

การพัฒนาวัตกรรมการนำหมักชีวภาพนมสด
สำหรับการปลูกผักกาดหอมที่ใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์

จาริวัฒน์ ศิริอินทร์

คู่มือฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาการบริหารเทคโนโลยีและนวัตกรรม

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

DEVELOPMENT OF FERMENTED MILK BIO-EXTRACT
FOR GROWING LETTUCES UNDER HYDROPONIC SYSTEM

JARIWAT SIRIIN

A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements
for Doctor of Philosophy in Technology and Innovation Management

Academic Year 2025

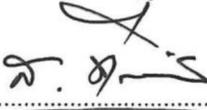
Copyright of Bansomdejchaopraya Rajabhat University

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การพัฒนานวัตกรรมการนำหมักชีวภาพนมสดสำหรับการปลูกผักกาดหอมที่ใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์

ชื่อนักศึกษา นางสาวจาริวัฒน์ ศิริอินทร์

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

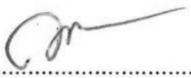

.....ประธานกรรมการที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุกูล สารวงค์)


.....กรรมการที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ทิมทรัพย์)


.....กรรมการที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ หรั่งเจริญ)

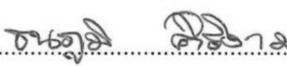
มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยาอนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาการบริหารเทคโนโลยีและนวัตกรรม


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุกูล สารวงค์)


.....อธิการบดี
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณกร สว่างเจริญ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ภัทรธรรม)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธนภูมิ ศิริงาม)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.โองการ วนิชาชีวะ)

ชื่อเรื่อง	การพัฒนานวัตกรรมน้ำหมักชีวภาพนมสดสำหรับการปลูกผักกาดหอมที่ใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์
ชื่อผู้วิจัย	นางสาวจารีวัฒน์ ศิริอินทร์
สาขาวิชา	การบริหารเทคโนโลยีและนวัตกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผศ.ดร.นฤกุล สารวงค์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.สมบัติ ทิมทรัพย์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.จักรพงษ์ หรั่งเจริญ
ปีการศึกษา	2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่พบในเขตรากผักกาดหอมสำหรับใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารทางเลือกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT โดยมุ่งประเมินศักยภาพของจุลินทรีย์ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช การลดการสะสมไนเตรท และผลสัมฤทธิ์ของสูตรน้ำหมักในสภาพการปลูกจริง กระบวนการวิจัยเริ่มจากการคัดแยกจุลินทรีย์ในเขตรากจากสามตำแหน่ง ได้แก่ ผีวราก ภายในราก และสารละลายธาตุอาหาร รวมทั้งสิ้น 269 ไอโซเลต และจำแนกเป็น 60 ลักษณะโคโลนี ผลการคัดแยกสะท้อนให้เห็นว่าระบบรากของพืชในระบบ NFT เป็นแหล่งจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลายสูงและมีศักยภาพสำหรับการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีบทบาทต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

การทดสอบคุณสมบัติของจุลินทรีย์พบว่า ไอโซเลตจำนวนมากมีความสามารถสร้างเอนไซม์โปรตีเอสและลิพอลิซ ผลิตฮอร์โมนอินโดล-3-อะซีติก ผลิตแอมโมเนีย และละลายฟอสเฟต ซึ่งเป็นกลไกสำคัญของจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช จึงนำมาสู่การคัดเลือกสายพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับผลิตน้ำหมักชีวภาพนมสด และทดสอบในระบบ NFT ภายใต้สูตรสารละลาย 7 แบบ ได้แก่ สูตรควบคุม น้ำหมักชีวภาพเดี่ยว สารละลายอินทรีย์การค้า สูตรเกษตรกร และสูตรผสมระหว่างน้ำหมักชีวภาพกับสารละลายอื่น ๆ ผลการทดลองด้านการเจริญเติบโตพบว่า สูตรผสมน้ำหมักชีวภาพนมสดกับสารละลายอินทรีย์การค้า (T5) ให้ผลดีที่สุดอย่างสม่ำเสมอในทุกตัวชี้วัด ทั้งความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความสูง น้ำหนักสด และระดับคลอโรฟิลล์ แสดงถึงความสมดุลของธาตุอาหารและผลเสริมฤทธิ์ของสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในน้ำหมักชีวภาพ ในขณะที่สูตรสารละลายอินทรีย์การค้า (T3) ให้ผลดีเป็นลำดับถัดมา แม้ไม่สูงเท่าสูตรผสม ด้านความ

ปลอดภัยของผลผลิตพบความแตกต่างเด่นชัดระหว่างสูตร โดยสูตรน้ำหมักชีวภาพเดี่ยว (T2) สามารถลดปริมาณไนเตรทในผักได้อย่างมาก ขณะที่สูตรเกษตรกร (T4) และสูตรผสมที่มีส่วนประกอบของสูตรเกษตรกร (T6 และ T7) ให้ระดับไนเตรทสูงที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นข้อจำกัดของการใช้ปุ๋ยสูตรทั่วไปในระบบ NFT ที่อาจก่อให้เกิดการสะสมไนเตรทในระดับที่ไม่เหมาะสม สรุปได้ว่าน้ำหมักชีวภาพนมสดที่พัฒนาจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นในงานวิจัยนี้เป็นแหล่งธาตุอาหารที่มีประสิทธิภาพ สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโต เพิ่มคุณภาพทางสรีรวิทยา และลดการสะสมไนเตรทในผักกาดหอมได้ โดยสูตรที่มีศักยภาพสูงสุดคือการผสมระหว่างน้ำหมักชีวภาพนมสดและสารละลายอินทรีย์การค้า (T5) ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในระบบ NFT ทั้งในระดับเกษตรกรและการผลิตเชิงพาณิชย์ ขณะที่สูตรน้ำหมักชีวภาพเดี่ยวเป็นตัวเลือกสำคัญสำหรับกรณีที่ต้องการควบคุมปริมาณไนเตรทในผลผลิต งานวิจัยนี้จึงยืนยันบทบาทของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการเพิ่มคุณค่าของทรัพยากรพื้นฐานอย่างน้ำนมดิบให้เป็นธาตุอาหารชีวภาพที่ช่วยลดต้นทุน เพิ่มผลผลิต และสนับสนุนระบบเกษตรยั่งยืนในอนาคต

คำสำคัญ : จุลินทรีย์ท้องถิ่น น้ำหมักชีวภาพนมสด ระบบไฮโดรพอนิกส์ NFT ผักกาดหอม
การลดการสะสมไนเตรท

Title	DEVELOPMENT OF FERMENTED MILK BIO-EXTRACT FOR GROWING LETTUCES UNDER HYDROPONIC SYSTEM
Author	JARIWAT SIRIIN
Program	Technology and Innovation Management
Major Advisor	Asst. Prof. Dr. Nukul Sarawong
Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Sombat Teekasap
Co-Advisor	Asst. Prof. Dr. Chakrapong Rangjaroen
Academic Year	2025

ABSTRACT

This study aimed to develop a fresh-milk biofermented nutrient solution using locally isolated microorganisms from the root zones of hydroponically grown lettuce and to evaluate its suitability as an alternative nutrient source in NFT systems. The research focused on assessing the microorganisms' capacity to promote plant growth, enhance physiological traits, and reduce nitrate accumulation in lettuce. A total of 269 bacterial isolates were obtained from the rhizoplane, endosphere, and nutrient solution, and classified into 60 colony types. This diversity reflects the richness of the microbial community in the NFT root environment and indicates its potential as a source of plant growth-promoting strains.

Biological screening revealed that many isolates possessed desirable functional traits, including protease and lipase production, indole-3-acetic acid synthesis, ammonia formation, and phosphate solubilization. These findings supported their selection for producing a biofermented milk solution. The resulting fermentation product was incorporated into seven nutrient formulations: a control solution, pure biofermented milk, a commercial organic nutrient solution, a farmer-made formulation, and combinations of biofermented milk with each nutrient source. These formulations were evaluated in an NFT system using lettuce as the test crop. The mixed formulation containing biofermented milk and a commercial organic nutrient solution (T5) produced the most

favorable results across all growth indicators, including canopy width, leaf number, plant height, fresh weight, and chlorophyll content. This outcome suggests that the integration of bioactive metabolites from microbial fermentation with a balanced organic nutrient profile provides an optimal environment for plant growth. The commercial organic solution (T3) also yielded consistently high performance, though not surpassing the mixed formulation. Nitrate accumulation exhibited clear variation among treatments. Pure biofermented milk (T2) effectively reduced nitrate levels in lettuce, whereas the farmer-made formulation (T4) and its derived mixtures (T6 and T7) resulted in the highest nitrate contents. These results emphasize the potential limitations of conventional nutrient formulas in NFT systems, where excessive nitrogen in nitrate form can readily accumulate in leafy vegetables. Overall, the findings demonstrate that the fresh-milk biofermented solution produced from local microbial isolates serves as an effective alternative nutrient source for hydroponic lettuce. It enhances growth, improves physiological quality, and reduces nitrate accumulation. Among all formulations tested, the combination of biofermented milk and a commercial organic nutrient solution (T5) exhibited the strongest overall performance and is therefore recommended for practical application in commercial and small-scale NFT systems. Pure biofermented milk (T2) represents a valuable option when minimizing nitrate content is a priority. This study highlights the importance of local microorganisms in converting low-cost raw materials such as fresh milk into high-value bio-nutrient products, supporting reduced production costs, improved crop quality, and the advancement of sustainable hydroponic agriculture.

Keyword (s): Local microorganisms, Fresh-milk biofermented solution, NFT hydroponic system, Lettuce, Nitrate reduction

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ หรั่งเจริญ ซึ่งได้กรุณาให้คำแนะนำ อธิบายแนวทางการดำเนินงาน และช่วยแก้ไขปัญหามาในทุกระดับขั้นตอนของการทำวิจัยด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างสูง จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุกูล สารวงค์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ ฑีฆทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม ซึ่งเมตตาให้ข้อเสนอแนะ คำชี้แนะ และแนวทางที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนางานวิจัยให้มีความครบถ้วนและมีคุณภาพมากยิ่งขึ้น

ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้งต่อ ครอบครัว ได้แก่ บิดา มารดา พี่น้อง สามี และลูก ๆ ที่ได้มอบกำลังใจ คำแนะนำ และการสนับสนุนด้านต่าง ๆ อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา การศึกษาและการทำวิจัย ขอบพระคุณทุกท่านที่เป็นแรงผลักดันสำคัญให้ข้าพเจ้าสามารถปฏิบัติงาน จนบรรลุผลสำเร็จในครั้งนี้

จารีวัฒน์ ศิริอินทร์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
คำถามวิจัย.....	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
สมมติฐานของการวิจัย.....	4
ขอบเขตของการวิจัย.....	4
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	5
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	7
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
ผักกาดหอม (lettuce).....	8
ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์.....	12
ระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless Culture Systems).....	15
น้ำหมักชีวภาพ (Bio-extract / Fermented Bio-liquid Fertilizer).....	17
จุลินทรีย์ที่พบในน้ำหมักชีวภาพ (Microorganisms Present in Bio-extracts)..	21
การใช้ประโยชน์ของน้ำหมักชีวภาพในระบบเกษตร	24
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	31

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	40
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	72
สรุปผลการวิจัย.....	72
อภิปรายผล.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	80
บรรณานุกรม.....	81
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้วิจัย	93

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของน้ำหมักชีวภาพต่อผักกาดหอม.....	30
4.1	จำนวนไอโซเลตแบคทีเรียที่แยกได้จากตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบรากผักกาดหอม 3 สายพันธุ์ที่ปลูกในระบบ NFT	41
4.2	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของปริมาณ NH_4^+ และ IAA ที่ผลิตโดยแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์.....	44
4.3	ผลการจำแนกระดับอนุกรมวิธานของแบคทีเรียด้วยการวิเคราะห์ BLASTn จากลำดับยีน 16S rRNA.....	52
4.4	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้างทรงพุ่มของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT	55
4.5	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนใบของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ในช่วงสัปดาห์หลังย้ายปลูก.....	57
4.6	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงต้นของผักสลัดกรีนโอ๊คในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT วัดในช่วงสัปดาห์หลังย้ายปลูก.....	59
4.7	ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรากของผักสลัดกรีนโอ๊คในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT วัดในช่วงสัปดาห์หลังย้ายปลูก.....	61
4.8	ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ณ วันเก็บเกี่ยว.....	62
4.9	ปริมาณไนเตรตตกค้าง (NO_3^-) ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ณ วันเก็บเกี่ยว.....	64
4.10	ค่าเฉลี่ยของ Chlorophyll a, Chlorophyll b และ Total Chlorophyll (mg/g Fresh Weight) ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ณ วันเก็บเกี่ยว.....	65
4.11	แสดงเมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) และค่า p-value ระหว่างตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์.....	68

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การจำแนกผักกาดหอมที่ครอบคลุมกว่า โดยแบ่งตามลักษณะทางสัณฐาน และการใช้ประโยชน์	11
2.2	ระบบปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture Systems).....	17
4.1	แผนภูมิแท่งแสดงค่า IAA เฉลี่ย ± SD ของไอโซเลตทั้ง 60 ชนิด.....	46
4.2	Dendrogram ของการจัดกลุ่มไอโซเลตด้วยวิธี hierarchical clustering จากค่า IAA เฉลี่ย.....	46
4.3	แผนภูมิแท่งแสดงค่า NH ₄ ⁺ เฉลี่ย ± SD ของไอโซเลตทั้ง 60 ชนิด.....	48
4.4	การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของปริมาณแอมโมเนียจากการ ทดสอบ Dunn post-hoc	49
4.5	ความสามารถละลายฟอสเฟตในอาหาร Pikovskaya's agar.....	50
4.6	แผนภูมิสายวิวัฒนาการของยีน 16S rRNA ของจุลินทรีย์ไอโซเลต TKM17, TKM18, TKM25, TKM51 และ TKM60 ที่ได้จากการศึกษา โดยสร้างต้นไม้ ด้วยวิธี Neighbor-Joining และทำการประเมินค่าความเชื่อมั่นของกิ่งด้วยวิธี Bootstrap จำนวน 1,000 ครั้ง	53
4.7	ความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัด กรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT	69
4.8	PCA Biplot ของตัวแปรการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีนโอ๊ค ในระบบไฮโดรพอนิกส์	71

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การปลูกพืชในระบบไฮโดรพอนิกส์ (hydroponics) เป็นแนวทางการเกษตรสมัยใหม่ที่มีรากฐานมาจากงานทดลองด้าน “water-culture” ของ Hoagland และ Arnon ซึ่งให้แนวทางการจัดเตรียมสารละลายธาตุอาหารมาตรฐาน เพื่อให้พืชได้รับธาตุที่จำเป็นโดยตรงผ่านราก โดยไม่ต้องพึ่งพาดินเป็นตัวกลาง การออกแบบสารละลายที่มีส่วนประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ทั้งธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรอง เช่น N, P, K, Ca, Mg, S รวมไปถึงจุลธาตุ เช่น Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo ในอัตราส่วนที่ปรับได้ตามชนิดและระยะการเจริญของพืช ซึ่งการควบคุมค่าพีเอช (pH) และค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายเป็นหัวใจสำคัญที่ส่งผลต่อการละลายและการดูดซึมของไอออนเหล่านี้ (Hoagland & Arnon, 1950; FAO, 2024). ระบบไฮโดรพอนิกส์มีหลายรูปแบบเช่น NFT, DWC และระบบหยด ซึ่งแต่ละแบบสร้างสมดุลระหว่างการให้น้ำและธาตุอาหารที่สำคัญต่อพืช ต่างมีจุดเด่นด้านการใช้ทรัพยากรและความซับซ้อนทางเทคนิคที่ต่างกัน (Nitu, Ivan, Tronac, & Arshad, 2024) เทคโนโลยีนี้มีความสามารถในการประหยัดน้ำและพื้นที่เพาะปลูกอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการเพาะปลูกบนดิน พร้อมทั้งให้ผลผลิตที่คงที่และคุณภาพเชิงอาหารที่ดีขึ้นภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อม (FAO, 2024; Nitu, Ivan, Tronac, & Arshad, 2024) ในอีกด้านหนึ่ง สารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในโตรเจนในรูปแบบไนเตรตเป็นองค์ประกอบสำคัญสามารถนำไปสู่การสะสมไนเตรตในเนื้อเยื่อพืชได้ โดยปัจจัยที่เพิ่มความเสี่ยงได้แก่ ความเข้มข้นไนโตรเจนในสารละลาย ระดับแสงสว่าง อุณหภูมิราก และรูปแบบไนโตรเจน (NO_3^- เทียบกับ NH_4^+) ดังนั้นการปรับสูตรสารละลาย เช่น ลดความเข้มข้นไนเตรต หรือทดแทนบางส่วนด้วยไอออนอื่น ๆ และปรับเงื่อนไขการจัดการสามารถลดการสะสมไนเตรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Martínez-Moreno et al., 2024; Dodocioiu et al., 2025) อีกทั้งความปลอดภัยต่อผู้บริโภคจึงต้องอิงมาตรฐานที่เกี่ยวข้องเช่นสหภาพยุโรปมีการกำหนดขีดจำกัดสูงสุดสำหรับไนเตรตในผักใบ เพื่อสุขภาพผู้บริโภค ดังนั้น ในงานวิจัยหรือการจัดการเชิงพาณิชย์ จึงจำเป็นต้องบูรณาการการออกแบบสารละลาย (สูตรและความเข้มข้น), การวัด/ควบคุม pH-EC, เงื่อนไขแสงและอุณหภูมิ, และการสุ่มตรวจทางห้องปฏิบัติการ (เช่นการตรวจปริมาณไนเตรตในตัวอย่างผลผลิต) เพื่อคุณภาพการผลิต

และความปลอดภัยของผู้บริโภค (FAO, 2024; Martínez-Moreno et al., 2024; WHO, 2011; EU Regulation)

ในปัจจุบัน น้ำหมักชีวภาพ (bio-extract หรือ fermented organic liquid fertilizer) ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายจากเกษตรกรและนักวิจัยในด้านการเกษตรอินทรีย์ เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติ เช่น เศษพืช ผัก ผลไม้ หรือเศษสัตว์ ผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ เช่น กลุ่ม *Lactobacillus* และ *Bacillus spp.* ซึ่งสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และธาตุอาหารในรูปแบบที่พืชดูดซึมได้ (FAO, 2023; Yadav et al., 2022) น้ำหมักชีวภาพจึงถูกนำมาใช้ทดแทนหรือเสริมในระบบปลูกพืชไร้ดิน โดยเฉพาะในระบบไฮโดรพอนิกส์ เพื่อช่วยลดการใช้สารละลายสังเคราะห์ทางเคมีที่มีต้นทุนสูง และอาจก่อให้เกิดการตกค้างของสารเคมีในผลผลิต (Chong et al., 2021; Zhang et al., 2023) ซึ่งในระบบไฮโดรพอนิกส์ น้ำหมักชีวภาพสามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งธาตุอาหารหลัก เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ตลอดจนมีสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช (plant growth-promoting substances) เช่น อินโดลอะซีติกแอซิด (IAA) และไซโตไคนินจากกระบวนการหมัก ซึ่งช่วยกระตุ้นการสร้างคลอโรฟิลล์และเพิ่มปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในพืชใบ (Zhou et al., 2022) การศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษพลาสติก สูตรผักตบชวา และสูตรผสม (น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาและผักตบชวา) ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค (*Lactuca sativa L.*) ที่ปลูกในระบบ nutrient film technique (NFT) พบว่า น้ำหมักชีวภาพจากเศษพลาสติกในอัตรา 1:500 มีผลส่งเสริมการเจริญเติบโตสูงสุด และเพิ่มปริมาณเบต้าแคโรทีนและแอนโทไซยานินในใบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของน้ำหมักชีวภาพในการใช้เป็นสารละลายธาตุอาหารทางเลือกที่ยั่งยืนในระบบไฮโดรพอนิกส์ (ราตรี, 2559) การประยุกต์ใช้น้ำหมักชีวภาพจึงเป็นแนวทางที่ตอบโจทย์ต่อการผลิตพืชในอนาคต โดยเฉพาะในระบบเกษตรอินทรีย์และระบบควบคุมสิ่งแวดล้อม (controlled-environment agriculture; CEA) ที่ต้องการลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมีและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ขณะเดียวกันยังคงรักษาผลผลิตที่มีคุณภาพและปลอดภัยต่อผู้บริโภค (FAO, 2023; Yadav et al., 2022; Zhang et al., 2023)

ผักกาดหอม (*Lactuca sativa L.*) เป็นพืชผักเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยและทั่วโลก เนื่องจากเป็นผักกินใบที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะวิตามินเอ วิตามินซี แคลเซียม เหล็ก โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต อีกทั้งยังเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น โฟลิกแอซิด (folic acid) ลูทีน (lutein) และเบต้าแคโรทีน (beta-carotene) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมสุขภาพและลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรัง (Kim et al., 2021) ผักกาดหอมเป็นพืชที่มีการบริโภคต่อเนื่องตลอดทั้งปี จึงมีความต้องการในตลาดสูงและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง การ

ปลูกผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์จึงได้รับความนิยมมากขึ้น เนื่องจากสามารถควบคุมคุณภาพและความสะอาดของผลผลิตได้ดี รวมถึงเป็นแนวทางในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Trefitz & Omaye, 2015) ในปัจจุบัน การพัฒนาเกษตรอินทรีย์และการลดการใช้สารเคมีในระบบไฮโดรพอนิกส์มีการนำจุลินทรีย์กลุ่มส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Promoting Rhizobacteria; PGPR) มาใช้เพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตของพืชและยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคในระบบราก เช่น *Pythium aphanidermatum* และ *P. myriotylum* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรครากเน่าในระบบไฮโดรพอนิกส์ (Compant et al., 2005; Koochakan & Rangjaroen, 2009) งานศึกษาของ Koochakan & Rangjaroen (2009) พบว่า การคัดเลือกแบคทีเรียจากเขตรากพืชที่ปลูกในระบบปลูกไฮโดรพอนิกส์สามารถลดการระบาดของเชื้อ *Pythium spp.* ได้อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การศึกษากลไกการยับยั้งเชื้อราโดยจุลินทรีย์ PGPR จึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาเทคโนโลยีการปลูกพืชในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบยั่งยืนในอนาคต

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนานวัตกรรมน้ำหมักชีวภาพจากนมสดสำหรับการปลูกผักกาดหอม (*Lactuca sativa*L.) ในระบบไฮโดรพอนิกส์ โดยมุ่งเน้นการคัดเลือกและคัดเลือกเชื้อแบคทีเรียสายพันธุ์ที่มีศักยภาพจากเขตรากพืชที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ ซึ่งสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช และเพิ่มความต้านทานต่อโรครากเน่า เช่น ที่เกิดจาก *Pythium spp.* งานวิจัยนี้ตั้งเป้าหมายเพื่อลดการใช้สารเคมีสังเคราะห์ ลดปริมาณไนเตรทที่สะสมในผักกาดหอม พร้อมทั้งพัฒนารูปแบบการประยุกต์ใช้น้ำหมักชีวภาพในระบบปลูกพืชไร้ดินอย่างยั่งยืน โดยน้ำหมักชีวภาพคาดว่าจะทำหน้าที่ทั้งเป็นแหล่งธาตุอาหารและสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช (plant growth-promoting substances) เช่น กรดอะมิโน ฮอร์โมนพืช และจุลินทรีย์ที่ช่วยยับยั้งเชื้อก่อโรค ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการเกษตรอินทรีย์และเกษตรยั่งยืน

คำถามการวิจัย

1. จุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นใดที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของพืชในการปลูกผักกาดหอมพันธุ์ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT
2. สภาวะใดที่เหมาะสมในการพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นเพื่อใช้ในระบบปลูกไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อคัดแยกจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นบริเวณเขตรากผักกาดหอม (Rhizosphere bacteria) ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT
2. เพื่อทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT
3. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดจากจุลินทรีย์ท้องถิ่น
4. เพื่อพัฒนานวัตกรรมการหมักชีวภาพนมสดพร้อมใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT

สมมุติฐานของการวิจัย

1. จุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นบริเวณเขตรากผักกาดหอมในการเจริญเติบโต ที่ส่งเสริมการเจริญและคุณภาพของผักกาดหอม ในการปลูกด้วยระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT โดยประเมินจากอัตราการเจริญเติบโต และปริมาณสารอาหารในสุตรน้ำหมักชีวภาพที่หมักด้วยจุลินทรีย์ท้องถิ่น
2. สภาวะที่เหมาะสมในการพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่เหมาะสมในการปลูกผักกาดหอมด้วยระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT
3. การใช้นวัตกรรมการหมักชีวภาพน้ำหมักชีวภาพนมสดพร้อมใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT

ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้กำหนดขอบเขตการวิจัยเรื่อง การพัฒนาน้ำหมักชีวภาพสำหรับการปลูกผักกาดหอมที่ใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ดังนี้

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาทดลอง
 - 1.1 ประชากร ได้แก่ ผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT (Nutrient Film Technique) โดยใช้ธาตุอาหารพืชจากการพัฒนานวัตกรรมการหมักชีวภาพนมสด
 - 1.2 กลุ่มตัวอย่าง ได้แก่ ผักกาดหอมที่เจริญในน้ำหมักชีวภาพจากนมสดโดยใช้โดยใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่น
 - 1.3 ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) คือตัวแปรที่มีผลต่อการหมักน้ำหมักจากนมสดที่ได้จากจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่น
 - 1.4 ตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือ อัตราการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในสารละลายมาตรฐานเปรียบเทียบกับน้ำหมักชีวภาพจากนมสด ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. ได้เชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นบริเวณเขตรากผักกาดหอม (Rhizosphere bacteria) ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT
2. ได้จุลินทรีย์ท้องถิ่นที่มีความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ แบบ NFT
3. ได้ส่วนผสมน้ำหมักชีวภาพนมสดพร้อมใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT
4. ผลงานวิจัยเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการพัฒนากะถางที่ยั่งยืนรวมทั้งเป็นประโยชน์ในการส่งเสริมทางการเกษตรแก่เกษตรกรต่อไป

นิยามศัพท์

1. น้ำหมักชีวภาพนมสด (Milk-based Bio-extract) หมายถึง สารละลายธาตุอาหารที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำนมดิบโดยใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นที่คัดเลือก ซึ่งมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ย่อยโปรตีน (protease) ย่อยไขมัน (lipase) ผลิตฮอร์โมนพืช เช่น IAA รวมถึงละลายธาตุฟอสเฟต กระบวนการหมักทำให้โปรตีน แลคโตส และแร่ธาตุในนมเปลี่ยนเป็นรูปที่พืชดูดใช้ได้ง่าย และสามารถใช้เป็นสารละลายธาตุอาหารหรือใช้ร่วมกับสูตรสารละลายอื่นในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT
2. ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) ผักกินใบเศรษฐกิจที่นิยมปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์เนื่องจากให้คุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น โฟเลต ลูทีน เบต้าแคโรทีน คลอโรฟิลล์ และมีราคาในตลาดสม่ำเสมอ งานวิจัยนี้เลือกใช้ผักกาดหอมกรีนโอ๊คเป็นชนิดทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพนมสดต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพผลผลิต
3. ระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT (Nutrient Film Technique) ระบบปลูกพืชไร้ดินที่ปล่อยสารละลายธาตุอาหารให้ไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางผ่านรากพืชอย่างต่อเนื่อง ทำให้รากได้รับทั้งออกซิเจนและสารอาหารพร้อมกัน ควบคุมค่า pH-EC ได้ง่าย เหมาะสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของสารละลายธาตุอาหารรูปแบบต่าง ๆ รวมถึงน้ำหมักชีวภาพนมสด
4. จุลินทรีย์บริเวณเขตรากพืช (Rhizosphere Bacteria) หมายถึงแบคทีเรียที่อาศัยอยู่บริเวณดินหรือสารละลายรอบราก (ectorhizosphere), ผิวราก (rhizoplane), ระหว่างเซลล์ราก (root-colonizing) และภายในเนื้อเยื่อราก (endophytic). จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญในการตรึงไนโตรเจน ละลายแร่ธาตุ ผลิตฮอร์โมนพืช และยับยั้งเชื้อก่อโรค จึงถูกคัดเลือกเป็นหัวเชื้อสำหรับผลิตน้ำหมักชีวภาพนมสดในงานนี้

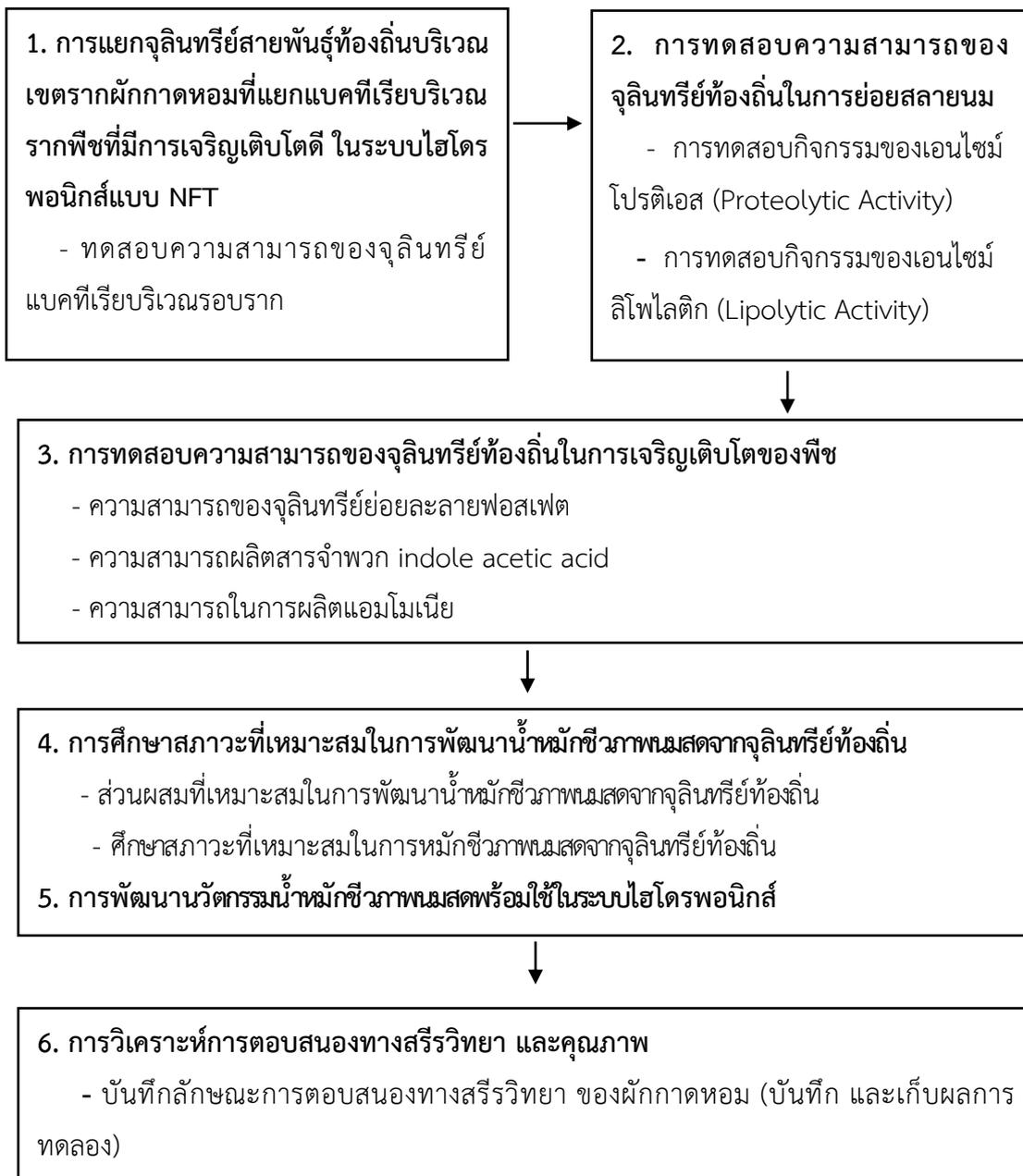
5. แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: PGPR) หมายถึงแบคทีเรียที่สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชผ่านกลไกต่าง ๆ เช่น การผลิตฮอร์โมนพืช (เช่น IAA), การผลิตเอนไซม์ย่อยสลายสารอินทรีย์, การผลิตแอมโมเนีย, การละลายฟอสเฟต, งานนี้ใช้ PGPR เป็นแหล่งหัวเชื้อในการพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสด

6. ความสามารถละลายฟอสเฟต (Phosphate Solubilization) หมายถึงความสามารถของจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ เช่น tricalcium phosphate ให้เป็นรูปที่พืชใช้ได้ง่าย โดยทดสอบบนอาหาร Pikovskaya's agar และสังเกตการเกิด halo zone งานนี้ใช้ค่าดังกล่าวในการคัดเลือกไอโซเลตสำหรับใช้ผลิตน้ำหมักชีวภาพนมสด

7. การผลิตน้ำหมักชีวภาพนมสดแบบผง (Milk Bio-extract Powder) หมายถึงผลิตภัณฑ์น้ำหมักชีวภาพที่ผ่านการทำให้เข้มข้นและทำให้แห้งด้วยวิธี Freeze Dryer เพื่อลดความชื้น เพิ่มความเสถียรในการเก็บรักษาและความสะดวกในการใช้ โดยยังคงคุณสมบัติฮอร์โมนพืช เอนไซม์ และจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ คัดค้านเพื่อใช้ในระบบ NFT ได้โดยไม่อุดตันระบบ

8. การสะสมไนเตรทในพืช (Nitrate Accumulation) หมายถึงปริมาณไนเตรท (NO_3^-) ในใบผักซึ่งได้รับผลจากสูตรธาตุอาหาร รูปไนโตรเจน ความเข้มแสง และจุลินทรีย์ในราก งานนี้วัดใน mg/kg FW และใช้เป็นตัวชี้วัดด้านความปลอดภัยอาหาร โดยพบว่าสูตรเกษตรกรให้ค่าไนเตรทสูงที่สุด ขณะที่น้ำหมักชีวภาพนมสดลดการสะสมไนเตรทได้ดีที่สุด

กรอบแนวคิดการวิจัย



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผักกาดหอม (lettuce)

ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) เป็นพืชผักในวงศ์ Asteraceae ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ และเป็นพืชรุ่มต้นที่นิยมปลูกในระบบเกษตรสมัยใหม่ โดยเฉพาะระบบปลูกพืชไร้ดิน เช่น ไฮโดรพอนิกส์ เนื่องจากสามารถปรับตัวได้ดีต่อสภาพแวดล้อมที่ควบคุมและให้ผลผลิตที่มีคุณภาพสม่ำเสมอ (Simko et al., 2020) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของผักกาดหอมประกอบด้วยระบบรากแบบรากแก้วที่สามารถพัฒนาได้ลึกและแตกแขนงจำนวนมาก ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหารสูง ลำต้นมีลักษณะสั้นและถูกห่อหุ้มด้วยใบที่เรียงซ้อนกันเป็นกระจุก ใบมีความหลากหลายทั้งในด้านรูปร่าง สี และความหนา ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่เกี่ยวข้องกับความต้องการแสงและศักยภาพในการสังเคราะห์ทางสรีรวิทยาของพืช (Ryder & Johnson, 2022)

ประเภทและพันธุ์ของผักกาดหอม

ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) เป็นพืชผักที่มีความหลากหลายทางพันธุกรรมสูง ทำให้สามารถจำแนกพันธุ์ได้หลายวิธี ทั้งตามรูปร่างใบ การห่อของหัว และลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยการจำแนกกลุ่มพันธุ์แบบดั้งเดิมแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผักกาดหอมห่อ, ผักกาดหอมใบ, และ ผักกาดหอมต้น ซึ่งเป็นการจัดกลุ่มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการปลูกเชิงการค้าในประเทศไทย (ศรานนท์, 2549)

ประเภทแรกคือ ผักกาดหอมห่อ (head lettuce) ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ ใบจะเรียงซ้อนทับกันจนเป็นหัว พันธุ์กลุ่มนี้แบ่งย่อยออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

- ชนิดห่อหัวแน่น (Crisphead type) ใบมีลักษณะกรอบ หนา และแน่น เช่น พันธุ์เกรทเลค (Great Lake), นิวยอร์ก (New York), อิมพีเรียล (Imperial) และโปรเกรสส์ (Progress)
- ชนิดห่อหัวไม่แน่น (Butterhead type) ใบมีลักษณะนุ่ม สีเขียวอ่อน เช่น พันธุ์บิกบอสตัน (Big Boston) และไวท์บอสตัน (White Boston)
- ชนิดห่อหัวหลวมค่อนข้างยาว (Cos type หรือ Romaine) มีทั้งพันธุ์หัวใหญ่ เช่น ปารีสไวท์ (Paris White), ไวท์เฮด (White Head) และพันธุ์หัวเล็ก เช่น ลิทเทิลเจม (Little Gem)

ประเภทที่สองคือ ผักกาดหอมใบ (leaf lettuce) ซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมปลูกมากที่สุดในประเทศไทยและในระบบไฮโดรพอนิกส์ เนื่องจากปลูกง่าย โตเร็ว และใบไม่ห่อเป็นหัว ใบเจริญออกด้านข้างและด้านบนจนมีลักษณะเป็นทรงพุ่มเตี้ย แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่

1. ชนิดใบสีเขียว เช่น พันธุ์ Grand Rapids, Simpson's Curled, Boston Curled และ Slobolt ซึ่งมีลักษณะใบหยิกและขยายตัวดี

2. ชนิดใบสีน้ำตาลหรือแดง เช่น พันธุ์ Prize Head ซึ่งมีแอนโทไซยานินสูง เหมาะสำหรับการปลูกในระบบที่ต้องการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนาการ เช่น ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ประเภทที่สามคือ ผักกาดหอมต้น (stem lettuce) หรือที่เรียกว่า *Asparagus lettuce* ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ ลำต้นอวบและยาว ใช้บริโภคลำต้นเป็นหลัก ใบมีลักษณะคล้ายผักกาดหอมใบแต่มีขนาดเล็กหนา และสีเข้มกว่า ไม่ห่อหัว พบว่าปลูกกันไม่มากในประเทศไทย พันธุ์ที่รู้จักคือ Celtuce (สรานนท์, 2549)

นอกจากการจำแนกแบบดั้งเดิมแล้ว งานของ Lebeda et al. (2007) ได้เสนอการจำแนกผักกาดหอมที่ครอบคลุมกว่า โดยแบ่งตามลักษณะทางสัณฐานและการใช้ประโยชน์ (ภาพที่ 2.1) ได้แก่

1. Butterhead Lettuce หรือผักกาดหอมบัตเตอร์เฮด เป็นหนึ่งในกลุ่มพันธุ์ปลูกผักกาดหอมที่ได้รับความนิยมทั่วโลกและจัดอยู่ในกลุ่มหลักตามการจำแนกของ Lebeda et al. (2007) โดยชื่อ "Butterhead" สื่อถึงลักษณะใบที่อ่อนนุ่ม มันเงา และมีรสชาติหวานละมุนคล้ายเนย ลักษณะเด่นคือเป็นผักกาดหอมชนิดห่อหัวแบบหลวม ใบเรียงซ้อนคล้ายดอกกุหลาบแต่ไม่แน่นเหมือน Crisphead (Iceberg) ใบมีความนุ่ม โกงมน สีตั้งแต่เขียวอ่อนไปจนถึงเขียวเข้ม และบางพันธุ์อาจมีสีแดงรสชาติเบา กรอบเล็กน้อย กลิ่นไม่ฉุน และเป็นที่นิยมในหมู่ผู้บริโภค รวมถึงเด็ก บางภูมิภาคเรียก Butterhead ว่า Boston lettuce หรือ Bibb lettuce ด้วย เนื่องจากความอ่อนนุ่มและรสชาติที่ดีจึงนิยมนำมาทำสลัด ใช้ห่ออาหาร เช่น wraps หรือเมี่ยงคำ และใช้เป็นผักเครื่องเคียงหรือใส่ในแซนด์วิชและเบอร์เกอร์ ทำให้ Butterhead แตกต่างจาก Crisphead ที่เน้นความกรอบ และ Cos ที่เน้นใบแข็งหนาและตั้งตรง นิยมปลูกในยุโรปตอนกลางและตะวันตก รวมถึงอังกฤษและเนเธอร์แลนด์ (ภาพที่ 2.1A)

2. Crisphead Lettuce หรือผักกาดแก้ว (Iceberg Lettuce) เป็นผักกาดหอมกลุ่มหนึ่งที่มีลักษณะเด่นชัดแตกต่างจากผักสลัดชนิดอื่น โดยชื่อ "Iceberg" มีที่มาจากการขนส่งในอดีตที่ใช้ก้อนน้ำแข็งรักษาความสดระหว่างการขนส่งจากแคลิฟอร์เนียไปยังชายฝั่งตะวันออกของสหรัฐอเมริกา ผักกาดหอมชนิดนี้มีการห่อหัวที่แน่นเป็นก้อนกลมคล้ายกะหล่ำปลี ใบมีสีเขียวอ่อนถึงเกือบขาวตอนในเพราะไม่รับแสงแดด เนื้อใบมีจุดเด่นคือความกรอบและฉ่ำน้ำ ให้รสชาติอ่อน จืด ไม่ขม จึง

เป็นที่นิยมในกลุ่มผู้ไม่ชอบรสขมของผักใบเขียว Crisphead มักถูกนำไปใช้ในเมนูที่ต้องการความกรอบกรอบ เช่น สลัด แซนด์วิช เบอร์เกอร์ หรือใช้เป็นผักแกล้มและห่อไส้ต่างๆ ทำให้เป็นผักสลัดที่ได้รับความนิยมทั้งในร้านอาหารและครัวเรือนทั่วโลก ปลูกมากในอเมริกาและขยายสู่ออสเตรเลีย จีน ญี่ปุ่น และยุโรปตะวันตก (ภาพที่ 2.1B)

3. Cos Lettuce หรือ Romaine เป็นผักกาดหอมแบบห่อหัวตั้งตรงและยาว โดยหัวมีลักษณะรีและอาจห่อหลวม ลักษณะใบยาวเรียวยาวตั้งตรง ใบหนา แข็งแรง และมีเส้นกลางใบเด่นชัด มักมีสีเขียวเข้มและให้รสชาติกรอบเล็กน้อย หวานปนขมเล็กน้อย โดยเฉพาะบริเวณซี่กลางใบ ผักกาดหอมชนิดนี้มีความทนทานต่อความร้อนมากกว่าผักสลัดชนิดอื่น และเป็นส่วนประกอบสำคัญของเมนูคลาสสิกอย่างซีซาร์สลัด รวมถึงนิยมบริโภคสดในสลัดหรือเมนูที่ต้องการความกรอบและความแข็งแรงของใบมีต้นกำเนิดจากเกาะ Kos ประเทศกรีซ (ภาพที่ 2.1C)

4. Leaf Lettuce หรือผักกาดหอมใบ (Curled/Looseleaf) เป็นผักกาดหอมชนิดไม่ห่อหัวหรือห่อหัวหลวมมาก โดยใบจะเจริญเติบโตเป็นกระจุกหรือทรงพุ่มแบบหลวม มีความหลากหลายของรูปทรงใบมากที่สุด เช่น ใบหยิก ใบคลื่น ใบย่น หรือใบเป็นแฉก สีตั้งแต่เขียวอ่อน เขียวเข้ม ไปจนถึงแดงและบรอนซ์ เนื้อสัมผัสแตกต่างกันตามสายพันธุ์ย่อย ทั้งแบบนุ่มและแบบกรอบ เช่น Red Oak หรือ Green Coral จึงนิยมใช้ในสลัดผสมเพื่อเพิ่มสีสันและผิวสัมผัสที่หลากหลาย และบางสายพันธุ์ยังมีรสชาติหวานอ่อน เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ชอบรสเบาและรับประทานสด (ภาพที่ 2.1D)

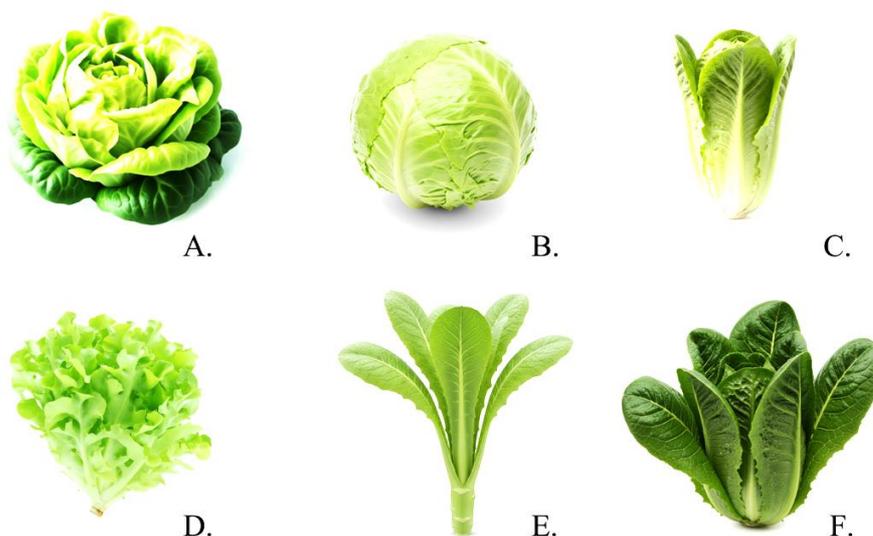
5. Stem Lettuce หรือ Celtuce (มักเรียกว่า Asparagus Lettuce) เป็นผักกาดหอมชนิดไม่ห่อหัวที่มีจุดเด่นอยู่ที่ลำต้นซึ่งตั้งตรง สูง และอวบใหญ่คล้ายหน่อไม้หรือก้านคะน้า ใบมีขนาดเล็กหนา และสีเข้มกว่าผักกาดหอมชนิดใบทั่วไป ส่วนที่บริโภคหลักคือลำต้น โดยปกผิวด้านนอกออกก่อนรับประทาน ขณะที่ใบแม้สามารถกินได้แต่ไม่นิยมเท่าลำต้น ลำต้นมีรสชาติอ่อนและเนื้อสัมผัสกรอบนุ่มไม่ละ ทำให้ได้รับความนิยมในอาหารจีน โดยเฉพาะในชื่อ “โอสุน” หรือ Wosun ซึ่งมักนำไปผัด ลวก ต้ม หรือทำยำ (ภาพที่ 2.1E)

6. Latin Lettuce (ผักกาดหอมละติน) เป็นกลุ่มพันธุ์ปลูกที่ Lebeda et al. (2007) จำแนกขึ้นเพื่อครอบคลุมความหลากหลายของผักกาดหอม โดยเฉพาะชนิดที่พบในแถบเมดิเตอร์เรเนียน มีลักษณะกึ่งกลางระหว่าง Butterhead และ Cos และทนทานต่อสภาพอากาศกึ่งแห้งแล้ง โดยมีหัวแบบห่อหลวมหรือกึ่งห่อหัว ใบมีความหนา เหนียวคล้ายหนัง ผิวมันหรือหยาบ สีเขียวเข้ม มีเส้นกลางใบเด่นชัด และมีรูปร่างหัวตั้งแต่รีสั้นถึงไปกลับ บางชนิดส่วนกลางหัวแน่น ลักษณะดังกล่าวทำให้บางครั้งถูกจัดรวมกับ Cos หรือ Butterhead ในระบบจำแนกแบบดั้งเดิม Latin Lettuce เป็นชนิดที่นิยมปลูกและบริโภคในภูมิภาคเมดิเตอร์เรเนียน โดยส่วนใหญ่ใช้รับประทานสดในสลัด

และมีความสำคัญต่อความหลากหลายทางพันธุกรรมของผักกาดหอม โดยเฉพาะในยุโรปใต้และแอฟริกาเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่ต้องการพันธุ์ที่ทนร้อนและทนแล้งมากกว่าสายพันธุ์อื่น ๆ

(ภาพที่ 2.1F)

7. Oilseed Lettuce เป็นผักกาดหอมชนิดไม่ห่อหุ้มที่ไม่ได้ปลูกเพื่อบริโภค เนื่องจากใบมีรสขมและไม่เหมาะสำหรับการกินสด แต่ปลูกเพื่อเก็บเกี่ยวเมล็ดซึ่งมีปริมาณน้ำมันสูงถึงประมาณ 35% และสามารถนำมาสกัดเป็นน้ำมันพืชที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เช่น น้ำมันที่มีวิตามินอี โดยเฉพาะในบางประเทศอย่างอียิปต์ที่มีการปลูกผักกาดหอมกลุ่มนี้เพื่อใช้ผลิตน้ำมันโดยตรง



ภาพที่ 2.1 การจำแนกผักกาดหอมที่ครอบคลุมกว่า โดยแบ่งตามลักษณะทางสัณฐานและการใช้ประโยชน์ โดยที่ A: Butterhead lettuce, B: Crisphead lettuce, C: Romaine lettuce, D: Leaf lettuce, E: Stalk lettuce และ F: Latin Lettuce

ที่มาภาพ: OpenAI (2025)

การจำแนกดังกล่าวช่วยให้เห็นความหลากหลายทางสัณฐานของผักกาดหอม ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการคัดเลือกพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัย โดยเฉพาะในระบบไฮโดรพอนิกส์ที่ต้องการพันธุ์ที่เจริญเร็ว อดซึมธาตุอาหารได้ดี และให้ผลผลิตสม่ำเสมอ เช่น กลุ่ม Leaf lettuce ซึ่งได้รับความนิยมสูงในประเทศไทยและเป็นพันธุ์ที่เหมาะสมกับการทดสอบผลของน้ำหมักชีวภาพในงานวิจัยครั้งนี้

ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์

การเจริญเติบโตและคุณภาพของผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์ขึ้นอยู่กับทั้งปัจจัยภายในของพืชเองและปัจจัยภายนอกในสภาพแวดล้อมการปลูก โดยเฉพาะเมื่อใช้ระบบสารละลายธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง เช่น ระบบ NFT (Nutrient Film Technique) ซึ่งรากสัมผัสสารละลายโดยตรงตลอดเวลา

1) ปัจจัยภายในพืช เป็นปัจจัยภายในที่สำคัญที่สุดคือ พันธุกรรมของผักกาดหอม ซึ่งถูกควบคุมโดยยีน (gene) ที่กำหนดลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยา เช่น อัตราการเจริญเติบโต รูปร่างทรงพุ่ม สีใบ ความหนาของใบ ความไวต่อแสงและอุณหภูมิ ตลอดจนศักยภาพในการสะสมไนเตรทและสารพฤกษเคมี (Simko et al., 2020; Sapkota et al., 2019) พันธุ์ผักกาดหอมกลุ่มใบ (leaf lettuce) เช่น กรีน โอ๊ค มักตอบสนองต่อระบบไฮโดรพอนิกส์ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว และตอบสนองต่อองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารอย่างชัดเจน ทั้งในด้านน้ำหนักสด ปริมาณใบ และคุณภาพทางโภชนาการ (Sapkota et al., 2019) อีกปัจจัยหนึ่งคือ สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth regulators) ซึ่งรวมถึงฮอร์โมนธรรมชาติ เช่น ออกซิน ไซโตไคนิน และจิบเบอเรลลิน ที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ การยืดตัวของใบ และการพัฒนาราก ฮอร์โมนเหล่านี้มีปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อม เช่น แสงและธาตุอาหาร ทำให้พันธุ์ต่าง ๆ แสดงพฤติกรรมของการเจริญเติบโตแตกต่างกันภายใต้สภาพสารละลายเดียวกัน (Rusu et al., 2021) กล่าวโดยสรุป ปัจจัยภายในจะเป็นตัวกำหนด “ศักยภาพสูงสุด” ของผักกาดหอม ขณะที่ปัจจัยแวดล้อมและการจัดการในระบบไฮโดรพอนิกส์จะเป็นตัวกำหนดว่าพืชจะแสดงศักยภาพนั้นได้มากน้อยเพียงใด

2) ปัจจัยภายนอกและสภาพแวดล้อมในระบบไฮโดรพอนิกส์

2.1 แสง เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งในระบบไฮโดรพอนิกส์ เนื่องจากผักกาดหอมต้องอาศัยแสงในการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรตและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและคุณภาพของใบ ความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์มักอยู่ในช่วง $200\text{--}300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ และระยะเวลาให้แสงประมาณ 12–16 ชั่วโมงต่อวัน ภายใต้ระดับคาร์บอนไดออกไซด์ปกติ (Both et al., อ้างใน Sapkota et al., 2019) งานวิจัยด้านการจัดการไนเตรทพบว่า ความเข้มแสงต่ำร่วมกับการให้ไนโตรเจนสูงทำให้เกิดการสะสมไนเตรทในใบผักกาดหอมเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ความเข้มแสงที่เพียงพอช่วยเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ nitrate reductase ทำให้ไนเตรทถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนได้มากขึ้น ส่งผลให้ระดับไนเตรทในใบลดลง (Cometti et al., 2011; Sago et al., 2018; Bian et al., 2020) สำหรับผักกาดหอมกรีน โอ๊คที่ปลูกในระบบ NFT มีรายงานว่า การจัดการแสงทั้งก่อนและหลังการเก็บเกี่ยว เช่น การใช้แสงประดิษฐ์ช่วงเวลายาว 12–24 ชั่วโมง สามารถปรับปรุงปริมาณ

วิตามินซีและลดระดับไนเตรทไนไบได้ (Htwe et al., 2022) แสดงให้เห็นว่าแสงไม่เพียงสำคัญต่อการเจริญเติบโต แต่ยังสำคัญต่อคุณภาพด้านความปลอดภัยอาหารอีกด้วย

2.2 อุณหภูมิ เป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อกระบวนการสรีรวิทยาของผักกาดหอม เช่น การสังเคราะห์ด้วยแสง การหายใจ การคายน้ำ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่าง ๆ ผักกาดหอมเป็นพืชเขตอากาศเย็นอ่อน (cool-season crop) โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตในเรือนปลูกอยู่ที่ประมาณ 18–22°C และอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหารในบริเวณรากควรอยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน (Olle & Bender, 2023; UF/IFAS, 2021) อุณหภูมิที่สูงเกินไปจะเร่งการหายใจ ทำให้พืชใช้คาร์โบไฮเดรตมากขึ้น ใบอาจมีขนาดเล็กลง เกิดการแทงช่อดอกก่อนวัย และในระบบไฮโดรพอนิกส์ยังพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิที่เขตรากสามารถทำให้การสะสมไนเตรทไนไบในผักกาดหอมสูงขึ้น เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการรีดิวซ์ไนเตรทถูกรบกวน (Bian et al., 2020)

2.3 องค์ประกอบของอากาศและออกซิเจนละลายน้ำ แม้ว่าส่วนเหนือดินของผักกาดหอมจะได้รับออกซิเจนเพียงพอจากบรรยากาศ แต่ในระบบไฮโดรพอนิกส์ สภาพออกซิเจนที่ราก (dissolved oxygen; DO) มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากรากอยู่ในสารละลายตลอดเวลา ถ้าค่า DO ต่ำกว่าประมาณ 5 mg/L จะเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดภาวะขาดออกซิเจน (hypoxia) ซึ่งทำให้ออกซิเจนเสียหายและประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหารลดลง (UF/IFAS, 2021) งานวิจัยด้าน NFT ล่าสุดยืนยันว่า การรักษาระดับ DO สูงในเขตรากช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต น้ำหนักสด และความทนทานต่อสภาพเครียด ของผักกาดหอมอย่างมีนัยสำคัญ (Nitu et al., 2024) ดังนั้นระบบไฮโดรพอนิกส์ที่ดีจำเป็นต้องมีการเติมอากาศหรือปรับการไหลเวียนของสารละลายให้เหมาะสม

2.4 คุณภาพน้ำ น้ำเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของสารละลายธาตุอาหาร คุณภาพน้ำจึงส่งผลต่อทั้ง ความพร้อมใช้ของธาตุอาหาร และ สุขภาพของระบบราก โดยตรง น้ำที่เหมาะสมสำหรับระบบไฮโดรพอนิกส์ควรมีความกระด้างและค่าต่ำ ไม่มีการปนเปื้อนของโลหะหนักและจุลินทรีย์ก่อโรค และมีค่าความนำไฟฟ้าพื้นฐาน (EC ของน้ำเปล่า) ไม่สูงเกินไป เพื่อให้สามารถปรับสูตรสารละลายธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ (Resh, 2022; Pace et al., 2024) ในกรณีที่ใช้น้ำจากแหล่งผิวดินหรือระบบชลประทานจำเป็นต้องมีการกรองตะกอนและอาจต้องฆ่าเชื้อเบื้องต้นเพื่อลดความเสี่ยงต่อโรกระบบรากในระบบไฮโดรพอนิกส์เชิงพาณิชย์ (Pace & Williams, 2024)

2.5 ค่า EC (Electrical Conductivity) ของสารละลายธาตุอาหารค่า EC เป็นตัวบ่งชี้ความเข้มข้นของสารละลายเกลืออนินทรีย์ทั้งหมดในระบบไฮโดรพอนิกส์ การปลูกผักกาดหอมในระบบ NFT มักแนะนำให้ใช้ค่า EC ประมาณ 0.8–1.2 mS/cm ในระยะกล้า และ 1.2–1.8 mS/cm ในระยะเจริญเติบโตจนถึงเก็บเกี่ยว (Vought et al., 2024; UF/IFAS, 2021; Owen, 2018) การใช้ค่า EC ต่ำเกินไปทำให้พืชได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ ส่งผลให้น้ำหนักสดและพื้นที่ใบลดลง ในขณะที่ค่า

EC สูงเกินไปอาจทำให้เกิดความเครียดจากเกลือ (salt stress) ใบไหม้ขอบ และลดประสิทธิภาพการใช้น้ำของพืช (Kappel et al., 2021; Silva et al., 2025)

2.6 ค่า pH ของสารละลายธาตุอาหาร ค่า pH มีผลโดยตรงต่อ รูปแบบเคมีและความสามารถในการละลายของธาตุอาหาร ทำให้มีผลต่อการดูดซึมของผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์อย่างมาก โดยทั่วไปแนะนำให้ควบคุมค่า pH ของสารละลายสำหรับผักกาดหอมให้อยู่ในช่วง 5.5–6.0 ซึ่งเป็นช่วงที่ธาตุอาหารส่วนใหญ่มีความพร้อมใช้สูง โดยเฉพาะเหล็ก แมงกานีส และฟอสฟอรัส (Owen, 2018) ถ้าค่า pH สูงเกินไป (มากกว่า 6.5) ธาตุเหล็กและจุลธาตุบางชนิดจะตกตะกอนหรืออยู่ในรูปที่พืชนำไปใช้ได้ยาก ทำให้เกิดอาการใบเหลืองระหว่างเส้นใบ (interveinal chlorosis) ส่วนค่า pH ที่ต่ำมากอาจเพิ่มความเสี่ยงในการละลายโลหะบางชนิดมากเกินไปและทำให้อายุการใช้งานจำเป็นต้องมีการปรับ pH ด้วยกรด เช่น กรดไนตริก หรือกรดฟอสฟอริก และในทางกลับกัน ใช้สารละลายต่าง เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เพื่อปรับให้สูงขึ้น โดยต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อสมดุลของธาตุอาหารรวมในระบบด้วย

2.7 ธาตุอาหารพืชและองค์ประกอบของสารละลาย ธาตุอาหารพืชในระบบไฮโดรพอนิกส์ประกอบด้วย ธาตุอาหารหลัก (N, P, K), ธาตุอาหารรอง (Ca, Mg, S) และ จุลธาตุ (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl) ซึ่งต้องอยู่ในสัดส่วนที่สมดุลเพื่อให้ได้การเจริญเติบโตและคุณภาพใบที่เหมาะสม (Sapkota et al., 2019; Mattson, 2015) สำหรับผักกาดหอม ไนโตรเจน (N) เป็นธาตุที่มีผลมากที่สุดต่อการสร้างมวลใบและความเขียวของใบ แต่การให้ไนโตรเจนมากเกินไป โดยเฉพาะในรูปแบบไนเตรต (NO_3^-) จะสัมพันธ์โดยตรงกับการสะสมไนเตรตในใบและอาจเกินค่ามาตรฐานด้านความปลอดภัย (Wenceslau et al., 2021; Martínez-Moreno et al., 2024) ฟอสฟอรัส (P) มีบทบาทในการถ่ายเทพลังงานและการพัฒนาระบบรากที่ดีในระยะต้นกล้า โพแทสเซียม (K) เกี่ยวข้องกับการควบคุมปากใบ คุณภาพใบ ความกรอบ และความทนทานต่อความเครียด และแคลเซียม (Ca) มีบทบาทสำคัญต่อความแข็งแรงของผนังเซลล์และการป้องกันอาการขาดแคลเซียม เช่น tipburn ในผักกาดหอมไฮโดรพอนิกส์

องค์ประกอบและสัดส่วนของธาตุอาหารในสารละลายสำหรับผักกาดหอมจึงต้องได้รับการออกแบบอย่างรอบคอบ โดยมีงานวิจัยหลายฉบับยืนยันว่า องค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารเป็นตัวกำหนดการเจริญเติบโต จำนวนใบ น้ำหนักสด ปริมาณคลอโรฟิลล์ และคุณภาพทางโภชนาการของผักกาดหอมโดยตรง (Sapkota et al., 2019; Vought et al., 2024)

ในบริบทของงานวิจัยนี้ การใช้น้ำหมักชีวภาพจากนมสด ในระบบไฮโดรพอนิกส์ถือเป็นการปรับแหล่งธาตุอาหารจากปุ๋ยเคมีสังเคราะห์ไปสู่แหล่งอินทรีย์ ซึ่งมีลักษณะการปลดปล่อยธาตุอาหารที่ช้ากว่าและอาจช่วยลดความเสี่ยงในการสะสมไนเตรตในใบ ทั้งนี้มีรายงานว่าปุ๋ยอินทรีย์

เหลวสามารถใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมีในระบบไฮโดรพอนิกส์เพื่อผลิตผักกาดหอมได้ โดยไม่กระทบต่อผลผลิตมากนัก หากมีการจัดการ EC, pH และองค์ประกอบธาตุอย่างเหมาะสม (Chowdhury et al., 2024)

ความปลอดภัยอาหารคือการสะสมไนเตรท (NO_3^-) ซึ่งพบได้สูงในพืชกินใบ โดยเฉพาะผักที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ เนื่องจากรากได้รับไนเตรทจากสารละลายโดยตรง (Grewal et al., 2022) การสะสมไนเตรทขึ้นอยู่กับความเข้มข้น อุณหภูมิ ค่าธาตุอาหาร และการทำงานของเอนไซม์ nitrate reductase ซึ่งทำงานได้ดีในสภาพแสงสูงและไนโตรเจนไม่เกินความต้องการ (Santamaria, 2006) หากแสงไม่เพียงพอหรือได้รับไนโตรเจนมากเกินไป พืชจะสะสมไนเตรทในใบสูงกว่าระดับปกติ ซึ่งอาจเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค โดยสหภาพยุโรป กำหนดระดับไนเตรทในผักกาดหอมห้ามเกิน 2,500–4,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักสด (European Commission, 2022) ดังนั้น การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ หรือแหล่งไนโตรเจนที่มีการปลดปล่อยแบบช้า เช่น น้ำหมักชีวภาพจากนมสด อาจช่วยลดความเสี่ยงในการสะสมไนเตรทและเพิ่มคุณภาพทางโภชนาการของพืชได้

ระบบปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Soilless Culture Systems)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเป็นเทคโนโลยีการผลิตพืชที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากช่วยลดปัญหาดินเสื่อมโทรม การปนเปื้อนเชื้อโรค และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พื้นที่ โดยเฉพาะในงานปลูกพืชเชิงพาณิชย์ในโรงเรือนระบบปิด การปลูกแบบนี้อาศัยการให้สารละลายธาตุอาหารแก่รากพืชโดยตรง ทำให้สามารถควบคุมปัจจัยด้านการเจริญเติบโตได้อย่างแม่นยำ (Resh, 2022) ระบบปลูกพืชไร้ดินมีการพัฒนาในหลายประเทศโดยยึดหลักการให้สารละลายธาตุอาหารแก่บริเวณรากเป็นสำคัญ ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ ระบบปลูกพืชในสารละลาย ระบบปลูกพืชในวัสดุปลูก และระบบปลูกพืชแบบรากลอยในอากาศ (Jones, 2014)

1. ระบบปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture Systems)

ระบบนี้เป็นพื้นฐานของการปลูกพืชไร้ดิน โดยให้รากพืชสามารถลอยอยู่ในสารละลายธาตุอาหารโดยตรง ซึ่งช่วยให้พืชดูดซึมธาตุอาหารได้อย่างรวดเร็ว และตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายได้ชัดเจน (Sapkota et al., 2019)

1.1 ระบบฟิล์มธาตุอาหาร (Nutrient Film Technique: NFT) เป็นระบบที่ได้รับความนิยมสูง โดยเฉพาะในการปลูกพืชใบ เช่น ผักกาดหอม ผักสลัด และกะหล่ำปลี เพราะเป็นระบบที่ใช้น้ำต่ำ ดูแลรักษาง่าย และควบคุมคุณภาพผลผลิตได้ดี (Resh, 2022) วิธีการคือการให้น้ำยาอาหารพืชไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางหนา 2–3 มิลลิเมตรผ่านรางปลูกที่รองรับรากพืช รากพืชจึงสัมผัส

สารละลายได้ต่อเนื่อง โดยไม่ถูกท่วมจนขาดออกซิเจน ความลาดเอียงของรางประมาณ 1% ทำให้น้ำไหลกลับลงสู่ถังพัก และปั้มน้ำจะหมุนเวียนสารละลายกลับไปยังรางอีกครั้งอย่างต่อเนื่อง อัตราการไหลที่เหมาะสมอยู่ที่ 1–2 ลิตรต่อนาทีต่อราง ซึ่งช่วยเพิ่มระดับออกซิเจนให้รากพืชและลดปัญหารากเน่าได้ดี (Olle & Bender, 2023) NFT จึงเป็นระบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับผักกาดหอม เนื่องจากพืชมีระบบรากตั้งและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของ EC และ pH อย่างรวดเร็ว (Grewal et al., 2022) (ภาพที่ 2.2A)

1.2 ระบบน้ำลึก (Deep Flow Technique: DFT) หรือระบบรากลอยในสารละลายลึก มีลักษณะคือรากจะแช่อยู่ในสารละลายที่มีความลึกประมาณ 15–20 เซนติเมตร โดยพืชถูกยึดอยู่บนแผ่นโฟมหรือวัสดุลอยน้ำ ระบบนี้มีความเสถียรของอุณหภูมิสูง เนื่องจากปริมาณสารละลายมาก ช่วยชะลอการเปลี่ยนแปลงของ EC และ pH (Jones, 2014) เป็นระบบที่ลดปัญหาขาดน้ำในกรณีไฟฟ้าดับ เหมาะกับพืชใบที่ต้องการน้ำสม่ำเสมอ ต้นทุนระบบต่ำกว่าระบบ NFT แต่ยังมีข้อจำกัดคือ รากอาจขาดออกซิเจนได้ง่าย ต้องเติมอากาศตลอดเวลา และการควบคุม EC ยากกว่าระบบ NFT เมื่อปลูกจำนวนมาก (Resh, 2022) (ภาพที่ 2.2B)

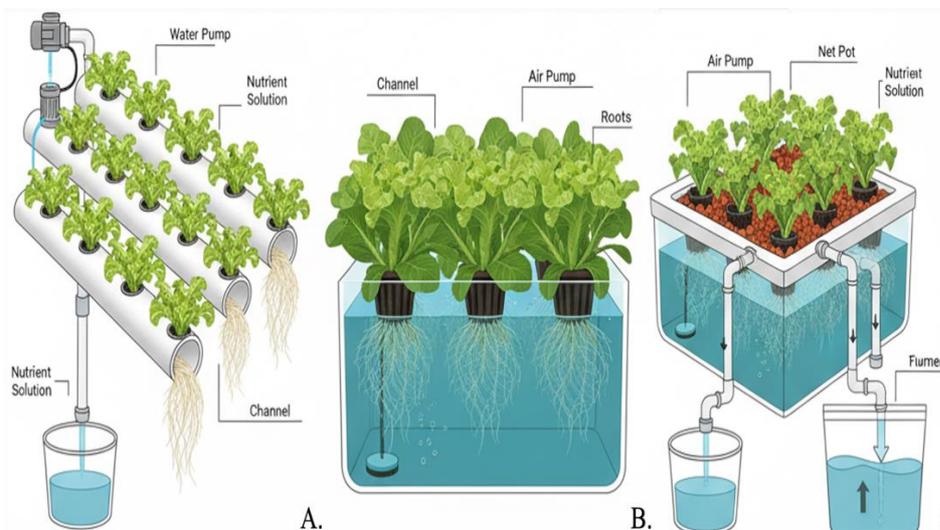
1.3 ระบบรากลอยแบบไหลเวียน (Dynamic Root Floating Technique: DRFT) เป็นการผสมผสานระหว่าง DFT และ NFT โดยให้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายระดับตื้น (3–5 ซม.) แต่มีการเติมอากาศและไหลเวียนน้ำผ่านรากตลอดเวลา ทำให้ช่วยลดปัญหาขาดออกซิเจนที่พบในระบบ DFT แบบดั้งเดิม (Nitu et al., 2024) ระบบนี้เหมาะสำหรับพืชใบไทย ผักสลัด และผักกาดหอม เนื่องจากมีออกซิเจนสูงและโครงสร้างระบบไม่ซับซ้อน (ภาพที่ 2.2C)

2. ระบบปลูกพืชในวัสดุปลูก (Substrate Culture)

การปลูกพืชในวัสดุที่ไม่ใช่ดิน เช่น ขุยมะพร้าว เพอร์ไลต์ และร็อกวูล โดยให้สารละลายผ่านระบบน้ำหยด วัสดุปลูกทำหน้าที่พยุงลำต้นและเก็บความชื้นบางส่วน เหมาะกับพืชที่มีลำต้นสูงหรือระบบรากใหญ่ เช่น มะเขือเทศ แตงกวา และพริก (Jones, 2014)

3. ระบบปลูกพืชแบบรากลอยในอากาศ (Aeroponics)

ระบบที่รากพืชถูกแขวนลอยอยู่ในภาชนะปิดและได้รับสารละลายผ่านการพ่นหมอกละเอียด ความเข้มข้นออกซิเจนที่รากสูงมาก ทำให้พืชเจริญเติบโตเร็วที่สุดในบรรดาทุกระบบทั้งหมด (Resh, 2022) ระบบนี้เหมาะกับการผลิตพืชคุณภาพสูง เช่น มันฝรั่งเมล็ดพันธุ์ ผักใบอายุเก็บเกี่ยวสั้น และพืชปลอดเชื้อ



ภาพที่ 2.2 ระบบปลูกพืชในสารละลาย (Water Culture Systems) โดยที่ A: ระบบฟิล์มธาตุอาหาร (Nutrient Film Technique: NFT) B: ระบบน้ำลึก (Deep Flow Technique: DFT) และ C: ระบบรากลอยแบบไหลเวียน (Dynamic Root Floating Technique: DRFT)

ที่มาภาพ: OpenAI (2025)

น้ำหมักชีวภาพ (Bio-extract / Fermented Bio-liquid Fertilizer)

น้ำหมักชีวภาพ (Bio-extract) เป็นผลิตภัณฑ์อินทรีย์เหลวที่ได้จากการหมักวัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น พืช สัตว์ หรือผลิตภัณฑ์จากนม โดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในสภาวะที่ควบคุม เพื่อให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และปลดปล่อยสารอาหารในรูปแบบที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันทีหรือใช้ได้ง่ายขึ้น (Higa & Parr, 1994) การหมักดังกล่าวก่อให้เกิดสารประกอบหลากหลาย เช่น กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน น้ำตาล แร่ธาตุ วิตามิน เอนไซม์ และฮอร์โมนพืชธรรมชาติ ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชโดยตรง (Sangakkara, 2014)

น้ำหมักชีวภาพ (Bio-extract) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายวัตถุดิบอินทรีย์ด้วยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ ทำให้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนถูกเปลี่ยนแปลงเป็น โมเลกุลที่มีขนาดเล็กและอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมและนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรงหรืออย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Zhang et al., 2021) การหมักนี้มักดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่มีการเติมแหล่งคาร์บอน เช่น กากน้ำตาล น้ำตาลทรายดิบ หรือวัตถุดิบที่มีน้ำตาลธรรมชาติสูง เพื่อเป็นพลังงานให้แก่จุลินทรีย์ในช่วงการเจริญเติบโตและย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปการหมักชีวภาพจะเป็นไปอย่างถึงไม่ใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน ขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้และชนิดของวัตถุดิบที่หมัก

ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการหมักประกอบด้วยสารสำคัญหลายกลุ่ม ได้แก่ (1) สารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายบางส่วน เช่น กรดอินทรีย์ เปปไทด์ และกรดอะมิโน ซึ่งเป็นรูปแบบไนโตรเจนที่พืชดูดซึมได้รวดเร็ว (2) แร่ธาตุหลัก แร่ธาตุรอง และจุลินทรีย์ที่ถูกปลดปล่อยให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำและพืชสามารถนำไปใช้ได้ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสี (3) จุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์และเมแทบอลิต์ของจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรียกรดแลกติก (LAB) ยีสต์ และ *Bacillus spp.* ซึ่งช่วยปรับปรุงความอุดมสมบูรณ์ของดิน ลดเชื้อก่อโรค และส่งเสริมการเจริญเติบโตของระบบราก (4) สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืชตามธรรมชาติ เช่น อินโดลอะซิติกแอซิด (IAA), จิบเบอเรลลิน (GA) และไซโตไคนิน ซึ่งเกิดขึ้นเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ และมีบทบาทสำคัญต่อการแบ่งเซลล์ การขยายตัวของพืช และการสร้างรากฝอย ด้วยองค์ประกอบดังกล่าว น้ำหมักชีวภาพจึงถือเป็นแหล่งปุ๋ยอินทรีย์เหลวที่มีความหลากหลายในเชิงชีวโมเลกุลและธาตุอาหาร สามารถใช้ในการบำรุงพืช เพิ่มอัตราการเจริญเติบโต เสริมความแข็งแรงของระบบราก และปรับปรุงสภาพแวดล้อมบริเวณรากของพืชให้เหมาะสมมากขึ้น ทั้งยังมีบทบาทในด้านการฟื้นฟูดิน เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ และลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมีในระบบเกษตรกรรมสมัยใหม่ (Nakasaki et al., 2020)

ประเภทของน้ำหมักชีวภาพ (Types of Bio-extracts)

น้ำหมักชีวภาพสามารถจำแนกตามชนิดของวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์ได้ 3 ประเภทหลัก ได้แก่ น้ำหมักจากพืช น้ำหมักจากสัตว์ และน้ำหมักจากนม แต่ละประเภทมีองค์ประกอบทางชีวเคมีและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเป็นแหล่งธาตุอาหารและสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง (Zhang et al., 2021)

1) น้ำหมักชีวภาพจากพืช (Plant-based Bio-extract) น้ำหมักชีวภาพประเภทนี้ใช้วัตถุดิบจากพืชเป็นหลัก เช่น เศษผัก ผลไม้ สมุนไพร วัชพืช สาหร่ายทะเล กระจิน กัลเล่ย์ เต้าเจี้ยว หรือวัสดุพืชอื่นที่มีโครงสร้างอ่อนและมีปริมาณน้ำมาก วัตถุดิบเหล่านี้มีความหลากหลายทางชีวโมเลกุล เช่น คาร์โบไฮเดรต วิตามิน แร่ธาตุรอง และสารฟีนอลิก ซึ่งเป็นสารตั้งต้นให้จุลินทรีย์ย่อยสลายและสร้างเมแทบอลิต์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Xu et al., 2012) แม้ว่าน้ำหมักจากพืชมักมีค่า N-P-K ในระดับปานกลางถึงต่ำเมื่อเทียบกับวัตถุดิบจากสัตว์ แต่มีความโดดเด่นด้านสารกระตุ้นการเจริญเติบโต เช่น ฮอร์โมนพืชธรรมชาติ ได้แก่ ออกซิน ไซโตไคนิน และจิบเบอเรลลิน ซึ่งช่วยส่งเสริมการพัฒนาราก การยึดตัวของลำต้น การแตกใบ และการฟื้นฟูสภาพพืชหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ยังเป็นแหล่งของแร่ธาตุรอง เช่น แมกนีเซียม (Mg) แคลเซียม (Ca) และเหล็ก (Fe) ในรูปที่ละลายน้ำได้ เหมาะสมสำหรับใช้ในระบบปลูกผักใบและพืชอายุสั้น

2) น้ำหมักชีวภาพจากสัตว์ (Animal-based Bio-extract) น้ำหมักจากสัตว์มีแหล่งกำเนิดจากวัตถุดิบที่มีโปรตีนสูง เช่น เศษปลา หอยเชอรี่ กุ้ง ปู หรือเศษซากสัตว์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งผ่านกระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ให้เป็นกรดอะมิโน เปปไทด์ และแร่ธาตุในรูปที่พืชสามารถดูดใช้ได้ทันที (Chowdhury et al., 2024) เนื่องจากวัตถุดิบมีองค์ประกอบโปรตีนและฟอสฟอรัสสูง น้ำหมักประเภทนี้จึงมีปริมาณธาตุอาหารหลัก N-P-K สูงกว่าน้ำหมักจากพืช โดยเฉพาะไนโตรเจนในรูปกรดอะมิโน ซึ่งดูดซึมเร็วและช่วยเพิ่มความเขียวของใบ กระตุ้นการสร้างคลอโรฟิลล์ ทำให้เหมาะอย่างยิ่งสำหรับผักใบ เช่น ผักกาดหอม คะน้า ผักบุ้ง และพืชที่ต้องการการพัฒนาระบบราก นอกจากนี้ยังช่วยเสริมกิจกรรมจุลินทรีย์ในดินหรือวัสดุปลูก และช่วยลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมีในโตรเจนในระบบเกษตรเชิงยั่งยืน

3) น้ำหมักชีวภาพจากนม (Milk-based Fermented Extract) น้ำหมักชีวภาพจากนมเป็นกลุ่มที่มีคุณลักษณะเฉพาะ เนื่องจากใช้น้ำนมหรือผลิตภัณฑ์จากนม เช่น นมสด นมดิบ หรือนมหมัก เป็นวัตถุดิบหลักในการหมัก กระบวนการหมักมักอยู่ภายใต้การทำงานของ แบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria: LAB) เช่น *Lactobacillus plantarum*, *L. casei* รวมถึงเอนไซม์โปรติเอส และลิโปเนส ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดการย่อยโปรตีนและไขมันในนม (Bansal et al., 2022) เมแทบอลิต์ที่เกิดขึ้นมีความสำคัญต่อการเจริญของพืช ได้แก่ กรดแลคติก ช่วยเพิ่มความเป็นกรดอ่อน ยับยั้งเชื้อโรคและเพิ่มการละลายธาตุฟอสเฟต กรดอะมิโนและเปปไทด์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งไนโตรเจนดูดซึมเร็ว ช่วยกระตุ้นการแตกใบ โปรไบโอติกบางชนิด ส่งเสริมสุขภาพของระบบราก และลดความเสี่ยงโรครากเน่า แร่ธาตุจากนม เช่น แคลเซียม ฟอสฟอรัส ที่พร้อมใช้งานวิจัยรายงานว่า น้ำหมักจากนมสามารถช่วยลดการสะสมไนเตรทในผักกินใบ โดยเพิ่มกิจกรรมเอนไซม์ nitrate reductase ในพืช ทำให้เหมาะสำหรับผักสลัดและผักไร้ดินที่มีปัญหาไนเตรทสะสมสูง (Bansal et al., 2022)

กลไกการหมักของน้ำหมักชีวภาพ (Fermentation Mechanisms of Bio-extracts)

กระบวนการหมักน้ำหมักชีวภาพเป็นกระบวนการทางชีวภาพที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิด โดยมีวัตถุดิบอินทรีย์เป็นแหล่งอาหารและมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเป็นตัวกำหนดความสำเร็จของการหมัก กระบวนการหมักมักประกอบด้วยสภาวะกึ่งใช้ออกซิเจนหรือไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งกระตุ้นให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ การสร้างเมแทบอลิต์ และการปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบให้เป็นรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่ายขึ้น (Zhang et al., 2021) โดยทั่วไป กลไกการหมักสามารถอธิบายได้เป็น 4 ระยะสำคัญ ได้แก่ (1) ระยะการสลายสารอินทรีย์เบื้องต้น (2) ระยะการหมักเชิงรุก (3) ระยะสร้างเมแทบอลิต์ที่มีประโยชน์ (4) ระยะความเสถียรของน้ำหมัก ซึ่งอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. ระยะเวลาสลายสารอินทรีย์เบื้องต้น (Initial Hydrolysis Phase) เมื่อเริ่มหมัก จุลินทรีย์ย่อยสลาย (decomposer microorganisms) เช่น *Bacillus spp.*, ยีสต์ และจุลินทรีย์ในธรรมชาติ จะเริ่มปล่อยเอนไซม์ เช่น เซลลูเลส โปรติเอส และอะไมเลส เพื่อย่อยโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ เซลลูโลส แป้ง โปรตีน ไขมัน ให้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่า เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดไขมันสายสั้น และกรดอะมิโน (Nakasaki et al., 2020) การลดขนาดโมเลกุลนี้เป็นขั้นตอนสำคัญ เพราะทำให้วัตถุดิบอินทรีย์พร้อมต่อการหมักโดยจุลินทรีย์เฉพาะกลุ่ม เช่น LAB (Lactic Acid Bacteria) และยีสต์ ซึ่งเป็นผู้เล่นหลักในระยะถัดไป

2. ระยะเวลาหมักเชิงรุก (Active Fermentation Phase) ในระยะนี้จุลินทรีย์จะเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียกรดแลคติก (LAB) เช่น *Lactobacillus plantarum*, *L. casei* และ *Pediococcus spp.* รวมทั้งยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) ซึ่งใช้น้ำตาลจากวัตถุดิบและกากน้ำตาลเป็นแหล่งพลังงาน กระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์สำคัญ ได้แก่ กรดแลคติก ลดค่า pH ของน้ำหมักช่วยยับยั้งเชื้อก่อโรค (Bansal et al., 2022) เอทานอลและกรดอินทรีย์อื่น ๆ เพิ่มการละลายธาตุฟอสเฟตและธาตุอาหารรองในวัตถุดิบ เอนไซม์ชีวภาพ เช่น protease, amylase, lipase เพิ่มความเร็วของการย่อยสลาย การลดค่า pH ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นกลไกธรรมชาติที่ช่วยคงสภาพน้ำหมักให้มีความปลอดภัยและลดโอกาสการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรค (Higa & Parr, 1994)

3. ระยะเวลาผลิตเมแทบอลิต์ที่มีประโยชน์ (Metabolite Production Phase) เมื่อการหมักดำเนินต่อไป จุลินทรีย์จะเริ่มสร้างเมแทบอลิต์ทุติยภูมิ (secondary metabolites) ซึ่งเป็นสารสำคัญที่มีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง สารที่เกิดในระยะนี้เช่น กรดอะมิโน และเปปไทด์ จากการย่อยสลายโปรตีน เป็นแหล่งไนโตรเจนที่ดูดซึมได้ง่าย (Chowdhury et al., 2024) ฮอร์โมนพืชธรรมชาติ อินโดลอะซิติกแอซิด (IAA) กระตุ้นการเกิดราก จิบเบอเรลลิน (GA) กระตุ้นการยืดตัวของพืช ไซโตไคนิน กระตุ้นการแบ่งเซลล์ ฮอร์โมนเหล่านี้เกิดจากการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์โดยตรง (Sangakkara, 2014) ได้แก่กรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก ซิตริก มาลิก เพิ่มการละลายธาตุอาหารในระบบปลูก โปรไบโอติก เช่น LAB และยีสต์ ส่งเสริมสุขภาพระบบราก ระยะนี้ถือเป็นช่วงที่น้ำหมักมีคุณภาพสูงที่สุด เนื่องจากธาตุอาหารอยู่ในรูปที่พืชสามารถดูดซึมได้อย่างรวดเร็ว เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล แร่ธาตุที่ละลายน้ำ และกรดอินทรีย์ที่ช่วยเพิ่มความพร้อมของธาตุอาหารอื่นในสารละลาย

4. ระยะเวลาเสถียรของน้ำหมัก (Stabilization & Maturation Phase) เมื่อการหมักดำเนินถึงระยะปลาย สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ถูกย่อยสลายแล้ว ระบบชีวภาพเริ่มเข้าสู่ความสมดุล ระดับ pH คงที่ ธาตุอาหารละลายน้ำมีความเสถียร และจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคลดลงอย่างมาก ใน

ระยะนี้ น้ำหมักมีคุณสมบัติพร้อมใช้งาน เนื่องจากโมเลกุลส่วนใหญ่มีขนาดเล็กดูดซึมง่าย ค่า pH มีความเสถียร (มักอยู่ระหว่าง 3.0–4.5) ไม่มีแก๊สสะสมมาก ความเสถียรของผลิตภัณฑ์สูง มีกลิ่นเปรี้ยวตามธรรมชาติของกรดแลคติก ซึ่งเป็นสัญญาณของการหมักสมบูรณ์ Zhang et al. (2021) รายงานว่าในระยะความเสถียรนี้ น้ำหมักมีองค์ประกอบเหมาะสมที่สุดต่อการใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพสำหรับพืช เนื่องจากมีความคงตัวทางเคมีและความปลอดภัยสูงสุด

จุลินทรีย์ที่พบในน้ำหมักชีวภาพ (Microorganisms Present in Bio-extracts)

จุลินทรีย์เป็นองค์ประกอบสำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตน้ำหมักชีวภาพ เนื่องจากเป็นตัวขับเคลื่อนการย่อยสลายสารอินทรีย์ การแปรสภาพธาตุอาหาร และการสร้างเมแทบอลิต์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดังนั้นชนิดและสัดส่วนของจุลินทรีย์ที่พบในน้ำหมักชีวภาพจึงเป็นตัวกำหนดทั้งคุณภาพและประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (Nakasaki et al., 2020) โดยทั่วไป น้ำหมักชีวภาพมีความหลากหลายของจุลินทรีย์สูง เพราะวัตถุดิบมีที่มาหลากหลาย ทั้งจากพืช สัตว์ นมสด และแหล่งน้ำตาล เช่น กากน้ำตาล การทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์เหล่านี้ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีอย่างต่อเนื่อง และเกิดผลิตภัณฑ์ชั้นกลางที่มีผลต่อระบบนิเวศของกระบวนการหมัก (Zhang et al., 2021)

จุลินทรีย์ที่พบได้บ่อยในน้ำหมักชีวภาพสามารถจัดเป็น 4 กลุ่ม

1. แบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria: LAB) เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดคือน้ำหมักชีวภาพ โดยเฉพาะน้ำหมักจากนม ผลไม้ และเศษพืช เนื่องจาก LAB เจริญเติบโตได้ดีในสภาพที่มีน้ำตาลสูงและมีออกซิเจนต่ำ (Bansal et al., 2022) ชนิดที่พบได้บ่อย ได้แก่ *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus casei*, *Pediococcus pentosaceus*, *Leuconostoc mesenteroides* โดยมีบทบาทของในน้ำหมักชีวภาพคือ ผลิตกรดแลคติก ช่วยลดค่า pH ของระบบหมักลงสู่ระดับ 3–4 ทำให้ยับยั้งเชื้อก่อโรค เช่น *Pythium*, *Fusarium* สร้างเอนไซม์ย่อยอาหาร เช่น protease, cellulase เพิ่มการย่อยโปรตีนและโครงสร้างพืช สร้างกรดอินทรีย์ที่ช่วยละลายธาตุอาหารในวัตถุดิบ เช่น ฟอสเฟตและธาตุรอง สร้างสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช เช่น อินโดลอะซิติกแอซิด (IAA) เพิ่มการสร้างรากและความต้านทานความเครียดของพืช ในระบบปลูกแบบไฮโดรพอนิกส์และดิน LAB จึงเป็นจุลินทรีย์หลักที่ช่วยเพิ่มคุณภาพน้ำหมักชีวภาพทั้งในด้านคุณค่าทางอาหารและการยับยั้งเชื้อสาเหตุโรคพืช

2. แบคทีเรียกลุ่ม *Bacillus* spp. เป็นจุลินทรีย์ที่มีสปอร์ ทำให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมต่าง ๆ และพบได้บ่อยในน้ำหมักจากสัตว์ พืช และกากอินทรีย์ที่ต้องผ่านการย่อยสลายที่ซับซ้อน (Sangakkara, 2014) ชนิดที่พบมาก ได้แก่ *Bacillus subtilis*, *Bacillus*

amyloliquefaciens, *Bacillus megaterium* โดยมีบทบาทในการผลิตเอนไซม์ย่อยสลายหลายชนิด เพิ่มความเร็วของการย่อยวัตถุดิบ เช่น protease, lipase, amylase, cellulase สร้างสารต้านจุลินทรีย์ (antimicrobial compounds) เช่น ซูร์แฟคแตนท์ อินโดลสารสกัดยับยั้งเชื้อราส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (PGPR) โดยสามารถสร้าง IAA สร้างไซเดอโรฟอรัส (siderophore) ช่วยเพิ่มการดูดเหล็กของพืช ช่วยเพิ่มการละลายฟอสเฟตและโพแทสเซียมในสารละลาย *Bacillus* เป็นจุลินทรีย์สำคัญที่เพิ่มประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพในระบบไฮโดรพอนิกส์ เพราะช่วยควบคุมเชื้อก่อโรคบริเวณรากและเสริมระบบรากของพืชให้แข็งแรง

3. ยีสต์ (Yeasts) เช่น *Saccharomyces cerevisiae* เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญในระยะต้นของการหมักและพบในน้ำหมักที่มีผลไม้ น้ำตาล หรือเศษพืชเป็นวัตถุดิบหลัก (Xu et al., 2012) โดยมีบทบาทในการผลิตวิตามินกลุ่ม B (B1, B2, B6, B12) ซึ่งช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์พืชผลิตเอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยาชีวภาพ เช่น invertase ช่วยย่อยน้ำตาล ผลิตฮอร์โมน (signal compounds) กระตุ้นการเจริญเติบโตของราก ช่วยสร้าง CO₂ ในระยะหมักต้น ซึ่งเป็นตัวเร่งให้เกิดสถานะกึ่งไร้ออกซิเจน เหมาะสมต่อ LAB ยีสต์จึงเป็นตัวเร่งสำคัญที่สนับสนุนทั้ง LAB และ *Bacillus* ในกระบวนการหมักชีวภาพ

4. จุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตอื่น ๆ (Other Plant Growth-Promoting Microorganisms) น้ำหมักชีวภาพที่ใส่วัตถุดิบหลากหลายมักพบจุลินทรีย์อื่นอีกหลายชนิด ได้แก่ Nitrogen-fixing bacteria ช่วยตรึงไนโตรเจนเพิ่มในระบบ ทำให้ค่า N ในผลิตภัณฑ์สูงขึ้น เช่น *Azotobacter*, *Azospirillum* Phosphate-solubilizing bacteria (PSB) เพิ่มการละลายฟอสเฟตให้พืชใช้ได้ เช่น *Pseudomonas fluorescens* เป็นต้น

สารอาหารที่น้ำหมักชีวภาพให้แก่พืช (Nutrients Supplied by Bio-extracts)

น้ำหมักชีวภาพเป็นแหล่งของสารอาหารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายวัตถุดิบโดยจุลินทรีย์ ทำให้สารอินทรีย์เชิงซ้อน เช่น โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ถูกแปรสภาพเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่พืชสามารถดูดซึมได้ง่ายขึ้น (Zhang et al., 2021) กระบวนการหมักยังช่วยปลดปล่อยแร่ธาตุจากวัตถุดิบให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำ เช่น ธาตุหลัก ธาตุรอง และจุลธาตุ รวมถึงสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น กรดอะมิโน กรดอินทรีย์ ฮอร์โมนพืชธรรมชาติ และเอนไซม์ต่าง ๆ (Nakasaka et al., 2020) คุณลักษณะเหล่านี้ทำให้น้ำหมักชีวภาพทำหน้าที่ทั้งเป็นแหล่งธาตุอาหารและเป็นตัวกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชในเวลาเดียวกัน

1. ธาตุอาหารหลัก (Macronutrients) น้ำหมักชีวภาพมีธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งเกิดจากการย่อยโปรตีนและโครงสร้างพืชหรือสัตว์

ระหว่างการหมัก โดยไนโตรเจนส่วนใหญ่อยู่ในรูปกรดอะมิโนและเปปไทด์ที่พืชดูดซึมได้รวดเร็ว ช่วยเร่งการแตกใบและเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ (Xu et al., 2012) ฟอสฟอรัสที่เกิดจากการสลายโปรตีนและการละลายฟอสเฟตด้วยกรดอินทรีย์จากจุลินทรีย์ เช่น *Bacillus* ช่วยพัฒนารากและการสร้างพลังงานของพืช (Sangakkara, 2014) ส่วนโพแทสเซียมพบมากในน้ำหมักจากพืช เช่น กลัวยหรือสาหร่ายทะเล ซึ่งช่วยควบคุมการเปิด-ปิดปากใบ การเคลื่อนย้ายน้ำตาล และเพิ่มความแข็งแรงของเนื้อเยื่อใบ

2. ธาตุอาหารรอง (Secondary Nutrients) ธาตุอาหารรอง เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน พบในน้ำหมักชีวภาพจากทุกประเภท โดยเฉพาะแคลเซียมจากน้ำหมักที่มีนมเป็นวัตถุดิบซึ่งอยู่ในรูปที่ละลายน้ำสูง ช่วยเสริมความแข็งแรงของผนังเซลล์และลดอาการปลายนใบไหม้ในผักกาดหอม แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบสำคัญของคลอโรฟิลล์ ช่วยประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ส่วนน้ำหมักบางชนิดมีสารประกอบกำมะถันซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของกรดอะมิโนหลายชนิดและช่วยเพิ่มความต้านทานของพืชต่อสภาวะเครียด (Xu et al., 2012)

3. จุลธาตุ (Micronutrients) จุลธาตุหลายชนิด เช่น เหล็ก สังกะสี แมงกานีส ทองแดง และโบรอน มักพบในน้ำหมักชีวภาพในรูปที่ละลายน้ำดี เนื่องจากกรดอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการหมักช่วยละลายแร่ธาตุจากวัตถุดิบ (Nakasaki et al., 2020) จุลธาตุเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ในกระบวนการเมตาบอลิซึม เช่น เหล็กช่วยในกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ แมงกานีสเกี่ยวข้องกับการแยกน้ำในระบบสังเคราะห์แสง และสังกะสีจำเป็นต่อการสร้างฮอร์โมนพืช IAA การมีจุลธาตุครบถ้วนในน้ำหมักจึงช่วยส่งเสริมสุขภาพพืชโดยรวมอย่างชัดเจน

4. สารชีวโมเลกุลกระตุ้นการเจริญเติบโต (Bioactive Compounds) หนึ่งในความโดดเด่นของน้ำหมักชีวภาพคือการมีสารชีวโมเลกุลที่เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ (กรดแลคติก กรดอะซิติก) กรดอะมิโน เปปไทด์ เอนไซม์ และฮอร์โมนพืชธรรมชาติ ซึ่งมีบทบาทกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง (Sangakkara, 2014) ฮอร์โมนที่พบ เช่น อินโดลอะซิติกแอซิด (IAA) ช่วยกระตุ้นการเกิดราก จิบเบอเรลลินช่วยการยืดตัวของพืช และไซโตไคนินช่วยกระตุ้นการแบ่งเซลล์ ส่วนกรดอินทรีย์ช่วยเพิ่มการละลายธาตุอาหาร ทำให้พืชดูดซึมได้ง่ายขึ้น สารออกฤทธิ์เหล่านี้ไม่มีในปุ๋ยเคมีทั่วไป จึงเป็นข้อได้เปรียบสำคัญของน้ำหมักชีวภาพต่อระบบปลูกพืชทั้งในดินและไร้ดิน

5. การผสมผสานคุณค่าทางโภชนาการของน้ำหมักชีวภาพต่อการเจริญเติบโตของพืช ด้วยองค์ประกอบทางอาหารที่ครอบคลุมทั้งธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง จุลธาตุ และสารกระตุ้นการเจริญเติบโต น้ำหมักชีวภาพจึงเป็นวัสดุปรับปรุงการเจริญเติบโตที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะใน

พืชใบ เช่น ผักกาดหอม ซึ่งตอบสนองต่อกรดอะมิโนและฮอร์โมนพืชจากจุลินทรีย์ได้ดี (Chowdhury et al., 2024) สารอาหารในน้ำหมักยังถูกดูดซึมได้เร็วเนื่องจากอยู่ในรูปโมเลกุลเล็ก ช่วยเพิ่มความเขียวสด ใบหนา และลดการสะสมไนเตรทในพืชใบอ่อน การใช้ร่วมกับระบบไฮโดรพอนิกส์จึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในเกษตรยุคใหม่ที่ต้องการเพิ่มคุณภาพผลผลิตและลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมี

การใช้ประโยชน์ของน้ำหมักชีวภาพในระบบเกษตร (Application of Bio-extracts in Agricultural Systems)

น้ำหมักชีวภาพเป็นวัสดุอินทรีย์ที่มีศักยภาพสูงในการปรับปรุงการปลูกพืชทั้งในระบบดินและระบบไร้ดิน เนื่องจากประกอบด้วยธาตุอาหาร โมเลกุลอินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการหมัก ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งปุ๋ยอินทรีย์และสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช (Sangakkara, 2014) น้ำหมักช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน ส่งเสริมโครงสร้างดินให้ร่วนซุย เพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ และช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ค้ำสะสมในดิน ทำให้ระบบรากของพืชเจริญได้ดีขึ้น นอกจากนี้กรดอินทรีย์ที่เกิดจาก LAB ยังช่วยละลายธาตุอาหารในดิน เช่น ฟอสเฟต และแร่ธาตุรอง ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ได้มากขึ้น (Nakasaka et al., 2020)

ในระบบไฮโดรพอนิกส์ น้ำหมักชีวภาพถูกนำมาใช้ทั้งในรูปของสารเสริมธาตุอาหารและตัวปรับสภาพรากของพืช งานวิจัยพบว่าเมแทบอลิต์จากจุลินทรีย์ เช่น กรดแลคติก กรดอะมิโน และโปรไบโอติกจาก LAB สามารถช่วยลดปัญหาการเน่า เพิ่มปริมาณรากฝอย และเพิ่มประสิทธิภาพการดูดธาตุอาหารของพืช โดยเฉพาะผักใบ เช่น ผักกาดหอมและผักสลัด (Chowdhury et al., 2024) นอกจากนี้การใช้สารละลายอินทรีย์จากน้ำหมักยังช่วยลดการสะสมไนเตรทในพืชใบอ่อนเนื่องจากการปลดปล่อยไนโตรเจนแบบค่อยเป็นค่อยไป (Bansal et al., 2022) ส่งผลให้ผลผลิตปลอดภัยต่อผู้บริโภค ปลอดภัยมากขึ้น จึงถือเป็นแนวทางสำคัญสำหรับเกษตรอินทรีย์ยุคใหม่ที่ต้องการหลีกเลี่ยงการใช้ปุ๋ยเคมีสังเคราะห์

ศักยภาพของน้ำหมักชีวภาพในการใช้ทดแทนสารละลายไฮโดรพอนิกส์ (Potential of Bio-extracts as Hydroponic Nutrient Solutions)

ศักยภาพของน้ำหมักชีวภาพในการใช้แทนหรือใช้ร่วมกับสารละลายไฮโดรพอนิกส์เคมีเริ่มได้รับความสนใจมากขึ้นในงานวิจัยเชิงเกษตรกรรมสมัยใหม่ เนื่องจากน้ำหมักมีธาตุอาหารหลัก-รอง-จุลธาตุ รวมถึงสารกระตุ้นการเจริญเติบโตที่พบเฉพาะในระบบอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และฮอร์โมนพืช การใช้สารอินทรีย์เหล่านี้ในระบบปลูกพืชไร้ดินช่วยเพิ่มการพัฒนาราก ความสมบูรณ์ของใบ และลดภาวะความเครียดที่เกิดจากความเข้มข้นเกลือในสารละลายเคมี

(Xu et al., 2012) งานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่าน้ำหมักจากพืชหรือสัตว์สามารถใช้แทนสารละลายปุ๋ยเคมีได้ราว 30–50% โดยไม่ทำให้ผลผลิตผักกาดหอมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Chowdhury et al., 2024) แม้ศักยภาพของน้ำหมักชีวภาพในระบบไฮโดรพอนิกส์จะสูง แต่ความท้าทายอยู่ที่ความไม่คงที่ของธาตุอาหารและความแปรผันของค่า pH และ EC ซึ่งขึ้นกับวัตถุดิบและกระบวนการหมัก จึงจำเป็นต้องมีการกรอง การกำจัดตะกอน และการปรับสัดส่วนก่อนใช้งาน การเติมอากาศในสารละลายน้ำหมักช่วยลดปัญหาการขาดออกซิเจนในรากและลดความเสี่ยงการเกิดโรค (Bansal et al., 2022) สำหรับระบบ NFT และ DFT น้ำหมักชีวภาพจากนมและสัตว์มีแนวโน้มเหมาะสม เนื่องจากมีกรดอินทรีย์และกรดอะมิโนที่ละลายน้ำสูง ทำให้พืชดูดซึมได้ดีและช่วยเพิ่มคุณภาพของใบ เช่น ความกรอบ ความเขียว และการลดไนเตรทสะสมในผักกาดหอม (Martínez-Moreno et al., 2024) น้ำหมักชีวภาพจึงมีศักยภาพใช้เป็น “สารละลายอินทรีย์ทดแทนบางส่วน” สำหรับไฮโดรพอนิกส์ และเป็นแนวทางสำคัญสู่ระบบ “Organic Hydroponics” ที่ปลอดภัยและยั่งยืนมากขึ้น

ความสามารถในการใช้แทนสารละลายไฮโดรพอนิกส์

น้ำหมักชีวภาพจะมีศักยภาพสูงในฐานะแหล่งธาตุอาหารและสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แต่ในเชิงเทคนิคแล้ว น้ำหมักยังมีข้อจำกัดสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายธาตุอาหารเคมีมาตรฐานที่ใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์ กล่าวคือ ความเข้มข้นของธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพมักแปรผันตามชนิดวัตถุดิบ อัตราส่วนผสม ระยะเวลาหมัก และสภาวะแวดล้อม ทำให้ค่า EC และ pH ของสารละลายยากต่อการควบคุมให้คงที่ในระยะยาว ขณะที่การปลูกพืชในระบบไฮโดรพอนิกส์ โดยเฉพาะในเชิงการค้า ต้องอาศัยความแม่นยำของค่า EC และ pH เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการเฉพาะของพืชในแต่ละระยะการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตาม งานวิจัยจำนวนมากในช่วงหลังชี้ให้เห็นว่า แม้น้ำหมักชีวภาพจะไม่สามารถ “ทดแทนทั้งหมด” ได้อย่างง่ายดาย แต่สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งธาตุอาหารทดแทน “บางส่วน” และเป็นแหล่งเสริม (supplement) ที่ช่วยยกระดับคุณภาพผลผลิตและลดการใช้ปุ๋ยเคมีได้อย่างมีนัยสำคัญในระบบไฮโดรพอนิกส์ โดยเฉพาะในผักกาดหอมซึ่งตอบสนองต่อกรดอะมิโน กรดอินทรีย์ และจุลินทรีย์ LAB ได้ดีเป็นพิเศษ

น้ำหมักชีวภาพในฐานะสารละลายทดแทนบางส่วนของปุ๋ยเคมี

จากการรายงานของ Chowdhury et al. (2024) การใช้ น้ำหมักจากสัตว์และพืชร่วมกับปุ๋ยเคมีในระบบไฮโดรพอนิกส์ สามารถลดการใช้ปุ๋ยเคมีลงได้ประมาณร้อยละ 30–50 โดยที่น้ำหนักสดและคุณภาพของผักกาดหอมไม่แตกต่างจากชุดที่ได้รับปุ๋ยเคมีเต็มอัตราอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า น้ำหมักชีวภาพสามารถทำหน้าที่เป็น “แหล่งไนโตรเจนและธาตุอาหารเสริม” ที่ช่วยแบ่งเบาภาระจากปุ๋ยเคมีได้จริงในเชิงปฏิบัติ กลไกสำคัญมาจากการที่ไนโตรเจนในน้ำหมักอยู่ในรูปกรดอะ

มิโนและเปปไทด์ซึ่งพืชดูดซึมได้ดี ประกอบกับการมีกรดอินทรีย์ที่ช่วยละลายฟอสเฟตและจุลธาตุในระบบ ทำให้พืชยังคงได้รับธาตุอาหารหลักและรองอย่างเพียงพอ แม้จะลดสัดส่วนปุ๋ยเคมีลง

บทบาทของน้ำหมักชีวภาพต่อการลดการสะสมไนเตรทในผักกินใบ

การใช้แหล่งไนโตรเจนอินทรีย์จากน้ำหมักชีวภาพมีผลต่อพลวัตของไนโตรเจนในพืชแตกต่างจากการใช้ในโตรเจนอนินทรีย์ในรูป NO_3^- หรือ NH_4^+ จากปุ๋ยเคมี โดยแหล่งไนโตรเจนอินทรีย์จะถูกปลดปล่อยและเปลี่ยนรูปอย่างค่อยเป็นค่อยไปผ่านกิจกรรมของจุลินทรีย์และเอนไซม์ในระบบรากและบริเวณไรโซสเฟียร์ ส่งผลให้ผักกาดหอมไม่ได้รับไนเตรทในระดับสูงฉับพลันเหมือนการให้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว (Bansal et al., 2022) นอกจากนี้ เมแทบอลไลต์จาก LAB และจุลินทรีย์ที่มากับน้ำหมักยังสามารถเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ nitrate reductase ในใบ ซึ่งมีหน้าที่เปลี่ยนไนเตรทให้เป็นไนไตรท์และกรดอะมิโน ทำให้ปริมาณไนเตรทที่คงค้างในใบลดลง งานวิจัยหลายฉบับจึงพบแนวโน้มสอดคล้องกันว่า การใช้น้ำหมักร่วมกับสารละลายไฮโดรพอนิกส์ช่วยลดการสะสมไนเตรทในผักใบได้ โดยเฉพาะในผักกาดหอมที่มีความไวต่อการสะสมไนเตรทจากการให้ปุ๋ยไนโตรเจนในระดับสูง

ผลของน้ำหมักชีวภาพต่อคุณภาพสารพฤกษเคมีของผักใบ

นอกจากปริมาณธาตุอาหารแล้ว น้ำหมักชีวภาพยังส่งผลต่อคุณภาพทางโภชนาการของผักใบผ่านการเพิ่มปริมาณสารพฤกษเคมี (phytochemicals) เช่น คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และวิตามินบางชนิด โดยกรดอินทรีย์ ฮอร์โมนพืชธรรมชาติ และกรดอะมิโนที่เกิดจากกระบวนการหมักช่วยกระตุ้นกระบวนการสังเคราะห์สารประกอบเหล่านี้ในใบพืช (Xu et al., 2012) ผักกาดหอมที่ได้รับน้ำหมักร่วมกับปุ๋ยเคมีมักมีสีเขียวเข้มมากขึ้น ใบหนาและกรอบ รวมทั้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์และแคโรทีนอยด์สูงขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับสมรรถนะการสังเคราะห์แสงที่ดีขึ้น การเพิ่มขึ้นของสารต้านอนุมูลอิสระและวิตามินในใบยังเป็นผลดีต่อคุณภาพด้านโภชนาการและความปลอดภัยทางอาหารของผู้บริโภค โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้แต่ปุ๋ยเคมีในอัตราสูงต่อเนื่อง

การใช้ระบบไฮโดรพอนิกส์อินทรีย์และความเหมาะสมกับ NFT/DFT

สำหรับแนวคิด “ไฮโดรพอนิกส์อินทรีย์” (organic hydroponics) น้ำหมักชีวภาพจากนมและจากปลาได้รับการเสนอให้เป็นหนึ่งในแหล่งสารละลายอินทรีย์ที่เหมาะสม เนื่องจากมีความอุดมไปด้วยกรดอะมิโน กรดอินทรีย์ และจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับระบบรากในสภาพไรดิินได้ดี งานของ Martínez-Moreno et al. (2024) แสดงให้เห็นว่า การใช้น้ำหมักอินทรีย์ที่ผ่านการกรองอย่างละเอียดและมีการปรับค่า pH-EC อย่างเหมาะสมในระบบ NFT และ DFT ทำให้ผักกาดหอมสามารถเจริญเติบโตและให้ผลผลิตใกล้เคียงกับการใช้ปุ๋ยเคมีมาตรฐาน อีกทั้งยังลดการสะสมไนเตรทและเพิ่มระดับสารประกอบต้านอนุมูลอิสระในใบ

อย่างไรก็ตาม การใช้ในระบบ NFT และ DFT จำเป็นต้องให้ความสำคัญกับการจัดการเชิงเทคนิคอย่างรอบคอบ เช่น การกรองตะกอนเพื่อลดการอุดตันรางและหัวจ่าย การเติมอากาศเพื่อป้องกันปัญหาการขาดออกซิเจน และการติดตามค่า EC-pH อย่างสม่ำเสมอ เพื่อหลีกเลี่ยงความผันผวนที่อาจกระทบต่อการดูดธาตุอาหารของพืช ดังนั้นในเชิงสรุป น้ำหมักชีวภาพจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะใช้ทดแทนบางส่วน และใช้ร่วมกับ สารละลายไฮโดรพอนิกส์ในระบบ NFT/DFT โดยเฉพาะในกรณีผักกาดหอมที่ตอบสนองต่อกรดอะมิโนและ LAB ได้ดี ซึ่งจะช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมี เพิ่มคุณภาพผลผลิต และสนับสนุนทิศทางการพัฒนาระบบไฮโดรพอนิกส์เชิงอินทรีย์ที่ยั่งยืนมากขึ้นในอนาคต

ความเป็นไปได้เชิงชีววิทยาของน้ำหมักต่อระบบ NFT และ DFT

การใช้น้ำหมักชีวภาพในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT และ DFT จำเป็นต้องพิจารณาปฏิกิริยาทางชีวภาพหลายประการที่อาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบปลูกพืช หนึ่งในประเด็นสำคัญคือ ความเสี่ยงของการอุดตัน (clogging) ซึ่งเกิดจากเศษอินทรีย์ ตะกอน หรือ bio-particles จากกระบวนการหมักที่ยังย่อยไม่สมบูรณ์ ตะกอนเหล่านี้สามารถสะสมในราง NFT หรือแผ่นโฟมของ DFT ทำให้รากพืชขาดน้ำหรือระบบไหลเวียนทำงานผิดปกติได้ (Torres & Somera, 2023) นอกจากนี้ น้ำหมักที่มีแบคทีเรียกรดแลคติก (LAB) สูงอาจทำให้ ค่า pH ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะช่วง 48–72 ชั่วโมงหลังเติมสารละลาย ซึ่งส่งผลกระทบต่อความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหารรอง เช่น Ca และ Mg ของผักกาดหอม (Ezziddine et al., 2021) จึงจำเป็นต้องมีการติดตามค่า pH และ EC อย่างสม่ำเสมอในระบบหมุนเวียน แม้ว่าน้ำหมักจะมีความเสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงของสารละลายในระบบ แต่ระบบ NFT และ DFT ที่มีการไหลเวียนของน้ำต่อเนื่องกลับช่วยเพิ่มระดับออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ เช่น *Lactobacillus* และ *Bacillus spp.* ทำให้เกิดความสมดุลทางชีวภาพได้ง่ายขึ้น (Park, 2024) อย่างไรก็ตาม น้ำหมักมีแนวโน้มก่อให้เกิด biofilm บริเวณผิวราก เมื่อมีจุลินทรีย์สะสมเป็นจำนวนมาก แม้ biofilm บางชนิดจะช่วยเพิ่มความทนทานต่อโรคราก แต่หากสะสมมากเกินไปอาจรบกวนการหายใจและการดูดซึมสารอาหารของรากพืช ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในระบบเลี้ยงรากแบบน้ำวน (Chowdhury et al., 2024)

ข้อจำกัดของปุ๋ยอินทรีย์ในระบบไฮโดรพอนิกส์

แม้ว่าสารละลายจากน้ำหมักชีวภาพจะมีธาตุอาหารและสารกระตุ้นการเจริญเติบโตจำนวนมาก แต่ข้อจำกัดที่สำคัญคือ ความไม่เสถียรของธาตุอาหาร ซึ่งแปรผันตามชนิดวัตถุดิบ กระบวนการหมัก และอัตราการเจือจาง ทำให้ N-P-K ไม่คงที่เทียบเท่าสารละลายเคมีมาตรฐาน (Torres, 2021) นอกจากนี้ ค่า pH ของสารละลายมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จาก

กระบวนการเมตาบอลิซึมของ LAB ทำให้ต้องมีการปรับ pH บ่อยครั้งเพื่อป้องกันการเกิดภาวะขาดธาตุอาหารรอง เช่น Ca และ Mg ซึ่งเป็นปัญหาที่พบบ่อยในผักกาดหอม (Park, 2024) ข้อจำกัดเพิ่มเติมที่เห็นได้ชัด คือ น้ำหมักชีวภาพมีส่วนของสารอินทรีย์ละลายน้ำสูง ทำให้ระดับ ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ลดลงง่าย หากไม่มีระบบเติมอากาศเหมาะสม ซึ่งทำให้เกิดรากเน่าในพืชอายุสั้น เช่น ผักกาดหอม (Chowdhury et al., 2024) นอกจากนี้ การเกิดตะกอนและสารแขวนลอยที่ไม่ละลายหมดเป็นสาเหตุของการอุดตันท่อในระบบ NFT และการสะสมของตะกอนในบ่อ DFT (Ezziddine et al., 2021) ทำให้ปุ๋ยอินทรีย์ต้องการการจัดการเฉพาะด้าน เช่น การกรองละเอียด การพักตะกอน และการเติมอากาศ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต้องเพิ่มในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบอินทรีย์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การใช้น้ำหมักชีวภาพเพื่อทดแทนหรือเสริมประสิทธิภาพของสารละลายธาตุอาหารในผักกาดหอมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากผักกาดหอมเป็นพืชใบที่ตอบสนองต่อธาตุอาหารในรูปกรดอะมิโน กรดอินทรีย์ และฮอร์โมนพืชธรรมชาติได้ดี ทำให้หลายงานวิจัยมุ่งศึกษาศักยภาพของน้ำหมักจากพืช สัตว์ และนม ในการเพิ่มผลผลิตและลดการสะสมไนเตรทของพืชใบในระบบปลูกโดยไม่ใช้ดิน (Chowdhury et al., 2024)

Xu et al. (2012) รายงานว่าน้ำหมักจากพืช เช่น วัชพืช ผลไม้ และสาหร่าย สามารถเพิ่มความพร้อมใช้ของธาตุอาหารรอง เช่น Mg, Ca, Fe และสารกระตุ้นการเจริญเติบโตอย่าง auxin และ cytokinin ส่งผลให้ผักกาดหอมมีการพัฒนารากดีขึ้น และมีใบใหญ่ขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ งานวิจัยนี้ยังพบว่า การใช้สารละลายอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมีสามารถลดปริมาณไนเตรทในใบลงได้มากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว เนื่องจากการปลดปล่อยไนโตรเจนแบบค่อยเป็นค่อยไปช่วยลดการสะสม NO_3^- ที่ใบอ่อน

ในประเทศไทย งานของปทุมพร และคณะ (2562) พบว่า น้ำหมักพืชผสม (plant fermented extract) อัตรา 1:500 สามารถเพิ่มน้ำหนักสด ใบสด และปริมาณคลอโรฟิลล์ของผักกาดหอมกรีนโอ๊คในระบบน้ำวนได้ดีเทียบเท่ากับปุ๋ยเคมีสูตรปกติ และยังเพิ่มจำนวนรากและความเขียวของใบโดยไม่เกิดพิษสะสมในระบบปลูก

Chowdhury et al. (2024) ทดลองใช้น้ำหมักจากปลาร่วมกับปุ๋ยเคมีในระดับ 30–50% พบว่าสามารถทดแทนปุ๋ยเคมีในระบบไฮโดรพอนิกส์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีผลผลิตผักกาดหอมไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากกลุ่มควบคุมที่ใช้ปุ๋ยเคมี 100% และยังเพิ่มความเข้มของสีเขียวในใบ

เนื่องจากมีกรดอะมิโนและ N ในรูปที่พืชดูดได้เร็ว นอกจากนี้ยังลดอาการขอบใบไหม้ (tipburn) เนื่องจากน้ำหมักให้ Ca และ Mg ในรูปที่เคลื่อนย้ายได้ดี

ในงานของ Tancharoen และคณะ (2020) พบว่าน้ำหมักปลาสามารถเพิ่มการย่อยสลายอินทรีย์อย่างรวดเร็วในสารละลาย ทำให้รากผักกาดหอมเจริญเร็ว ทั้งในระบบ NFT และ DFT อีกทั้งยังพบว่าปริมาณไนเตรทในใบลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีเพียงอย่างเดียว

น้ำหมักจากนมเป็นหัวข้อที่สอดคล้องกับโครงการของคุณโดยตรง เพราะมี LAB จำนวนมากซึ่งช่วยเพิ่มสุขภาพระบบรากและลดการสะสมไนเตรทในผักใบ งานของ Bansal et al. (2022) ระบุว่า LAB ช่วยเพิ่มกิจกรรมเอนไซม์ nitrate reductase ในใบผัก ส่งผลให้ไนเตรทถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโนได้มากขึ้น ทำให้ผักมีปริมาณไนเตรทต่ำกว่าวิธีการให้ปุ๋ยเคมีทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่ากรดแลคติก โปรตีนเอส และเปปไทด์ที่เกิดจากการย่อยโปรตีนในนม สามารถเพิ่มจำนวนรากฝอย เพิ่มอัตราการดูด N และ P และลดการติดเชื้อที่รากจากเชื้อราดิน เช่น *Pythium* และ *Fusarium* ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของโรครากเน่าในระบบไฮโดรพอนิกส์

ในประเทศไทย มีรายงานของสมพร และคณะ (2564) ระบุว่า การใช้น้ำหมักนมสดร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์น้ำช่วยเพิ่มน้ำหนักสดของผักกาดหอม และลดปริมาณไนเตรทลง 15–38% เมื่อเทียบกับการให้น้ำสังเคราะห์ปกติ

Martínez-Moreno et al. (2024) ศึกษาการใช้สารละลายอินทรีย์หมักในระบบ NFT พบว่าผักกาดหอมสามารถดูดซึมไนโตรเจนจากกรดอะมิโนได้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าปุ๋ยเคมี และยังลดการสะสมไนเตรทลงได้มากกว่า 40% โดยไม่ลดน้ำหนักสดของผัก งานนี้ยืนยันชัดเจนว่าการใช้สารละลายอินทรีย์ใน NFT สามารถเป็น “ทางเลือกจริง” ของปุ๋ยเคมีได้ หากมีการกรองและปรับค่า EC-pH อย่างเหมาะสม งานของ Hsieh et al. (2019) พบว่าการใช้น้ำหมักร่วมกับระบบ DFT ช่วยเพิ่มจำนวนรากและเสริมการดูด Ca-K ในผักกาดหอม ทำให้ลดอัตราการเกิด tipburn นอกจากนี้ยังพบการเพิ่มของสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น วิตามิน C และฟีนอลิก ในใบผักอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2.1 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของน้ำหมักชีวภาพต่อผักกาดหอม

ประเภทน้ำหมัก / แหล่งอินทรีย์	ระบบปลูก	ผลต่อการเจริญเติบโต	ผลต่อไนเตรท	หมายเหตุ	ผู้วิจัย (ปี)
น้ำหมักพืช	ไร้ดิน/ดิน	เพิ่มคลอโรฟิลล์ใบใหญ่ขึ้น	ลด	ฮอร์โมนพืชสูง	Xu et al. (2012)
น้ำหมักจากกากเลี้ยงปลา	NFT	ผลผลิตใกล้เคียงปุ๋ยเคมี	ลดเล็กน้อย	ต้องปรับ pH-EC	Ezziddine et al. (2021)
สารละลายอินทรีย์ผสม	Hydroponics	ทดแทนปุ๋ยเคมีบางส่วน	ลด	ต้องเติม DO	Chowdhury et al. (2024)
น้ำหมักนม (LAB)	ผักใบ	เพิ่มราก & น้ำหนักสด	ลดเด่นชัด	LAB เพิ่ม nitrate reductase	Bansal et al. (2022)
ปุ๋ยอินทรีย์หมัก	Hydroponic Review	ใช้ได้ดีหากปรับระบบ	ขึ้นกับสูตร	วิเคราะห์ระบบอินทรีย์	Park (2024)
ปุ๋ยอินทรีย์หมัก	DFT	เพิ่ม Ca ในใบ ลด tipburn	ลด	ใบแข็งแรงขึ้น	Hsieh et al. (2019)
น้ำหมักนม	ดิน/น้ำ	เพิ่มน้ำหนักสด	ลด 15–38%	งานไทยเหมาะสมกับผักกาดหอม	สมพร et al. (2564)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การแยกจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นบริเวณเขตรากพืช

ตัวอย่างผักกาดหอมที่นำมาแยกแบคทีเรียบริเวณเขตรากพืช

เก็บตัวอย่างผักกาดหอมที่ปลูกในระบบการปลูกพืชโดยคัดเลือกต้นที่มีการเจริญเติบโตดี ไม่มีอาการของโรค ในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT (Nutrient Film Technique) ซึ่งตัวอย่างที่ได้มานั้นทำการแยกแบคทีเรียจากส่วนต่างๆ ดังนี้

การแยกแบคทีเรียจากบริเวณรอราก (Ectorrhizosphere)

นำตัวอย่างสารละลายธาตุอาหารจากแหล่งปลูกที่เก็บมาในแต่ละครั้งมาเจือจางด้วยวิธีการ ten-fold serial dilution ตั้งแต่ 10^0 ถึง 10^{-8} หลังจากนั้นนำสารละลายที่เจือจาง 3 ความเข้มข้นสุดท้ายนำไปเกลี่ย (spread) ให้ทั่วบนจานเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อ PTYGA [จากการเตรียมใน 1 ลิตรประกอบด้วย peptone 0.25 กรัม tryptone 0.25 กรัม yeast extract 0.5 กรัม น้ำตาลกลูโคส 0.5 กรัม $MgSO_4$ 3 กรัม $CaCl_2$ 3.5 กรัม และวุ้น 18 กรัม อย่างละ 3 ซ้ำ นำไปบ่มไว้ที่อุณหภูมิห้อง นาน 24-72 ชั่วโมง และจากนั้นทำการแยกโคโลนีเดี่ยว (single colony) ที่เกิดขึ้นบนอาหารแต่ละชนิดมาทำให้บริสุทธิ์บนอาหาร NA แล้วทำการเก็บรักษาเพื่อใช้ในการทดสอบต่อไป

วิธีการแยกแบคทีเรียครอบครองราก (Root colonizing)

นำรากมาล้างผ่านน้ำไหลเบาๆ ชั่งน้ำหนักรากในแต่ละซ้ำจำนวน 1 กรัมไปบดด้วยโกร่งอบฆ่าเชื้อ ค่อยๆ เติมน้ำผ่านการฆ่าเชื้อลงไปจนครบ 10 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ไปทำการเจือจางด้วยวิธีการ ten-fold serial dilution จากนั้นทำการแยกจุลินทรีย์เช่นเดียวกับวิธีการแยกแบคทีเรียจากบริเวณรอราก

วิธีการแยกแบคทีเรียจากบริเวณผิวราก (Rhizoplane)

นำรากมาล้างผ่านน้ำไหลเบาๆ ชั่งน้ำหนักรากในแต่ละซ้ำจำนวน 1 กรัมใส่ในหลอดทดลองที่มีน้ำผ่านการฆ่าเชื้อ 10 มิลลิลิตร ปั่นด้วยเครื่องเขย่า ที่ความเร็วรอบ 2,500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที

แยกกรากออกจากสารละลาย นำเชื้อที่ได้ไปทำการเจือจางด้วยวิธีการ ten-fold serial dilution จากนั้นทำการแยกจุลินทรีย์เช่นเดียวกับวิธีการแยกแบคทีเรียจากบริเวณรอบราก

วิธีการแยกแบคทีเรียที่เจริญอยู่ภายในเซลล์ราก (Endophytic bacteria)

นำรากมาแช่ในสารละลาย sodium hypochlorite ความเข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 1 นาที หลังจากนั้นแช่ด้วย hydrogen peroxide ความเข้มข้น 36 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 30 วินาที แล้วล้างด้วยน้ำกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อเรียบร้อยแล้ว 3 ครั้ง นำรากที่ได้ไปบดด้วยโกร่งอบฆ่าเชื้อค่อยๆ เติมน้ำกรองที่ผ่านการฆ่าเชื้อลงไปจนครบ 10 มิลลิลิตร นำสารละลายที่ได้ทำการเจือจางด้วยวิธีการ ten-fold serial dilution จากนั้นทำการแยกจุลินทรีย์เช่นเดียวกับวิธีการแยกแบคทีเรียจากบริเวณรอบราก

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการย่อยสลายนม

การทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส (Proteolytic Activity)

นำจุลินทรีย์ที่แยกได้มาทำการทดสอบการสร้างเอนไซม์โปรติเอสโดยวิธี Point inoculation technique ลงบนอาหารแข็ง Skim milk agar ทำการเลี้ยงเชื้อที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ จากนั้นนำมาวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของการเกิดวงใส

การทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ลิพอลิติก (Lipolytic Activity)

นำจุลินทรีย์ที่แยกได้มาทำการทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ลิพอลิติกโดยใช้ spot inoculation technique บนอาหาร Spirit blue agar ที่มีส่วนผสมของไขมันจากนมทำการเลี้ยงเชื้อที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลอง 5 ซ้ำ บันทึกผลโดยการสังเกตการเกิดสีน้ำเงินเข้มบนอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการเจริญเติบโตของพืช

คัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีความสามารถที่ผ่านการทดสอบ กิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสและ การทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ลิพอลิติก โดยให้ผลเป็นบวกทั้งคู่มาทำการทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการเจริญเติบโตของพืช ดังนี้

ความสามารถผลิตสารจำพวก indole acetic acid

การผลิต indole-3-acetic acid (IAA) ของแบคทีเรีย โดยประยุกต์วิธี colorimetric method โดยเตรียมแบคทีเรียเข้มข้นประมาณ 10^7 cfuต่อมิลลิลิตร ใส่ลงในอาหาร JM บ่มเชื้อที่ 30 องศาเซลเซียส 72 ชั่วโมง และเติมสารละลาย Salkowski's reagent วัดปริมาณ โดยเปรียบเทียบค่าดูดกลืนแสง

จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (Hartman et al., 1983) เทียบกับสารละลายมาตรฐาน standard IAA (Sigma, US)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าการผลิตรวดอิน โคล-3-อะซีติก (IAA) จากแบคทีเรียทั้ง 60 ไอโซเลต ดำเนินการโดยแปลงค่าการดูดกลืนแสงเป็นปริมาณ IAA ตามสมการมาตรฐาน และคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูลด้วยการทดสอบ Shapiro–Wilk เพื่อประเมินความเป็นปกติ และ Levene’s test เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของความแปรปรวน ก่อนเปรียบเทียบความแตกต่างของปริมาณ IAA ระหว่างไอโซเลตทั้งหมดด้วย Kruskal–Wallis test ซึ่งเหมาะสมสำหรับข้อมูลที่ไม่เป็นปกติ โดยเมื่อตรวจพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจึงใช้ Tukey’s Honestly Significant Difference (Tukey HSD) เพื่อระบุไอโซเลตที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนเพิ่มเติม นอกจากนี้ได้ทำการจัดกลุ่มไอโซเลตตามระดับการผลิต IAA ด้วยวิธี hierarchical clustering (Ward’s method) บนข้อมูลที่ได้ผ่านการปรับมาตรฐานแล้ว

ความสามารถในการผลิตแอมโมเนีย

ประเมินศักยภาพของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์ในการผลิตแอมโมเนีย (NH_4^+) ได้มีการใช้วิธีเชิงสี (colorimetric method) ซึ่งอาศัยหลักการที่ว่าแอมโมเนียสามารถทำปฏิกิริยากับสารละลาย Nessler’s reagent ให้เกิดสีที่มีความเข้มตามปริมาณแอมโมเนียที่ปรากฏ (Cappuccino & Sherman, 2001) โดยนำโคโลนีเดี่ยวของแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์นำมาเลี้ยงบนอาหาร LB agar หลังจากนั้นจึงนำโคโลนีบริสุทธิ์ที่มีเชื้อประมาณ 10^7 CFU/mL มาปลูกลงในอาหาร peptone broth บ่มที่อุณหภูมิ 30°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนและปลดปล่อยแอมโมเนียเข้าสู่สารละลาย หลังจากครบกำหนดเวลาบ่ม ตัวอย่างถูกปั่นเหวี่ยงเพื่อลดความขุ่นและแยกเอาเฉพาะ supernatant ที่ปราศจากเซลล์เพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณแอมโมเนีย ส่วน supernatant แต่ละตัวอย่างนำมาผสมกับ Nessler’s reagent ซึ่งเป็นสารตรวจวัดแอมโมเนียโดยตรง โดยเติมรีเอเจนต์ปริมาตรคงที่ลงในตัวอย่าง ทั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาทีเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสีอย่างสมบูรณ์ จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 530 nm ด้วยเครื่อง UV–Vis spectrophotometer ทำข้อมูลที่ได้ไปเทียบกับสารละลายมาตรฐาน ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยเริ่มจากการตรวจสอบการกระจายตัวของข้อมูลด้วยการทดสอบความเป็นปกติ (Shapiro–Wilk test) ซึ่งพบว่าส่วนใหญ่ของข้อมูลไม่มีการกระจายแบบปกติ จึงใช้การทดสอบ Kruskal–Wallis ในการประเมินความแตกต่างของความสามารถในการผลิตแอมโมเนียระหว่างสายพันธุ์ เมื่อพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) จึงทำการวิเคราะห์ระยะหลังด้วยวิธี Dunn’s post-hoc test เพื่อตรวจสอบความ

แตกต่างแบบรายคู่ พร้อมสร้าง heatmap แสดงค่า p-value สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสายพันธุ์อย่างเป็นระบบ นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานในรูปแบบ bar chart และตารางเชิงสถิติเพื่อสรุปประสิทธิภาพในการผลิตแอมโมเนียของสายพันธุ์ทั้งหมด ช่วยให้สามารถจำแนกกลุ่มที่ให้ผลการผลิตสูง ปานกลาง และต่ำได้อย่างชัดเจนและรองรับการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีศักยภาพสูงสำหรับงานประยุกต์ด้านเกษตรกรรมหรือการพัฒนาผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ในขั้นตอนต่อไป

ความสามารถละลายฟอสเฟตของแบคทีเรีย

การประเมินความสามารถละลายฟอสเฟตของแบคทีเรียดำเนินการโดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ Pikovskaya's agar ซึ่งประกอบด้วยแหล่งฟอสฟอรัสในรูปของ tricalcium phosphate (TCP) ที่ไม่ละลายน้ำ (Pikovskaya, 1948) เตรียมสารแขวนลอยของเชื้อแบคทีเรียโดยนำโคโลนีบริสุทธิ์อายุ 24 ชั่วโมงมาปั่นหรือกระจายในน้ำเกลือปลอดเชื้อให้มีความขุ่นใกล้เคียงมาตรฐาน McFarland 0.5 เพื่อให้ได้ความหนาแน่นของเซลล์ที่สม่ำเสมอ เมื่อพร้อมแล้วจึงหยอดเชื้อปริมาตร 5–10 ไมโครลิตรลงบนผิวของ Pikovskaya's agar ในแต่ละเพลต และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 28–30°C เป็นเวลา 3–7 วัน ตามแนวทางที่ใช้ทั่วไปในการประเมินเชื้อที่ละลายฟอสเฟต (Nautiyal, 1999; Satyaprakash et al., 2017) หลังการบ่ม ทำการสังเกตและวัดการเกิดแถบใส (halo zone) รอบโคโลนีให้ บันทึกผลเป็น + เมื่อพบ halo zone อย่างชัดเจน และ – เมื่อไม่พบ

การจำแนกชนิดจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค 16S rDNA Sequencing

การจำแนกชนิดจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้ดำเนินการด้วยเทคนิค 16S rDNA sequencing โดยสกัดจีโนมิกดีเอ็นเอจากแบคทีเรียบริสุทธิ์ด้วยชุดสกัด **Bacteria Genomic DNA Kit (Geneaid Biotech Ltd., Taiwan)** ตามคู่มือผู้ผลิต โดยมีการทำลายผนังเซลล์ด้วย buffer และ proteinase K ต่อด้วยการจับดีเอ็นเอบนซิลิกาเมมเบรนและทำการชะล้างเพื่อลบล้างปนเปื้อน ก่อนชะล้างดีเอ็นเอออกด้วย elution buffer ปริมาณดีเอ็นเอและความบริสุทธิ์ถูกตรวจสอบด้วย NanoDrop spectrophotometer โดยตัวอย่างที่มีค่า A260/A280 ระหว่าง 1.8–2.0 ถือว่ามีคุณภาพเพียงพอในการทำ PCR ตัวอย่างที่ต่ำกว่า 1.8 ต้องสกัดซ้ำ

การเพิ่มปริมาณชิ้นชิ้น 16S rDNA ทำโดยใช้ปฏิกิริยา Polymerase Chain Reaction (PCR) โดยใช้ไพรเมอร์สากลที่ครอบคลุมยีน 16S rDNA คือ fD1 (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') และ rP2 (5'-ACGGCTACCTTGTTACGACTT-3') (Weisburg et al., 1991) ส่วนผสมปฏิกิริยา PCR มีปริมาตรรวม 25 μ L ประกอบด้วย Quick Taq™ HS DyeMix (Toyobo, Japan) ไพรเมอร์คู่ละ 1 μ L (10

μM) ดีเอ็นเอ template 1–2 μL และน้ำปราศจาก DNase/RNase จนครบปริมาตร เจือปนไปปฏิกิริยา PCR ประกอบด้วย initial denaturation ที่ 94 °C เป็นเวลา 3 นาที ตามด้วย 30–35 รอบของ denaturation (94 °C, 30 วินาที), annealing (55 °C, 30 วินาที) และ extension (72 °C, 1 นาที) ปิดท้ายด้วย final extension 72 °C 5 นาที ผลิตภัณฑ์ PCR ถูกตรวจสอบด้วย agarose gel electrophoresis 1.2% และเลือกแถบที่มีขนาดประมาณ 1.5 kb เพื่อนำส่งลำดับเบสด้วยวิธี Sanger sequencing โดยใช้เครื่อง ABI PRISM 3730XL Automated DNA Sequencer (Applied Biosystems, USA) ผ่านบริการของ BioBasic Inc. ไฟล์ผลลัพธ์ลำดับเบสในรูปแบบ chromatogram (.ab1) ถูกตรวจสอบคุณภาพและตัดส่วนที่มีสัญญาณคุณภาพต่ำด้วยโปรแกรม Chromas และประกอบลำดับเบส (contig assembly) ด้วย BioEdit เพื่อสร้าง consensus sequence ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วย BLASTn ในฐานข้อมูล NCBI เพื่อระบุชนิดของจุลินทรีย์ โดยใช้เกณฑ์การจำแนกระดับชนิดที่ $\geq 99\%$ และระดับสกุลที่ $\geq 97\%$ (Kim et al., 2014) สำหรับตัวอย่างที่ต้องการยืนยันความสัมพันธ์เชิงวิวัฒนาการเพิ่มเติม มีการสร้าง phylogenetic tree โดยวิธี Neighbor-Joining (NJ) หรือ Maximum Likelihood (ML) ผ่านโปรแกรม MEGA 11 เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ของสายพันธุ์อ้างอิงและเชื้อที่ศึกษา วิธี 16S rDNA sequencing จึงเป็นมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางและมีความน่าเชื่อถือสูงสำหรับการจำแนกจุลินทรีย์ แม้ในกรณีที่มีวิธีชีวเคมีหรือสัณฐานวิทยาไม่สามารถแยกความแตกต่างได้ (Janda & Abbott, 2007)

การพัฒนานวัตกรรมน้ำหมักชีวภาพนมสดพร้อมใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์

การผลิตน้ำหมักชีวภาพนมสดแบบผงเริ่ม

ทำการคัดเลือกน้ำนมดิบที่ไม่ผ่านมาตรฐานคุณภาพตามเกณฑ์ของกรมปศุสัตว์ ซึ่งมักเป็นน้ำนมที่มีค่าคุณภาพผิดปกติ เช่น pH ต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 6.8 จำนวนจุลินทรีย์รวมสูงกว่า 2×10^5 cfu/mL มีจำนวนโซมาติกเซลล์มากกว่า 300,000 เซลล์/mL หรือมีลักษณะสี-กลิ่นผิดปกติ น้ำนมดังกล่าวไม่เหมาะสมต่อการบริโภคหรือการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร แต่ยังคงเป็นแหล่งสารอาหารสำคัญ เช่น แลคโตส โปรตีนกรดอะมิโน แร่ธาตุ Ca, P และวิตามิน ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบต้นทุนต่ำสำหรับการผลิตสารละลายธาตุอาหารพืชด้วยกระบวนการหมักทางชีวภาพ

น้ำนมดิบที่ได้มานำมาผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 50–60 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที เพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ปนเปื้อนบางส่วน จากนั้นปล่อยให้เย็นลงจนถึงอุณหภูมิประมาณ 30–35 องศาเซลเซียส ก่อนเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์คัดเลือกในอัตราส่วน 5–10% (v/v) โดยจุลินทรีย์ที่คัดเลือกมีคุณสมบัติเด่น เช่น การผลิตเอนไซม์ย่อยโปรตีนและแลคโตส การละลายธาตุฟอสเฟต การสร้าง

ฮอร์โมนพืชจำพวก IAA และการปรับเปลี่ยนรูปแร่ธาตุให้อยู่ในรูปที่พืชดูดใช้ได้ กระบวนการหมัก ดำเนินที่อุณหภูมิ 30–35 องศาเซลเซียส นาน 48–72 ชั่วโมง ภายในระบบหมักที่สามารถระบายก๊าซได้ ระหว่างการหมัก จุลินทรีย์จะเปลี่ยนแลคโตสเป็นกรดแลคติกและสารประกอบอินทรีย์อื่น ๆ ย่อย โปรตีนในน้ำนมเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์ ตลอดจนปรับเปลี่ยนแร่ธาตุรูปไม่ละลายน้ำให้กลายเป็น รูปที่พืชสามารถใช้ประโยชน์ได้ ส่งผลให้น้ำหมักที่ได้เป็นสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดอินทรีย์ กรดอะมิโน ธาตุอาหารพืช และสารกระตุ้นการเจริญเติบโต ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้ทดแทนหรือ เสริมการใช้ปุ๋ยเคมีในระบบไฮโดรพอนิกส์

หลังเสร็จสิ้นกระบวนการหมัก น้ำหมักถูกกรองเพื่อลดสิ่งตกค้าง โดยใช้กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ผ่านชุดกรอง Büchner funnel ร่วมกับปั๊มสุญญากาศที่แรงดันประมาณ -0.8 ถึง -0.9 bar เพื่อให้ได้สารละลายใส ลดการอุดตันในระบบ NFT และเพิ่มความเสถียรต่อการทำให้แห้ง หลังจากนั้นมีการเติมสารช่วยทำแห้ง เช่น มอลโทเดกซ์ทริน หรือ gum arabic ในอัตราร้อยละ 10–20 เพื่อช่วยให้ ผงละลายน้ำได้ดี ไม่จับตัวเป็นก้อน และคงสภาพความชื้นต่ำก่อนเข้าสู่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

การทำให้แห้งดำเนินการด้วยเครื่อง Freeze Dryer (BÜCHI Lyovapor: L-200) โดยเริ่มจากการ แช่เยือกสารละลายที่อุณหภูมิ -40 ถึง -50 องศาเซลเซียสอย่างน้อย 6–12 ชั่วโมง จากนั้นเข้าสู่ กระบวนการอบแห้งปฐมภูมิภายใต้ความดัน 0.08–0.2 mbar ที่อุณหภูมิ -10 ถึง 0 องศาเซลเซียส เพื่อให้ น้ำแข็งระเหิดโดยตรงเป็นไอ ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 24–36 ชั่วโมง แล้วจึงเข้าสู่การอบแห้งทุติยภูมิ ที่อุณหภูมิ 20–30 องศาเซลเซียส นาน 6–12 ชั่วโมง เพื่อกำจัดความชื้นที่เหลือให้ต่ำกว่า 5% ผลลัพธ์ที่ได้ คือผงน้ำหมักชีวภาพที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี สีเหลืองอ่อน ไม่จับตัวเป็นก้อน พร้อมสำหรับใช้เป็น แหล่งธาตุอาหารในระบบไฮโดรพอนิกส์

การวางแผนการทดลอง

ในการประเมินประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพนมสดแบบผงและสูตรน้ำหมักชนิดต่าง ๆ ผู้วิจัยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ประกอบด้วยชุด การทดลองทั้งหมด 7 ชุดการทดลอง แต่ละชุดประกอบด้วย 5 ซ้ำ โดยแต่ละซ้ำมีจำนวนต้นผักกาดหอม 100 ต้น ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันในโรงเรือน เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลของชนิดสารละลาย ธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมได้อย่างถูกต้องและลดอิทธิพลของปัจจัยแวดล้อมที่อาจ แปรปรวน ชุดการทดลองประกอบด้วย

T1: ชุดควบคุม (ใช้น้ำเปล่า ไม่เติมสารละลายธาตุอาหาร)

T2: น้ำหมักชีวภาพนมสดโดยกระบวนการทางชีวภาพ

T3: สารละลายธาตุอาหารอินทรีย์ทางการค้า

T4: สารละลายธาตุอาหารตามกรรมวิธีของเกษตรกร

T5: น้ำหมักชีวภาพนมสด + สารละลายอินทรีย์การค้า อัตราส่วน 1:1

T6: น้ำหมักชีวภาพนมสด + สารละลายตามสูตรเกษตรกร อัตราส่วน 1:1

T7: สารละลายอินทรีย์การค้า + สารละลายตามสูตรเกษตรกร อัตราส่วน 1:1

ชุดการทดลองถูกจัดวางแบบสุ่มภายในโรงเรือนเพื่อลดอคติจากความแตกต่างของแสง ความชื้น และการถ่ายเทอากาศในแต่ละตำแหน่ง

การเตรียมต้นกล้า

เมล็ดผักกาดหอมถูกเพาะในกระบะฟองน้ำแบบ 1 เมล็ดต่อ 1 ก้อน โดยใช้ระดับน้ำสูงประมาณ 3 เซนติเมตรเพื่อรักษาความชื้น เมื่อเมล็ดงอกและมีใบจริง 2-3 ใบ อายุประมาณ 14 วัน มีความสูง 1-2 เซนติเมตร ต้นกล้าจะถูกย้ายปลูกลงในระบบ NFT ของแต่ละชุดการทดลอง

การปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT

การทดลองปลูกดำเนินการที่ฟาร์มอับดุลเลาะ ไฮโดรฟาร์ม เขตมีนบุรี กรุงเทพมหานคร ระบบ NFT มีลักษณะการไหลของสารละลายเป็นแผ่นฟิล์มบางหนา 2-3 มิลลิเมตรในรางปลูกที่มีความกว้าง 5-35 เซนติเมตร สูง 5-10 เซนติเมตร และยาว 5-20 เมตร สารละลายถูกปั๊มให้หมุนเวียนต่อเนื่องด้วยอัตราไหล 1-2 ลิตรต่อนาที่ต่อรางก่อนการปลูกผู้วิจัยเตรียมสารละลายธาตุอาหารแต่ละชุดทดลอง ปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5.5-6.5 และปรับค่า EC ให้อยู่ในช่วง 1.0-1.8 mS/cm พร้อมทั้งบันทึกปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์ของแต่ละสูตร

การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตและคุณภาพ

เมื่อผักกาดหอมถึงอายุเก็บเกี่ยว ทำการวัดค่าต่าง ๆ ได้แก่ ความสูงของต้น วัดความสูงตั้งแต่บริเวณโคนต้นจนถึงบริเวณข้อบนสุดของต้น ความกว้างทรงพุ่ม วัดความกว้างทรงพุ่มจากบริเวณใบด้านที่กว้างสุดฝั่งหนึ่ง ไปยังด้านที่กว้างที่สุดอีกฝั่งหนึ่งของต้น จำนวนใบ นับจำนวนใบที่มีการขยายบนแผ่นใบอย่างสมบูรณ์และไม่มีบาดแผลจากการรบกวนของโรคและแมลง น้ำหนักสดของรากและลำต้น/ใบ น้ำหนักแห้งของรากและลำต้น/ใบ หลังอบที่ 70°C นาน 72 ชั่วโมง วิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณไนเตรท และคุณภาพทางกายภาพ

การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ด้วย ANOVA ตามแบบแผน CRD หากพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.05$ จะทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) และรายงานผลในรูปค่าเฉลี่ย \pm ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พร้อมตัวอักษรกำกับกลุ่มค่าที่แตกต่างกัน

การเตรียมชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และ PCA

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ได้จากค่าเฉลี่ยของตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและตัวแปรด้านคุณภาพของผักสลัดกรีน โอ๊ค ณ วันเก็บเกี่ยวภายใต้ 7 ชุดการทดลอง ตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์ประกอบด้วย

1. ตัวแปรด้านการเจริญเติบโต (Growth variables) ความกว้างทรงพุ่ม (cm), จำนวนใบ (ใบ), ความสูงต้น (cm), ความยาวราก (cm), น้ำหนักสดต่อต้น (g) และน้ำหนักแห้งต่อต้น (g)

2. ตัวแปรด้านคุณภาพ (Quality variables) ปริมาณ Chlorophyll a, Chlorophyll b และ Total chlorophyll (mg/g น้ำหนักสด) และปริมาณไนเตรทสะสมในต้น (mg/kg FW)

ข้อมูลทั้งหมดถูกรวบรวมในรูปเมทริกซ์ขนาด 7×10 (7 ชุดการทดลอง \times 10 ตัวแปร) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ การสร้าง heatmap และวิเคราะห์ PCA

ทำการคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's correlation coefficient, r) ระหว่างตัวแปรทั้งหมด 10 ตัว โดยใช้ค่าเฉลี่ยของแต่ละตัวแปรในแต่ละชุดการทดลอง ($n = 7$) เพื่อประเมินความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง ตัวแปรการเจริญเติบโตด้วยตัวเอง ตัวแปรการเจริญเติบโตกับตัวแปรด้านคลอโรฟิลล์ ตัวแปรทั้งหมดกับปริมาณไนเตรท ค่าความสัมพันธ์ r อยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยพิจารณาความแรงของความสัมพันธ์ตามเกณฑ์ทั่วไป ($|r|$ ใกล้ $1 =$ ความสัมพันธ์สูง) และทำการทดสอบนัยสำคัญทางสถิติของแต่ละคู่ตัวแปรด้วยสถิติ t-test เพื่อให้ได้ค่า p-value โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $\alpha = 0.05$ ค่าความสัมพันธ์และ p-value ถูกจัดเรียงให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ และนำเสนอเป็นค่า r แสดงบนแนวทแยงบน และค่า p-value แสดงในวงเล็บใต้ค่า r เพื่อให้เห็นทั้งขนาดและนัยสำคัญของความสัมพันธ์ จากนั้นนำเมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์ดังกล่าวไปสร้างเป็น แผนภาพ Heatmap โดย แกน X และ Y ของ Heatmap แทนชื่อตัวแปรแต่ละตัว ช่องตัดกันของแถว-คอลัมน์แสดงค่า r และระบายสีตามขนาดของค่าสหสัมพันธ์ โดยมีแถบสี (color bar) กำกับสเกลของค่า r วิเคราะห์ด้วยโปรแกรม XLSTAT ในโปรแกรม Microsoft Excel

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) และการสร้าง PCA Biplot

ทำการลดมิติของข้อมูลและทำความเข้าใจความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างระหว่างชุดการทดลอง (T1–T7) กับตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพพืช จึงทำการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) จากชุดข้อมูลตัวแปรทั้ง 10 ค่าตัวแปรทำ PCA ข้อมูลของแต่ละตัวแปรจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปค่ามาตรฐาน (standardized scores หรือ Z-score) โดยหักค่าเฉลี่ยและหารด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวแปร เพื่อลดอิทธิพลจากความแตกต่างของหน่วยและสเกลของตัวแปร จากนั้นจึงคำนวณ eigenvalues และ eigenvectors จากเมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม (covariance matrix) ของข้อมูลมาตรฐาน เลือกใช้เฉพาะองค์ประกอบหลักลำดับที่ 1 (PC1) และลำดับที่ 2 (PC2) ซึ่งมีค่า eigenvalue สูงที่สุดและสามารถอธิบายความแปรปรวนรวมของข้อมูลได้มากที่สุด (มากกว่า 90% ของความแปรปรวนทั้งหมด) แล้วนำคะแนนของแต่ละชุดการทดลอง (scores) และค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตัวแปร (loadings) มาแสดงในรูปแบบ PCA Biplot การตีความกราฟ Biplot พิจารณาทั้ง (1) ตำแหน่งของจุดแต่ละ Treatment บนแกน PC1–PC2 ซึ่งสะท้อนลักษณะรวมของตัวแปรทั้งหมด และ (2) ทิศทางของลูกศรตัวแปร หากจุดของชุดทดลองใดอยู่ในทิศเดียวกับลูกศรของตัวแปรนั้น แสดงว่าชุดทดลองนั้นมีค่าสูงในตัวแปรดังกล่าว ในทางตรงข้าม หากอยู่คนละทิศหรือห่างจากจุดกำเนิดมากก็สะท้อนค่าต่ำหรือลักษณะตรงข้าม

บทที่ 4

ผลการทดลอง

การแยกจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นบริเวณเขตรากพืช

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า บริเวณผิวยราก (rhizoplane) เป็นแหล่งที่พบจำนวนไอโซเลตแบคทีเรียสูงที่สุดในฝักกาดหอมทั้งสามชนิด โดยเฉพาะใน Red coral และ Cos ซึ่งให้จำนวน 54 และ 50 ไอโซเลตตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวยรากเป็นพื้นที่ที่จุลินทรีย์สามารถยึดเกาะได้ดีตามธรรมชาติ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่มีการสะสมของสารคัดหลั่งจากราก (root exudates) อาทิ น้ำตาล กรดอินทรีย์ และกรดอะมิโน ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย ส่งผลให้ความหนาแน่นและความอุดมสมบูรณ์ของชุมชนจุลินทรีย์บนผิวยรากสูงกว่าบริเวณอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางนิเวศวิทยา (ตารางที่ 4.1)

สำหรับแบคทีเรียกลุ่มแบคทีเรียที่เจริญอยู่ในเซลล์ราก (endophytic bacteria) พบมากที่สุดที่ฝักกาดหอม Butterhead จำนวน 16 ไอโซเลต รองลงมาคือ Red coral จำนวน 14 ไอโซเลต และ Cos 10 ไอโซเลต ความแตกต่างนี้สะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างทางกายภาพของราก ความหนาแน่นของผนังเซลล์ รวมถึงองค์ประกอบของเมตาบอไลต์รอง (secondary metabolites) อาจมีบทบาทต่อความสามารถในการเป็นเจ้าบ้าน (host capacity) ของแต่ละชนิดพืชต่อแบคทีเรีย endophyte จึงทำให้ระดับการตั้งถิ่นฐานภายในเซลล์รากแตกต่างกันระหว่างสายพันธุ์ฝักกาดหอม (ตารางที่ 4.1)

ในส่วนของจุลินทรีย์ที่พบใน สาระละลายธาตุอาหาร (ectorrhizosphere) ซึ่งเป็นบริเวณรอบรากที่สัมผัสกับสารละลายโดยตรง พบว่า Red coral มีจำนวนไอโซเลตสูงที่สุดถึง 42 ไอโซเลต ขณะที่ Cos และ Butterhead มีจำนวนต่ำกว่า ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าระบบ NFT ที่ใช้ปลูก Red coral อาจเอื้อต่อการเจริญของแบคทีเรียอิสระมากกว่า อาจเนื่องมาจากอัตราการไหลเวียนของสารละลายที่เหมาะสม หรือการปลดปล่อยสารคัดหลั่งสู่สารละลายมากกว่าชนิดอื่น ทำให้มีแหล่งคาร์บอนที่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ในระบบเปิดดังกล่าว (ตารางที่ 4.1)

สำหรับกลุ่มแบคทีเรียที่สามารถตั้งถิ่นฐานภายในชั้นผิวหรือระหว่างเซลล์ราก (root-colonizing bacteria) จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่บริเวณเนื้อเยื่อชั้นผิวยรากโดยไม่เข้าสู่เซลล์ เมื่อประเมินจำนวนพบว่า พบว่าฝักกาดหอม Cos มีจำนวนสูงที่สุด 7 ไอโซเลต มากกว่า Red coral และ

Butterhead ความแตกต่างนี้อาจสะท้อนถึงโครงสร้างของระบบราก เช่น ความยาว ความแตกแขนง หรือความพรุนของเซลล์ ที่อาจเอื้อต่อการแทรกซึมและตั้งถิ่นฐานของจุลินทรีย์กว่าชนิดอื่น (ตารางที่ 4.1)

เมื่อพิจารณาจำนวนแบคทีเรียทั้งหมดจากทุกตำแหน่ง พบว่า Red coral เป็นสายพันธุ์ที่มีความหลากหลายและความอุดมสมบูรณ์ของจุลินทรีย์สูงที่สุดรวม 114 ไอโซเลต รองลงมาคือ Cos มีจำนวน 81 ไอโซเลต และ Butterhead 74 ไอโซเลต แสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านพันธุกรรมของพืชและลักษณะทางสรีรวิทยาของรากมีผลต่อองค์ประกอบชุมชนจุลินทรีย์ในระบบ NFT อย่างชัดเจน ความแตกต่างของจุลินทรีย์ในแต่ละบริเวณของระบบรากมีความสำคัญต่อการคัดเลือกแบคทีเรียที่มีศักยภาพไปใช้ในการหมักนมเพื่อผลิตสารละลายธาตุอาหาร โดยเฉพาะสายพันธุ์ที่มาจากบริเวณ rhizoplane และ endophyte ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (ตารางที่ 4.1)

ตารางที่ 4.1 จำนวนไอโซเลตแบคทีเรียที่แยกได้จากตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบรากผักกาดหอม 3 สายพันธุ์ที่ปลูกในระบบ NFT

ชนิดผักกาดหอม	Endophytic	Rhizoplane	Root-colonizing	Ectorrhizosphere	รวมทั้งหมด
Red coral	14	54	4	42	114
Cos	10	50	7	14	81
Butterhead	16	32	3	23	74

จากนั้นนำแบคทีเรียที่แยกได้ทั้งหมด 269 ไอโซเลตมาทำการศึกษาลักษณะโคโลนีที่แตกต่างกันบนอาหาร LB agar ที่เวลา 48 ชั่วโมง อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกันทั้งหมด 60 แบบ ซึ่งทำการแยกและตั้งชื่อ ไอโซเลตตั้งแต่ TMK 001 ถึง TMK 060 และทำการเก็บรักษาไว้ในอาหาร LB ที่มีส่วนผสมของ glycerol 15 % เพื่อทำการศึกษาในขั้นตอนต่อไป

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการย่อยสลายนม

กิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอส (Proteolytic Activity) บนอาหาร Skim milk agar

จากการทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์โปรติเอสบนอาหาร Skim milk agar พบว่าแบคทีเรียที่คัดแยกได้ทั้งหมด 60 ไอโซเลต มีจำนวน 27 ไอโซเลต ที่แสดงการเกิดวงใสรอบโคโลนี แสดงถึงความสามารถในการสร้างเอนไซม์โปรติเอส ในขณะที่อีก 33 ไอโซเลต ไม่พบการเกิดวงใส (เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0 mm) จึงจัดว่าไม่พบกิจกรรมของเอนไซม์ภายใต้เงื่อนไขการทดสอบนี้

เมื่อพิจารณาขนาดวงใสของไอโซเลตที่ให้ผลบวก พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของวงใสมีค่าตั้งแต่ 7.5–19.0 mm โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 14 mm ในกลุ่มที่มีวงใส แสดงให้เห็นว่าหลายไอโซเลตมีศักยภาพในการย่อยสลายโปรตีนในระดับค่อนข้างสูง ไอโซเลตที่ให้ขนาดวงใสสูงสุดคือ TMK 009, TMK 025, TMK 042 และ TMK 045 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงใส 19.0 mm รองลงมาเช่น TMK 021 (18.5 mm), TMK 022 (18.0 mm) และ TMK 023, TMK 035 (16.0 mm) เป็นต้น

ในทางกลับกัน ไอโซเลตบางส่วน เช่น TMK 003, TMK 004, TMK 005, TMK 008, TMK 010, TMK 012 และอีกหลายไอโซเลต แสดงค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงใสเท่ากับ 0 mm สะท้อนให้เห็นว่ากลุ่มจุลินทรีย์ที่คัดแยกได้นั้นมีความหลากหลายของกิจกรรม โปรติเอส ทั้ง ไอโซเลตที่มีศักยภาพสูง ปานกลาง และไม่มีการสร้างเอนไซม์อย่างชัดเจน

โดยรวมแล้วคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 45% ของไอโซเลตทั้งหมด ที่มีศักยภาพด้านการผลิตโปรติเอส ซึ่งอาจมีความสำคัญต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนในระบบชีวภาพหรือในการประยุกต์ใช้ด้านเกษตรกรรมและอุตสาหกรรมชีวภาพในลำดับต่อไป

กิจกรรมของเอนไซม์ลิพอลิติก (Lipolytic Activity) บนอาหาร Spirit blue agar

ผลการทดสอบกิจกรรมของเอนไซม์ลิพอลิติกบนอาหาร Spirit blue agar พบว่าในจำนวนทั้งหมด 60 ไอโซเลต มี 22 ไอโซเลต ที่ให้ผลเป็นบวก (+) โดยแสดงการเกิดบริเวณสีน้ำเงินเข้มรอบหรือใต้โคโลนี บ่งชี้ถึงการย่อยไขมันในอาหารเลี้ยงเชื้อ ส่วนที่เหลือ 38 ไอโซเลต ให้ผลเป็นลบ (-) ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของสีอาหารอย่างชัดเจน ไอโซเลตที่แสดงกิจกรรมลิพอลิติก ได้แก่ เช่น TMK 002, TMK 003, TMK 006, TMK 007, TMK 009, TMK 011, TMK 017, TMK 018, TMK 021, TMK 022, TMK 024, TMK 025, TMK 028, TMK 033, TMK 035, TMK 042, TMK 045, TMK 048, TMK 051, TMK 057, TMK 058 และ TMK 060 ในขณะที่ TMK 001, TMK 004, TMK 008, TMK 010, TMK 012, TMK 013, TMK 015 และอีกหลายไอโซเลตไม่พบกิจกรรมลิพอลิติก เมื่อคิดเป็นร้อยละ พบว่าไอโซเลตที่มีความสามารถย่อยไขมันคิดเป็นประมาณ 36.7% ของไอโซเลตทั้งหมด ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่ามีสัดส่วนหนึ่งของกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพต่อการย่อยสลายไขมัน

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการเจริญเติบโตของพืช

ความสามารถในการผลิต IAA

การประเมินศักยภาพการผลิตกรดอินโดล-3-อะซีติก (IAA) ของแบคทีเรียจำนวน 60 ไอโซเลต (TMK 01–TMK 60) ทำโดยวิธี colorimetric method ร่วมกับ Salkowski's reagent และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 536 นาโนเมตร จากนั้นคำนวณกลับเป็นความเข้มข้น IAA ($\mu\text{g/mL}$) ด้วยสมการมาตรฐานที่สร้างขึ้น ($\text{IAA} = (\text{OD} - 0.0005)/0.003$) โดยตั้งสมมติฐานว่า ค่าที่ต่ำกว่า 0 ถือว่าไม่สามารถตรวจวัดได้และกำหนดเป็น 0 $\mu\text{g/mL}$ ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทำซ้ำสามครั้งแสดงในตารางที่ 4.2

ผลการวิเคราะห์พบว่าแบคทีเรียส่วนใหญ่มีความสามารถในการผลิต IAA อยู่ในระดับต่ำหรือไม่สามารถตรวจวัดได้ ในขณะที่บางไอโซเลตมีศักยภาพในการผลิต IAA สูงอย่างชัดเจน เมื่อจัดกลุ่มตามค่าเฉลี่ย IAA พบว่าไอโซเลตถูกแบ่งออกเป็นสามระดับ ได้แก่ กลุ่ม high producers ($\geq 6 \mu\text{g/mL}$) ซึ่งประกอบด้วย TMK 02 ($8.39 \pm 4.95 \mu\text{g/mL}$), TMK 03 ($6.39 \pm 2.55 \mu\text{g/mL}$), TMK 04 ($6.72 \pm 1.07 \mu\text{g/mL}$) และ TMK 12 ($10.72 \pm 7.65 \mu\text{g/mL}$); กลุ่ม medium producers ($1 < \mu\text{g/mL}$) ประกอบด้วย TMK 07, TMK 09, TMK 10 และ TMK 11; ส่วนไอโซเลตที่เหลือทั้งหมดถูกจัดเป็นกลุ่ม low producers ($\text{IAA} < 1 \mu\text{g/mL}$ หรือไม่สามารถตรวจวัดได้) ตารางที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.1

การวิเคราะห์ความแตกต่างของค่า IAA ระหว่างไอโซเลตโดยใช้ Tukey's honestly significant difference (HSD) test แสดงให้เห็นว่าไอโซเลตในกลุ่ม high producers มีค่าการผลิต IAA สูงกว่าไอโซเลตส่วนใหญ่ในกลุ่ม low producers อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะ TMK 12 และ TMK 02–TMK 04 ซึ่งมีค่าเฉลี่ย IAA สูงกว่าไอโซเลตที่ไม่มีการผลิต IAA อย่างเด่นชัด (p ต่ำมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 หลายลำดับขั้น) ภาพที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณ IAA เฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของไอโซเลตทั้งหมด

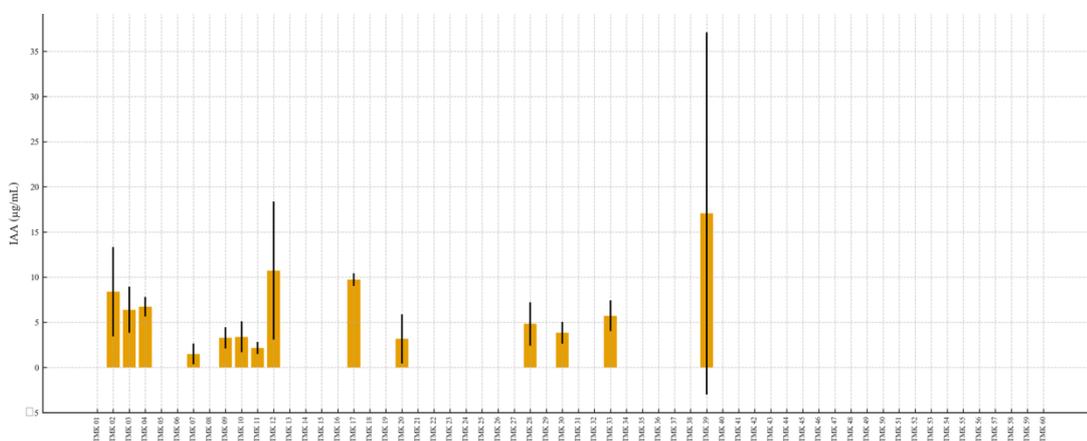
ผลการจัดกลุ่มด้วยวิธี hierarchical clustering (Ward's method) จากค่าปริมาณ IAA เฉลี่ยสนับสนุนการแบ่งกลุ่มดังกล่าว โดยไอโซเลตกลุ่ม high producers ถูกจัดอยู่ในคลัสเตอร์แยกต่างหากจากกลุ่ม medium และ low producers รูปที่ 3 แสดง dendrogram ของการจัดกลุ่มดังกล่าว ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความหลากหลายเชิงฟีโนไทป์ของความสามารถในการสังเคราะห์ IAA ภายในชุมชนจุลินทรีย์ต้นกำเนิด และบ่งชี้ว่า TMK 12, TMK 02, TMK 03 และ TMK 04 เหมาะสมสำหรับการคัดเลือกเป็นจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในขั้นตอนต่อไป (ภาพที่ 4.2)

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean \pm SD) ของปริมาณ NH_4^+ และ IAA ที่ผลิต
โดยแบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์

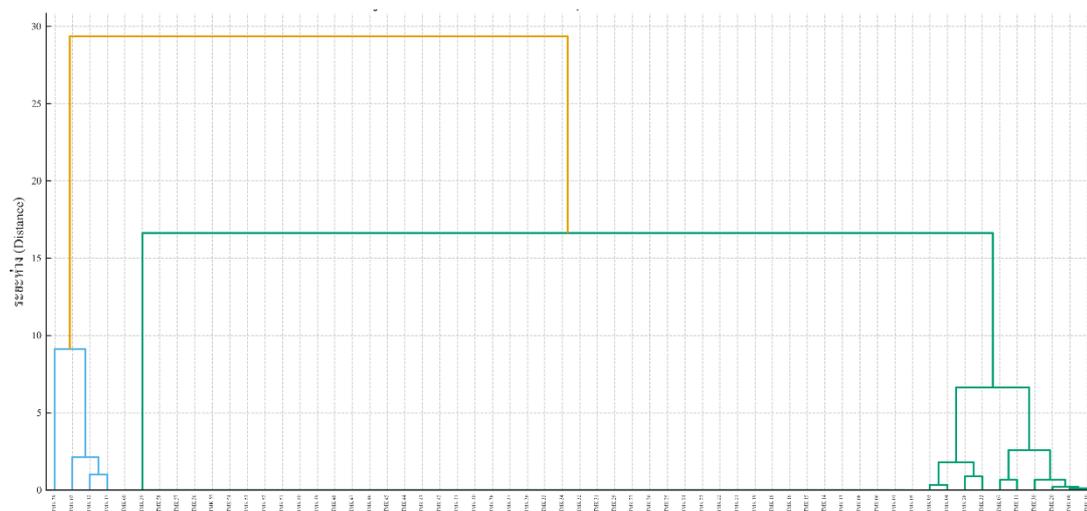
รหัสแบคทีเรีย	ค่าเฉลี่ย \pm SD ความสามารถของจุลินทรีย์	
	NH_4^+ (mg/mL/24h)	IAA ($\mu\text{g/mL}$)
TMK01	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK02	0.00 \pm 0.00	8.39 \pm 4.95
TMK03	0.00 \pm 0.00	6.39 \pm 2.55
TMK04	0.00 \pm 0.00	6.72 \pm 1.07
TMK05	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK06	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK07	0.00 \pm 0.00	1.50 \pm 1.16
TMK08	0.03 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK09	0.00 \pm 0.00	3.28 \pm 1.17
TMK10	0.00 \pm 0.00	3.39 \pm 1.71
TMK11	0.22 \pm 0.03	2.17 \pm 0.67
TMK12	0.00 \pm 0.00	10.72 \pm 7.65
TMK13	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK14	0.32 \pm 0.02	0.00 \pm 0.00
TMK15	0.14 \pm 0.03	0.00 \pm 0.00
TMK16	0.37 \pm 0.11	0.00 \pm 0.00
TMK17	0.14 \pm 0.02	9.72 \pm 0.69
TMK18	0.09 \pm 0.01	0.00 \pm 0.00
TMK19	0.44 \pm 0.10	0.00 \pm 0.00
TMK20	0.00 \pm 0.00	3.17 \pm 2.73
TMK21	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK22	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK23	0.07 \pm 0.03	0.00 \pm 0.00
TMK24	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK25	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK26	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00

รหัสแบบคที่เรีย	ค่าเฉลี่ย \pm SD ความสามารถของจุลินทรีย์	
	NH4+ (mg/mL/24h)	IAA (μ g/mL)
TMK27	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK28	0.06 \pm 0.04	4.83 \pm 2.40
TMK29	0.41 \pm 0.08	0.00 \pm 0.00
TMK30	0.00 \pm 0.00	3.83 \pm 1.20
TMK31	0.39 \pm 0.11	0.00 \pm 0.00
TMK32	0.43 \pm 0.04	0.00 \pm 0.00
TMK33	0.36 \pm 0.10	5.72 \pm 1.71
TMK34	0.30 \pm 0.02	0.00 \pm 0.00
TMK35	0.21 \pm 0.07	0.00 \pm 0.00
TMK36	0.35 \pm 0.06	0.00 \pm 0.00
TMK37	0.35 \pm 0.09	0.00 \pm 0.00
TMK38	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK39	0.00 \pm 0.00	17.06 \pm 20.06
TMK40	0.17 \pm 0.04	0.00 \pm 0.00
TMK41	0.33 \pm 0.02	0.00 \pm 0.00
TMK42	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK43	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK44	0.29 \pm 0.07	0.00 \pm 0.00
TMK45	0.29 \pm 0.07	0.00 \pm 0.00
TMK46	0.30 \pm 0.01	0.00 \pm 0.00
TMK47	0.44 \pm 0.08	0.00 \pm 0.00
TMK48	0.35 \pm 0.09	0.00 \pm 0.00
TMK49	0.18 \pm 0.01	0.00 \pm 0.00
TMK50	0.43 \pm 0.02	0.00 \pm 0.00
TMK51	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
TMK52	0.21 \pm 0.01	0.00 \pm 0.00
TMK53	0.47 \pm 0.10	0.00 \pm 0.00
TMK54	0.25 \pm 0.04	0.00 \pm 0.00

รหัสแบคทีเรีย	ค่าเฉลี่ย ± SD ความสามารถของจุลินทรีย์	
	NH4+ (mg/mL/24h)	IAA (µg/mL)
TMK55	0.37 ± 0.08	0.00 ± 0.00
TMK56	0.22 ± 0.01	0.00 ± 0.00
TMK57	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
TMK58	0.46 ± 0.04	0.00 ± 0.00
TMK59	0.52 ± 0.16	0.00 ± 0.00
TMK60	0.26 ± 0.03	0.00 ± 0.00



ภาพที่ 4.1 แผนภูมิแท่งแสดงค่า IAA เฉลี่ย ± SD ของไอโซเลตทั้ง 60 ชนิด



ภาพที่ 4.2 Dendrogram ของการจัดกลุ่มไอโซเลตด้วยวิธี hierarchical clustering จากค่า IAA เฉลี่ย ความสามารถในการผลิตแอมโมเนีย

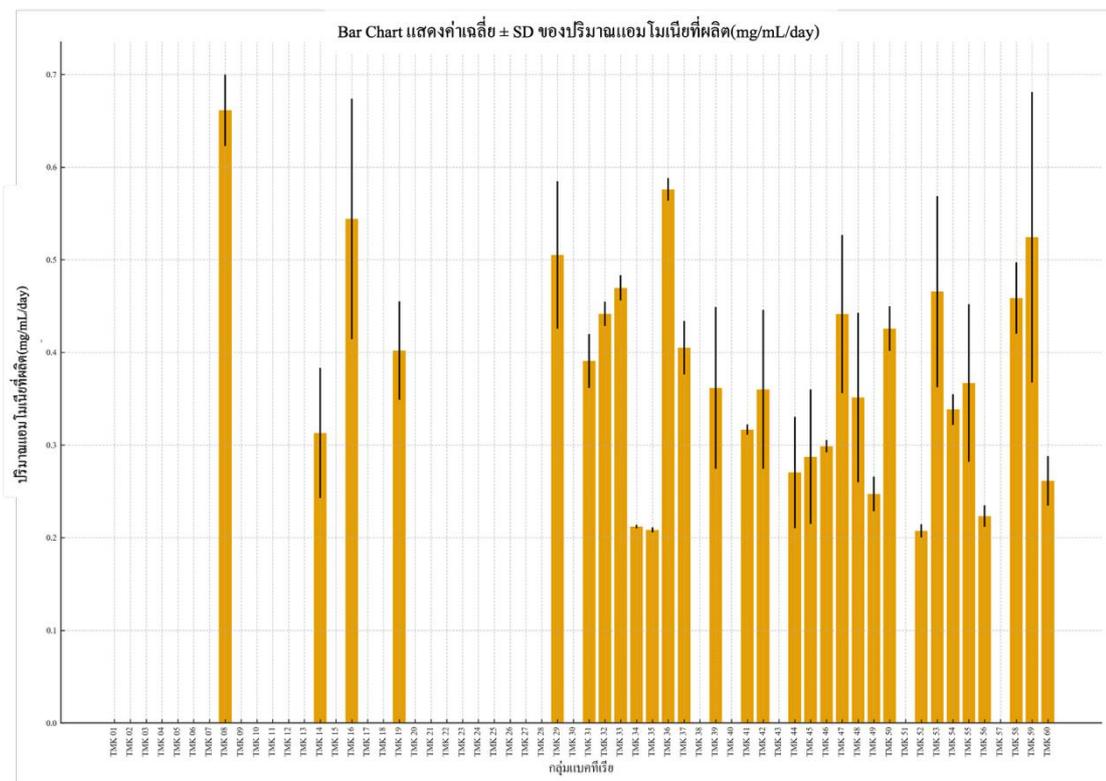
ผลการประเมินความสามารถในการผลิตแอมโมเนีย (NH_4^+) ของแบคทีเรียสายพันธุ์ TMK 01-TMK 60 ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.2 ชี้ให้เห็นถึงความแปรผันอย่างกว้างของศักยภาพการผลิต NH_4^+ ระหว่างสายพันธุ์ โดยมีค่าการผลิตเฉลี่ยตั้งแต่ 0.000 mg/mL/24h จนถึงมากกว่า 0.50 mg/mL/24h ผลลัพธ์นี้สะท้อนให้เห็นถึงการที่แบคทีเรียแต่ละสายพันธุ์มีองค์ประกอบทางเมตาบอลิซึมและกลไกการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มีระดับการปลดปล่อย NH_4^+ ไม่เท่ากัน แบคทีเรียในกลุ่มที่ผลิตปริมาณสูง เช่น TMK59, TMK58, TMK53, TMK50, TMK47 และ TMK29 มีค่าการผลิตสูงกว่า 0.40 mg/mL/24h และมีความแปรปรวนในระดับต่ำถึงปานกลาง ซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มนี้มีเสถียรภาพของการผลิต NH_4^+ ที่ดีในการทดลองซ้ำ ทั้งนี้กลุ่มดังกล่าวสามารถแสดงศักยภาพด้าน ammonification ได้โดดเด่นและเหมาะสมสำหรับพิจารณานำไปใช้ในงานด้านการเกษตรหรือการสังเคราะห์ปุ๋ยชีวภาพ

ในขณะที่กลุ่มที่มีค่าการผลิตปานกลาง เช่น TMK14, TMK15, TMK17, TMK35, TMK44–TMK46 และ TMK52 แสดงค่าการผลิตอยู่ในช่วง 0.15–0.35 mg/mL/24h ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการผลิต NH_4^+ ในระดับที่น่าสนใจ แม้จะไม่สูงเท่ากลุ่มแรก กลุ่มนี้ยังมีบทบาทสำคัญในการเสริมการทำงานของจุลินทรีย์อื่น ๆ ในระบบหมักหรือระบบปลูกพืช ทั้งนี้ความแปรปรวนของกลุ่มดังกล่าวยังอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แสดงถึงความสม่ำเสมอในการผลิต NH_4^+ จากการทดลองซ้ำ นอกจากนี้ แบคทีเรียอีกจำนวนมาก เช่น TMK01–TMK07, TMK09–TMK13, TMK20–TMK27 และ TMK38–TMK43 พบว่ามีค่าการผลิต NH_4^+ เป็นศูนย์ในทุกซ้ำ สะท้อนให้เห็นถึงการไม่สามารถสร้างเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน หรืออาจมีการใช้รูปแบบเมตาบอลิซึมที่ไม่ก่อให้เกิดการปลดปล่อย NH_4^+ ลงในสารละลายทดสอบ

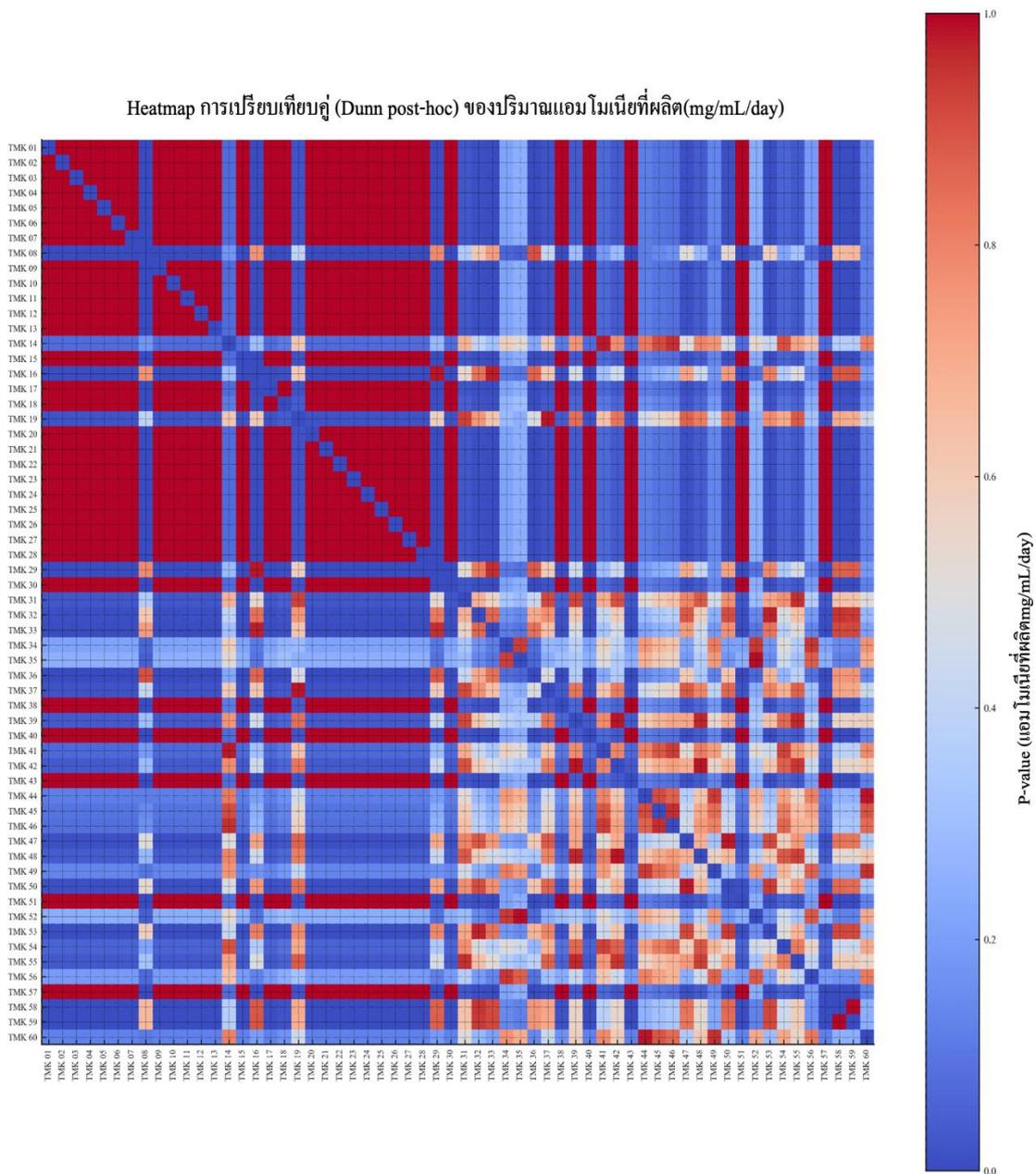
จากผลการนำเสนอด้วยกราฟแท่งในภาพที่ 4.3 พบว่า การเรียงลำดับค่าการผลิต NH_4^+ จาก TMK01 ถึง TMK60 ทำให้สามารถสังเกตแนวโน้มการกระจายตัวของศักยภาพการผลิตได้อย่างชัดเจน โดยกลุ่ม high-producers แสดงความเด่นชัดของปริมาณที่สูงกว่าสายพันธุ์อื่นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่กลุ่ม low-producers มีกราฟที่อยู่ระดับศูนย์หรือใกล้ศูนย์ทั้งหมด ซึ่งช่วยยืนยันข้อมูลจากตารางที่ 4.2 ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ ความแตกต่างระหว่างกลุ่มยังได้รับการยืนยันด้วยภาพที่ 4.4 ซึ่งแสดง heatmap ของค่า p-value จากการทดสอบ Dunn post-hoc พบว่ากลุ่มที่มีค่าเฉลี่ย (p ต่ำ) เป็นกลุ่มที่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจากสายพันธุ์ที่ผลิตต่ำมาก โดยเฉพาะกลุ่ม TMK59, TMK53 และ TMK58 ที่มีค่าเฉลี่ยชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับสายพันธุ์อื่น

โดยสรุป ผลการทดลองทั้งหมดจากตารางและภาพประกอบสะท้อนให้เห็นถึงการกระจายตัวของศักยภาพการผลิต NH_4^+ ที่หลากหลายของแบคทีเรีย TMK01–TMK60 การวิเคราะห์เชิงสถิติและการแสดงผลเชิงภาพช่วยให้สามารถจำแนกสายพันธุ์ที่มีศักยภาพสูง ปานกลาง และต่ำได้อย่าง

ชัดเจน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการคัดเลือกแบคทีเรียที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยต่อยอด เช่น การพัฒนาน้ำหมักชีวภาพ การเพิ่มแร่ธาตุในระบบไฮโดรพอนิกส์ และการสร้าง consortia จุลินทรีย์ สำหรับส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยกลุ่ม high-producers จะมีบทบาทสำคัญในด้านการเพิ่มแอมโมเนียมในระบบ ขณะที่กลุ่ม moderate-producers อาจทำหน้าที่เสริมสมดุลของกระบวนการหมัก และกลุ่ม low-producers สามารถถูกคัดออกจากขั้นตอนการคัดเลือกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของสูตรหัวเชื้อในอนาคต



ภาพที่ 4.3 แผนภูมิแท่งแสดงค่า NH_4^+ เฉลี่ย \pm SD ของไอโซเลตทั้ง 60 ชนิด



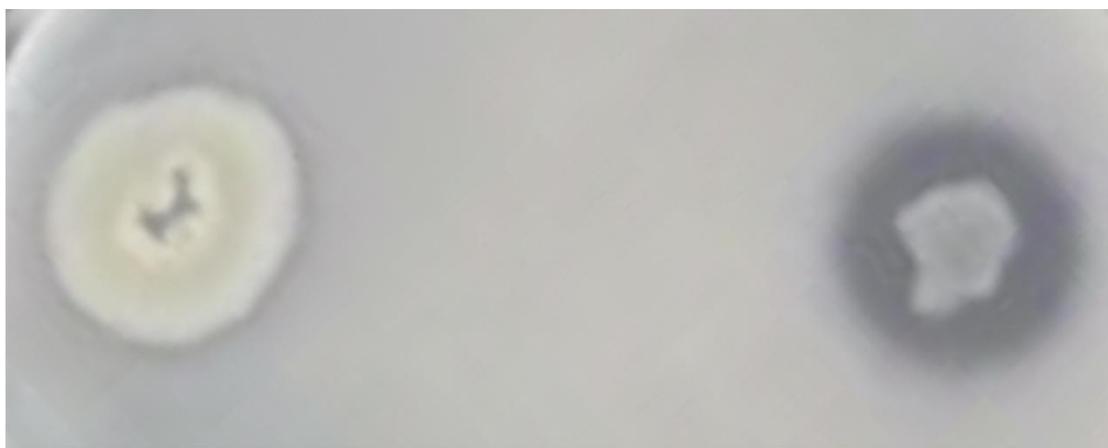
ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มของปริมาณแอม โมนีเยจากการทดสอบ Dunn post-hoc

ความสามารถละลายฟอสเฟตของแบคทีเรีย

ผลการประเมินความสามารถละลายฟอสเฟตโดยใช้อาหาร Pikovskaya's agar พบว่าในบรรดา 60 ไอโซเลต มีจำนวน 19 ไอโซเลต ที่ให้ผลเป็นบวก (+) แสดงการเกิดแถบใส (clear zone/halo zone) รอบโคโลนี ในขณะที่ 41 ไอโซเลต ไม่พบแถบใสและถูกจัดเป็นผลลบ (-)

ไอโซเลตที่มีความสามารถละลายฟอสเฟต ได้แก่ TMK 002, TMK 003, TMK 005, TMK 017, TMK 018, TMK 019, TMK 020, TMK 025, TMK 026, TMK 029, TMK 031, TMK 032, TMK 034, TMK 041, TMK 049, TMK 050, TMK 051, TMK 052 และ TMK 060 ส่วนไอโซเลตอื่น ๆ เช่น TMK 001, TMK 004, TMK 006, TMK 007, TMK 008, TMK 009, TMK 010, TMK 011 และอีกหลายไอโซเลตไม่แสดงความสามารถละลายฟอสเฟตภายใต้สภาวะการทดสอบที่ใช้

เมื่อกำหนดเป็นสัดส่วน จะพบว่าไอโซเลตที่ละลายฟอสเฟตได้คิดเป็นประมาณ 31.7% ของไอโซเลตทั้งหมด ซึ่งถือว่ามีจำนวนที่น่าสนใจสำหรับการคัดเลือกไปใช้เป็นจุลินทรีย์ที่ช่วยปรับปรุงความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินหรือในระบบปลูกพืช โดยเฉพาะในระบบเกษตรอินทรีย์และชีวภาพที่ต้องการลดการใช้ปุ๋ยเคมี



ภาพที่ 4.5 ความสามารถละลายฟอสเฟตในอาหาร Pikovskaya's agar โดยไม่พบแถบใสและถูกจัดเป็นผลลบ (-) การเกิดแถบใส (clear zone/halo zone) ให้ผลเป็นบวก (+)

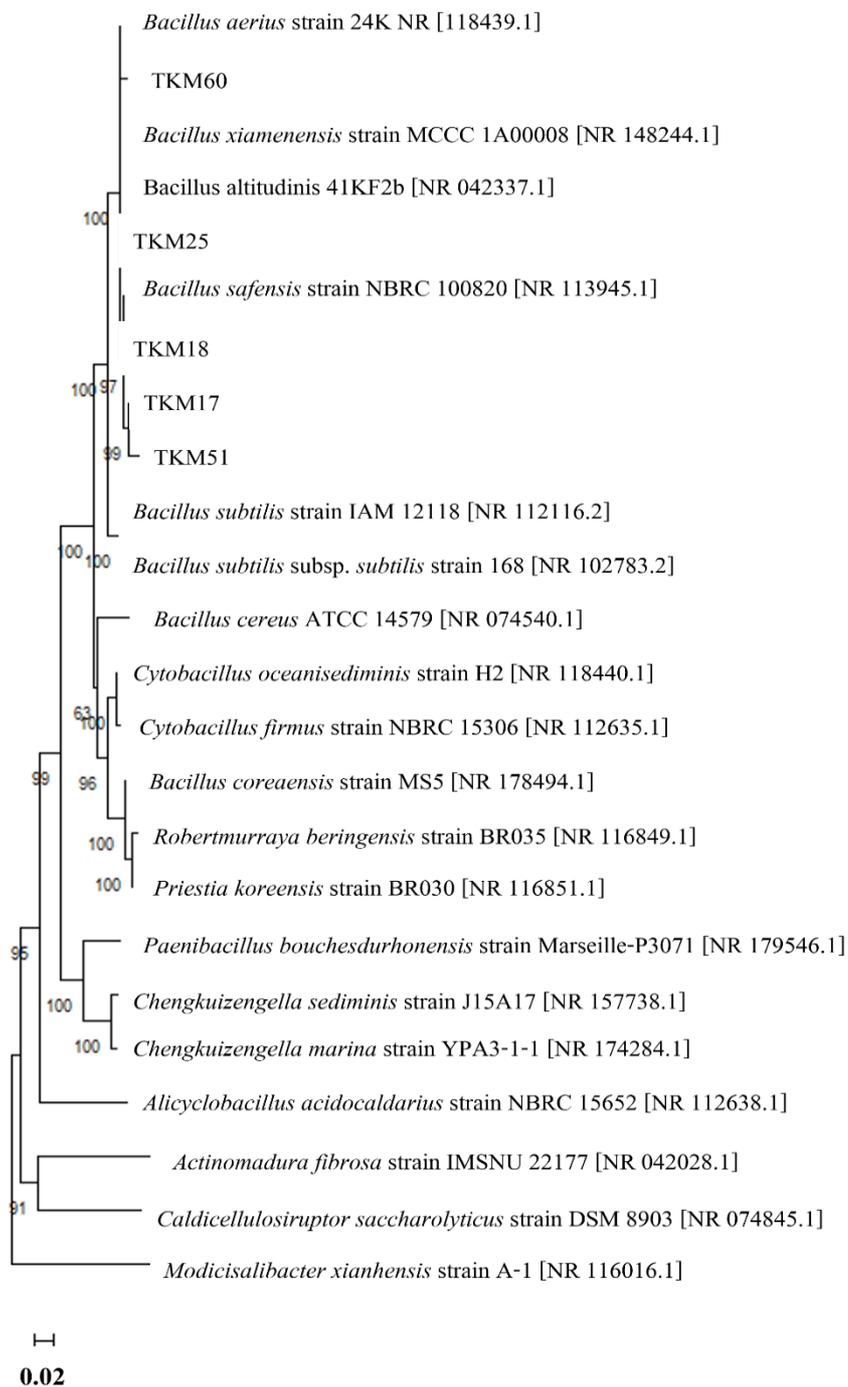
การจำแนกชนิดจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค 16S rDNA Sequencing

การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA ของไอโซเลต TKM17, TKM18, TKM25, TKM51 และ TKM60 ถูกนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล GenBank ด้วยโปรแกรม BLASTn เพื่อใช้ในการจำแนกชนิดของจุลินทรีย์ระดับอนุกรมวิธานเบื้องต้น ผลการวิเคราะห์สรุปได้ดังนี้ ไอโซเลต TKM17 มีความสอดคล้องสูงกับ *Bacillus pumilus* strain NRRL NRS-272 (GenBank accession no. NR_116191.1) โดยมีค่า query cover เท่ากับ 91% และมีเปอร์เซ็นต์ความเหมือนของลำดับ (identity) สูงถึง 99.08% พร้อมค่า E-value เท่ากับ 0.00 ซึ่งบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของการจับคู่ลำดับอย่างยิ่ง จึงสามารถเสนอได้ชัดเจนว่า TKM17 อยู่ในกลุ่ม *Bacillus pumilus* สำหรับไอโซเลต TKM18 พบว่ามีความใกล้เคียงกับ *Bacillus pumilus* strain NBRC 12092 (GenBank accession no. NR_112637.1) โดยมีค่า query cover 100% และเปอร์เซ็นต์ identity เท่ากับ 99.44% ซึ่งแสดงถึงความคล้ายคลึงของลำดับในระดับสายพันธุ์ (strain level) ทำให้สามารถระบุชนิดจุลินทรีย์ไอโซเลตนี้เป็น *Bacillus pumilus* ในกรณีของไอโซเลต TKM25 ผลการวิเคราะห์ BLAST แสดงความคล้ายคลึงกับ *Bacillus aerius* strain 24K (GenBank accession no. NR_118439.1) โดยมีค่า query cover 100% และเปอร์เซ็นต์ identity สูงถึง 99.79% พร้อมทั้งค่า E-value เท่ากับ 0.00 ซึ่งบ่งชี้ถึงการจับคู่ลำดับที่มีความน่าเชื่อถือ จึงสามารถระบุได้ว่า TKM25 เป็น *Bacillus aerius* สำหรับไอโซเลต TKM51 พบว่ามีความใกล้เคียงกับ *Bacillus safensis* strain NBRC 100820 (GenBank accession no. NR_113945.1) โดยมีค่า query cover เท่ากับ 95% และเปอร์เซ็นต์ identity เท่ากับ 98.08% ซึ่งแม้ค่า identity จะต่ำกว่าไอโซเลตอื่นเล็กน้อย แต่ยังอยู่ในช่วงที่รับได้สำหรับการจำแนกสายพันธุ์ของแบคทีเรียสกุล *Bacillus* โดยเฉพาะในกลุ่ม *B. pumilus* group ดังนั้น TKM51 จึงถูกเสนอให้เป็น *Bacillus safensis* สุดท้าย ไอโซเลต TKM60 มีความคล้ายคลึงกับ *Bacillus altitudinis* 41KF2b (GenBank accession no. NR_042337.1) โดยมีค่า query cover 100% และเปอร์เซ็นต์ identity เท่ากับ 98.87% พร้อมค่า E-value เท่ากับ 0.00 ซึ่งเป็นการจับคู่ลำดับที่มีความน่าเชื่อถือสูง ทำให้สามารถสรุปได้ว่า TKM60 มีความใกล้เคียงกับ *Bacillus altitudinis* อย่างมาก (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 ผลการจำแนกระดับอนุกรมวิธานของแบคทีเรียด้วยการวิเคราะห์ BLASTn จากลำดับ ยีน 16S rRNA

Isolate	Closest match (BLASTn)	GenBank accession	Query cover (%)	Identity (%)	E-value	Proposed identification
TKM17	<i>Bacillus pumilus</i> strain NRRL NRS-272	NR_116191.1	91	99.08	0.00	<i>Bacillus pumilus</i>
TKM18	<i>Bacillus pumilus</i> strain NBRC 12092	NR_112637.1	100	99.44	0.00	<i>Bacillus pumilus</i>
TKM25	<i>Bacillus aerius</i> strain 24K	NR_118439.1	100	99.79	0.00	<i>Bacillus aerius</i>
TKM51	<i>Bacillus safensis</i> strain NBRC 100820	NR_113945.1	95	98.08	0.00	<i>Bacillus safensis</i>
TKM60	<i>Bacillus altitudinis</i> strain 41KF2b	NR_042337.1	100	98.87	0.00	<i>Bacillus altitudinis</i>

แผนภูมิสายวิวัฒนาการจากลำดับยีน 16S rRNA ของไอโซเลต TKM17, TKM18, TKM25, TKM51 และ TKM60 โดยใช้วิธี Neighbor-Joining และ Bootstrap 1,000 ครั้ง แสดงความสัมพันธ์เชิงอนุกรมวิธานที่ชัดเจนระหว่างไอโซเลตทั้งหมดกับสายพันธุ์อ้างอิงในฐานข้อมูล NCBI ดังแสดงในภาพที่ 4.6 จากผลการวิเคราะห์พบว่า ไอโซเลต TKM17 และ TKM18 สามารถจัดกลุ่มร่วมกับสายพันธุ์อ้างอิง *Bacillus pumilus* ซึ่งมีค่าความเชื่อมั่นสูงบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการ และสอดคล้องกับผลการ BLAST ที่ระบุว่าไอโซเลตทั้งสองอยู่ในสกุล *B. pumilus* ในขณะที่ไอโซเลต TKM51 อยู่ในกิ่งย่อยเดียวกันกับ *Bacillus safensis* สำหรับไอโซเลต TKM25 พบว่าอยู่ในกิ่งเดียวกับ *Bacillus aerius* strain 24K (NR_118439.1) ด้วยค่า bootstrap 100% แสดงให้เห็นว่าลำดับของ TKM25 มีโครงสร้างใกล้เคียงกับสายพันธุ์อ้างอิง สอดคล้องกับผล BLAST ซึ่งให้ค่า identity สูงถึง 99.79% และยืนยันการจำแนกเป็น *B. aerius* ไอโซเลต TKM60 จัดกลุ่มร่วมกับ *Bacillus altitudinis* 41KF2b (NR_042337.1) และ *Bacillus xiamenensis* (NR_148244.1) ภายใน clade เดียวกัน โดยมี bootstrap สูงมาก (100%) บ่งชี้ว่า TKM60 อยู่ในสายวิวัฒนาการที่ใกล้ชิดกับ *B. altitudinis* มากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับผล BLAST ที่ได้ค่า identity 98.87% และ query cover 100% โครงสร้างต้นไม้โดยรวมมีการใช้สายพันธุ์อ้างอิงจากหลายวงศ์ เช่น *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Cytobacillus*, *Paenibacillus*, *Alicyclobacillus*, และ *Actinomadura* เพื่อใช้เป็น outgroup และช่วยสร้างโครงสร้างของ clade ให้แม่นยำยิ่งขึ้น ผลการจัดกลุ่มแสดงให้เห็นว่าไอโซเลตทั้งหมดของการศึกษานี้อยู่ภายในกลุ่ม *Bacillus pumilus* group อย่างชัดเจน ไม่มีการจัดกลุ่มผิดตำแหน่ง (misclassification) และได้รับการสนับสนุนจากค่าความเชื่อมั่นของกิ่งที่สูงเกือบทุกจุด (97–100%)



รูปที่ 4.6 แผนภูมิตายวิวัฒนาการของยีน 16S rRNA ของจุลินทรีย์ไฮโซเลต TKM17, TKM18, TKM25, TKM51 และ TKM60 ที่ได้จากการศึกษา โดยสร้างต้นไม้ด้วยวิธี Neighbor-Joining และทำการประเมินค่าความเชื่อมั่นของกิ่งด้วยวิธี Bootstrap จำนวน 1,000 ครั้ง

การพัฒนาวัตกรรมการนำหมักนมสดพร้อมใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์

ผลการประเมินความกว้างทรงพุ่มของผักสลัดกรีนโอ๊คในช่วงสี่สัปดาห์หลังการย้ายปลูก แสดงความแตกต่างชัดเจนระหว่างชุดการทดลองทั้งเจ็ดชุด โดยในสัปดาห์ที่ 1 ชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มีค่าความกว้างทรงพุ่มต่ำที่สุดเท่ากับ 5.75 ± 0.63 แสดงถึงการตั้งตัวที่ช้าจากการขาดธาตุอาหาร ขณะที่ชุดทดสอบที่มีการเติมธาตุอาหารทุกสูตรมีการขยายทรงพุ่มสูงกว่าอย่างเด่นชัด โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ให้ค่าความกว้างทรงพุ่มสูงที่สุด 14.55 ± 0.51 รองลงมาคือ T4 สูตรเกษตรกร 14.35 ± 0.87 และ T3 อินทรีย์การค้ำ 13.90 ± 0.78 ส่วน T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ซึ่งมีส่วนผสมของน้ำหมักชีวภาพ ให้ค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกันคือ 13.25 ± 0.71 และ 13.15 ± 0.74 ตามลำดับ ขณะที่ T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร อยู่ในระดับต่ำสุดของสูตรที่มีปุ๋ยคัวยค่า 11.55 ± 0.94

ในสัปดาห์ที่ 2 ความแตกต่างของความกว้างทรงพุ่มยิ่งชัดเจนขึ้น โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ยังเป็นชุดที่ให้ค่าสูงที่สุดที่ 24.80 ± 1.00 ตามด้วย T4 สูตรเกษตรกร ที่ 24.35 ± 1.49 และ T3 อินทรีย์การค้ำ ที่ 23.70 ± 0.97 ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีศักยภาพการเจริญเติบโตสูง ส่วน T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร อยู่ในระดับปานกลางเท่ากับ 20.25 ± 1.16 และ 20.55 ± 1.14 ขณะที่ T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร ให้ค่า 19.15 ± 1.75 และ T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) ยังคงต่ำที่สุดคือ 4.10 ± 0.71 โดยแทบไม่เพิ่มจากสัปดาห์แรก สะท้อนการต้านทานการขยายใบอย่างรุนแรงเมื่อไม่มีธาตุอาหาร

ในสัปดาห์ที่ 3 การขยายทรงพุ่มของพืชเริ่มเข้าช่วงเจริญเติบโตอย่างเต็มที่ โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ มีความกว้างทรงพุ่มมากที่สุด 26.80 ± 0.95 แสดงการตอบสนองอย่างต่อเนื่องต่อสูตรผสมอินทรีย์การค้ำกับน้ำหมักชีวภาพ ขณะที่ T4 สูตรเกษตรกร และ T3 อินทรีย์การค้ำ มีค่าอยู่ที่ 25.20 ± 1.73 และ 24.05 ± 0.82 ตามลำดับ ซึ่งยังจัดอยู่ในกลุ่มที่ให้ผลดี ส่วน T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด มีการเจริญเติบโตในระดับรองลงมาที่ 23.20 ± 0.89 และ 22.85 ± 0.93 ส่วน T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร อยู่ระดับใกล้เคียงคือ 22.80 ± 1.00 ขณะที่ชุดควบคุม T1 น้ำเปล่า ยังคงต่ำที่สุดอย่างชัดเจน 4.70 ± 0.92

ในสัปดาห์ที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงก่อนเก็บเกี่ยว พบว่าค่าความกว้างทรงพุ่มของแต่ละชุดสะท้อนผลสะสมจากสูตรธาตุอาหารที่ใช้ โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ยังคงให้ค่าสูงสุด 27.16 ± 1.23 แสดงศักยภาพที่เหนือกว่าสูตรอื่นอย่างต่อเนื่อง รองลงมาคือ T3 อินทรีย์การค้ำ ที่ 26.03 ± 1.47 และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกรที่ 25.36 ± 1.27 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมน้ำหมักชีวภาพร่วมกับสูตรเกษตรกรช่วยเร่งการเจริญเติบโตได้ดีกว่าสูตรเกษตรกรเดี่ยวที่มีค่า 23.06 ± 2.46 ในสัปดาห์นี้ ขณะที่ T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร มีค่า 23.66 ± 1.26 อยู่ในระดับ

ปานกลาง ส่วนชุดควบคุม T1 น้ำเปล่า มีค่าเพียง 3.62 ± 0.90 ซึ่งต่ำที่สุดเช่นเดิม สะท้อนว่าการไม่ให้ธาตุอาหารอย่างสมบูรณ์ทำให้พืชไม่สามารถขยายทรงพุ่มได้ตามศักยภาพ

เมื่อพิจารณาภาพรวมของผลการทดลองในตารางที่ 4.4 พบว่าความกว้างทรงพุ่มของผักสลัดกรีน โอ๊คมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดการทดลองทั้งเจ็ดชุดตลอดช่วงสี่สัปดาห์หลังการย้ายปลูก โดยสูตรที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดอย่างต่อเนื่องคือ T5 (น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ) ซึ่งให้ค่าความกว้างทรงพุ่มมากที่สุดในทุกสัปดาห์ แสดงให้เห็นถึงความเสริมฤทธิ์ของการผสมน้ำหมักชีวภาพนมสดกับธาตุอาหารอินทรีย์ที่มีความสมดุล ส่งผลให้พืชสามารถขยายทรงพุ่มได้เต็มศักยภาพ รองลงมาคือ T3 (อินทรีย์การค้ำ) ซึ่งเป็นสูตรเดียวที่ให้ผลดีสม่ำเสมอ และ T6 (น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร) ที่มีศักยภาพสูงในระยะท้าย ขณะที่สูตรเกษตรกรเดียว T4 แม้มีผลดีในช่วงต้น แต่มีความผันแปรสูงและประสิทธิภาพลดลงในสัปดาห์สุดท้าย สะท้อนความไม่เสถียรขององค์ประกอบธาตุอาหารในสูตรดังกล่าว ส่วน T2 (น้ำหมักชีวภาพนมสดเดียว) และ T7 (อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร) ให้ผลในระดับปานกลาง และยิ่งเหนือกว่าชุดควบคุมอย่างชัดเจน สำหรับ T1 (น้ำเปล่า) ให้ค่าต่ำที่สุดตลอดการทดลอง สะท้อนบทบาทจำเป็นของธาตุอาหารต่อการพัฒนาโครงสร้างของพืชโดยตรง สรุปได้ว่าการใช้ ธาตุอาหารอินทรีย์ร่วมกับน้ำหมักชีวภาพนมสด เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการส่งเสริมความเจริญเติบโตและการขยายทรงพุ่มของผักสลัดกรีน โอ๊คในระบบ NFT

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความกว้างทรงพุ่มของผักสลัดกรีน โอ๊ค ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้อุณหภูมิ 7 ชุดการทดลอง ในช่วงสี่สัปดาห์หลังย้ายปลูก

Treatment	ความกว้างทรงพุ่มของผักสลัดกรีน โอ๊ค (เซนติเมตร)			
	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
T1 Control (น้ำเปล่า)	5.75 ± 0.63 e*	4.10 ± 0.71 e	4.70 ± 0.92 e	3.62 ± 0.90 d
T2 น้ำหมักนมสด	13.15 ± 0.74 c	20.25 ± 1.16 c	22.85 ± 0.93 d	23.83 ± 1.51 c
T3 สารละลายอินทรีย์การค้ำ	13.90 ± 0.78 b	23.70 ± 0.97 b	24.05 ± 0.82 c	26.03 ± 1.47 b
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	14.35 ± 0.87 ab	24.35 ± 1.49 ab	25.20 ± 1.73 b	23.06 ± 2.46 c
T5 น้ำหมักนมสด + อินทรีย์การค้ำ (1:1)	14.55 ± 0.51 a	24.80 ± 1.00 a	26.80 ± 0.95 a	27.16 ± 1.23 a
T6 น้ำหมักนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	13.25 ± 0.71 c	20.55 ± 1.14 c	23.20 ± 0.89 d	25.36 ± 1.27 b
T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร (1:1)	11.55 ± 0.94 d	19.15 ± 1.75 d	22.80 ± 1.00 d	23.66 ± 1.26 c

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ผลการประเมินจำนวนใบของผักสลัดกรีน โอ๊ค ในช่วงสี่สัปดาห์หลังการย้ายปลูกพบความแตกต่างอย่างเด่นชัดระหว่างชุดการทดลองทั้งเจ็ดชุด โดยในสัปดาห์ที่ 1 ชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มีจำนวนใบต่ำที่สุด 5.05 ± 0.75 สะท้อนการตั้งตัวที่ล่าช้าเนื่องจากขาดธาตุอาหาร ขณะที่ชุดที่ได้รับสารอาหารมีการเจริญของใบสูงกว่าอย่างชัดเจน โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการคำ และ T3 อินทรียการคำ ให้จำนวนใบสูงที่สุดอย่างใกล้เคียงกันคือ 8.00 ± 0.79 และ 7.70 ± 0.92 รองลงมาคือ T4 สูตรเกษตรกร ที่ 6.95 ± 0.94 ส่วน T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร อยู่ในระดับปานกลางเท่ากับ 6.30 ± 1.12 และ 6.55 ± 0.51 ขณะที่ T7 อินทรียการคำ + สูตรเกษตรกรอยู่ที่ 6.20 ± 0.89 ซึ่งแม้อยู่ในกลุ่มที่มีปุ๋ย แต่ยังคงต่ำกว่าสูตรผสมที่มีอินทรียการคำชัดเจน

ในสัปดาห์ที่ 2 จำนวนใบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกสูตรยกเว้นชุดควบคุมที่ยังอยู่ค่าต่ำสุดคือ 4.10 ± 0.71 โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการคำ และ T3 อินทรียการคำ ยังคงเป็นสองสูตรที่ให้ผลดีที่สุดคือ 14.15 ± 1.38 และ 14.10 ± 1.33 ตามลำดับ ขณะที่ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด และ T7 อินทรียการคำ + สูตรเกษตรกร มีจำนวนใบเพิ่มขึ้นอยู่ระดับใกล้เคียงกันคือ 13.65 ± 1.18 และ 13.20 ± 1.23 ส่วน T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร และ T4 สูตรเกษตรกร อยู่ที่ 12.85 ± 1.08 และ 12.15 ± 1.53 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสูตรที่ผสมอินทรียการคำให้ผลดีกว่าสูตรที่ผสมสูตรเกษตรกรเดี่ยว

ในสัปดาห์ที่ 3 การเจริญของใบเข้าสู่ระยะเร่งเต็มที่ โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการคำ ยังคงให้จำนวนใบสูงที่สุด 23.55 ± 1.23 ตามด้วย T3 อินทรียการคำ ที่ 22.70 ± 1.45 และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ที่ 22.45 ± 1.19 ซึ่งสะท้อนว่าทั้งสูตรอินทรียการคำและสูตรที่มีน้ำหมักชีวภาพนมสดมีศักยภาพในการเร่งการขยายใบสูงมาก ส่วน T7 อินทรียการคำ + สูตรเกษตรกร และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร อยู่ที่ 21.85 ± 1.30 และ 21.30 ± 1.30 ตามลำดับ ขณะที่สูตรเกษตรกรเดี่ยว T4 มีค่าน้อยที่สุดในกลุ่มที่มีปุ๋ยคือ 20.30 ± 1.21 และ T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มีค่าเพียง 4.60 ± 0.59 ซึ่งต่ำมากเมื่อเทียบกับสูตรอื่นทั้งหมด

ในสัปดาห์ที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงก่อนเก็บเกี่ยว จำนวนใบสะท้อนผลสะสมของการได้รับธาตุอาหารในแต่ละสูตร โดย T3 อินทรียการคำ ให้จำนวนใบมากที่สุดคือ 36.16 ± 2.13 ตามด้วย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการคำ ที่ 34.60 ± 1.32 ทั้งสองสูตรแสดงประสิทธิภาพสูงสุดอย่างชัดเจน ขณะที่ T7 อินทรียการคำ + สูตรเกษตรกร อยู่ในอันดับถัดมาที่ 31.20 ± 1.57 ส่วน T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร อยู่ระดับปานกลางที่ 29.33 ± 1.37 และ 29.70 ± 4.17 ส่วน T4 สูตรเกษตรกร มีค่า 26.66 ± 1.42 ต่ำกว่าสูตรที่มีอินทรียการคำทุกสูตร และ T1 น้ำเปล่า อยู่ต่ำสุดเช่นเดิมคือ 5.23 ± 0.97 สะท้อนการขาดการพัฒนาเมื่อไม่มีธาตุอาหารสนับสนุน

เมื่อพิจารณาภาพรวมของผลการทดลองในตารางที่ 4.5 พบว่าจำนวนใบของผักสลัดกรีนไอล์มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูตรที่ให้ผลดีที่สุดคือ T3 อินทรีย์การค้ำ และ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ซึ่งให้จำนวนใบสูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะช่วงสัปดาห์ที่ 3 และ 4 ซึ่งเป็นช่วงสะสมมวลใบมากที่สุด รองลงมาคือ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสดเดี่ยว และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร ซึ่งให้จำนวนใบปานกลาง ส่วน T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร ให้ผลดีในลำดับถัดมาแต่ยังต่ำกว่าสูตรที่มีอินทรีย์การค้ำเดี่ยวหรือผสม ขณะที่ T4 สูตรเกษตรกร ให้ผลน้อยกว่าสูตรอินทรีย์ทั้งหมด และ T1 น้ำเปล่า มีค่าต่ำที่สุดตลอดการทดลอง สะท้อนว่าการเติมธาตุอาหาร โดยเฉพาะสูตรอินทรีย์การค้ำและสูตรผสมน้ำหมักชีวภาพนมสด ช่วยกระตุ้นการขยายใบและเพิ่มจำนวนใบของผักสลัดกรีนไอล์ได้ดีที่สุดในระบบ NFT

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนใบของผักสลัดกรีนไอล์ที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้อุณหภูมิ 7 ชุดการทดลอง ในช่วงสัปดาห์หลังย้ายปลูก

Treatment	จำนวนใบของผักสลัดกรีนไอล์ (ใบ)			
	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
T1 Control (น้ำเปล่า)	5.05 ± 0.75 d	4.10 ± 0.71 d	4.60 ± 0.59 f	5.23 ± 0.97 f
T2 น้ำหมักนมสด	6.30 ± 1.12 c	13.65 ± 1.18 ab	22.45 ± 1.19 bc	29.33 ± 1.37 d
T3 สารละลายอินทรีย์การค้ำ	7.70 ± 0.92 a	14.10 ± 1.33 a	22.70 ± 1.45 b	36.16 ± 2.13 a
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	6.95 ± 0.94 b	12.15 ± 1.53 c	20.30 ± 1.21 e	26.66 ± 1.42 e
T5 น้ำหมักนมสด + อินทรีย์การค้ำ (1:1)	8.00 ± 0.79 a	14.15 ± 1.38 a	23.55 ± 1.23 a	34.60 ± 1.32 b
T6 น้ำหมักนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	6.55 ± 0.51 bc	12.85 ± 1.08 bc	21.30 ± 1.30 d	29.70 ± 4.17 d
T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร (1:1)	6.20 ± 0.89 c	13.20 ± 1.23 b	21.85 ± 1.30 cd	31.20 ± 1.57 c

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ผลการประเมินความสูงของต้นผักสลัดกรีน โอ๊คในช่วงสี่สัปดาห์หลังการย้ายปลูกแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างชัดเจนระหว่างชุดการทดลองทั้งเจ็ดชุด โดยในสัปดาห์ที่ 1 ชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มีค่าความสูงต่ำที่สุดคือ 7.40 ± 1.11 แสดงถึงข้อจำกัดด้านธาตุอาหารที่ทำให้ต้นไม่สามารถยืดตัวได้อย่างเหมาะสม ขณะที่ชุดที่ได้รับธาตุอาหารทุกสูตรมีความสูงมากกว่าชัดเจน โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีयरคาร์บ ให้ค่าความสูงมากที่สุดคือ 9.40 ± 0.99 รองลงมาคือ T4 สูตรเกษตรกร ที่ 9.10 ± 1.11 และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร ที่ 9.00 ± 0.85 ส่วน T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด และ T3 อินทรีयरคาร์บ ให้ค่าอยู่ในระดับใกล้เคียงกันคือ 8.75 ± 0.71 และ 8.10 ± 0.85 ขณะที่ T7 อินทรีयरคาร์บ + สูตรเกษตรกร อยู่ที่ 7.50 ± 0.94 ซึ่งแม้จะสูงกว่าชุดควบคุม แต่ต่ำกว่าสูตรผสมหรือสูตรอินทรีयरที่มีความสมดุลของธาตุอาหารมากกว่า

ในสัปดาห์ที่ 2 ความสูงของต้นพืชเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในทุกชุดยกเว้นชุดควบคุม ซึ่งลดลงเหลือ 4.40 ± 0.94 อาจเนื่องมาจากการชะลอการยืดตัวเนื่องจากขาดธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง ตรงกันข้ามกับชุดที่ได้รับสารอาหาร โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีयरคาร์บ, T3 อินทรีयरคาร์บ, T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร, T7 อินทรีयरคาร์บ + สูตรเกษตรกร, และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ให้ค่าความสูงในระดับสูงใกล้เคียงกันระหว่าง $11.50 - 12.05$ ซึ่งสะท้อนประสิทธิภาพของสูตรที่มีส่วนผสมของอินทรีयरคาร์บหรือจุลินทรีย์จากน้ำหมักที่กระตุ้นการยืดตัวของต้น ขณะที่ T4 สูตรเกษตรกร มีค่าความสูงลดลงอยู่ที่ 10.20 ± 0.76 ซึ่งแม้ว่าจะยังสูงกว่าชุดควบคุม แต่เริ่มแสดงแนวโน้มความไม่สม่ำเสมอของสูตรในระยะนี้

ในสัปดาห์ที่ 3 ตัวต้นผักอยู่ในช่วงการยืดตัวเต็มที่ โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีयरคาร์บ ยังคงเป็นสูตรที่ให้ค่าความสูงสูงที่สุดคือ 14.00 ± 0.91 ใกล้เคียงกับ T3 อินทรีयरคาร์บ ที่ 14.10 ± 0.78 และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ที่ 13.90 ± 0.85 ส่วน T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร และ T7 อินทรีयरคาร์บ + สูตรเกษตรกร อยู่ที่ 12.55 ± 1.23 และ 12.95 ± 0.82 ตามลำดับ ขณะที่ T4 สูตรเกษตรกร มีค่า 10.75 ± 1.16 ต่ำกว่าสูตรอินทรีयरและสูตรผสมน้ำหมักอย่างชัดเจน และชุดควบคุม T1 น้ำเปล่า ยังคงต่ำที่สุดเพียง 4.00 ± 0.72 แสดงการยืดตัวจำกัดอย่างมากเนื่องจากขาดธาตุอาหาร

ในสัปดาห์ที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงก่อนการเก็บเกี่ยว พบว่าค่าความสูงของต้นผักสะท้อนความแตกต่างสะสมจากสูตรธาตุอาหารที่ใช้ โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีयरคาร์บ ยังคงให้ค่าความสูงมากที่สุดคือ 16.36 ± 1.24 แสดงประสิทธิภาพการส่งเสริมการยืดตัวต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง รองลงมาคือ T3 อินทรีयरคาร์บ และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ที่ 16.03 ± 1.35 และ 15.96 ± 1.24 ตามลำดับ แสดงว่าสูตรอินทรีयरและสูตรน้ำหมักชีวภาพมีบทบาทสำคัญต่อการยืดตัวของต้น ขณะที่ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร และ T7 อินทรีयरคาร์บ + สูตรเกษตรกร

อยู่ในระดับรองลงมาที่ 15.53 ± 1.27 และ 15.70 ± 1.17 ส่วน T4 สูตรเกษตรกร มีค่าเพียง 15.36 ± 1.40 ซึ่งแม้จะสูงขึ้นแต่ยังต่ำกว่าสูตรที่เสริมด้วยน้ำหมักชีวภาพ และชุดควบคุม T1 น้ำเปล่า ยังคงต่ำที่สุดอย่างต่อเนื่องที่ 5.23 ± 0.81 สะท้อนว่าการขาดธาตุอาหารจำกัดการยึดตัวของต้นอย่างมาก

เมื่อพิจารณาภาพรวมของผลการทดลองในตารางที่ 4.6 พบว่าความสูงของต้นผักสลัดกรีน โอ๊คแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดการทดลอง โดยสูตรที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ซึ่งให้ค่าความสูงสูงที่สุดอย่างต่อเนื่องในทุกสัปดาห์ แสดงถึงความสมดุลของธาตุอาหารและจุลินทรีย์ที่ช่วยส่งเสริมการยึดตัวของต้น รองลงมาคือ T3 อินทรีย์การค้ำ และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสดเดี่ยว ซึ่งทั้งสองสูตรมีประสิทธิภาพสูงใกล้เคียงกัน ขณะที่สูตรผสมร่วมกับสูตรเกษตรกรอย่าง T6 และ T7 ให้ผลในระดับปานกลาง ส่วนสูตรเกษตรกรเดี่ยว T4 มีประสิทธิภาพรองลงมาและมีความผันแปร ส่วน T1 น้ำเปล่า ให้ค่าต่ำที่สุดอย่างสม่ำเสมอ แสดงชัดเจนว่าการไม่มีธาตุอาหารจำกัดการยึดตัวของพืชอย่างมาก โดยสรุป สูตรที่มีอินทรีย์การค้ำ และน้ำหมักชีวภาพนมสดให้ผลดีที่สุดในการส่งเสริมความสูงของต้นผักสลัดกรีน โอ๊คในระบบ NFT

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความสูงต้นของผักสลัดกรีน โอ๊คในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้ 7 ชุดการทดลอง วัดในช่วงสัปดาห์หลังย้ายปลูก

Treatment	ความสูงต้นของผักสลัดกรีน โอ๊ค (เซนติเมตร)			
	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
T1 Control (น้ำเปล่า)	7.40 ± 1.11 d	4.40 ± 0.94 c	4.00 ± 0.72 d	5.23 ± 0.81 c
T2 น้ำหมักนมสด	8.75 ± 0.71 b	11.95 ± 1.19 a	13.90 ± 0.85 a	15.96 ± 1.24 ab
T3 สารละลายอินทรีย์การค้ำ	8.10 ± 0.85 c	11.85 ± 0.87 a	14.10 ± 0.78 a	16.03 ± 1.35 ab
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	9.10 ± 1.11 ab	10.20 ± 0.76 b	10.75 ± 1.16 c	15.36 ± 1.40 b
T5 น้ำหมักนมสด + อินทรีย์การค้ำ (1:1)	9.40 ± 0.99 a	12.05 ± 1.35 a	14.00 ± 0.91 a	16.36 ± 1.24 a
T6 น้ำหมักนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	9.00 ± 0.85 ab	11.60 ± 0.94 a	12.55 ± 1.23 b	15.53 ± 1.27 ab
T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร (1:1)	7.50 ± 0.94 d	11.50 ± 1.23 a	12.95 ± 0.82 b	15.70 ± 1.17 ab

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ผลการประเมินความยาวรากของผักสลัดกรีนโอ๊คในช่วงสี่สัปดาห์หลังย้ายปลูกพบความแตกต่างชัดเจนระหว่างชุดการทดลอง โดยในสัปดาห์ที่ 1 ชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มีค่าความยาวรากต่ำที่สุดคือ 4.975 ± 0.54 แสดงถึงการพัฒนารากที่จำกัดจากการขาดธาตุอาหาร ขณะที่ชุดที่ได้รับสารอาหารมีความยาวรากสูงกว่าอย่างเด่นชัด โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการค้ำ ให้ค่าความยาวรากมากที่สุด 13.50 ± 0.51 รองลงมาคือ T7 อินทรียการค้ำ + สูตรเกษตรกร ที่ 11.05 ± 0.88 และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร ที่ 10.30 ± 1.38 ส่วน T3 อินทรียการค้ำ, T4 สูตรเกษตรกร และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด อยู่ในระดับใกล้เคียงกันระหว่าง 9.40–9.60 สะท้อนว่าการเติมธาตุอาหารช่วยเพิ่มความสามารถของรากในการแผ่ขยายได้ตั้งแต่ช่วงต้น

ในสัปดาห์ที่ 2 ค่าความยาวรากเพิ่มขึ้นในทุกชุด โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการค้ำ ยังคงเป็นสูตรที่ให้ผลดีที่สุดคือ 14.15 ± 0.98 รองลงมาคือ T7 อินทรียการค้ำ + สูตรเกษตรกร ที่ 13.25 ± 1.06 และ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร ที่ 12.95 ± 1.43 ส่วน T4 สูตรเกษตรกร และ T3 อินทรียการค้ำ อยู่ในระดับปานกลางคือ 12.65 ± 0.98 และ 11.90 ± 1.51 ตามลำดับ ขณะที่ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ให้ค่า 11.75 ± 1.71 และ T1 น้ำเปล่า ยังคงต่ำที่สุดที่ 10.20 ± 1.05 แสดงว่าการขาดธาตุอาหารจำกัดการยึดตัวของรากอย่างต่อเนื่อง

ในสัปดาห์ที่ 3 ความยาวรากเพิ่มขึ้นในช่วงเจริญเติบโตสูงสุด โดย T7 อินทรียการค้ำ + สูตรเกษตรกร ให้ค่ามากที่สุดคือ 21.55 ± 1.05 รองลงมาคือ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกรที่ 20.55 ± 1.31 และ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการค้ำที่ 19.75 ± 1.11 ขณะที่ T4 สูตรเกษตรกร และ T3 อินทรียการค้ำ อยู่ในระดับใกล้เคียงกันที่ 18.90 ± 1.20 และ 18.60 ± 1.18 ส่วน T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด ให้ค่า 16.90 ± 1.33 และ T1 น้ำเปล่า อยู่ต่ำสุดที่ 12.85 ± 0.81 สะท้อนบทบาทของธาตุอาหารต่อการยึดตัวรากอย่างเด่นชัด

ในสัปดาห์ที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงก่อนเก็บเกี่ยว พบว่า T3 อินทรียการค้ำ ให้ค่าความยาวรากมากที่สุดที่ 20.83 ± 2.82 รองลงมาคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการค้ำ ที่ 20.36 ± 5.06 และ T7 อินทรียการค้ำ + สูตรเกษตรกร ที่ 19.13 ± 4.87 ขณะที่สูตรผสมเกษตรกรร่วมกับน้ำหมักชีวภาพ T6 อยู่ที่ 19.10 ± 1.76 ส่วน T4 สูตรเกษตรกร และ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด อยู่ในระดับปานกลางคือ 18.50 ± 3.33 และ 17.66 ± 1.32 ส่วน T1 น้ำเปล่า ลดลงเหลือ 6.46 ± 2.87 ซึ่งต่ำที่สุดอย่างมากชี้ให้เห็นข้อจำกัดในการพัฒนารากจากการไม่มีธาตุอาหาร

โดยภาพรวมของตารางที่ 4.7 พบว่าสูตรที่ให้ผลดีที่สุดในทุกช่วงคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรียการค้ำ, T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร, และ T7 อินทรียการค้ำ + สูตรเกษตรกร โดยมีความยาวรากสูงสม่ำเสมอในทุกสัปดาห์ สะท้อนให้เห็นว่าการใช้สูตรผสมช่วยเพิ่มความต่อเนื่องของธาตุอาหารซึ่งเอื้อต่อการพัฒนาระบบราก ขณะที่สูตรอินทรียการค้ำเดี่ยว T3 แม้

จะให้ผลดีในช่วงท้าย แต่ให้ผลต่ำกว่าสูตรผสมในช่วงต้น ส่วนสูตรเกษตรกรเดี่ยว T4 ให้ผลปานกลางและมีความผันแปร ส่วน T1 น้ำเปล่า ให้ผลต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทุกสัปดาห์

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความยาวรากของผักสลัดกรีน โอ๊คในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้อุณหภูมิ 7 ชุดการทดลอง วัดในช่วงสัปดาห์หลังย้ายปลูก

Treatment	ความยาวรากของผักสลัดกรีน โอ๊ค (เซนติเมตร)			
	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
T1 Control (น้ำเปล่า)	4.98 ± 0.54 e	10.20 ± 1.05 e	12.85 ± 0.81 f	6.46 ± 2.87 d
T2 น้ำหมักนมสด	9.40 ± 0.80 d	11.75 ± 1.71 d	16.90 ± 1.33 e	17.66 ± 1.32 c
T3 สารละลายอินทรีย์การค้ำ	9.55 ± 1.35 d	11.90 ± 1.51 cd	18.60 ± 1.18 d	20.83 ± 2.82 a
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	9.60 ± 1.04 d	12.65 ± 0.98 bc	18.90 ± 1.20 d	18.50 ± 3.33 bc
T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ (1:1)	13.50 ± 0.51 a	14.15 ± 0.98 a	19.75 ± 1.11 c	20.36 ± 5.06 ab
T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	10.30 ± 1.38 c	12.95 ± 1.43 b	20.55 ± 1.31 b	19.10 ± 1.76 abc
T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร (1:1)	11.05 ± 0.88 b	13.25 ± 1.06 b	21.55 ± 1.05 a	19.13 ± 4.87 abc

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ผลการประเมินน้ำหนักสดของผักสลัดกรีน โอ๊ค ณ วันเก็บเกี่ยวพบความแตกต่างชัดเจนระหว่างชุดการทดลองทั้งหมด โดยชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) ให้ค่าน้ำหนักสดต่ำที่สุดอย่างมากคือ 3.11 ± 0.40 สะท้อนผลกระทบจากการขาดธาตุอาหารที่จำกัดการเจริญเติบโตของพืชอย่างรุนแรง ขณะที่ชุดที่ได้รับสารละลายธาตุอาหารให้ผลสูงกว่ามาก โดยสูตรที่ให้ค่าน้ำหนักสดสูงที่สุดคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ซึ่งมีน้ำหนักสดเฉลี่ย 101.19 ± 14.31 รองลงมาคือ T3 อินทรีย์การค้ำที่ 99.80 ± 11.18 ซึ่งให้ค่ามวลสดสูงใกล้เคียงกันอย่างมาก แสดงถึงความสามารถในการสนับสนุนการสร้างมวลชีวภาพของสูตรที่มีธาตุอาหารอินทรีย์ครบถ้วน นอกจากนี้ T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด, T4 สูตรเกษตรกร, T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร, และ T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกรให้ผลอยู่ในระดับใกล้เคียงกันระหว่าง 77-82 กรัม ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมอย่างชัดเจน แต่ต่ำกว่าสูตรที่มีอินทรีย์การค้ำเดี่ยวหรือสูตรที่มีน้ำหมักชีวภาพผสมอินทรีย์การค้ำ

ในส่วนของน้ำหนักแห้ง พบร่องรอยแนวโน้มสอดคล้องกับน้ำหนักสด โดยชุดที่ให้มวลแห้งมากที่สุดคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ที่มีน้ำหนักแห้ง $6,071 \pm 858$ มิลลิกรัม ตามด้วย T3 อินทรีย์การค้ำ ที่ $5,988 \pm 671$ มิลลิกรัม ซึ่งสอดคล้องกับน้ำหนักสดที่สูงที่สุดและแสดง

ถึงการสร้างโครงสร้างพีชที่หนาแน่นกว่า ส่วนชุนน้ำหมักชีวภาพเดี่ยว T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด, T4 สูตรเกษตรกร, T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร, และ T7 อินทรีย์การค้า + สูตรเกษตรกร ให้ค่าน้ำหนักแห้งในช่วง 4,676–4,975 มิลลิกรัม ซึ่งมากกว่าชุดควบคุมอย่างเด่นชัด แต่ยังต่ำกว่าสูตรที่มีอินทรีย์การค้า ขณะที่ชุดควบคุม T1 น้ำเปล่า มีน้ำหนักแห้งต่ำที่สุดเพียง 187±24 มิลลิกรัม แสดงถึงความไม่พัฒนาของโครงสร้างพีชอย่างชัดเจนเมื่อไม่มีธาตุอาหาร

เมื่อพิจารณาภาพรวมจากตารางที่ 4.8 พบว่าสูตรที่ให้ประสิทธิภาพดีที่สุดต่อการเพิ่มน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักสลัดกรีน โอ๊คคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้า รองลงมาคือ T3 อินทรีย์การค้าทั้งสองสูตรแสดงผลเหนือกว่าสูตรอื่นอย่างสม่ำเสมอ แสดงให้เห็นถึงความสมดุลของธาตุอาหารและคุณสมบัติของอินทรีย์การค้าที่ส่งเสริมการสร้างมวลชีวภาพ ส่วนสูตรผสมร่วมกับสูตรเกษตรกรอย่าง T6 และ T7 รวมถึงสูตรเดี่ยวของน้ำหมักชีวภาพหรือสูตรเกษตรกรเดี่ยว ให้ผลในระดับปานกลางและมีความผันแปร ขณะที่ T1 น้ำเปล่า ให้ผลต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ แสดงความจำเป็นของธาตุอาหารต่อการพัฒนาของผักสลัดกรีน โอ๊คในระบบ NFT โดยสรุป สูตรที่มีอินทรีย์การค้า โดยเฉพาะเมื่อผสมน้ำหมักชีวภาพนมสด เป็นสูตรที่ให้การตอบสนองต่อการสะสมมวลชีวภาพสูงที่สุดอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.8 ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักสลัดกรีน โอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้อุณหภูมิ 7 ชุดการทดลอง ณ วันเก็บเกี่ยว

Treatment	น้ำหนักสด (g) ± SD	น้ำหนักแห้ง (mg) ± SD
T1 Control (น้ำเปล่า)	3.11±0.40c	187±24 c
T2 น้ำหมักนมสด	82.92±13.40b	4,975±804 b
T3 สารละลายอินทรีย์การค้า	99.80±11.18a	5,988±671 a
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	78.18±10.96b	4,691±657 b
T5 น้ำหมักนมสด + อินทรีย์การค้า (1:1)	101.19±14.31a	6,071±858 a
T6 น้ำหมักนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	77.94±13.56b	4,676±813 b
T7 อินทรีย์การค้า + สูตรเกษตรกร (1:1)	82.45±13.40b	4,947±804 b

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตตกค้างในผักสลัดกรีนโอ๊ค ณ วันเก็บเกี่ยวแสดงให้เห็นว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในแต่ละชุดการทดลอง โดยชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (ไม่เติมสารละลายธาตุอาหาร) มีปริมาณไนเตรตต่ำที่สุดเท่ากับ $1,550.00 \pm 2.00$ มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมสด ซึ่งสะท้อนถึงการเจริญเติบโตที่จำกัดและการดูดซึมไนเตรตที่ต่ำมากเนื่องจากขาดธาตุอาหาร ขณะที่ชุดที่เติมสารอาหารมีปริมาณไนเตรตสูงกว่าอย่างเด่นชัด โดยสูตรที่ให้ค่าสูงที่สุดคือ T4 สูตรเกษตรกร ที่มีค่า $8,033.00 \pm 1.54$ ซึ่งสูงกว่าสูตรอื่นทั้งหมด สะท้อนให้เห็นว่าสูตรเกษตรกรมีส่วนในโตรเจนหรือรูปแบบธาตุอาหารที่พืชดูดซึมไนเตรตจำนวนมาก แต่ยังไม่สามารถส่งเสริมการเปลี่ยนไนเตรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนรูปอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ T6 น้ำหมักชีวภาพนมสด + สูตรเกษตรกร มีค่าสูงรองลงมาที่ $7,033.00 \pm 1.34$ ใกล้เคียงกับสูตรเกษตรกรเดี่ยว แสดงให้เห็นว่าสูตรน้ำหมักชีวภาพไม่สามารถลดการสะสมไนเตรตที่มีอยู่สูงในสูตรเกษตรกรได้อย่างเต็มที่

ในส่วนของสูตรที่มีอินทรีย์คาร์บอน ได้แก่ T3 อินทรีย์คาร์บอน, T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์คาร์บอน และ T7 อินทรีย์คาร์บอน + สูตรเกษตรกร พบว่ามีระดับไนเตรตปานกลาง โดย T3 มีค่า $5,300.00 \pm 2.12$, T5 มีค่า $2,733.00 \pm 1.50$ และ T7 มีค่า $4,578.00 \pm 2.00$ แสดงให้เห็นว่าสูตร T5 ซึ่งมีน้ำหมักชีวภาพร่วมกับอินทรีย์คาร์บอนสามารถลดการสะสมไนเตรตบริเวณใบได้ดีที่สุดในกลุ่มนี้ อาจเกิดจากจุลินทรีย์ในน้ำหมักที่ช่วยกระตุ้นกระบวนการเปลี่ยนไนเตรตเป็นสารประกอบไนโตรเจนรูปอื่น ขณะที่สูตรอินทรีย์คาร์บอนเดี่ยว (T3) และสูตรผสมอินทรีย์-เกษตรกร (T7) ยังคงมีระดับไนเตรตสูงในระดับปานกลางตามปริมาณไนโตรเจนที่มีในสูตรปุ๋ย ส่วนสูตรน้ำหมักชีวภาพเดี่ยว T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด มีค่าไนเตรต $2,356.33 \pm 1.23$ ซึ่งต่ำกว่าสูตรที่มีอินทรีย์คาร์บอนและสูตรเกษตรกรหลายชุด แสดงถึงความสามารถของน้ำหมักชีวภาพนมสดในการลดปริมาณไนเตรตสะสมได้ดี

โดยภาพรวมจากตารางที่ 4.9 สามารถสรุปได้ว่า สูตรที่มีปริมาณไนเตรตสูงสุด คือ สูตรเกษตรกรเดี่ยว (T4) และสูตรผสมที่มีสูตรเกษตรกรร่วมด้วย (T6, T7) ซึ่งสามารถนำไปสู่ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยอาหารเมื่อเทียบกับเกณฑ์มาตรฐานสากล ขณะที่สูตรที่มีน้ำหมักชีวภาพนมสดเดี่ยว (T2) และสูตรผสมกับอินทรีย์คาร์บอน (T5) ให้ระดับไนเตรตต่ำกว่าอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในการช่วยควบคุมและลดการสะสมของไนเตรตในใบ โดยเฉพาะ T5 ที่มีศักยภาพสูงที่สุดในการลดการสะสมไนเตรต ทั้งนี้ การไม่เติมสารละลายธาตุอาหาร (T1) แม้จะให้ไนเตรตต่ำที่สุด แต่ให้ผลการเจริญเติบโตต่ำที่สุดเช่นกัน สรุปได้ว่าสูตรที่ให้ความสมดุลระหว่างการเติบโตและความปลอดภัยของไนเตรตที่ดีที่สุดคือสูตรที่มีน้ำหมักชีวภาพนมสดร่วมกับอินทรีย์คาร์บอน (T5)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณไนเตรตตกค้าง (NO_3^-) ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้อุณหภูมิ 7 ชุดการทดลอง ณ วันเก็บเกี่ยว

Treatment	ปริมาณไนเตรต (mg/kg FW) \pm SD
T1 Control (น้ำเปล่า)	1,550.00 \pm 2.00 f
T2 น้ำหมักนมสด	2,356.33 \pm 1.23 e
T3 สารละลายอินทรีย์การค้า	5,300.00 \pm 2.12 c
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	8,033.00 \pm 1.54 a
T5 น้ำหมักนมสด + อินทรีย์การค้า (1:1)	2,733.00 \pm 1.50 d
T6 น้ำหมักนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	7,033.00 \pm 1.34 b
T7 อินทรีย์การค้า + สูตรเกษตรกร (1:1)	4,578.00 \pm 2.00 c

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มนี้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ของผักสลัดกรีนโอ๊ค ณ วันเก็บเกี่ยวแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างชุดการทดลองทั้งเจ็ดชุด โดยชุดควบคุม T1 ชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มีค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งสามชนิดต่ำที่สุดอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับการเจริญเติบโตที่จำกัดและการพัฒนาของใบที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากขาดธาตุอาหาร สะท้อนให้เห็นว่าการเจริญของใบและระบบสังเคราะห์แสงได้รับผลกระทบอย่างรุนแรงเมื่อไม่มีสารอาหารรองรับ ขณะที่สูตรที่ได้รับสารละลายธาตุอาหาร ไม่ว่าจะเป็นอินทรีย์การค้า น้ำหมักชีวภาพ หรือสูตรผสม ล้วนให้ค่าคลอโรฟิลล์สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในชุดที่มีอินทรีย์การค้าและน้ำหมักชีวภาพร่วมกัน ซึ่งให้ระดับคลอโรฟิลล์สูงที่สุดในหมู่ชุดทดสอบทั้งหมด (ตารางที่ 4.10)

ชุดที่ให้ค่าคลอโรฟิลล์ a สูงที่สุดคือ T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้า และ T3 อินทรีย์การค้า ซึ่งมีค่าที่สูงใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับข้อมูลด้านการเจริญเติบโตและมวลชีวภาพที่แสดงว่าสูตรที่มีอินทรีย์การค้าให้ศักยภาพทางสรีรวิทยาที่สูงที่สุดสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสง ขณะที่ชุดที่มีน้ำหมักชีวภาพร่วมกับสูตรเกษตรกร T6 และสูตรผสมอินทรีย์-เกษตรกร T7 ให้ค่าคลอโรฟิลล์ในระดับปานกลาง ส่วน T4 สูตรเกษตรกรเดี่ยว แม้ให้ผลการเติบโตบางด้านได้ดี แต่มีคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าสูตรที่มีอินทรีย์การค้าอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจเป็นผลจากความไม่สมดุลของธาตุอาหารในสูตร ปริมาณคลอโรฟิลล์ b มีรูปแบบคล้ายคลึงกับคลอโรฟิลล์ a โดย T5 และ T3 ยังคงเป็นสูตรที่ให้ค่ามากที่สุด ขณะที่สูตรผสมกับสูตรเกษตรกรให้ค่าอยู่ระดับรองลงมา ส่วน T1 น้ำเปล่า มีค่าต่ำที่สุดเช่นเดิม (ตารางที่ 4.10)

เมื่อพิจารณาปริมาณคลอโรฟิลล์รวม จะพบแนวโน้มเดียวกัน โดย T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ ให้ค่าคลอโรฟิลล์รวมสูงที่สุด รองลงมาคือ T3 อินทรีย์การค้ำ ซึ่งทั้งสองสูตรนี้มีศักยภาพในการส่งเสริมระบบสังเคราะห์แสงได้ดีที่สุด ส่วนชุดน้ำหมักชีวภาพเดี่ยว T2 น้ำหมักชีวภาพนมสด และชุดผสมกับสูตรเกษตรกร T6 และ T7 ให้ค่าคลอโรฟิลล์รวมในระดับปานกลาง ขณะที่ T4 สูตรเกษตรกร มีค่าคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าสูตรอินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ และชุดควบคุม T1 น้ำเปล่า ให้ค่าต่ำที่สุดอย่างมากในทุกชนิดของคลอโรฟิลล์ สอดคล้องกับรูปแบบการเจริญเติบโตและลักษณะทางสัณฐานของใบที่ด้อยกว่าในสูตรที่ไม่มีธาตุอาหาร (ตารางที่ 4.10)

โดยสรุปจากตารางที่ 4.10 สามารถกล่าวได้ว่าสูตรที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุดด้านการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์คือ T5 (น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้ำ) และ T3 (อินทรีย์การค้ำ) ซึ่งส่งเสริมระบบสังเคราะห์แสงได้ดีที่สุดและสอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตด้านอื่น ๆ เช่น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และน้ำหนักสด ขณะที่สูตรที่มีน้ำหมักชีวภาพร่วมกับสูตรเกษตรกรหรืออินทรีย์-เกษตรกร แม้จะให้ผลในระดับดี แต่ยังไม่สูงเท่าสูตรที่มีอินทรีย์การค้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ส่วนสูตรเกษตรกรเดี่ยวให้ค่าต่ำกว่าสูตรอินทรีย์ทั้งหมด และชุดควบคุมให้ค่าต่ำที่สุดตามความคาดหมาย โดยภาพรวม สูตรที่มีการผสมผสานระหว่างอินทรีย์การค้ำและน้ำหมักชีวภาพเป็นสูตรที่ส่งเสริมศักยภาพทางสรีรวิทยาของผักสลัดได้ดีที่สุดในระบบ NFT

ตารางที่ 4.10 ค่าเฉลี่ยของ Chlorophyll a, Chlorophyll b และ Total Chlorophyll (mg/g Fresh Weight) ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ภายใต้ 7 ชุดการทดลอง ณ วันเก็บเกี่ยว

Treatment	Chl a ± SD	Chl b ± SD	Total Chl ± SD
T1 Control (น้ำเปล่า)	0.061 ± 0.003 f	0.021 ± 0.001 f	0.082 ± 0.003 f
T2 น้ำหมักนมสด	0.115 ± 0.007 d	0.039 ± 0.002 d	0.153 ± 0.007 d
T3 สารละลายอินทรีย์การค้ำ	0.163 ± 0.007 a	0.052 ± 0.002 a	0.216 ± 0.008 a
T4 สูตรธาตุอาหารเกษตรกร	0.109 ± 0.006 e	0.036 ± 0.002 e	0.145 ± 0.007 e
T5 น้ำหมักนมสด + อินทรีย์การค้ำ (1:1)	0.168 ± 0.007 a	0.054 ± 0.003 a	0.222 ± 0.008 a
T6 น้ำหมักนมสด + สูตรเกษตรกร (1:1)	0.129 ± 0.005 c	0.043 ± 0.002 c	0.171 ± 0.006 c
T7 อินทรีย์การค้ำ + สูตรเกษตรกร (1:1)	0.139 ± 0.006 b	0.046 ± 0.002 b	0.185 ± 0.007 b

* ค่าที่มีตัวอักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (DMRT, $p \leq 0.05$)

ประเมินความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์

จากตารางที่ 4.11 และ ภาพที่ 4.7 แสดงให้เห็นโครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านการเจริญเติบโต (growth traits) และตัวแปรด้านคุณภาพ (chlorophyll และ ไนเตรท) ของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ภายใต้ 7 ชุดการทดลอง โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (Pearson's r) เป็นตัวชี้วัดความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรแต่ละคู่ พร้อมค่า p-value ประกอบการพิจารณานัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณา ภาพที่ 4.7A จะเห็นได้ชัดว่า ส่วนใหญ่ของเมทริกซ์มีโทนสีใกล้เคียงกันและอยู่ในระดับ เข้มในทิศทางบวก แสดงถึงค่าสหสัมพันธ์เชิงบวกสูงเกือบทุกคู่ของตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคลอโรฟิลล์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า r ที่อยู่ในช่วงประมาณ 0.93–1.00 (ตารางที่ 4.11) ในขณะที่ช่องที่เกี่ยวข้องกับไนเตรทมีโทนสีอ่อนกว่าอย่างชัดเจน สะท้อนว่าความสัมพันธ์ระหว่างไนเตรทกับตัวแปรอื่นมีระดับต่ำและไม่เป็นนัยสำคัญทางสถิติ

ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้านการเจริญเติบโต ได้แก่ ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความสูง ความยาวราก น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ซึ่งสรุปแสดงใน ภาพที่ 4.7B จะพบว่าค่าความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละคู่ของตัวแปรอยู่ในระดับสูงมาก โดยมีค่า r อยู่ในช่วงประมาณ 0.97–1.00 และมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.01$ แทบทุกคู่ (ตารางที่ 4.11) เช่น ความกว้างทรงพุ่มมีความสัมพันธ์สูงกับจำนวนใบ ความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ($r > 0.98$; $p < 0.01$) น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งมีค่าสหสัมพันธ์เกือบสมบูรณ์ ($r \approx 1.00$; $p < 0.01$) ซึ่งสอดคล้องกับหลักสรีรวิทยาว่า มวลชีวภาพสดที่เพิ่มขึ้นมักสะท้อนถึงการสะสมมวลแห้งในส่วนเหนือดินของพืช ในเชิงสรีรวิทยา ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่า เมื่อพืชมีการพัฒนาโครงสร้างทางสัณฐาน เช่น ทรงพุ่มกว้างขึ้น จำนวนใบเพิ่มขึ้น ความสูงและความยาวรากมากขึ้น จะส่งผลให้มวลชีวภาพโดยรวมเพิ่มขึ้นตามไปด้วยอย่างชัดเจน โครงสร้างการเจริญเติบโตจึงสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกันอย่างแข็งแกร่ง ซึ่งภาพที่ 4.7B แสดงออกมาในรูปของบล็อกลีเข้มเกือบเต็มทั้งเมทริกซ์ของตัวแปรกลุ่มนี้ ยืนยันถึงความเป็น กลุ่มตัวแปรเดียวกัน ที่สะท้อนสมรรถนะการเจริญเติบโตของผักในระบบไฮโดรพอนิกส์

ความสัมพันธ์ระหว่างคลอโรฟิลล์กับการเจริญเติบโต พบว่า ตัวแปรด้านคุณภาพใบ ได้แก่ Chlorophyll a, Chlorophyll b และ Total chlorophyll พบว่ามีความสัมพันธ์กันเองในระดับสูงมาก (r เกือบเท่ากับ 1.00; $p < 0.01$) และยังมีความสัมพันธ์เชิงบวกสูงกับตัวแปรด้านการเจริญเติบโตเกือบทุกตัว (ตารางที่ 4.11) โดยที่ Total chlorophyll มีความสัมพันธ์สูงกับจำนวนใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ($r > 0.95$; $p < 0.01$) (ตารางที่ 4.11) และ Chlorophyll a และ b มีแนวโน้มความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกับความกว้างทรงพุ่มและความสูงของต้น (r สูงกว่า 0.93; $p < 0.01$) เมื่อพิจารณา

จาก Heatmap เฉพาะกลุ่มคุณภาพจาก ภาพที่ 4.7C จะพบว่า ช่องระหว่าง Chl a, Chl b และ Total Chl มีสีเข้มมาก แสดงถึงความสัมพันธ์สูงมากในเชิงเส้นระหว่างกัน เนื่องจากทั้งสามตัวแปรเป็นตัวแทนของเม็ดสีสังเคราะห์แสงในใบพืช และปกติจะเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกันเมื่อพืชอยู่ในสถานะที่ส่งเสริมการสังเคราะห์แสงเมื่อนำผลจากภาพที่ 4.7A มาพิจารณาร่วมกัน จะพบว่าทิศทางของตัวแปรคลอโรฟิลล์สอดคล้องไปกับตัวแปรการเจริญเติบโตด้านมวลชีวภาพและโครงสร้าง เช่น น้ำหนักสด จำนวนใบ และความกว้างทรงพุ่ม บ่งชี้ว่า การเพิ่มขึ้นของคลอโรฟิลล์ในใบผักกาดหอมในระบบนี้ สามารถใช้เป็นดัชนีหนึ่งในการสะท้อนประสิทธิภาพของสูตรอาหารและความสามารถในการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งส่งผลต่อผลผลิตในที่สุด

บทบาทของไนเตรตต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพ พบว่าปริมาณไนเตรตกลับมีความสัมพันธ์ในระดับต่ำและไม่เป็นนัยสำคัญทางสถิติกับตัวแปรการเจริญเติบโตและคลอโรฟิลล์ส่วนใหญ่ (ค่า r ประมาณ 0.35–0.51; $p > 0.25$) (ตารางที่ 4.11) เมื่อพิจารณาจาก Heatmap ในภาพที่ 4.7A และ 4.7 C จะเห็นว่า ช่องที่สัมพันธ์กับ Nitrate มีสีอ่อนกว่าช่องของตัวแปรอื่นอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของไนเตรตในดินไม่ได้สะท้อนการเพิ่มขึ้นของผลผลิตหรือปริมาณคลอโรฟิลล์โดยตรง ผลนี้สอดคล้องกับข้อเท็จจริงเชิงสรีรวิทยาว่า แม้นไนโตรเจน ที่อยู่ในรูปของไนเตรต เป็นธาตุอาหารหลักที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต แต่เมื่อความเข้มข้นสูงเกินกว่าระดับเหมาะสม อาจทำให้เกิดการสะสมไนเตรตในเนื้อเยื่อพืชโดยไม่ได้เพิ่มการสร้างมวลชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังอาจเพิ่มความเสี่ยงด้านความปลอดภัยจากการบริโภคผักที่มีไนเตรตสะสมสูง

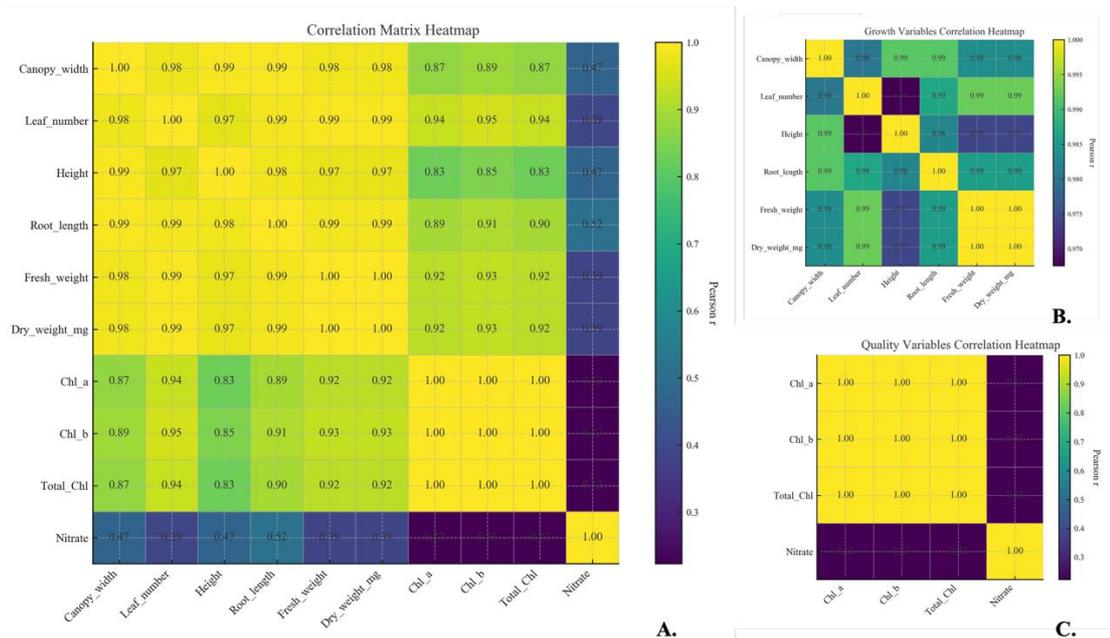
การที่ไนเตรตไม่สัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนใบ และคลอโรฟิลล์ (ตารางที่ 4.11, ภาพที่ 4.7A และ 4.7C) จึงสามารถตีความได้ว่า สูตรธาตุอาหารบางสูตร โดยเฉพาะสารละลายธาตุอาหารตามกรรมวิธีของเกษตรกรและสูตรน้ำหมักนมสดผสมกับสารละลายธาตุอาหารตามกรรมวิธีของเกษตรกร (1:1) แม้จะเพิ่มภาวะไนเตรตในดิน แต่ไม่ได้ให้ผลผลิตเหนือกว่าสูตรอินทรีย์การค้าหรือสูตรผสมกับน้ำหมักนมสดที่มีระดับไนเตรตต่ำกว่า ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการควบคุมปริมาณไนโตรเจนในสูตรอาหารพืช เพื่อให้ได้สมดุลระหว่างผลผลิตและความปลอดภัยในการบริโภค

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แสดงภาพรวมที่ชัดเจนว่า ตัวแปรด้านการเจริญเติบโตทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สะท้อนว่าการตอบสนองต่อสูตรธาตุอาหารต่างๆ ของผักสลัดกรีนโอ๊คในระบบไฮโดรพอนิกส์เกิดขึ้นทั้งในแง่โครงสร้าง (ทรงพุ่ม ใบ ความสูง ราก) และมวลชีวภาพ (น้ำหนักสด-แห้ง) (ตารางที่ 4.11, ภาพที่ 4.7B) นอกจากนี้คลอโรฟิลล์เป็นตัวแปรสรีรวิทยาที่สัมพันธ์ใกล้ชิดกับการเจริญเติบโต และสามารถใช้เป็นดัชนีประเมินภาวะ

โภชนาการและสมรรถนะการสังเคราะห์แสงของพืชได้ดี (ตารางที่ 4.11, ภาพที่ 4.7A และ 4.7C) ในขณะที่ไนเตรทสะสมไม่ได้เป็นตัวชี้วัดผลผลิตโดยตรง และในบางสูตรธาตุอาหาร แม้ไนเตรทสูง แต่ไม่ทำให้พืชให้ผลผลิตสูงกว่าสูตรที่มีไนเตรทต่ำกว่า แสดงให้เห็นความสำคัญของการออกแบบสูตรธาตุอาหารที่สมดุลทั้งด้านผลผลิตและความปลอดภัยอาหาร (ตารางที่ 4.10, ภาพที่ 4.7A, 4.7C)

ตารางที่ 4.11 แสดงเมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์ของเพียร์สัน (r) และค่า p-value ระหว่างตัวแปรด้าน การเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีน โอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์

ตัวแปร	Canopy width	Leaf number	Height	Root length	Fresh weight	Dry weight	Chl a	Chl b	Total Chl	Nitrate
Canopy width	1.000	0.9928 (0.0002)	0.9875 (0.0004)	0.9880 (0.0004)	0.9881 (0.0004)	0.9881 (0.0004)	0.9846 (0.0006)	0.9815 (0.0009)	0.9841 (0.0007)	0.3895 (0.3892)
Leaf number	0.9928 (0.0002)	1.000	0.9796 (0.0011)	0.9804 (0.0010)	0.9928 (0.0002)	0.9928 (0.0002)	0.9385 (0.0057)	0.9319 (0.0067)	0.9373 (0.0060)	0.5133 (0.2581)
Height	0.9875 (0.0004)	0.9796 (0.0011)	1.000	0.9985 (0.00003)	0.9828 (0.0008)	0.9827 (0.0008)	0.9819 (0.0009)	0.9787 (0.0012)	0.9819 (0.0009)	0.3870 (0.3925)
Root length	0.9880 (0.0004)	0.9804 (0.0010)	0.9985 (0.00003)	1.000	0.9842 (0.0007)	0.9843 (0.0007)	0.9808 (0.0010)	0.9775 (0.0013)	0.9803 (0.0010)	0.3586 (0.4303)
Fresh weight	0.9881 (0.0004)	0.9928 (0.0002)	0.9828 (0.0008)	0.9842 (0.0007)	1.000	1.000	0.9518 (0.0033)	0.9467 (0.0040)	0.9512 (0.0034)	0.4885 (0.2817)
Dry weight	0.9881 (0.0004)	0.9928 (0.0002)	0.9827 (0.0008)	0.9843 (0.0007)	1.000	1.000	0.9517 (0.0033)	0.9467 (0.0040)	0.9511 (0.0034)	0.4887 (0.2815)
Chl a	0.9846 (0.0006)	0.9385 (0.0057)	0.9819 (0.0009)	0.9808 (0.0010)	0.9518 (0.0033)	0.9517 (0.0033)	1.000	0.9980 (0.00006)	0.9998 (0.00001)	0.4313 (0.3336)
Chl b	0.9815 (0.0009)	0.9319 (0.0067)	0.9787 (0.0012)	0.9775 (0.0013)	0.9467 (0.0040)	0.9467 (0.0040)	0.9980 (0.00006)	1.000	0.9987 (0.00003)	0.4313 (0.3335)
Total Chl	0.9841 (0.0007)	0.9373 (0.0060)	0.9819 (0.0009)	0.9803 (0.0010)	0.9512 (0.0034)	0.9511 (0.0034)	0.9998 (0.00001)	0.9987 (0.00003)	1.000	0.4324 (0.3321)
Nitrate	0.3895 (0.3892)	0.5133 (0.2581)	0.3870 (0.3925)	0.3586 (0.4303)	0.4885 (0.2817)	0.4887 (0.2815)	0.4313 (0.3336)	0.4313 (0.3335)	0.4324 (0.3321)	1.000



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีนโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT โดย

A: แสดง Heatmap ของเมทริกซ์ค่าสหสัมพันธ์ (Pearson correlation) ของตัวแปรทั้งหมดที่ศึกษา ได้แก่ ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความสูง ความยาวราก น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ปริมาณคลอโรฟิลล์ (Chl a, Chl b, Total Chl) และปริมาณไนเตรท พบว่าตัวแปรด้านการเจริญเติบโตมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับสูงมาก ($r > 0.95$) ในขณะที่ปริมาณไนเตรทมีความสัมพันธ์ต่ำและไม่เป็นนัยสำคัญทางสถิติกับตัวแปรอื่น

B: แสดง Heatmap ของตัวแปรกลุ่มการเจริญเติบโต พบความสัมพันธ์ภายในกลุ่มสูงมากทุกคู่ ($r = 0.97-1.00$) สะท้อนว่าโครงสร้างการเจริญเติบโตของพืชมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

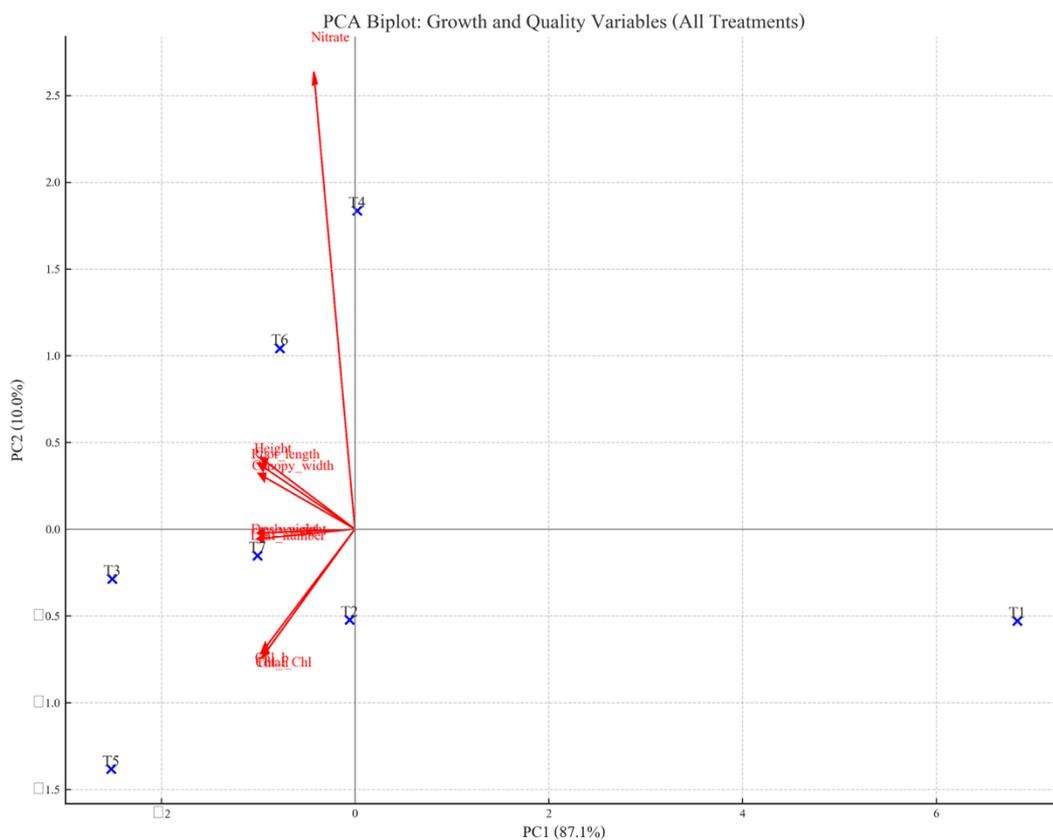
C: แสดง Heatmap ของคุณภาพใบ ได้แก่ Chlorophyll a, Chlorophyll b, Total Chlorophyll และปริมาณไนเตรท โดยพบว่าคลอโรฟิลล์ทั้งสามตัวมีความสัมพันธ์สูงมาก ($r \approx 1.00$) ในขณะที่ไนเตรทไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวชี้วัดด้านสรีรวิทยาทางใบ

ความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างระหว่างชุดการทดลอง กับตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพพืช

จากภาพที่ 4.8A เป็นกราฟ PCA Biplot แสดงตำแหน่งของชุดการทดลองทั้ง 7 ชุด (T1–T7) บนระนาบขององค์ประกอบหลักตัวที่ 1 (PC1) และตัวที่ 2 (PC2) พร้อมกับเวกเตอร์ของตัวแปรทั้งหมด 10 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรการเจริญเติบโต: ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความสูง ความยาวราก น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ตัวแปรคุณภาพใบ: Chlorophyll a, Chlorophyll b, Total chlorophyll ตัวแปรคุณภาพด้านความปลอดภัยอาหาร: Nitrate

ผลการวิเคราะห์พบว่า PC1 อธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ประมาณ 87% PC2 อธิบายเพิ่มได้ประมาณ 10% รวมกันแล้ว PC1 + PC2 อธิบายข้อมูลได้มากกว่า 97% ทำให้ภาพที่ 4.8A สามารถสะท้อนโครงสร้างข้อมูลแทบทั้งหมดของชุดการทดลองได้อย่างเหมาะสม การใช้ Biplot บนแกน PC1–PC2 จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการเปรียบเทียบสูตรต่าง ๆ ซึ่ง PC1 แสดงค่าดัชนี ความสมบูรณ์ของการเจริญเติบโตและสภาพสรีรวิทยาจากทิศทางและความยาวของลูกศรในภาพที่ 4.8 จะเห็นว่าเวกเตอร์ของตัวแปรด้านการเจริญเติบโตทั้งหมด (Canopy width, Leaf number, Height, Root length, Fresh weight, Dry weight) และเวกเตอร์ของตัวแปร Chl a, Chl b และ Total chlorophyll ล้วนชี้ไปในทิศทางใกล้เคียงกันบนแกน PC1 ซึ่งหมายความว่า PC1 เป็นแกนที่แยก ชุดที่พืชเจริญเติบโตดีและมีคลอโรฟิลล์สูง ออกจาก ชุดที่พืชเจริญเติบโตต่ำและมีคลอโรฟิลล์ต่ำ อีกนัยหนึ่ง PC1 สามารถตีความได้ว่าเป็น “ดัชนีความสมบูรณ์ของพืช (Growth & Physiological status axis)” ชุดที่อยู่ด้านหนึ่งของ PC1 ใกล้ทิศของเวกเตอร์เหล่านี้ คือชุดที่มีความกว้างทรงพุ่มสูง ใบมาก น้ำหนักสด-แห้งสูง และมีคลอโรฟิลล์สูง ส่วนชุดที่อยู่ตรงข้าม จะเป็นสูตรที่ให้ค่าเหล่านี้ต่ำ เช่น ชุดควบคุม T1 ในขณะที่เดียวกันความหมายของแกน PC2 พบว่าดัชนี ในเตรท แยกออกจากกลุ่มตัวแปรอื่น สำหรับ PC2 จะสังเกตได้ว่าเวกเตอร์ของ Nitrate มีความยาวและชี้เด่นชัดไปในทิศทางของ PC2 ขณะที่เวกเตอร์ของ Chl a, Chl b และ Total chlorophyll มีทิศทางเกือบ “ตรงข้าม” กับในเตรทบนแกน PC2 จึงสามารถตีความได้ว่า PC2 ทำหน้าที่แยก ชุดที่มีแนวโน้มสะสมไนเตรทสูง ออกจาก ชุดที่มีแนวโน้มไนเตรทต่ำและมีคลอโรฟิลล์สูงกว่า กล่าวคือด้านหนึ่งของ PC2 มีค่าคะแนนสูงใน Nitrate (ไนเตรทสะสมมาก) และมักสัมพันธ์กับสูตรที่ใช้ธาตุอาหารเคมี/สูตรเกษตรกร อีกด้านหนึ่งของ PC2 ยังมีค่าคลอโรฟิลล์สูงกว่า และไนเตรทต่ำกว่า ดังนั้น PC2 จึงสามารถมองได้ว่าเป็น แกนไนเตรท/ความเสี่ยงด้านความปลอดภัยอาหาร ซึ่งช่วยจำแนกชุดการทดลองตามระดับการสะสมไนเตรทในต้นพืช

จากการพิจารณา ภาพที่ 4.8 สามารถทราบได้เชิงวิจัยว่า PC1 ทำหน้าที่เป็นดัชนีรวมของการเจริญเติบโตและสภาพสรีรวิทยา โดยแยกชุดควบคุม (T1) ที่ให้ค่าต่ำในทุกตัวแปร ออกจากกลุ่มสูตรที่ให้ผลผลิตสูงโดยชัดเจน เช่น T3 และ T5 ในขณะที่ PC2 ทำหน้าที่แยกกลุ่มสูตรที่ให้ไนเตรทสูง โดยเฉพาะชุดที่เกี่ยวข้องกับสูตรเกษตรกร (T4, T6) ออกจากสูตรอินทรีย์การค้าและสูตรผสมกับน้ำหมักนมสดที่มีแนวโน้มไนเตรทต่ำกว่า สูตรที่เหมาะสมเชิงสมดุล ทั้งในแง่ผลผลิตและคุณภาพใบ ได้แก่ T3 อินทรีย์การค้า T5 น้ำหมักชีวภาพนมสด + อินทรีย์การค้า ซึ่งอยู่ในทิศทางเดียวกับเวกเตอร์ของตัวแปรด้านการเจริญเติบโตและคลอโรฟิลล์ และไม่ได้เอนเข้าไปใกล้เวกเตอร์ไนเตรทมากเกินไป การใช้ PCA Biplot ใน ภาพที่ 4.8 จึงช่วยยืนยันผลจากตารางค่ากลางเชิงเดี่ยว (ค่าเฉลี่ย น้ำหนักสด ไนเตรท ฯลฯ) ว่าสูตรน้ำหมักชีวภาพนมสดร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ (T5) และปุ๋ยอินทรีย์การค้าเดี่ยว (T3) เป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้แทนหรือร่วมกับสูตรเกษตรกรเดิม ทั้งในเชิงผลผลิตและความปลอดภัยด้านไนเตรท



ภาพที่ 4.8 PCA Biplot ของตัวแปรการเจริญเติบโตและคุณภาพของผักสลัดกรีน โอ๊คในระบบไฮโดรพอนิกส์ ภายใต้ 7 ชุดการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

การพัฒนานวัตกรรมการนำหมักชีวภาพนมสดจากจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นที่พบในเขตรากของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT โดยมุ่งหวังให้เป็นแหล่งธาตุอาหารทางเลือกที่สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโต ลดปริมาณไนเตรทสะสมในผลผลิต และมีความเหมาะสมต่อการใช้งานจริงในระบบปลูกพืชไร้ดิน โดย

1. การคัดแยกจุลินทรีย์จากบริเวณเขตรากผักกาดหอมในระบบ NFT ซึ่งพบความหลากหลายของแบคทีเรียในบริเวณผิวยาง ภายนอก และภายในเนื้อเยื่อของรากรวมทั้งสิ้น 269 ไอโซเลต โดยจัดจำแนกออกได้เป็น 60 ลักษณะโคโลนี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบรากของพืชที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลายสูง และเอื้อต่อการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีศักยภาพต่อการเป็นจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชอย่างแท้จริง

2. การทดสอบคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช พบว่าหลายไอโซเลตมีความสามารถทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ การสร้างเอนไซม์โปรตีเอสและลิพอลิเอสซึ่งช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ การผลิตฮอร์โมนพืชจำพวก IAA ซึ่งเกี่ยวข้องกับการยึดตัวของราก การผลิตแอมโมเนียซึ่งเป็นแหล่งไนโตรเจนที่พืชสามารถดูดใช้ได้ทันที และความสามารถในการละลายฟอสเฟตที่อยู่ในรูปไม่ละลายน้ำ สิ่งเหล่านี้สะท้อนให้เห็นว่าไอโซเลตที่คัดเลือกมานั้นมีบทบาทตามธรรมชาติในลักษณะของ PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) ที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชผ่านหลายกลไก ทั้งการเพิ่มธาตุอาหาร การผลิตสารกระตุ้นชีวภาพ และการช่วยให้พืชใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุได้ดีขึ้น

3. การคัดเลือกไปใช้ในการพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสด พบว่าสภาวะการหมักที่อุณหภูมิ 30–35°C เป็นเวลา 48–72 ชั่วโมงเหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างกรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และสารสำคัญอื่น ๆ ที่เกิดจากกระบวนการหมักจุลินทรีย์ นอกจากนี้การกรองลดสิ่งตกค้างและการทำแห้งแบบ Freeze Dryer ช่วยให้น้ำหมักชีวภาพอยู่ในรูปผงที่มีความเสถียรและเหมาะสมต่อการใช้งานในระบบ NFT โดยลดปัญหาการอุดตันได้อย่างชัดเจน

4. การวิเคราะห์ลำดับยีน 16S rRNA ของไอโซเลตที่มีศักยภาพสูง ได้แก่ TKM17, TKM18, TKM25, TKM51 และ TKM60 แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ทั้งหมดอยู่ในกลุ่ม *Bacillus pumilus* group ซึ่งเป็นกลุ่มที่เป็นที่รู้จักว่ามีบทบาทสำคัญด้านการผลิตเอนไซม์ไฮโดรไลติกและการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (PGPR) โดยตรง โดยที่ ไอโซเลต TKM17 และ TKM18 มีความคล้ายคลึงสูงกับ *Bacillus pumilus* TKM25 ใกล้เคียงกับ *Bacillus aerius* TKM51 ใกล้เคียงกับ *Bacillus safensis* TKM60 ใกล้เคียงกับ *Bacillus altitudinis* และ ผลดังกล่าวยืนยันว่าแบคทีเรียท้องถิ่นที่คัดเลือกจากเขตรากผักกาดหอมล้วนเป็นกลุ่ม *Bacillus* ที่มีชื่อเสียงด้านความทนทาน ความปลอดภัย และความสามารถในการผลิตเอนไซม์ protease, lipase การละลายฟอสเฟต และการผลิตสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น IAA และกรดอินทรีย์ ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตน้ำหมักชีวภาพนมสดสำหรับระบบไฮโดรพอนิกส์

5. ประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพนมสดต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมภายใต้ชุดการทดลอง 7 ชุด พบว่าสูตรผสมระหว่างน้ำหมักชีวภาพนมสดและสารละลายอินทรีย์การค้ำในอัตรา 1:1 (T5) ให้ผลดีที่สุดในด้านความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ ความสูง น้ำหนักสด รวมถึงระดับคลอโรฟิลล์ ซึ่งสะท้อนถึงคุณภาพของพืชที่ดีในทุกมิติ รองลงมาคือสูตรอินทรีย์การค้ำ (T3) ซึ่งมีความสม่ำเสมอในการให้ผลผลิต แต่ไม่สูงเท่าสูตรผสม ขณะที่น้ำหมักชีวภาพนมสดเดี่ยว (T2) แม้ให้ผลการเจริญเติบโตระดับปานกลาง แต่กลับโดดเด่นในการลดการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่สำคัญด้านความปลอดภัยของผู้บริโภค ตรงกันข้ามกับสูตรเกษตรกร (T4) ที่แม้ให้ผลตอบสนองด้านการเจริญเติบโตในระดับหนึ่ง แต่มีระดับไนเตรทสูงกว่ามาตรฐานความปลอดภัยอาหารอย่างมีนัยสำคัญ จึงไม่เหมาะสำหรับใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์โดยลำพัง

6. งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นได้ และนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพทั้งในด้านการกระตุ้นการเจริญเติบโต การเพิ่มคุณภาพทางสรีรวิทยา และการลดการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ได้จริงในระบบ NFT ทั้งในรูปแบบของเหลวและผง ทำให้มีศักยภาพในการต่อยอดเชิงนวัตกรรมสำหรับภาคการเกษตรสมัยใหม่และระบบปลูกพืชไร้ดินเชิงพาณิชย์ในอนาคต นอกจากนี้ผลการวิจัยยังสนับสนุนบทบาทของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการแปลงวัตถุดิบราคาต่ำอย่างน้ำมันคัวยคุณภาพให้เป็นผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพที่มีมูลค่าเพิ่มสูง ช่วยลดการใช้สารเคมี ลดต้นทุนการผลิต และเพิ่มความปลอดภัยของผลผลิต ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มเกษตรยั่งยืนและระบบอาหารปลอดภัยในปัจจุบันอย่างชัดเจน

อภิปรายผล

การแยกจุลินทรีย์สายพันธุ์ท้องถิ่นบริเวณเขตรากพืช

ผลการแยกจุลินทรีย์บริเวณเขตรากผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT พบว่า สามารถแยกแบคทีเรียได้ทั้งหมด 269 ไอโซเลต และจำแนกเป็น 60 ลักษณะโคโลนี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเขตรากของพืช (rhizosphere) เป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลายสูง แม้จะเป็นระบบปลูกพืชไร้ดินก็ตาม ผลนี้สอดคล้องกับหลักการที่ว่า รากพืชเป็นแหล่งปล่อยสารคัดหลั่ง (root exudates) เช่น กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน น้ำตาล และสารฟีนอลิก ซึ่งมีบทบาทในการดึงดูดจุลินทรีย์หลากหลายกลุ่มเข้ามาอาศัยในบริเวณดังกล่าว (Badri & Vivanco, 2009) ทำให้พื้นที่เขตรากมี microbial hotspots ที่เกิดปฏิสัมพันธ์สองทางระหว่างพืชและจุลินทรีย์อย่างเข้มข้น

การพบจำนวนโคโลนีมากที่สุดจากบริเวณผิวราก (rhizoplane) และ ectorhizosphere สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของผิวรากที่ทำหน้าที่เป็น interface zone ระหว่างรากกับสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งมีองค์ประกอบเหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย เช่น คาร์บอนจาก root exudates และออกซิเจนที่มีการถ่ายเทอย่างต่อเนื่องในระบบ NFT งานวิจัยจำนวนมากพบว่า rhizoplane เป็นตำแหน่งที่มีความเข้มข้นของจุลินทรีย์สูงที่สุดในระบบรากของพืช โดยเฉพาะแบคทีเรียสกุล Bacillus, Pseudomonas, Enterobacter และ Acinetobacter ซึ่งมักเกี่ยวข้องกับการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (PGPR) ผ่านกลไกต่าง ๆ เช่น การผลิตเอนไซม์ การละลายแร่ธาตุ การตรึงไนโตรเจน และการผลิตฮอร์โมนพืช (Compant et al., 2005; Mendes et al., 2013)

ระบบไฮโดรพอนิกส์จะมีความเข้มงวดด้านสภาพแวดล้อมมากกว่าการปลูกบนดิน แต่ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าสามารถพบจุลินทรีย์ที่มีความหลากหลายใกล้เคียงกับระบบดั้งเดิม ซึ่งสนับสนุนงานของ Masson-Boivin & Sachs (2018) ที่ระบุว่าปฏิสัมพันธ์ระหว่างพืชและจุลินทรีย์สามารถเกิดขึ้นได้ในทุกสภาพแวดล้อมหากมีสารอาหารและพื้นที่ผิวที่เหมาะสม แม้ในระบบที่ไม่มีดิน จุลินทรีย์ยังสามารถเกาะติดกับโครงสร้างรากและพัฒนาเป็นไมโครไบโอมเฉพาะของพืชแต่ละชนิด

นอกจากนี้ การพบแบคทีเรีย endophytic ภายในเนื้อเยื่อรากยังสะท้อนถึงความสามารถของจุลินทรีย์บางชนิดในการเข้าสู่รากผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์หรือบริเวณปลายราก ซึ่งเป็นกลไกที่พบได้ทั่วไปในกลุ่ม PGPR และมักมีบทบาทเด่นในด้านการส่งเสริมการเจริญของพืชและการป้องกันโรค (Hardoim et al., 2015) ผลนี้สอดคล้องกับผลการทดสอบในขั้นตอนถัดไปที่พบว่าหลายสายพันธุ์สามารถผลิตเอนไซม์ protease, lipase, IAA, แอมโมเนีย และละลายฟอสเฟตได้ ซึ่งเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการเป็นจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยตรง เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการจำแนกชนิดด้วย BLAST และการสร้าง phylogenetic tree พบว่ากลุ่มไอโซเลตที่มี

ศักยภาพทางชีวภาพสูงทั้งหมดอยู่ใน *Bacillus pumilus* group ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่พบได้ทั่วไปในเขตรากพืชและมักมีบทบาทเป็น PGPR ผ่านหลายกลไก เช่น การสร้างเอนไซม์ย่อยสลายสารอินทรีย์ การผลิต phytohormone และการกระตุ้นภูมิคุ้มกันด้านพืช (Compant et al., 2005; Backer et al., 2018) ซึ่งพบว่าไอโซเลตในกลุ่ม *Bacillus* ได้แก่ TKM17, TKM18, TKM25, TKM51 และ TKM60 ต่างมีคุณสมบัติการผลิต protease, lipase, IAA, แอมโมเนีย และการละลายฟอสเฟตในระดับสูงเมื่อเทียบกับไอโซเลตอื่นในชุดทดลอง การยืนยันชนิดด้วยเทคนิค Molecular ช่วยเพิ่มความแม่นยำและสนับสนุนว่ากลุ่มจุลินทรีย์ที่คัดเลือกได้มีศักยภาพเพียงพอสำหรับใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตน้ำหมักชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการย่อยสลายนม

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการย่อยสลายนมในงานวิจัยนี้อาศัยการตรวจวัดกิจกรรมของเอนไซม์โปรตีเอสบนอาหาร Skim milk agar และเอนไซม์ลิพอลิซบนอาหาร Spirit blue agar ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐานที่นิยมใช้ในการคัดกรองจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยโปรตีนและไขมันจากผลิตภัณฑ์นมและสิ่งแวดลอมอื่น ๆ โดยการเกิด วงใส รอบโคโลนีบน Skim milk agar แสดงถึงการย่อยเคซีนด้วยโปรตีเอส ขณะที่การเปลี่ยนแปลงของสีหรือการเกิดบริเวณสีน้ำเงินเข้มรอบโคโลนีบน Spirit blue agar บ่งชี้ถึงการย่อยไขมันด้วยเอนไซม์ลิพอลิซ (lipase) (Chung et al., 2021; Starr, 1941; Adetunji et al., 2021)

ผลการทดลองพบว่า จากจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่คัดแยกได้ 60 ไอโซเลต มีจำนวน 27 ไอโซเลต ที่ให้ผลบวกต่อกิจกรรมโปรตีเอสบน Skim milk agar (คิดเป็นประมาณ 45%) โดยมีขนาดวงใสตั้งแต่ 7.5–19.0 มิลลิเมตร และมีหลายไอโซเลต เช่น TMK009, TMK025, TMK042 และ TMK045 ให้ขนาดวงใสสูงสุด 19.0 มิลลิเมตร สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพในการย่อยโปรตีนในนมในระดับสูง ในขณะที่อีก 33 ไอโซเลตไม่พบการเกิดวงใสภายใต้สภาวะการทดสอบที่ใช้ ความแปรผันดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของศักยภาพการผลิตเอนไซม์ระหว่างสายพันธุ์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานจำนวนมากที่พบว่าแบคทีเรียจากสิ่งแวดล้อมหนึ่งแหล่งมักมีเฉพาะบางส่วนที่เป็น proteolytic group ที่โดดเด่นในการย่อยโปรตีน เช่นกลุ่ม *Bacillus*, *Pseudomonas* และ *Lactobacillus* ที่ถูกคัดเลือกจากตัวอย่างน้ำนมหรือของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ (Raveschot et al., 2020; Zarei et al., 2023)

สำหรับกิจกรรมลิพอลิซบน Spirit blue agar พบว่า 22 จาก 60 ไอโซเลต (ประมาณ 36.7%) แสดงการย่อยไขมันให้ผลเป็นบวก โดยมีการเกิดบริเวณสีน้ำเงินเข้มหรือการเปลี่ยนแปลงของสีรอบโคโลนีอย่างชัดเจน ในขณะที่อีก 38 ไอโซเลตไม่พบกิจกรรมดังกล่าว การที่มีเพียง

บางส่วนของจุลินทรีย์ในเขตรากสามารถผลิตเอนไซม์ย่อยไขมัน ได้สอดคล้องกับแนวคิดว่า ความสามารถสร้างเอนไซม์ไฮโดรไลติกชนิดต่าง ๆ เป็นลักษณะจำเพาะของสายพันธุ์ ซึ่งสัมพันธ์ ทั้งกับ niche ทางนิเวศและชนิดของสารตั้งต้นในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ (Carrasco-Palafox et al., 2018; Adetunji et al., 2021)

เมื่อพิจารณาร่วมกัน กิจกรรมของโปรติเอสและลิพอลิซที่ตรวจพบในกลุ่มจุลินทรีย์ ท้องถิ่นนี้มีความสำคัญโดยตรงต่อการพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสด เนื่องจากน้ำนมประกอบด้วย โปรตีน โดยเฉพาะเคซีน และไขมันเป็นองค์ประกอบหลัก การที่จุลินทรีย์สามารถสร้างเอนไซม์ ย่อยทั้งสองกลุ่มได้ แสดงว่ามีศักยภาพในการเปลี่ยนนมให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน เปปไทด์สั้น และกรดไขมัน ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนที่จุลินทรีย์และพืช สามารถใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้น กระบวนการนี้สอดคล้องกับบทบาทของเอนไซม์ไฮโดรไลติกจาก จุลินทรีย์ในเขตรากที่ช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในระบบปลูกพืช ทั้งในด้านการ ปลดปล่อยธาตุอาหารจากสารอินทรีย์และการเร่งการหมุนเวียนของธาตุอาหารในสภาวะแวดล้อม (Ould Ouali et al., 2024; Chowhan et al., 2023)

บริบทของ PGPR เอนไซม์โปรติเอสและลิพอลิซไม่ได้มีบทบาทเพียงด้านการย่อยสลาย วัตถุประสงค์อินทรีย์เท่านั้น แต่ยังเกี่ยวข้องกับการควบคุมเชื้อก่อโรคพืชบางกลุ่มด้วย โดยการทำลาย โครงสร้างโปรตีนหรือเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อราและแบคทีเรียก่อโรค งานวิจัยหลายชิ้นรายงานว่า แบคทีเรียในกลุ่ม PGPR ที่ผลิตเอนไซม์เหล่านี้สามารถลดความรุนแรงของโรคพืชและส่งเสริมการ เจริญเติบโตของพืชได้พร้อมกัน (Ghodsolavi et al., 2013; Alavi et al., 2013; Backer et al., 2018) ดังนั้น ไอโซเลตที่ให้ผลบวกต่อกิจกรรมโปรติเอสและลิพอลิซในงานนี้จึงไม่เพียงมีบทบาทด้าน การย่อยนมในกระบวนการหมักเท่านั้น แต่ยังมีศักยภาพในการนำไปพัฒนาต่อเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ ที่ช่วยทั้งย่อยสลายวัตถุดิบ สร้างธาตุอาหาร และอาจลดความเสี่ยงจากเชื้อสาเหตุโรคพืชในระบบ ไฮโดรพอนิกส์ได้ในอนาคต

การทดสอบความสามารถในการย่อยสลายนมของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในงานนี้ยืนยันว่า กลุ่ม จุลินทรีย์ที่แยกได้จากเขตรากผักกาดหอมในระบบ NFT มีศักยภาพสูงด้านการสร้างเอนไซม์ ไฮโดรไลติกที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนน้ำนมให้เป็นน้ำหมักชีวภาพที่อุดมด้วยสารอาหาร และสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนานวัตกรรม น้ำหมัก ชีวภาพนมสด สำหรับใช้ในระบบปลูกพืชไร้ดินอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการเจริญเติบโตของพืช

การประเมินความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่คัดแยกได้จากเขตรากผักกาดหอมพบว่า มีหลายไอโซเลตที่แสดงศักยภาพเด่นในด้านการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชผ่านกลไกสำคัญ

ได้แก่ การผลิตฮอร์โมนพืชจำพวกอินโดล-3-อะซีติกแอซิด (IAA) การผลิตแอมโมเนีย และความสามารถในการละลายฟอสเฟต ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของแบคทีเรียกลุ่ม Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) ที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในงานวิจัยสมัยใหม่ (Backer et al., 2018; Vessey, 2003)

ความสามารถในการผลิต IAA และผลต่อการเจริญเติบโตของรากผลการทดสอบพบว่าไอโซเลตหลายชนิด เช่น TMK02 TMK03 TMK04 และ TMK12 มีระดับการผลิต IAA สูงกว่าไอโซเลตอื่นอย่างชัดเจน ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการส่งสัญญาณภายในพืชเพื่อกระตุ้นการยึดตัวของราก การสร้างรากแขนง และการเพิ่มพื้นที่ผิวรากสำหรับการดูดซึมธาตุอาหาร งานวิจัยจำนวนมากรายงานตรงกันว่า IAA ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ในเขตรากมีผลโดยตรงต่อการเพิ่ม biomass และความยาวราก เช่น ในงานของ Spaepen และ Vanderleyden (2011) ที่ระบุว่า IAA ช่วยเพิ่มการดูดซึมไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในระบบปลูกพืชไร่ดิน ซึ่งสอดคล้องกับการที่ชุดทดลองน้ำหมักชีวภาพจากไอโซเลตที่ผลิต IAA สูงทำให้ผักกาดหอมมีรากสมบูรณ์และมีน้ำหนักสดสูงในงานวิจัยนี้ ความสามารถในการผลิตแอมโมเนีย (NH_4^+) ไอโซเลตที่ผลิตแอมโมเนียในระดับสูง เช่น TMK58 TMK59 และ TMK53 มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเพิ่มธาตุไนโตรเจนในสภาพแวดล้อมของราก เนื่องจากแอมโมเนียเป็นรูปแบบของไนโตรเจนที่พืชสามารถดูดใช้ได้โดยตรงและรวดเร็วกว่าการใช้ในเตรต กลไกนี้ช่วยลดความเสี่ยงของการสะสมไนเตรตในใบพืช ซึ่งพบว่าเป็นหนึ่งในปัญหาหลักของระบบไฮโดรพอนิกส์ที่ใช้ปุ๋ยเคมีรูปไนเตรตสูงเกินความจำเป็น

งานวิจัยของ Santoyo et al. (2016) รายงานว่าแบคทีเรียที่ผลิตแอมโมเนียสามารถเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในบริเวณ rhizosphere และทำให้พืชเร่งการสร้างกรดอะมิโนและโปรตีน ส่งผลให้การเจริญเติบโตด้านความสูงและน้ำหนักสดเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยนี้ที่พบว่าชุดทดลองที่ใช้ น้ำหมักชีวภาพจากแบคทีเรียผลิตแอมโมเนียมีความสูงของต้นมากกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ

ความสามารถในการละลายฟอสเฟต พบว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถสร้าง halo zone บน Pikovskaya's agar เช่น TMK07 TMK14 TMK39 และ TMK49 แสดงความสามารถในการละลายฟอสฟอรัสรูปไม่ละลายน้ำให้กลายเป็นรูปที่พืชดูดใช้ได้ง่าย เช่น orthophosphate ซึ่งเป็นรูปที่พืชใช้ในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก พลังงาน ATP และระบบเมแทบอลิซึมอื่น ๆ กลไกการละลายฟอสเฟตมักเกิดจากการสร้างกรดอินทรีย์ เช่น กรดกลูโคนิก ซึ่งช่วยละลายสารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำยาก งานของ Rawat et al. (2021) ยืนยันว่าการละลายฟอสเฟตของ PGPR มีผลต่อการเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์และการสร้างใบ ซึ่งสอดคล้องกับผลในการศึกษานี้ที่พบว่าชุดน้ำหมักชีวภาพที่มีแบคทีเรียละลายฟอสเฟตทำให้ผักกาดหอมมีจำนวนใบและความกว้างของทรงพุ่ม

สูงขึ้น ความเชื่อมโยงกับประสิทธิผลของน้ำหมักชีวภาพนมสด จากการที่แบคทีเรียมีความสามารถในการผลิต IAA, แอมโมเนีย และ ฟอสเฟต ทำงานร่วมกันอย่างสอดคล้องประสานในระบบราก ส่งผลให้สูตรน้ำหมักชีวภาพนมสดที่พัฒนาจากไอโซเลตที่มีความสามารถสูงในด้านเหล่านี้ เช่น สูตร T5 (นมสดหมัก + อินทรีย์การค้ำ) และสูตร T2 (นมสดหมักเดี่ยว) มีผลต่อการเพิ่มน้ำหนักสด จำนวนใบ และคลอโรฟิลล์มากกว่าชุดควบคุมอย่างเด่นชัด งานวิจัยก่อนหน้า เช่น Backer et al. (2018) ระบุว่า PGPR ที่มีคุณสมบัติหลากหลาย (multifunctional PGPR) จะให้ผลต่อการเจริญเติบโตของพืชสูงกว่าแบคทีเรียที่มีคุณสมบัติเดี่ยว ซึ่งตรงกับผลในงานวิจัยนี้อย่างมากดังนั้น การทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ท้องถิ่นในการผลิต IAA แอมโมเนีย และละลายฟอสเฟตสามารถสะท้อนความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างแท้จริง และเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ น้ำหมักชีวภาพนมสดที่พัฒนาขึ้นแสดงประสิทธิภาพสูงในระบบ NFT

การพัฒนานวัตกรรมน้ำหมักนมสดพร้อมใช้ในระบบไฮโดรพอนิกส์

การพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดในงานวิจัยนี้ถือเป็นนวัตกรรมด้านธาตุอาหารสำหรับระบบไฮโดรพอนิกส์ที่น่าสนใจ เนื่องจากใช้ จุลินทรีย์ท้องถิ่นจากเขตรากผักกาดหอม เป็นหัวเชื้อหมักนํ้านม ให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีทั้งสารอาหาร และจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (PGPR) จากนั้นพัฒนาต่อเป็นทั้งรูปน้ำและผงแห้งโดยใช้ระบบ Freeze dryer เพื่อให้ พร้อมใช้ ในระบบ NFT โดยไม่เกิดปัญหาตะกอนหรือการอุดตันของราง ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้มการใช้ biofertilizer/bio-product เป็นแหล่งธาตุอาหารหลักหรือบางส่วนในระบบปลูกพืชไร้ดิน เพื่อลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมีและเพิ่มความยั่งยืนของระบบผลิตผักใบ

การพัฒนาน้ำหมักชีวภาพนมสดในงานวิจัยนี้ถือเป็นแนวทางใหม่ของการจัดการธาตุอาหารในระบบไฮโดรพอนิกส์ โดยอาศัยจุลินทรีย์ท้องถิ่นที่คัดเลือกจากเขตรากผักกาดหอมมาเป็นหัวเชื้อในการย่อยสลายนํ้านมดิบให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอินทรีย์ กรดอะมิโน และสารกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช รวมถึงการคงอยู่ของกลุ่มจุลินทรีย์ที่มีสมบัติ PGPR ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการปรับสมดุลธาตุอาหารรากและเพิ่มการดูดซึมของธาตุอาหารในพืชอย่างมีประสิทธิภาพ (Backer et al., 2018)

ผลการศึกษาพบว่า สูตรน้ำหมักนมสดผสมกับสารละลายอินทรีย์การค้ำ (T5) ส่งผลให้ผักกาดหอมมีการเจริญเติบโตดีที่สุด ได้แก่ ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และน้ำหนักสดที่สูงที่สุด สูตรนี้สะท้อนให้เห็นถึง ผลเสริมฤทธิ์ร่วม ระหว่างน้ำหมักชีวภาพซึ่งให้สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive metabolites) กับสารละลายอินทรีย์การค้ำ ซึ่งให้ธาตุอาหารพื้นฐานอย่างสมดุล ส่งผลให้กลไกทางสรีรวิทยาของพืชทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ

Chong et al. (2021) ซึ่งรายงานว่า การผสมผสานระหว่างสารละลายอินทรีย์และผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์ ช่วยเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์และผลผลิตของผักกาดหอมในระบบไฮโดรพอนิกส์

ในขณะที่ สูตรน้ำหมักชีวภาพนมสดเคี้ยว (T2) แม้ให้การเจริญเติบโตของพืชระดับปานกลาง แต่กลับโดดเด่นในด้าน การลดการสะสมไนเตรทในใบผักกาดหอม ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญด้านความปลอดภัยอาหารในระบบไร้ดิน งานวิจัยหลายชิ้นชี้ว่า PGPR ที่ผลิตแอมโมเนีย ฮอร์โมนพืช และเอนไซม์รีดิวซ์ไนเตรท สามารถลดการสะสมไนเตรทในพืชใบได้โดยการเพิ่มอัตราการเปลี่ยนไนเตรทเป็นกรดอะมิโน (Zhou et al., 2022) จึงคาดได้ว่าสารชีวโมเลกุลที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักนมสด ตรงกันข้ามกับสูตรเกษตรกร (T4) ที่พบว่ามีการสะสมไนเตรทสูงที่สุดสะท้อนถึงปัญหา ในโตรเจนส่วนเกินในรูปไนเตรต ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การสะสมไนเตรทตามที่ WHO (2011) และงานวิจัยทางสรีรวิทยาพืชหลายฉบับได้ระบุไว้ กระบวนการแปรรูปน้ำหมักนมสดให้เป็น รูปผงด้วยเครื่อง Freeze Dryer ถือเป็นจุดเด่นของงานวิจัยนี้ เนื่องจากช่วยเพิ่มความเสถียร ลดความเสี่ยงของการปนเปื้อน และสำคัญที่สุดคือช่วยลดปัญหา การอุดตันของระบบ NFT ซึ่งเป็นอุปสรรคหลักในการใช้น้ำหมักอินทรีย์แบบของเหลวในงานปลูกพืชไร้ดิน การทำให้แห้งแบบแช่เยือกแข็งยังช่วยรักษากรดอะมิโนและสารชีวภาพได้ดีกว่าการอบแห้งแบบใช้ความร้อนตามที่มีรายงานในงานของ Puskarova et al. (2022)

ผลการจำแนกสายพันธุ์พบว่าไอโซเลตทั้งหมดที่คัดเลือกไปใช้พัฒนาน้ำหมักชีวภาพอยู่ในกลุ่ม *Bacillus* ซึ่งเป็นสกุลที่มีความสามารถสูงในการผลิตเอนไซม์ไฮโดรไลติก เช่น protease และ lipase ซึ่งจำเป็นต่อการย่อยเคซีนและไขมันในนมสดให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน และกรดอินทรีย์ต่าง ๆ กระบวนการย่อยดังกล่าวถือเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้ “น้ำหมักชีวภาพนมสด” ที่ผลิตได้มีธาตุอาหารรูปใช้ งานง่ายสำหรับราก และเกิดสารกระตุ้นการเจริญเติบโตที่ช่วยให้สูตร T2 และ T5 แสดงผลเด่นในการเพิ่มการเจริญเติบโตและลดการสะสมไนเตรทในผักกาดหอม

นอกจากนี้ *Bacillus altitudinis* (TKM60) และ *Bacillus safensis* (TKM51) เป็นสายพันธุ์ที่มีรายงานว่ามีความสามารถทนสภาพแวดล้อมในระบบไฮโดรพอนิกส์และสร้างเอนไซม์หลายชนิดต่อเนื่องแม้ในสภาพสารละลาย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่าน้ำหมักชีวภาพมีความเสถียรในการใช้งานและให้ผลเด่นในสูตรผสม T5

อีกประเด็นหนึ่งที่มีคุณค่าเชิงเศรษฐกิจ คือ การนำน้ำนมดิบที่ไม่ผ่านมาตรฐานมาใช้เป็นวัตถุดิบหมัก ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิด เศรษฐกิจหมุนเวียน (circular agriculture) ที่มุ่งใช้ทรัพยากรเหลือทิ้งให้เกิดประโยชน์ การศึกษาของ Wen et al. (2023) พบว่าการแปรรูป waste milk ให้เป็นผลิตภัณฑ์ปุ๋ยอินทรีย์สามารถเพิ่มผลผลิตพืชได้จริง ซึ่งสนับสนุนผลจากงานวิจัยนี้โดยตรง

นวัตกรรมน้ำหมักนมสดที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูงทั้งด้านการเพิ่มผลผลิต ลดไนเตรท และเพิ่มความยั่งยืนของระบบปลูกพืชไร้ดิน สามารถประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับเกษตรกรและฟาร์มเชิงพาณิชย์

ข้อเสนอแนะ

1. น้ำหมักชีวภาพนมสดที่ผลิตจากจุลินทรีย์ท้องถิ่นสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของผักกาดหอม และลดการสะสมไนเตรทในระบบไฮโดรพอนิกส์แบบ NFT ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การใช้น้ำหมักชีวภาพมีความเสถียรในระยะยาว ควรมีการควบคุมคุณภาพของน้ำหมัก เช่น ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณจุลินทรีย์ และความเข้มข้นของสารอาหารในแต่ละชุดการผลิต เนื่องจากปัจจัยเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อผลผลิตและคุณภาพผักในระบบปลูกพืชไร้ดิน

2. การใช้สูตรน้ำหมักชีวภาพนมสดที่เหมาะสมผลการทดลองชี้ว่า สูตร T5 (น้ำหมักชีวภาพนมสด + สารละลายอินทรีย์การค้ำ 1:1) ให้ผลดีที่สุดสำหรับการเพิ่มผลผลิตผักกาดหอม จึงแนะนำให้เกษตรกรเลือกใช้สูตรนี้เพื่อเพิ่มน้ำหนักสด ความกว้างทรงพุ่ม และคุณภาพใบ การใช้สูตรเพื่อลดไนเตรทในผลผลิต หากมีวัตถุประสงค์ลดการสะสมไนเตรทในพืช ควรใช้สูตร T2 (น้ำหมักชีวภาพนมสดเดี่ยว) ซึ่งพบว่าช่วยลดไนเตรทได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งส่งเสริมการเจริญเติบโตในระดับที่ยอมรับได้ การจัดการสารละลายในระบบ NFT ควรตรวจสอบค่า pH (5.5–6.5) และ EC (1.0–1.8 mS/cm) อย่างสม่ำเสมอ เนื่องจากน้ำหมักชีวภาพอาจมีความเป็นกรดอ่อนจากกระบวนการหมัก ซึ่งอาจทำให้ค่า pH ของสารละลายลดลงได้ แนวทางสนับสนุนเกษตรกรแนะนำให้เกษตรกรเตรียมน้ำหมักชีวภาพในปริมาณเหมาะสมต่อรอบการผลิต และเก็บรักษาที่อุณหภูมิต่ำ เพื่อยืดอายุการใช้งานของจุลินทรีย์และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

บรรณานุกรม

- ศรานนท์ เจริญสุข. (2549). ผักกินใบในเขตเมืองร้อน. กรุงเทพมหานคร: สถาบันการเกษตร.
สมพร และคณะ. (2564). ผลของน้ำหมักนมสูงต่อคุณภาพผักใบ. วารสารวิจัยเกษตรไทย, 12(3), 115–124.
- Adetunji, A. I., Olanbiwoninu, A. A., Emeka, A. E., & Lewu, F. B. (2021). Production strategies and biotechnological relevance of microbial lipases: A review. *Biotechnology Letters*, 43(8), 1589–1607.
- Alavi, P., Starcher, M. R., Thallinger, G. G., Zachow, C., Müller, H., & Berg, G. (2013). *Stenotrophomonas* comparative genomics reveals genes and functions that differentiate beneficial and pathogenic bacteria. *BMC Genomics*, 14, 1–15.
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., ... & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473.
- Badri, D. V., & Vivanco, J. M. (2009). Regulation and function of root exudates. *Plant, Cell & Environment*, 32(6), 666–681.
- Bansal, R., Singh, A., & Kumar, P. (2022). Lactic acid bacteria-based biofertilizers: Potential and applications. *Journal of Applied Microbiology*, 132(5), 3408–3420.
- Bian, Z., Cheng, R., Yang, Q., Wang, J., & Lu, C. (2020). Effect of light quality on nitrate accumulation and nitrate reductase activity in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 271, 109473.
- Carrasco-Palafox, J., López-Cuellar, M. d. R., Vergara-Porras, B., & Rodríguez-Hernández, A. I. (2018). Improved method for qualitative screening of lipolytic bacteria. *MethodsX*, 5, 68–74.
- Chong, C. H., Law, C. L., Figiel, A., Wojdylo, A., & Oziemblowski, M. (2021). Effects of organic liquid fertilizers on growth and quality of lettuce under soilless culture. *Scientia Horticulturae*, 276, 109741.

- Chong, C. T., Lim, S. Y., & Lee, C. H. (2021). Application of fermented organic waste as nutrient source in hydroponics: A sustainable approach. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128125.
- Chowdhury, M. M., Saha, D., Hasan, M. J., & Karim, M. R. (2024). Organic nutrient solution as an alternative to chemical fertilizers in hydroponic lettuce production. *Journal of Plant Nutrition*, 47(2), 204–218.
- Chowdhury, M. M., Saha, D., Hasan, M. J., Karim, M. R., ... & co-authors. (2024). Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1401089.
- Chowhan, L. B., Thakur, N., Kumar, V., Kumar, A., & Tomar, M. (2023). Plant growth promoting and antagonistic traits of bacteria isolated from rhizosphere of apple trees of Trans Himalayan Region of Kinnaur, India. *Archives of Microbiology*, 205(5), 230.
- Chung, D., Kim, H. R., & Jeong, S. T. (2021). Characterization of the proteolytic activity of a halophilic microorganism using skim milk agar assay. *Microorganisms*, 9(12), 2523.
- Cometti, N. N., Mattos, D. D., Bastos, R. G., & Furlani, P. R. (2011). Nitrate accumulation in hydroponic lettuce under different light intensities and nitrogen concentrations. *Horticultura Brasileira*, 29(1), 91–97.
- Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., & Barka, E. A. (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9), 4951–4959.
- Ezziddine, F. M., Liltved, H., & Seljåsen, R. (2021). Hydroponic lettuce cultivation using organic nutrient solution from aquaculture sludge. *Agronomy*, 11(8), 1484.
- European Commission. (2011). Regulation (EU) No 1258/2011 amending maximum levels for nitrate in certain leafy vegetables. *Official Journal of the European Union*.
- European Commission. (2022). Commission regulation on maximum nitrate levels in leafy vegetables. Brussels: European Union.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2023). Organic liquid fertilizers: Production, use, and environmental implications. *FAO Technical Report*.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). Growing without soil: Hydroponics fundamentals, pros and cons. Rome: FAO.

- Ghodsolavi, B., Ahmadzadeh, M., Soleimani, M., Madloo, P., & Taghizad-Farid, R. (2013). Isolation and characterization of rhizobacteria and their effects on root extracts of *Valeriana officinalis*. *Australian Journal of Crop Science*, 7(3), 338–344.
- Grewal, H. S., Maheshwari, B., & Parks, S. (2022). Hydroponic cultivation for sustainable vegetable production: A review. *Agricultural Water Management*, 259, 107167.
- Hardoim, P. R., van Overbeek, L. S., & van Elsas, J. D. (2015). The hidden world within plants: Ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 79(3), 293–320.
- Higa, T., & Parr, J. (1994). *Beneficial and Effective Microorganisms for a Sustainable Agriculture and Environment*. FAO Publications.
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil*. California Agricultural Experiment Station.
- Hsieh, Y. C., et al. (2019). Application of organic nutrient solutions in DFT hydroponics. *Horticulturae*, 5(3), 47.
- Htwe, N. M., Daryanto, S., & Dong, X. (2022). Postharvest LED light treatment improves vitamin C content and reduces nitrate accumulation in leafy vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 192, 112029.
- Jones, J. B. (2014). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower* (2nd ed.). CRC Press.
- Kappel, N., Neocleous, D., & Savvas, D. (2021). Responses of lettuce to salinity in a deep-water culture system. *Agronomy*, 11(3), 536.
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., & Waterland, N. L. (2021). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 101, 103981.
- Koohakan, P., & Rangjaroen, C. (2009). Isolation of plant growth promoting rhizobacteria from hydroponic systems for the control of Pythium root rot. *Thai Journal of Agricultural Science*, 42(2), 63–71.
- Kuncoro, W. S., Permana, D. S., & Wibowo, A. (2021). Automation of nutrient film technique (NFT) hydroponic system. *Journal of Robotics and Control*, 2(4), 260–267.
- Lebeda, A., Ryder, E. J., Grube, R. C., & Mou, B. (2007). Lettuce (Asteraceae) taxonomy, genetic resources, and breeding: A review. *Plant Breeding Reviews*, 28, 1–30.

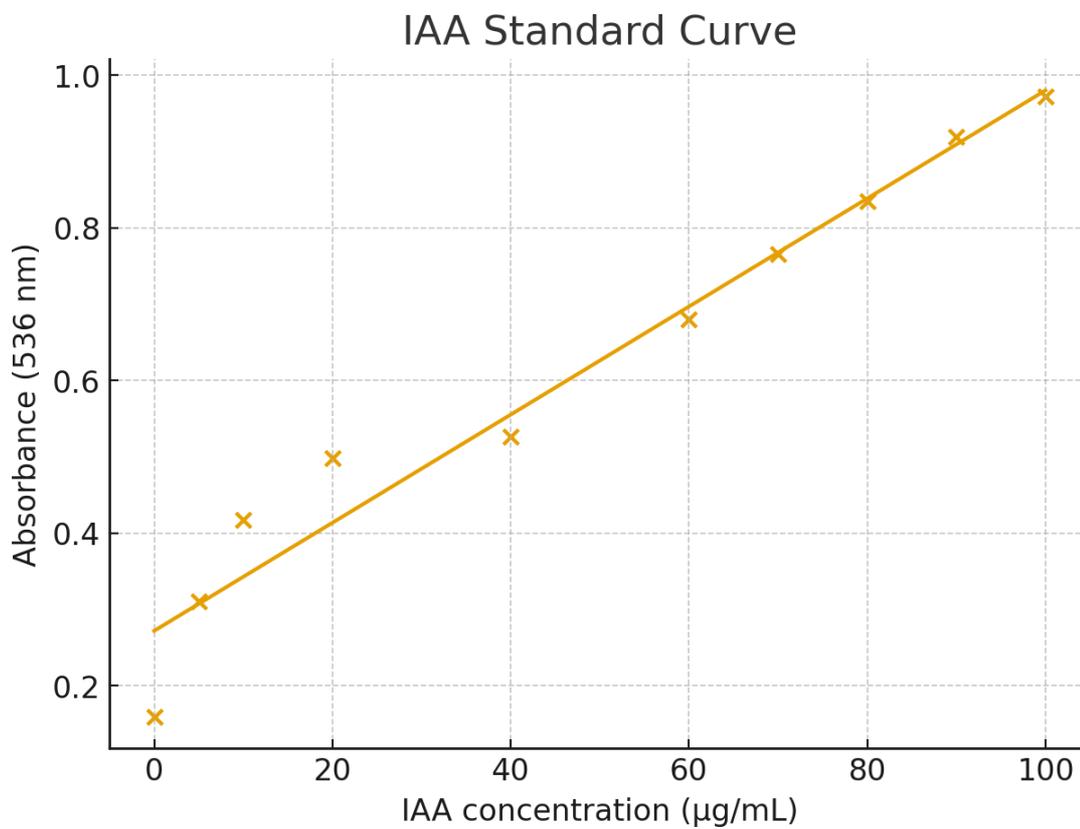
- Martínez-Moreno, A., et al. (2024). Reducing nitrate accumulation through the management of nutrient solution in hydroponic lettuce. *Science of the Total Environment / Food Chemistry* (article).
- Martínez-Moreno, F., Mena, J., Pérez-Romero, A., & Andreu-Taberner, A. (2024). Nitrate accumulation in hydroponic lettuce influenced by nitrogen form and concentration. *Journal of Food Composition and Analysis*, 125, 105670.
- Masson-Boivin, C., & Sachs, J. L. (2018). Symbiotic nitrogen fixation by rhizobia—The roots of a success story. *Current Opinion in Plant Biology*, 44, 7–15.
- Mattson, N. (2015). *Nutrient Management in Hydroponics*. Cornell University Controlled Environment Agriculture Program.
- Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2013). The rhizosphere microbiome: Significance of plant beneficial, plant pathogenic, and human pathogenic microorganisms. *FEMS Microbiology Reviews*, 37(5), 634–663.
- Nakasaki, K., et al. (2020). Organic fertilizer fermentation and microbial succession. *Waste Management*, 102, 371–379.
- Nicolle, C., Carnat, A., Fraisse, D., Lamaison, J. L., Rock, E., Michel, H., & Amouroux, P. (2004). Characterization and variation of antioxidant micronutrients in lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(9), 2629–2634.
- Nitu, N. E., Chuan, Y. L., & Zahangir, M. M. (2024). Effect of dissolved oxygen level on lettuce growth in a nutrient film technique hydroponic system. *International Journal of Agricultural Science*, 14(1), 45–56.
- Nitu, O. A., Ivan, E. S., Tronac, A. S., & Arshad, A. (2024). Optimizing lettuce growth in nutrient film technique hydroponics: Evaluating the impact of elevated oxygen concentrations in the root zone under LED illumination. *Agronomy*, 14(9), 1896.
- Olle, M., & Bender, I. (2023). Environmental factors affecting lettuce growth in controlled environments: A synthesis. *Horticulture Research*, 10(3), 1–14.
- Ould Ouali, K., Belabid, L., & Bellik, Y. (2024). Halophilic plant growth-promoting rhizobacteria as biofertilizers for crops under salinity stress: Hydrolytic enzymes and phytohormone production. *Agronomy*, 14(4), 845.

- Owen, W. G. (2018). Managing pH, EC and temperature in hydroponic nutrient solutions. NC State University, Horticultural Science Extension.
- Pace, A., & Williams, K. A. (2024). Comparison of hydroponic butterhead lettuce grown in reject water from a reverse osmosis system, municipal water, and purified water. *HortScience*, 59(10), 1553–1562.
- Pace, D. A., Ghashghaie, J., & Veste, M. (2024). Water quality considerations for hydroponics: Impacts on nutrient availability and plant performance. *Plants*, 13(2), 305.
- Park, J. (2024). Organic hydroponics: A comprehensive review. *Scientia Horticulturae*, 319, 112024.
- Puskarova, A., Bučková, M., & Kraková, L. (2022). Stability of biological metabolites and microorganisms in freeze-dried bio-based products. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(4), 1505–1517.
- Rattree, R. (2016). Effects of bio-extracts on growth and antioxidant compounds of hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) under NFT system (Master's thesis). Khon Kaen University.
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Applied Microbiology*, 131(3), 1058–1072.
- Raveschot, C., Cudennec, B., Coutte, F., Dhulster, P., & Flahaut, C. (2020). Proteolytic activity of *Lactobacillus* strains isolated from dairy products: Screening and characterization. *Food Chemistry*, 310, 125943.
- Resh, H. M. (2022). *Hydroponic Food Production* (8th ed.). CRC Press.
- Ryder, E. J., & Johnson, R. (2022). *Lettuce and Leafy Vegetable Science*. Springer.
- Sago, Y., Sugiyama, M., & Yoshioka, M. (2018). Light intensity regulates nitrate assimilation and growth in leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 1–8.
- Sangakkara, R. (2014). Role of microbial metabolites in plant growth improvement. *Tropical Agricultural Research*, 25(4), 485–495.
- Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: Toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10–17.
- Santoyo, G., Moreno-Hagelsieb, G., Orozco-Mosqueda, M. C., & Glick, B. R. (2016). Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research*, 183, 92–99.

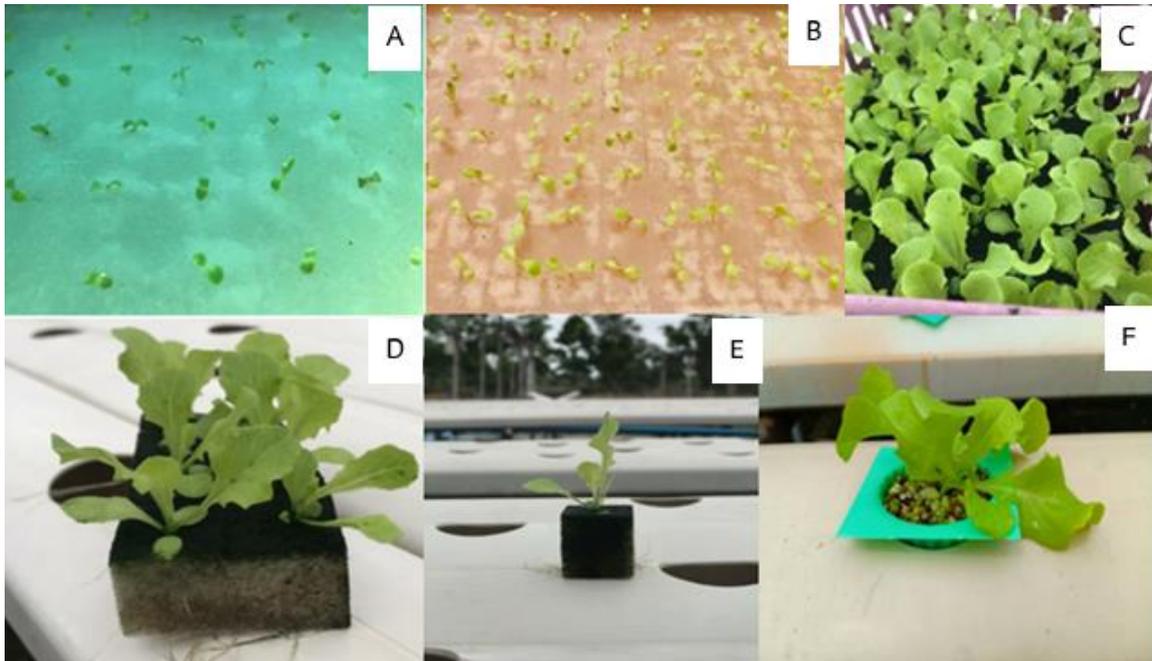
- Sapkota, S., Pradhan, S. P., & Dhakal, A. (2019). A review on factors affecting the growth of hydroponic leafy vegetables. *Journal of Agriculture and Environment*, 20, 1–15.
- Silva, L. J., Rodrigues, M., & Monteiro, C. (2025). Salinity and electrical conductivity management in hydroponic lettuce cultivation. *Journal of Plant Physiology*, 315, 153836.
- Simko, I., Hayes, R. J., & Mou, B. (2020). Lettuce and spinach. In *Vegetables* (pp. 1–30). Springer.
- Spaepen, S., & Vanderleyden, J. (2011). Auxin and plant-microbe interactions. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 3(4), a001438.
- Starr, M. P. (1941). Spirit blue agar: A medium for the detection of lipolytic microorganisms. *Science*, 93(2414), 333–334.
- UF/IFAS (University of Florida Institute of Food and Agricultural Sciences). (2021). *Hydroponic Vegetable Production Systems* (UF Extension Publication HS1197). University of Florida.
- Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255(2), 571–586.
- Vought, A. M., Myers, T. K., & Brown, J. E. (2024). Nutrient management strategies for optimizing lettuce production in NFT hydroponics. *Horticulturae*, 10(1), 112.
- Wen, Z., Ding, C., Li, J., & Wang, Y. (2023). Valorization of waste milk into nano-structured fertilizers for improved plant growth. *Nature Communications*, 14, 44422.
- Wenceslau, R. F., Silva, C. L., & de Carvalho, D. (2021). Nitrogen management and its effect on nitrate content in hydroponic lettuce. *Scientia Agricola*, 78(4), e20200425.
- World Health Organization (WHO). (2011). *Nitrate and nitrite in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Geneva: World Health Organization.
- Xu, L., Luo, L., & Zhang, H. (2012). Plant-based fermented fertilizers: Composition and benefits. *Agricultural Sciences*, 3(2), 269–276.
- Yadav, B. K., Singh, R., & Meena, M. (2022). Role of fermented biofertilizers in sustainable soil fertility and crop productivity. *Sustainability*, 14(3), 1742.
- Zarei, M., Elmi Anvari, S., Maktabi, S., Saris, P. E. J., & Yousefvand, A. (2023). Identification, proteolytic activity quantification and biofilm-forming characterization of Gram-positive, proteolytic, psychrotrophic bacteria isolated from cold raw milk. *PLOS ONE*, 18(9), e0290953.

- Zhang, Y., Chen, S., & Zhao, D. (2023). Evaluation of fish-based biofertilizers as partial nutrient replacement in hydroponic vegetable cultivation. *Agronomy*, 13(5), 1189.
- Zhang, Y., Li, X., & Chen, J. (2021). Dynamics of organic matter decomposition in bio-extract fermentation. *Bioresource Technology*, 319, 124233.
- Zhou, C., Ma, Z., Zhu, L., Xiao, X., Xie, Y., & Zhu, J. (2022). Beneficial effects of plant growth-promoting bacteria on nutrient uptake and nitrate reduction in leafy vegetables. *Frontiers in Plant Science*, 13, 859254.
- Zhou, L., Xu, Q., & Liu, Z. (2022). Phytohormones and enzymatic activities in hydroponic lettuce treated with fermented organic extracts. *Frontiers in Plant Science*, 13, 890211.

ภาคผนวก



ภาคผนวกที่ 1 สารละลายมาตรฐานกรดอินโดล-3-อะซีติก (IAA standard solution) ที่เตรียมในช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับใช้สร้างกราฟมาตรฐานในการวิเคราะห์ปริมาณ IAA ของตัวอย่างโดยวิธีสเปกโตรโฟโตเมตรี



ภาคผนวกที่ 2 ต้นกล้าผักกาดหอมพันธุ์กรีนโอ๊ค A: อายุ 4 วัน, B: อายุ 6 วัน, C-D: อายุ 14 วัน, F: อายุ 20 วัน



ภาคผนวกที่ 3 A-C : การปลูกพืชในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT (Nutrient Film Technique) รากพืช แช่อยู่ในสารละลายโดยตรง สารละลายธาตุอาหารจะไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (หนาประมาณ 2-3 มิลลิเมตร)



ภาคผนวกที่ 4 A-B : เตรียมสารละลายตามแต่ละชุดการทดลอง เตรียมสารละลายตามแต่ละชุดการทดลอง หลังจากที่เติมสารละลายธาตุอาหารและน้ำหมักชีวภาพแต่ละสูตรลงถึงพักน้ำ

C : ปรับค่า pH ให้อยู่ประมาณ 5.5 - 6.5 และค่า EC ประมาณ 1.0-1.8 ms/cm ใ้เท่ากันทุกชุดการทดลอง

D : บันทึกรายละเอียดการใช้หมักชีวภาพจากนมสด และสารละลายธาตุอาหารสูตรมาตรฐาน ในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT (Nutrient Film Technique)

E-G: การบันทึกค่าการทดลอง ความสูง ความกว้างทรงพุ่ม (เซนติเมตร) จำนวนใบ (ใบ)

H-I: น้ำหนักต้นสด และ น้ำหนักต้นแห้ง



ภาคผนวกที่ 5 แสดงการเจริญเติบโต T1-T6 ชุดการทดลองทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง (Treatment)

ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	จาริวัฒน์ ศิริอินทร์
วัน เดือน ปี เกิด	25 พฤษภาคม 2529
สถานที่เกิด	อำเภอนางรอง บุรีรัมย์
ที่อยู่ปัจจุบัน	901/1895 จรัญสนิทวงศ์ 3 แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร 10900

ตำแหน่งและประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2566- ปัจจุบัน	ประธานสาขาวิชาชีววิทยา คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
พ.ศ. 2568	รองผู้อำนวยการสำนักกิจการนักศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
พ.ศ. 2561-2567	รองผู้อำนวยการสำนักศิลปะและวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
พ.ศ. 2560	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสำนักศิลปะและวัฒนธรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2568	ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต การบริหารเทคโนโลยีและนวัตกรรม
พ.ศ. 2556	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (จุลชีววิทยาประยุกต์) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
พ.ศ. 2562	ประกาศนียบัตรหลักสูตรบัณฑิตวิชาชีพครู คณะครุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
พ.ศ. 2552	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ชีววิทยา) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา