตการดำเนินงานครอบคลุมการปรับปรุงสูตรและกระบวนการผลิต การประเมินประสิทธิภาพในสภาพจริง และการถ่ายทอดองค์ความรู้แก่เกษตรกรและภาคีเครือข่าย สรุปดังนี้

5.1 การปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก *Spodoptera litura* จากสารแต่งกลิ่นสังเคราะห์และเลียนแบบธรรมชาติ

พัฒนาและทดสอบเทคโนโลยีการผลิตฟีโรโมนต้นแบบสูตรใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะสมต่อการผลิตเชิงพาณิชย์ เพื่อใช้ในการควบคุมประชากรผีเสื้อหนอนกระทู้ผักภายใต้ระบบเกษตรที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยเปรียบเทียบสูตรฟีโรโมนเดิมกับฟีโรโมนต้นแบบใหม่ 3 ตำรับ ซึ่งแตกต่างกันในองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์และตัวประสาน เพื่อเพิ่มความคงตัวของสารระเหยและประสิทธิภาพการดึงดูดแมลง รวมถึงการประเมินความเหมาะสมทางเทคนิคและเศรษฐศาสตร์เพื่อพัฒนาเชิงอุตสาหกรรม

<u>สูตรเดิม</u> ใช้ Cis-3-Hexen-1-ol 95–99% ร่วมกับวิตามินอี 1-5% โดยน้ำหนัก หยดบนวัสดุดูดซับพาราฟินแว็กซ์ 10 หยด พบว่ามีประสิทธิภาพการดึงดูดผีเสื้อหนอนกระทู้ผักระดับปานกลาง (เฉลี่ย 65%) แต่มีข้อจำกัดด้านการระเหยเร็วของสารออกฤทธิ์ และอายุการใช้งานสั้น (ไม่เกิน 14 วัน) ส่งผลให้ต้องเปลี่ยนกับดักบ่อยครั้งและมีต้นทุนต่อพื้นที่สูง (1,866.24 บาท/ไร่)

<u>สูตรใหม่ตำรับที่ 1</u> ใช้ Aromatic aldehyde (Benzaldehyde) ร่วมกับ Dipropylene glycol (DPG) ซึ่งมีคุณสมบัติช่วยลดการระเหยและคงความคงตัวของสารหอมระเหย ผลทดสอบพบว่ามีความคงตัวของสารสูงสุด โดยปริมาณ Benzaldehyde ลดลงเพียง 3.9% หลังเก็บ 6 เดือน และค่าการดึงดูดในอุโมงค์ลมสูงถึง 72.84% สูงกว่าสูตรเดิมอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) การทดสอบภาคสนามในแปลงผักกาดขาวปลีและกะหล่ำปลีหัวใจแสดงผลดึงดูด 61-69% และลดความเสียหายของพืชเหลือ 35% ขณะที่มีต้นทุนการใช้ 162.9 บาท/ไร่ สูตรมีความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพ ความคงตัว และต้นทุน เหมาะสมต่อการพัฒนาสู่ระดับกึ่งอุตสาหกรรม

<u>สูตรใหม่ตำรับที่ 2</u> (Cis-3-Hexenyl acetate ผสม Dipropylene glycol) เป็นสูตรปรับปรุงจากสารกลิ่นธรรมชาติกลุ่มเอสเทอร์ มีจุดเด่นที่กลิ่นคล้ายใบพืชสดซึ่งกระตุ้นพฤติกรรมการหาคู่ของผีเสื้อหนอนกระทู้ผัก ผลทดสอบพบค่าการดึงดูดเฉลี่ย 55-61% และลดความเสียหายของพืชได้ 42% โดยมีความคงตัวของสารออกฤทธิ์ดีภายใน 6 เดือน (ลดลงเพียง 1.5%) แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเก็บเกิน 9 เดือน จากอัตราการสลายตัวของเอสเทอร์ในสภาวะอุณหภูมิสูง การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่าต้นทุนอยู่ที่ 197.37 บาท/ไร่ และเหมาะสมต่อการใช้ในระบบเกษตรที่ต้องการกลิ่นระเหยแรงระยะสั้น

สูตรใหม่ตำรับที่ 3 (Allyl Isothiocyanate ผสม Dipropylene glycol) เป็นสูตรฟีโรโมนที่ใช้สารกลุ่มไอโซไธโอไซยาเนต ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งดึงดูด-ขับไล่ตามความเข้มข้น ผลทดลองในอุโมงค์ลมให้ค่าการดึงดูดเฉลี่ย 45-55% และลดความเสียหายของพืชได้ 49-68% แต่มีความคงตัวต่ำกว่าสูตรอื่น โดยปริมาณ AITC ลดลงประมาณ 5% หลังเก็บ 6 เดือน ทำให้ต้องเปลี่ยนกับดักถี่กว่า (ทุก 7-14 วัน) ทั้งนี้มีต้นทุนการผลิตต่ำที่สุด (146.7 บาท/ไร่) แต่ความสม่ำเสมอของการปล่อยกลิ่นยังไม่คงที่ จึงเหมาะใช้ในงานเฝ้าระวังประชากรแมลงมากกว่าการควบคุมโดยตรง

จากการประเมินฟีโรโมน 3 ตำรับ ตามเกณฑ์ 6 ด้าน ได้แก่ (1) ความคงตัวของสารออกฤทธิ์ (2) ประสิทธิภาพการดึงดูด (3) การลดความเสียหายของพืช (4) อายุการใช้งาน (5) ต้นทุนต่อไร่ และ (6) ความเหมาะสมเชิงเทคนิค พบว่าตำรับที่ 1 (Benzaldehyde ผสม Dipropylene glycol) มีความเหมาะสมสูงสุดสำหรับการพัฒนาระดับกึ่งอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ผลดึงดูดสูงสุด คงตัวดี และต้นทุนต่ำ รองลงมาคือ ตำรับที่ 2 (Cis-3-Hexenyl acetate ผสม DPG) ซึ่งให้กลิ่นดึงดูดเฉพาะช่วงต้นการใช้งานและเหมาะในสภาพเย็น ส่วนตำรับที่ 3 (AITC ผสม DPG) เหมาะกับการติดตั้งแบบตรวจจับระยะสั้นหรือในสภาพพื้นที่เฉพาะ

เกณฑ์การพิจารณา	**สูตรเดิม**	**ตำรับที่ 1**	**ตำรับที่ 2**	**ตำรับที่ 3**
1. สารออกฤทธิ์หลัก	Cis-3-Hexen-1-ol	**Benzaldehyde**	Cis-3-Hexenyl acetate	Allyl Isothiocyanate
2. ตัวประสาน	วิตามินอี ผสม Paraffin Wax	**Dipropylene glycol**	Dipropylene glycol	Dipropylene glycol
3. ความคงตัวของสาร (6 เดือน)	ลดลงเร็ว ภายใน 14 วัน	**คงตัวสูง (ลดลง <4%)**	คงตัวปานกลาง (ลดลง 1.5%)	คงตัวต่ำ (ลดลง 5%)
4. % การดึงดูดในอุโมงค์ลม	65.85	**72.84**	62.33	55.43
5. % การดึงดูดในภาคสนาม	51.21	**61.02-69.12**	53.80-55.42	45.43-49.31
6. % ลดความเสียหายของพืช	49-50	**35-36**	40-42	49-68
7. อายุใช้งาน (วัน)	7-14	**21-28**	14-21	7-14
8. ต้นทุน (บาท/ไร่)	1,866.24	**162.90**	197.37	146.70
9. ความเหมาะสมเชิงเทคนิค	ปานกลาง	**สูงสุด (สมดุลทุกด้าน)**	สูง	ปานกลาง
10. ความเหมาะสมเชิงอุตสาหกรรม	ปานกลาง	**เหมาะสมที่สุด**	ดี (เฉพาะสภาพเย็น)	เหมาะใช้เฝ้าระวังระยะสั้น

5.2 การปรับปรุงเทคโนโลยีการผลิตชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคราสีเทา *Botrytis cinerea* ของพริก ด้วยเทคนิค ไมโครเอนแคปซูเลชั่น

เปรียบเทียบระหว่างสูตรเดิมและสูตรต้นแบบใหม่ 3 ตำรับ ซึ่งมีองค์ประกอบและกระบวนการผลิตแตกต่างกัน โดยมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความคงตัวของจุลินทรีย์ แบคทีเรียปฏิปักษ์ ไอโซเลต 28 และเพิ่มประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อสาเหตุโรค

สูตรเดิมของการผลิตชีวภัณฑ์ใช้กระบวนการอบแห้งแบบอุณหภูมิต่ำ (40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง) โดยมี Corn starch และ Talcum เป็นวัสดุรองรับหลัก ผลทดสอบพบว่าหลังการผลิตมีความเข้มข้นจุลินทรีย์เริ่มต้นประมาณ 1.50×10^{9} cfu/ml แต่ลดลงต่อเนื่องระหว่างการเก็บรักษา โดยหลัง 9 เดือน เหลือประมาณ 3.50×10^{5} cfu/ml ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* ลดลงจาก 85.0% เหลือ 63.5-65.0% โดยยังสามารถลดความรุนแรงของโรคในสภาพแปลงได้ 50% แต่ถือว่ามีข้อจำกัดด้านความคงตัวของเชื้อ

สูตรใหม่ตำรับที่ 1 เป็นสูตรผงชีวภัณฑ์ที่ปรับปรุงจากสูตรเดิม โดยเสริมสารกระตุ้นการเจริญและสารป้องกันการสูญเสียความชื้น ได้แก่ Glucose, Nitrogen, Soy protein, Gelatin และ Corn starch ร่วมกับวัสดุรองรับ CMC, Maltodextrin, Corn starch และ Zinc sulfate หลังการผลิตมีความเข้มข้นจุลินทรีย์ 2.10×10^{9} cfu/ml คงตัวดีถึง 6 เดือน (ประมาณ 2.00×10^{6} cfu/ml) และยังคงประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราได้ 84-85% โดยลดลงเพียงเล็กน้อยหลัง 9 เดือน (63.5%) การทดสอบภาคสนามร่วมกับเกษตรกรแสดงให้เห็นว่าสามารถลดความรุนแรงของโรคได้ 45-50% ด้วยต้นทุนประมาณ 85 บาท ต่อโรงเรือนต่อเดือน จึงจัดเป็นสูตรที่มีความสมดุลระหว่างประสิทธิภาพ ความคงตัว และต้นทุน เหมาะสมต่อการนำไปผลิตระดับกึ่งอุตสาหกรรม

สูตรใหม่ตำรับที่ 2 ได้รับการพัฒนาในรูปแบบ Encapsulation โดยใช้ Gelatin และ Sodium alginate เป็นวัสดุห่อหุ้มจุลินทรีย์ สูตรที่ให้ผลดีที่สุดคือ Gelatin 6.6 กรัม ร่วมกับ Sodium alginate 1 กรัม ในน้ำ 200 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นจุลินทรีย์เริ่มต้น $5.80\text{x}10^{10}$ cfu/ml และสามารถยับยั้งเชื้อ *B. cinerea* ได้ 89.85% หลังเก็บรักษา 6 เดือน ยังคงระดับ 10^{5}-10^{6} cfu/ml และประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ 65-70% เมื่อทดสอบภาคสนาม สามารถลดความรุนแรงของโรคได้ 30-40% อย่างไรก็ตาม ต้นทุนการผลิตสูง ประมาณ 4,799 บาท ต่อโรงเรือนต่อเดือน จึงเหมาะสมในเชิงเทคนิคสำหรับการวิจัยและการพัฒนาต้นแบบมากกว่าการผลิตเชิงพาณิชย์ระยะเริ่มต้น

สูตรใหม่ตำรับที่ 3 เป็นสูตรชีวภัณฑ์ชนิดน้ำ โดยเติมธาตุอาหาร (Mg, Ca หรือ N) และสารเคลือบผนังเซลล์ (Sodium alginate หรือ Gum arabic) สูตรที่มี Nitrogen และ Magnesium ให้ผลดีที่สุด โดยมีความเข้มข้นจุลินทรีย์เริ่มต้น 6.50×10^{9} cfu/ml และมีประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ 88.90% หลังเก็บรักษา 3 เดือน ลดลงเหลือ 3.23×10^{6} cfu/ml และยังคงการยับยั้งเชื้อได้ 65% สูตรนี้ยังไม่ผ่านการทดสอบในสภาพแปลงเกษตรกร แต่มีต้นทุนต่ำสุด ประมาณ 39.65 บาทต่อลิตร และสะดวกต่อการใช้งานภาคสนาม จึงมีศักยภาพต่อการพัฒนาเป็นสูตรชีวภัณฑ์น้ำ แต่ยังต้องการการปรับปรุงด้านเสถียรภาพของเชื้อและการประเมินประสิทธิภาพ

จากการเปรียบเทียบโดยใช้เกณฑ์ 6 ด้าน ได้แก่ (1) ความคงตัวของเชื้อ (2) ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา (3) การควบคุมโรคในสภาพจริง (4) อายุการเก็บรักษา (5) ต้นทุน และ (6) ความเหมาะสมเชิงเทคนิค พบว่า ตำรับที่ 1 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการพัฒนาระดับกึ่งอุตสาหกรรม เนื่องจากให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อและควบคุมโรคใกล้เคียงกับตำรับที่มีศักยภาพสูงสุด แต่มีต้นทุนต่ำและผ่านการทดสอบภาคสนามจริง ส่วนตำรับที่ 2 มีศักยภาพชีวภาพสูงสุดแต่ต้นทุนสูง เหมาะกับการต่อยอดเชิงวิจัย ขณะที่ตำรับที่ 3 มีศักยภาพด้านการใช้ประโยชน์และต้นทุนต่ำ แต่จำเป็นต้องพัฒนาเสถียรภาพและประเมินผลก่อนการขยายผลระดับอุตสาหกรรม

เกณฑ์การพิจารณา	**สูตรเดิม**	**ตำรับ 1**	**ตำรับ 2**	**ตำรับ 3**
1. ความเข้มข้นของจุลินทรีย์หลังการผลิต (cfu/ml)	1.50×10^{9}	**2.10×10^{9}**	5.80×10^{10}	6.50×10^{9}
2. ความคงตัวของจุลินทรีย์ระหว่างเก็บรักษา (cfu/ml)	3.50×10^{5} หลัง 9 เดือน	**2.00×10^{6} หลัง 6 เดือน; 3.50×10^{5} หลัง 9 เดือน**	5.00×10^{5} หลัง 6 เดือน	3.23×10^{6} หลัง 3 เดือน
3. % การยับยั้งเชื้อ *B. cinerea*	87.5 (เริ่มต้น) 63.5-65.0 (9 เดือน)	**84.0-85.0 (เริ่มต้น) 63.5 (9 เดือน)**	89.85 (สูตร Gelatin ผสม Alginate หลังผลิต)	88.90 (สูตร N ผสม Mg หลังผลิต)
4. % ลดความรุนแรงของโรค (ห้องปฏิบัติการ)	50	**45-50**	30-40	45
5. % ลดความรุนแรงของโรค (แปลงเกษตรกร)	50	**50**	55	ไม่ทดสอบภาคสนาม
6. อายุการเก็บรักษาที่คงประสิทธิภาพ (เดือน)	6	**9**	6	3
7. ต้นทุนการผลิตโดยประมาณ	85 บาท/กิโลกรัม	**85 บาท/กิโลกรัม**	4,799 บาท/โรงเรือน/เดือน	39.65 บาท/ลิตร
8. ความเหมาะสมเชิงเทคนิค	ปานกลาง (สูตรเปรียบเทียบ)	**สูง (คงตัวดี ต้นทุนต่ำ)**	สูงมาก (ประสิทธิภาพสูงสุด แต่ต้นทุนสูง)	ปานกลาง (เหมาะใช้ระยะสั้น)
9. สูตรย่อยที่ให้ผลดีที่สุด	-	**CMC ผสม Maltodextrin ผสม Corn starch ผสม $ZnSO_4$**	Gelatin 6.6 g ผสม Sodium alginate 1 g/200 ml	Nitrogen 15 ml ผสม Magnesium 25 g/200 ml

เกณฑ์การพิจารณา	สูตรเดิม	ตำรับ 1	ตำรับ 2	ตำรับ 3
10. ความเหมาะสมโดยรวมต่อการพัฒนาเชิงอุตสาหกรรม	ปานกลาง	**ดีที่สุด**	ดี (หากมีงบเพียงพอ)	เหมาะสำหรับแปลงทดลองระยะสั้น

5.3 การเพิ่มคุณภาพชีวภัณฑ์ป้องกันกำจัดโรคใบจุด *Cercospora* spp. ตระกูลผักกาด ด้วยเทคโนโลยีปกป้องเซลล์จุลินทรีย์จากความร้อน

เน้นปรับปรุงกระบวนการผลิตและสูตรส่วนประกอบ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวและประสิทธิภาพสูงขึ้น พัฒนา 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ (2) สูตรสารปกป้องเซลล์ และ (3) สูตรวัสดุรองรับร่วมกับเทคนิคการทำแห้ง 2 วิธี คือ อบลมร้อนและพ่นฝอย โดยยึดหลักการเพิ่มสมรรถภาพของเซลล์จุลินทรีย์ การลดความเครียดจากสภาวะแวดล้อม และการรักษาความมีชีวิตรอดของเซลล์หลังการทำแห้งและเก็บรักษา

สูตรเดิม ใช้เชื้อ *Bacillus amyloliquefaciens* ไอโซเลท B18 เพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตรแป้งถั่วเหลืองและเกลือแร่ ก่อนทำแห้งด้วยวิธีอบลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (40 °C นาน 24 ชั่วโมง) โดยใช้ แป้งข้าวเจ้าผสม น้ำมันถั่วเหลือง และซูโครส เป็นวัสดุรองรับ ผลผลิตที่ได้มีจำนวนเชื้อเฉลี่ย 1.0×10^8 cfu/ml ความชื้น 15% และให้ผงชีวภัณฑ์เฉลี่ย 700 กรัมต่อสารแขวนลอยจุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร หลังการเก็บรักษา 9 เดือน จำนวนเชื้อลดลงเหลือระดับ 10^5 cfu/ml ทำให้ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *Cercospora* spp. ลดลงจากร้อยละ 81 เหลือร้อยละ 58 ทั้งนี้มีข้อจำกัดด้านความคงตัวและอายุเก็บรักษา

การพัฒนาอาหารเลี้ยงเชื้อ จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ 2 ชนิด ได้แก่ สูตรแป้งถั่วเหลือง และสูตรกากน้ำตาล พบว่าสูตรกากน้ำตาลให้ผลผลิตเซลล์สูงกว่า โดยมีจำนวนเชื้อเฉลี่ย 3.1×10^{10} cfu/ml ภายใน 48-72 ชั่วโมง ขณะที่สูตรแป้งถั่วเหลืองให้ค่าเฉลี่ยเพียง 2.0×10^8 cfu/ml แต่มีต้นทุนสูงกว่าถึง 6 เท่า (2.47 เทียบกับ 14.15 บาทต่อลิตร) จึงคัดเลือกสูตรกากน้ำตาลที่เป็นแหล่งคาร์บอนราคาประหยัดเป็นสูตรมาตรฐานในการเพาะเลี้ยงโดยพิจารณาด้านผลผลิต ความเสถียร และความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

การพัฒนาสูตรสารปกป้องเซลล์ ได้คัดเลือกสูตรสารปกป้องเซลล์จำนวน 21 สูตร ซึ่งประกอบด้วยสารกลุ่มน้ำตาล โปรตีน กรดอะมิโน และเกลือแร่สัดส่วนต่างๆ พบว่าสูตรที่ 11, 18 และ 20 ให้ผลดีที่สุด โดยเฉพาะสูตรที่ 18 (D-glucose ผสม urea ผสม soy protein ผสม gelatin ผสม corn starch) มีจำนวนเชื้อเฉลี่ยสูงสุดช่วง 48-72 ชั่วโมง (9.0×10^9-6.7×10^{11} cfu/ml) และมีค่าการอยู่รอดของเซลล์ระดับสูงสุดส่วนสูตรที่ 11 และ 20 ให้ผลใกล้เคียงและมีต้นทุนต่ำกว่า (11.55 และ 9.53 บาท/ลิตร ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามสูตรที่ 18 ถูกคัดเลือกเป็นสูตรมาตรฐานสำหรับการทำแห้ง เนื่องจากให้สมดุลระหว่างปริมาณเชื้อ ความคงตัว และความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของเซลล์ในอาหารเหลว ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณภาพของชีวภัณฑ์

การคัดเลือกวัสดุรองรับและเทคนิคการทำแห้ง

เทคนิคอบลมร้อน (Hot Air Drying) จากการทดสอบวัสดุรองรับ 8 สูตร พบว่าสูตรที่ 4 (Maltodextrin ผสม $MgSO_4$ ผสม Glucose) และ สูตรที่ 6 (แป้งมันสำปะหลัง ผสม Sucrose ผสม Skim milk ผสม $MgSO_4$) ให้จำนวนเชื้อสูงสุด 5.64×10^{10} และ 1.98×10^{10} cfu/ml ตามลำดับ ทั้ง 2 สูตร มีค่า

ความชื้นหลังอบเฉลี่ย 10-11% ให้ผงชีวภัณฑ์เฉลี่ย 1,000 กรัมต่อสารแขวนลอย 100 มิลลิลิตร และมีค่า pH ระหว่าง 6.5-7.5 ซึ่งเหมาะสมต่อการคงสภาพของเซลล์ *B. amyloliquefaciens* ไอโซเลท B18 สีของผลิตภัณฑ์เป็นขาวครีม เนื้อผงละเอียด และละลายน้ำได้ดี (ระดับ 3) ตกตะกอนน้อยถึงปานกลาง (ระดับ 2-3) ผลการวิเคราะห์ต้นทุนเฉลี่ย 87.5 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งถือว่าอยู่ระดับต่ำ เหมาะสมสำหรับการผลิตระดับห้องปฏิบัติการและการขยายสู่ระดับกึ่งอุตสาหกรรม

เทคนิคพ่นฝอย (Spray Drying) การทดลองด้วยเครื่องพ่นฝอยขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิขาเข้า 180 °C และอัตราการป้อนสาร 50% พบว่าจำนวนเชื้อหลังผลิตอยู่ในช่วง 1.0×10^{4}-8.16×10^{9} cfu/ml โดยสูตรที่ 5 (Maltodextrin ผสม Whey protein ผสม $MgSO_4$) ให้จำนวนเชื้อสูงสุด 8.16×10^{9} cfu/ml และผลผลิต 80.50 กรัมต่อสารแขวนลอย 100 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์มีลักษณะสีขาวครีม ละลายน้ำได้น้อยระดับ 2 และตกตะกอนน้อย แต่มีต้นทุนค่าสารสูงสุด 3,251 บาทต่อกิโลกรัม ในขณะที่สูตร 2 (Corn starch ผสม Talcum) ให้จำนวนเชื้อน้อยกว่า (2.30×10^{8} cfu/ml) แต่มีต้นทุนต่ำสุด 50 บาทต่อกิโลกรัม และมีคุณสมบัติทางกายภาพดี (pH 6.54 ละลายน้ำและการตกตะกอนระดับ 1) จึงถือว่าสูตร 2 มีความเหมาะสมต่อการผลิตเชิงพาณิชย์ระยะเริ่มต้น โดยสามารถควบคุมต้นทุนได้ต่ำและได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรสูง

การพัฒนาองค์ประกอบทั้ง 3 ด้าน พบว่า เทคนิคอบลมร้อนโดยใช้สูตรวัสดุรองรับที่ 4 และ 6 ให้ผลดีที่สุดด้านปริมาณเชื้อ ความชื้น ผลผลิต และความสมดุลระหว่างต้นทุนและประสิทธิภาพ โดยสามารถเพิ่มจำนวนเชื้อจากสูตรเดิม (1.0×10^{8} cfu/ml) เป็นระดับ 10^{10} cfu/ml และลดค่าความชื้นจาก 15% เหลือ 10-11% ส่วนเทคนิคพ่นฝอยให้คุณภาพผงละเอียด สีสม่ำเสมอ ละลายน้ำได้ดี เหมาะต่อการผลิตระดับอุตสาหกรรม แต่มีต้นทุนสูงกว่า ขณะที่สูตรเดิมยังคงมีข้อดีด้านความเรียบง่ายของกระบวนการ แต่ด้อยกว่าในทุกมิติทั้งด้านปริมาณเชื้อ ความชื้น และประสิทธิภาพการคงตัว

รายการ	**สูตรเดิม อบลมร้อน**	**สูตรใหม่ อบลมร้อน**	**สูตรใหม่ พ่นฝอย**
ตำรับการผลิตหลัก	แป้งข้าวเจ้า ผสมน้ำมันถั่วเหลือง และซูโครส	**สูตร 4 Maltodextrin ผสม $MgSO_4$ ผสม Glucose สูตร 6 Tapioca starch ผสม Sucrose ผสม Skim milk ผสม $MgSO_4$**	สูตร 2 Corn starch ผสม Talcum สูตร 5 **Tapioca starch** ผสม peptone ผสม Whey protein ผสม Talcum ผสม Zinc sulphate
จำนวนเชื้อหลังผลิต (cfu/ml)	1.0×10^{8}	**5.64×10^{10} และ 1.98×10^{10}**	2.3×10^{8} และ 8.16×10^{9}
ค่าความชื้น (%)	15.00	**11.00 และ 11.00**	8.00 และ 9.00
ผลผลิตผงชีวภัณฑ์ (กรัม/100 มิลลิลิตร)	700	**1,000 และ 1,000**	73.08 และ 80.50

รายการ	สูตรเดิม อบลมร้อน	สูตรใหม่ อบลมร้อน	สูตรใหม่ พ่นฝอย
ค่า pH ของผลิตภัณฑ์	6.20	**7.40 และ 7.80**	6.54 และ 7.10
ลักษณะสีผลิตภัณฑ์	ขาวอมเหลือง	**ขาวครีม และขาว**	ขาว และขาวครีม
ความสามารถละลายน้ำ (ระดับ 1–5)	4 (ปานกลาง)	**3 และ 3 (ดี และดี)**	1 และ 2 (ดี และน้อย)
การเกิดตะกอน (ระดับ 1–5)	4 (มาก)	**2 และ 3 (น้อย และปานกลาง)**	1 และ 1 (น้อย และน้อย)
ต้นทุนค่าวัสดุรองรับ (บาท/กิโลกรัม)	350	**90 และ 85**	50 และ 3,251
คะแนนความเหมาะสมโดยรวม (1–5)	2.5	**4.5**	3.8
ระดับความเหมาะสมต่อการผลิต	ห้องปฏิบัติการ (ประสิทธิภาพต่ำกว่าสูตรปรับปรุงใหม่)	**กึ่งอุตสาหกรรม (สมดุลระหว่างต้นทุนและประสิทธิภาพ)**	ต้นแบบอุตสาหกรรม (คุณภาพสูงแต่ต้นทุนสูง)

5.4 การเพิ่มคุณภาพชีวภัณฑ์ป้องกัน กำจัดโรคขอบใบไหม้ *Xanthomonas campestris* ตระกูลกะหล่ำ ด้วยเทคโนโลยี

มุ่งพัฒนาเทคโนโลยีการผลิต โดยปรับปรุงองค์ประกอบของสูตรและกระบวนการผลิต เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงตัวและประสิทธิภาพสูงขึ้น ผ่านการพัฒนา 3 องค์ประกอบหลัก ได้แก่ (1) สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อ (2) สูตรสารปกป้องเซลล์ และ (3) วัสดุรองรับร่วมกับเทคนิคการทำแห้ง 2 วิธี คือ อบลมร้อนและพ่นฝอย

<u>สูตรเดิม</u> ใช้เชื้อ *Bacillus amyloliquefaciens* ไอโซเลท B6 เพาะเลี้ยงในอาหารเหลวสูตรแป้งถั่วเหลืองและเกลือแร่ จากนั้นทำแห้งด้วยวิธี อบลมร้อนที่อุณหภูมิต่ำ (40 °C นาน 24 ชั่วโมง) โดยใช้ แป้งข้าวเจ้า ผสมน้ำมันถั่วเหลืองและซูโครส เป็นวัสดุรองรับหลัก ผลผลิตที่ได้มีจำนวนเชื้อเฉลี่ยประมาณ 1.0×10^8 cfu/ml ความชื้นเฉลี่ย 15% และผลผลิตผง 700 กรัม/100 มิลลิลิตร หลังเก็บรักษา 9 เดือน จำนวนเชื้อลดลงเหลือ 10^5 cfu/ml ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *X. campestris* ลดลงจาก 83% เหลือ 63% ทั้งนี้มีข้อจำกัดด้านความคงตัวและอายุเก็บรักษา

<u>การพัฒนาอาหารเลี้ยงเชื้อ</u> เมื่อเปรียบเทียบระหว่างสูตรแป้งถั่วเหลืองกับสูตรกากน้ำตาล พบว่าสูตรกากน้ำตาล (Molasses medium) ให้จำนวนเชื้อเฉลี่ย 1.2×10^{11} cfu/ml ภายใน 72 ชั่วโมง ใกล้เคียงกับสูตรแป้งถั่วเหลือง แต่มีต้นทุนต่ำกว่า ประมาณ 6 เท่า (2.47 เทียบกับ 14.15 บาท/ลิตร) จึงคัดเลือกให้เป็นสูตรมาตรฐาน สำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อ *B. amyloliquefaciens* ไอโซเลท B6 เนื่องจากให้ผลผลิตเชื้อสูงและมีความคุ้มค่า โดยไม่ลดประสิทธิภาพการเจริญ

<u>การพัฒนาสูตรสารปกป้องเซลล์</u> จากการทดสอบ 21 สูตรสารปกป้องเซลล์ พบว่าสูตรที่ 11, 18 และ 20 ให้ผลดีที่สุด โดยเฉพาะสูตรที่ 18 (D-glucose ผสม urea ผสม soy protein ผสม gelatin ผสม corn starch) ให้จำนวนเชื้อเฉลี่ย 9.0×10^9-6.7×10^{11} cfu/ml และมีค่าความอยู่รอดของเชื้อสูงสุดในกลุ่ม a ทั้งที่

48 และ 72 ชั่วโมง ส่วนสูตร 11 และ 20 มีผลใกล้เคียงกันแต่มีต้นทุนต่ำกว่า (11.55 และ 9.53 บาท/ลิตร) อย่างไรก็ตามสูตรที่ 18 ได้รับการคัดเลือกเป็นสูตรหลักในการทำแห้ง เนื่องจากให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างจำนวนเชื้อและความคงตัวของเซลล์

การคัดเลือกวัสดุรองรับและเทคนิคการทำแห้ง

เทคนิคอบลมร้อน (Hot Air Drying) จากการทดสอบวัสดุรองรับ 8 สูตร พบว่าสูตรที่ 4 (Maltodextrin ผสม $MgSO_4$ ผสม Glucose) และ 6 (แป้งมันสำปะหลัง ผสม Sucrose ผสม Skim milk ผสม $MgSO_4$) ให้จำนวนเชื้อสูงสุด 4.52×10^{10} และ 2.10×10^{10} cfu/ml ตามลำดับ จัดอยู่ในกลุ่ม a ตามการวิเคราะห์ทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ความชื้นหลังอบเฉลี่ย 10-11%, ผลผลิตผงเฉลี่ย 1,000 กรัม/100 ml, ค่า pH อยู่ระหว่าง 6.5-7.5 ซึ่งเหมาะสมต่อการคงสภาพของ *B. amyloliquefaciens* ไอโซเลท B6 ทั้ง 2 สูตรให้ประสิทธิภาพสูงกว่าสูตรเดิมอย่างชัดเจน และมีต้นทุนปานกลาง (เฉลี่ย 410.5 บาท/กิโลกรัม) จึงเหมาะสำหรับการผลิตในระดับห้องปฏิบัติการและขยายสู่ระดับกึ่งอุตสาหกรรม

เทคนิคพ่นฝอย (Spray Drying) การทดลองด้วยเครื่องพ่นฝอยขนาด 5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 180 °C และอัตราการป้อนสาร 50% พบว่าจำนวนเชื้อหลังผลิตอยู่ในช่วง 1.0×10^{4}-7.60×10^{9} cfu/ml โดยสูตรที่ 5 (Maltodextrin ผสม Whey Protein ผสม $MgSO_4$) ให้จำนวนเชื้อสูงสุด 7.60×10^{9} cfu/ml ผลผลิต 819 กรัม/100 มิลลิลิตร และมีสีขาวครีม ละลายน้ำดีในระดับ 1-2 แต่มีต้นทุนสูงสุด -3,251 บาท/กิโลกรัม ในขณะที่สูตรที่ 2 (Corn starch ผสม Talcum) ให้จำนวนเชื้อระดับ 3.0×10^{8} cfu/ml ต้นทุนต่ำสุด 50 บาท/กิโลกรัม และมีคุณสมบัติทางกายภาพดี (pH 6.46, การละลายและการตกตะกอนระดับ 1) จึงถือว่าเหมาะสมสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ระยะเริ่มต้น

การพัฒนาองค์ประกอบทั้ง 3 ด้าน พบว่าเทคนิค อบลมร้อน โดยใช้สูตรวัสดุรองรับที่ 4 และ 6 ให้ผลดีที่สุดในแง่ของจำนวนเชื้อ ความชื้น ผลผลิต และความสมดุลระหว่างต้นทุนและประสิทธิภาพ โดยสามารถเพิ่มจำนวนเชื้อหลังผลิตจากสูตรเดิม (10^{8} cfu/ml) เป็นระดับ 10^{10} cfu/ml และลดค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์จาก 15% เหลือประมาณ 10-11% ขณะที่เทคนิคพ่นฝอยให้คุณภาพผงละเอียด ละลายน้ำง่าย และสีสม่ำเสมอ เหมาะต่อการผลิตระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้มีต้นทุนสูงกว่า ส่วนสูตรเดิม มีข้อดีด้านความเรียบง่ายของกระบวนการ แต่ด้อยกว่าทุกด้านทั้งด้านปริมาณเชื้อ ความชื้น และผลผลิต

รายการ	**สูตรเดิม อบลมร้อน**	**สูตรใหม่ อบลมร้อน**	**สูตรใหม่ พ่นฝอย**
ตำรับการผลิตหลัก	แป้งข้าวเจ้า ผสมน้ำมันถั่วเหลือง และซูโครส	**สูตรที่ 4 Maltodextrin ผสม$MgSO_4$ ผสม Glucose**	สูตรที่ 2 Corn starch ผสม Talcum สูตร 5 Maltodextrin ผสม Whey Protein ผสม $MgSO_4$

รายการ	สูตรเดิม อบลมร้อน	สูตรใหม่ อบลมร้อน	สูตรใหม่ พ่นฝอย
		สูตร 6 Tapioca starch ผสม Sucrose ผสม Skim milk ผสม $MgSO_4$	
จำนวนเชื้อหลังผลิต (cfu/ml)	1.0×10^{8}	**2.10×10^{10} และ 4.52×10^{10}**	1.0×10^{4} และ 7.60×10^{9}
ค่าความชื้น (%)	15.00	**10.00 และ 11.00**	8.00 และ 10.00
ผลผลิตผงชีวภัณฑ์ (กรัม/100 มิลลิลิตร)	700	**850 และ 1,000**	510 และ 819
ค่า pH ของผลิตภัณฑ์	6.50	**6.50 และ 7.50**	6.46 และ 7.78
ลักษณะสีผลิตภัณฑ์	ขาวอมเหลือง	**ขาว และขาวครีม**	ขาว และขาวครีม
ความสามารถละลายน้ำ (ระดับ 1–5)	3 (ปานกลาง)	**3 และ 4 (ดี และดีมาก)**	1 และ 3 (ดี และปานกลาง)
การเกิดตะกอน (ระดับ 1–5)	4 (มาก)	**2 และ 3 (น้อย และปานกลาง)**	1 และ 3 (น้อย และปานกลาง)
ต้นทุนค่าสาร (บาท/กิโลกรัม)	120	**300 และ 500**	50 และ 3,251
คะแนนความเหมาะสมโดยรวม (1–5)	2.5	**4.5**	3.8
ระดับความเหมาะสมต่อการผลิต	ห้องปฏิบัติการ (ประสิทธิภาพต่ำกว่า สูตรปรับปรุงใหม่)	**กึ่งอุตสาหกรรม (สมดุลระหว่างต้นทุนและประสิทธิภาพ)**	ต้นแบบอุตสาหกรรม (คุณภาพสูงแต่ต้นทุนสูง)

วัตถุประสงค์ที่ 2 เพื่อทดสอบและสาธิตต้นแบบชีวภัณฑ์และฟีโรโมนโดยกระบวนการมีส่วนร่วมของเกษตรกรและภาคีเครือข่าย

5.5 การประเมินผลสัมฤทธิ์การนำงานวิจัยชีวภัณฑ์และฟีโรโมนไปใช้แก้ไขปัญหาสารเคมีเกษตรบนพื้นที่สูงสำคัญร่วมกับหน่วยงานเครือข่าย

มุ่งนำผลงานวิจัยชีวภัณฑ์และฟีโรโมนไปใช้ประโยชน์จริงบนพื้นที่สูงด้านการลดการใช้สารเคมีอันตราย การสร้างการยอมรับของเกษตรกร การพัฒนาแหล่งเรียนรู้ต้นแบบ การสร้างระบบสารสนเทศสนับสนุนการบริหารจัดการ และการเตรียมขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์ต้นแบบ ซึ่งเป็นกลไกสำคัญต่อการขับเคลื่อนระบบการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสาน (Integrated Pest Management: IPM) สู่การพัฒนาเกษตรยั่งยืน กิจกรรมประกอบด้วย

5.5.1 ศึกษาผลยอมรับการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนที่สอดคล้องกับหลักการจัดการศัตรูพืชแบบผสมผสานกับกลุ่มพืชตระกูล Solanaceae

ดำเนินการทดสอบและสาธิตการใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมน โดยกระบวนการมีส่วนร่วมของเกษตรกรในพื้นที่ ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงแม่ทาเหนือ และ โครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงปางหินฝน จ.เชียงใหม่ รวม 4 แปลงสาธิต (มะเขือเทศเชอร์รี่ 2 แปลง และมะเขือเทศโทมัส 2 แปลง) เกษตรกรเข้ามามีส่วนร่วมทุกขั้นตอน ตั้งแต่การวางแผน การติดตั้ง การติดตามผล ไปจนถึงการประเมินร่วมกับเจ้าหน้าที่

ผลการปฏิบัติภาคสนามพบว่า เกษตรกรมีความรู้และทักษะเพิ่มขึ้น สามารถใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนได้ถูกต้องตามชนิดศัตรูพืช โดยแปลงมะเขือเทศเชอร์รี่สามารถลดแมลงวันหนอนชอนใบจาก 1.25 เหลือ 0.18 ตัวต่อต้น ลดความรุนแรงของโรคใบจุดจาก ร้อยละ 53.1 เหลือ 52.1 และลดการใช้สารเคมีลงกว่า ร้อยละ 40 ส่วนแปลงมะเขือเทศโทมัสสามารถลดแมลงหวี่ขาวได้ ร้อยละ 87-100 ลดโรคใบไหม้จาก ร้อยละ 28.1 เหลือ 6.3 และเพิ่มผลผลิตเฉลี่ย ร้อยละ 6-7 มีกำไรเพิ่มขึ้น 103-131 บาทต่อแปลง ผลประเมินการยอมรับของเกษตรกร 45 ราย พบว่าเกษตรกร ร้อยละ 73.33 ยอมรับการใช้ชีวภัณฑ์ และ ร้อยละ 70.00 ยอมรับการใช้ฟีโรโมน เหตุผลหลักคือความปลอดภัยต่อผู้ใช้และผู้บริโภค (ร้อยละ 64.29) สอดคล้องกับมาตรฐานของโครงการ (ร้อยละ 64.29) และมีประสิทธิภาพควบคุมศัตรูพืช (ร้อยละ 46.43) เกษตรกรส่วนใหญ่กว่า ร้อยละ 85 มีแผนเลือกใช้ชีวภัณฑ์ต่อเนื่องในฤดูถัดไป พร้อมเสนอแนวทางพัฒนาเพิ่มเติม ได้แก่ การเพิ่มประสิทธิภาพของชีวภัณฑ์ การลดต้นทุน และการเพิ่มช่องทางจำหน่ายสำหรับพื้นที่ห่างไกล

5.5.2 ปรับปรุงแหล่งเรียนรู้การใช้ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนภายใต้องค์ประกอบการพัฒนา 7 ด้าน

คัดเลือกโครงการพัฒนาพื้นที่สูงแบบโครงการหลวงห้วยก้างปลา จ.เชียงราย และดำเนินการร่วมกับโครงการขยายผลการใช้ฟีโรโมนดึงดูดด้วงหมัดผักแถบลายแทนสารเคมีในพื้นที่ปลูกผักปลอดภัยบนพื้นที่สูงในการพัฒนากระบวนการเรียนรู้เชิงปฏิบัติจริง ปรับโครงสร้างพื้นที่ให้มีแปลงสาธิต Learning Station ป้ายความรู้ และสื่อมัลติมีเดีย พร้อมคัดเลือกเกษตรกรผู้นำ 2 ราย ทำหน้าที่เป็นวิทยากรถ่ายทอด โดยออกแบบและประเมินแหล่งเรียนรู้ตามองค์ประกอบการพัฒนา 7 ด้าน (องค์ความรู้ วิทยากร การจัดการเรียนรู้ กระบวนการถ่ายทอด สื่อการเรียนรู้ สถานที่ และการบริหารจัดการ) ผลประเมินก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า คะแนนเฉลี่ยภาพรวมก่อนปรับปรุงอยู่ที่ประมาณ 4.1 จาก 5.0 (ร้อยละ 82) ขณะที่หลังปรับปรุงอยู่ที่ประมาณ 3.7 (ร้อยละ 74) ข้อมูลแสดงว่าคุณภาพด้าน “โครงสร้างและสื่อ” ดีขึ้น (เดิม 4.0 เป็น 4.4) แต่ “กระบวนการจัดการเรียนรู้” ยังไม่สอดคล้องกับลักษณะและความต้องการของกลุ่มเป้าหมาย คะแนนลดจาก 4.3 เหลือ 3.6 ทำให้ต้องปรับรูปแบบกิจกรรมใหม่ ด้านการพัฒนาเกษตรกรในฐานะวิทยากร ผลประเมินโดยรวมอยู่ระดับ “ดีถึงดีมาก” (ประมาณ 3.5–4.5 คะแนนจาก 5 ระดับ) จุดแข็ง คือ เกษตรกรมีประสบการณ์ตรงในการปลูกผัก การจัดการศัตรูพืช และการใช้ชีวภัณฑ์หรือฟีโรโมน สามารถเชื่อมโยงเนื้อหากับบริบทจริงและสร้างแรงบันดาลใจในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้สารเคมีของเกษตรกรรายอื่นได้ดี ส่วนจุดที่ควรพัฒนา คือ ทักษะการสื่อสารและการพูดในที่ชุมชน รวมถึงความรู้เชิงเทคนิคการจัดการศัตรูพืชเชิงระบบ ซึ่งจำเป็นต่อการถ่ายทอดหลักวิชาการให้ถูกต้องและเชื่อมโยงกับแนวทางเกษตรยั่งยืน

5.5.3 พัฒนาระบบสารสนเทศ Web Base Application งานชีวภัณฑ์และฟีโรโมน

สร้างระบบใหม่เพื่อใช้จัดเก็บ สืบค้น และบริหารจัดการข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับชีวภัณฑ์ ฟีโรโมน โรคพืช แมลงศัตรูพืช และข้อมูลด้านการวิจัยและการผลิต เริ่มจากการวิเคราะห์กระบวนการทำงานเดิมของหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่อระบุปัญหาการกระจายตัวของข้อมูล ความซ้ำซ้อน และข้อจำกัดในการเข้าถึง ก่อนออกแบบระบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ เพื่อรวมศูนย์ข้อมูลให้สามารถบริหารจัดการได้ครบ

ระบบพัฒนาด้วย PHP (Hypertext Preprocessor) บน CodeIgniter Framework ภายใต้สถาปัตยกรรม MVC (Model–View–Controller) ซึ่งช่วยให้การพัฒนามีโครงสร้างชัดเจนและง่ายต่อการบำรุงรักษา ใช้ฐานข้อมูล MySQL (Structured Query Language–based Relational Database Management System) สำหรับจัดเก็บและเชื่อมโยงข้อมูลหลัก โดยออกแบบ Entity-Relationship Diagram (ERD) และจัดทำ Data Dictionary เพื่อรองรับการบริหารจัดการและการปรับปรุง ระบบมีคุณลักษณะเด่น ได้แก่ การรองรับการใช้งานผ่านอุปกรณ์หลากหลาย การเข้าสู่ระบบด้วยบัญชีผู้ใช้ขององค์กร การกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงตามบทบาท ระบบบันทึกประวัติการเปลี่ยนแปลงข้อมูล การแจ้งเตือนสถานะการประมวลผลแบบเรียลไทม์ การจัดการข้อมูลส่วนบุคคลให้เป็นไปตาม Personal Data Protection Act (PDPA) และการเข้ารหัสข้อมูลด้วย Secure Sockets Layer / Transport Layer Security (SSL/TLS) เพื่อความปลอดภัยของข้อมูล ผลทดสอบการใช้งานพบว่า ระบบมีความเสถียรและตอบสนองรวดเร็ว รองรับผู้ใช้งานพร้อมกันได้โดยไม่พบปัญหาการประมวลผล ผู้ใช้งานส่วนใหญ่เห็นว่าระบบมีโครงสร้างเข้าใจง่าย การสืบค้นข้อมูลมีประสิทธิภาพสูง สามารถลดเวลาการจัดเก็บและค้นหาข้อมูลลงได้ นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังเสนอแนวทางพัฒนาเพิ่ม เช่น เพิ่มคำอธิบายประกอบภาพ จัดหมวดหมู่ข้อมูลให้ชัดเจนขึ้น เชื่อมโยงข้อมูลระหว่างตารางอัตโนมัติ และพัฒนาโมดูลรายงานสรุปผลแบบอัตโนมัติ ทั้งนี้ Web Base Application ที่พัฒนาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบริหารจัดการข้อมูลชีวภัณฑ์และฟีโรโมนอย่างเป็นระบบ โปร่งใส และตรวจสอบได้ สนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบาย การติดตามผลการดำเนินงาน และการเผยแพร่ข้อมูล

5.5.4 ติดตามสถานะการขึ้นทะเบียนวัตถุอันตราย ชนิดที่ 2 ได้แก่ ชีวภัณฑ์และฟีโรโมนจากผลงานวิจัย ซึ่งผลิตโดยโรงชีวภัณฑ์ มูลนิธิโครงการหลวง (โรงงานต้นแบบ)

คัดเลือกต้นแบบฟีโรโมน (1) ฟีโรโมนดึงดูดเพลี้ยไฟ *Microcephalothrips abdominalis* ศัตรูพืชตระกูลเบญจมาศ และ (2) ฟีโรโมนดึงดูดผีเสื้อหนอนใยผัก *Plutella xylostella* ศัตรูพืชตระกูลคะน้า กะหล่ำ ผักกาด จากนั้นติดตามความก้าวหน้าการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

(1) จัดเตรียมเอกสารทางวิชาการและแบบคำขอขึ้นทะเบียนวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 โดยศึกษาเอกสารต้นแบบ 6 ประเภท อาทิ แบบฟอร์มคำขอ รายงานการวิจัย แผนการทดลองภาคสนาม รายการข้อมูลผลิตภัณฑ์ และร่างฉลาก เพื่อจัดทำชุดเอกสารให้เป็นไปตามข้อกำหนดของกรมวิชาการเกษตร

(2) ตรวจวิเคราะห์สารออกฤทธิ์ฟีโรโมน โดยส่งตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry ที่บริษัทห้องปฏิบัติการกลาง จำกัด (1) ฟีโรโมนเพลี้ยไฟ ประกอบด้วย สารกลุ่มฟีนอลิก เซสควิเทอร์พีน และโมโนเทอร์พีน ส่วนฟีโรโมนหนอนใยผัก ประกอบด้วย สารกลุ่มเอสเทอร์ และโมโนเทอร์พีน โดยทั้งหมดเป็นสารระเหยที่ทำงานร่วมกันในลักษณะเสริมฤทธิ์ ส่งผลให้มีความเสถียรและประสิทธิภาพการดึงดูดแมลงเป้าหมายสูงขึ้น

ผลการดำเนินงานมีความก้าวหน้าโดยรวม ร้อยละ 45 ขณะนี้อยู่ระหว่างการสรุปผลการวิเคราะห์ทางเคมีและเตรียมทำเอกสารประกอบการยื่นขอขึ้นทะเบียน แต่พบปัญหาหลักคือ เอกสารมีหลายส่วนและเป็น

ข้อมูลเฉพาะ แผนดำเนินงานระยะต่อไป (กรณีที่ประชุมคณะทำงานที่เกี่ยวข้องมีมติเห็นชอบให้ขึ้นทะเบียนผลิตภัณฑ์) คือเร่งรัดจัดทำเอกสารให้ครบถ้วน จัดทำรายงานผลวิเคราะห์เพิ่มเติม และเตรียมการทดสอบภาคสนาม

สถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) Highland Research and Development Institute (Public Organization)