



การเจริญเติบโตและการสะสมสารบาโคไซด์ เอ ของพรอมมิ
(*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์



ชุตติพร มณีพลาย

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

การเจริญเติบโตและการสะสมสารบาโคไซด์ เอ ของพรอมมิ
(*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การเจริญเติบโตและการสะสมสารบาโคไซด์ เอ ของพรมมิ
(*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิิกส์"

ของ ชุติพร มณีพลาย

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรศิริกุลญา ธารธิมา)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.เนริสา คุณประทุม)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวี สุจิตฺติ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ กงบังเกิด)

อนุมัติ

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มุณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การเจริญเติบโตและการสะสมสารบาโคไซด์ เอ ของพรมมิ (<i>Bacopa monnieri</i> (L.) Wettst.) ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิิกส์
ผู้วิจัย	ชุตติพร มณีพลา
ประธานที่ปรึกษา	ดร. เนริสา คุณประทุม
กรรมการที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวี สุจิตฺติ
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2561
คำสำคัญ	พรมมิ, ไฮโดรโปนิิกส์, สารบาโคไซด์ เอ, เมทิลจัสโมน

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพรมมิ (*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์ 2 แบบ คือ แบบ NFT และ DFT ใช้สารละลายธาตุอาหารครึ่งสูตร Hoagland โดยมีการปลูกพรมมิในวงบ่อที่บรรจุดินที่มีน้ำท่วมขังเป็นชุดควบคุม เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ พบว่า พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์ แบบ DFT มีน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนยอด จำนวนใบ และพื้นที่ใบ สูงที่สุด การทดลองโดยรวมบ่งชี้ว่าการปลูกพรมมิด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์ แบบ DFT เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพรมมิ ส่งผลให้มีผลผลิตสูงสุด เมื่อศึกษาค่า EC (1.00, 1.50 และ 2.00 mS/cm) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ภายใต้ระบบ DFT สามารถสรุปได้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC 1.50 mS/cm นาน 6 สัปดาห์ มีการเจริญเติบโต ทั้ง 7 ลักษณะ ได้แก่ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวต้น จำนวนยอด จำนวนใบ พื้นที่ใบ และปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงสุด จากการศึกษาค่า pH (ที่ 5.5, 6.5 และ 7.5) โดยใช้สารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT ที่ EC 1.5 mS/cm ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ นาน 6 สัปดาห์ สามารถสรุปได้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH 6.5 มีการเจริญเติบโตโดยรวมของทั้ง 7 ลักษณะสูงสุด และผลของ MeJA ต่อการสะสมสาร Bacoside A โดยปลูกพรมมิในระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT ใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ค่า EC 1.5 mS/cm pH 6.5 เป็นเวลา 6 สัปดาห์ จากนั้น ฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μ M) วิเคราะห์ปริมาณสาร Bacoside A หลังจากได้รับ MeJA เป็นเวลา 2, 4 และ 6 วัน พบว่าพรมมิมีการสะสมปริมาณสาร Bacoside A สูงที่สุด หลังจากได้รับ 250 μ M MeJA เป็นเวลา 2 วัน

Title	GROWTH AND BACOSIDE A ACCUMULATION IN <i>BACOPA MONNIERI</i> (L.) WETTST. UNDER HYDROPONIC SYSTEM
Author	CHUTIPORN MANEELY
Advisor	Narisa Kunpratum
Co-Advisor	Assistant Professor Kawee Sujjipuli, Ph.D.
Academic Paper	Thesis M.S. in Biological Sciences, Naresuan University, 2018
Keywords	Bacopa monnieri (L.) Wettst., Hydroponics, Bacoside A, Methyl jasmonate

ABSTRACT

The aim of this study was to compare the growth of Brahmi (*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) cultured by NFT and DFT hydroponics for 6 weeks using half strength Hoagland's nutrient solutions. Conventional soil culture was used as control containing Brahmi shoots grown in wet soil. The results found that the highest growth (fresh weight, dry weight, shoot number, leaf number and leaf area) was observed on Brahmi cultured by DFT hydroponic system. These results indicated that DFT hydroponic system was suitable for enhancing the growth of Brahmi giving a highest yield. For the study of the effect of EC (1.0, 1.5 and 2.0 mS/cm) on growth of Brahmi cultivated in a DFT hydroponic for 6 weeks. The results revealed that 7 growth characteristics (fresh weight, dry weight, plant height, shoot number, leaf number, total leaf area and photosynthetic pigment contents) of Brahmi were highest in EC 1.5 mS/cm. The effect of pH (5.5, 6.5 and 7.5) on Brahmi growth was investigated. Brahmi shoots were cultivated in DFT hydroponic system nourished with Hoagland's nutrient solutions, EC 1.5 mS/cm for 6 weeks. The results revealed that all 7 growth characteristics of Brahmi were highest in pH 6.5. Bacoside A accumulation induced by MeJA was studied. Brahmi shoots were cultivated in DFT hydroponic system using Hoagland's nutrient solution, EC 1.5 mS/cm, pH 6.5 for 6 weeks then treated with various concentrations of MeJA (0, 50, 150 and 250 μ M). The bacoside A content was

detected after treatments for 2, 4 and 6 days. Results revealed that highest bacoside A accumulation was found in Brahmi treated with 250 μ M MeJA for 2 days.



ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนร่วมทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ในความกรุณาของ ดร.เนริสา คุณประทุม ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กวี สุจิตฺติ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้มอบความรู้ คำปรึกษาที่ดี รวมถึงคำแนะนำ ในการทำวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งคำปรึกษาในการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ รวมทั้งปลูกฝังและให้ข้อคิดแก่ผู้วิจัยให้มีความอดทน มีความขยัน เพียรพยายาม ในการทำงานวิจัยในครั้งนี้ และยังสนับสนุนให้มีความกล้าใจและเป็นแบบอย่างที่ดีมาโดยตลอด จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุพันธ์ กงบังเกิด ที่กรุณาตรวจแก้ไข ปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรศิริกุลญา ธาราธิมา ที่ให้ความกรุณามาเป็นประธานในการพิจารณาวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.พิทักษ์ อินธิมา รวมถึงคณาจารย์ภาควิชาชีววิทยาทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาที่ดี ช่วยแนะนำและแก้ไขปัญหาให้การทำวิจัยผ่านพ้นไปได้ด้วยดี อีกทั้งขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาชีววิทยา ศูนย์ปฏิบัติการกลาง คณะวิทยาศาสตร์ และคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่อำนวยความสะดวกในด้านของเครื่องมือและอุปกรณ์ในงานวิจัย รวมถึงให้คำปรึกษาที่ดีมาโดยตลอด รวมทั้งรุ่นพี่ รุ่นน้อง เพื่อนร่วมรุ่นนิสิตปริญญาโท และปริญญาเอก ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งไม่สามารถเอ่ยชื่อนามได้ครบทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเสมอมา

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และมหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการทำการวิจัยในครั้งนี้

เหนือสิ่งอื่นใดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนและส่งเสริมในด้านการศึกษายเป็นอย่างดีมาโดยตลอด คอยให้ความรักและเป็นกำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด รวมถึงครอบครัว อันเป็นที่รักยิ่งและเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

ชุตินพร มณีพลา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....ค	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....จ	จ
ประกาศขอบคุณการ.....ช	ช
สารบัญ.....ช	ช
สารบัญตาราง..... 1	1
สารบัญภาพ..... 1	1
บทที่ 1 บทนำ..... 1	1
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 6	6
2.1 ลักษณะและความสำคัญของพรมมิ..... 6	6
2.2 การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponic systems)..... 10	10
2.2.1. ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชเป็น แผ่นฟิล์มบางๆ (Nutrient film technique; NFT)..... 11	11
2.2.2. ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชในรางปลูก ระดับลึก (Deep flow technique; DFT) 12	12
2.2.3. ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบกึ่งน้ำลึก (Dynamic root floating technique; DRFT) 13	13
2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตภายใต้การปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์..... 14	14
2.3.1. ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร..... 14	14
2.3.2. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)..... 16	16
2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มการสะสมสารทุติยภูมิในพืชสมุนไพร..... 17	17

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	21
3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย	21
3.2 การเตรียมต้นพันธุ์พรมมิในการทดลอง	27
3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมสาร Bacoside A ของพรมมิ ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิิกส์	27
3.4 แผนการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง	33
บทที่ 4 ผลการวิจัย	34
4.1 ผลการทดลองที่ 1 ผลของระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ NFT และ DFT ต่อการ เจริญเติบโตของพรมมิ	34
4.2 ผลการทดลองที่ 2 ผลของค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบ ไฮโดร โปนิิกส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ	40
4.3 ผลการทดลองที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายธาตุอาหาร ใน ระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ	47
4.4 ผลการทดลองที่ 4 ผลของ Methyl jasmonate (MeJA) ต่อการสะสมสาร Bacoside A ในพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT	56
บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย	61
5.1 การทดลองที่ 1 ผลของระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ NFT และ DFT ต่อการเจริญเติบโต ของพรมมิ	61
5.2 การทดลองที่ 2 ผลของค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบ ไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ	64
5.3 การทดลองที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายธาตุอาหารใน ระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ	67
5.4 การทดลองที่ 4 ผลของ Methyl jasmonate (MeJA) ต่อการสะสมสาร Bacoside A ในพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT	69

บรรณานุกรม.....72

ภาคผนวก83

ประวัติผู้วิจัย.....93



สารบัญตาราง

ตาราง 1	องค์ประกอบของสารเคมีในสูตรอาหาร Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950).....	26
ตาราง 2	น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์.....	35
ตาราง 3	ความยาวต้น (เซนติเมตร) และจำนวนยอด (ยอด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบ	37
ตาราง 4	จำนวนใบ (ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วย	39
ตาราง 5	น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุ	41
ตาราง 6	ความยาวต้น (เซนติเมตร/ต้น) และจำนวนยอด (ยอด/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วย.....	43
ตาราง 7	จำนวนใบ (ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วย	44
ตาราง 8	ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูก ด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์.....	46
ตาราง 9	น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์.....	48
ตาราง 10	ความยาวต้น (เซนติเมตร/ต้น) และจำนวนยอด (ยอด/ต้น) ของพรมมิที่ปลูก ด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ pH แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์	51
ตาราง 11	จำนวนใบ (ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วย สารละลายธาตุอาหารที่ pH แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์.....	52
ตาราง 12	ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH แตกต่างกัน เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์.....	53
ตาราง 13	ปริมาณสาร Bacoside A ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ EC 1.50 mS/cm pH 6.5 เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์	55
ตาราง 14	ปริมาณสาร Bacoside A ของพรมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น และเวลาที่แตกต่างกัน เมื่ออายุ 6 สัปดาห์	57
ตาราง 15	ปริมาณสาร Bacoside A ของพรมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น และเวลาที่แตกต่างกัน เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์	58

ตาราง 16	น้ำหนักแห้งของพรมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น และเวลาที่แตกต่างกันเมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์	59
ตาราง 17	ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์.....	91
ตาราง 18	ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH แตกต่างกัน เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์.....	92



สารบัญภาพ

ภาพ 1 การเจริญเติบโตของพรมมิในบ่อน้ำ (ก) ลักษณะดอกพรมมิ (ข) และลักษณะลำต้น ใบ และการออกดอกของพรมมิ (ค) สเกลบาร์ = 1 เซนติเมตร.....	7
ภาพ 2 ลักษณะโครงสร้างของสาร saponin glycosides ในพรมมิ.....	8
ภาพ 3 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT.....	12
ภาพ 4 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT.....	13
ภาพ 5 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DRFT.....	14
ภาพ 6 โครงสร้างสาร Methyl jasmonate.....	19
ภาพ 7 ปุ่มสารละลาย ยี่ห้อ Minjiang รุ่น NS 803 กำลังไฟ 35 W.....	21
ภาพ 8 เครื่อง TRI-Meter รุ่น pH/EC&TEMP-983.....	21
ภาพ 9 ลักษณะและขนาดรางปลูกไฮโดรโปนิคส์.....	22
ภาพ 10 ลักษณะและขนาดชุดปลูกไฮโดรโปนิคส์.....	23
ภาพ 11 ชุดปลูกไฮโดรโปนิคส์ ร้าน Hydroponic-OK อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่.....	23
ภาพ 12 เครื่อง Leaf Area Meter รุ่น LI-3100C ยี่ห้อ LI-COR ประเทศสหรัฐอเมริกา.....	24
ภาพ 13 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Analytik Jena ประเทศไทย.....	24
ภาพ 14 เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1100 Series ประเทศเยอรมนี.....	25
ภาพ 15 ระดับความลึกของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT.....	28
ภาพ 16 ระดับความลึกของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT.....	28
ภาพ 17 ลักษณะการเจริญเติบโตของพรมมิที่เจริญเติบโตในดิน (ก) ในระบบ NFT (ข) และระบบ DFT (ค) เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ สเกลบาร์ = 20 เซนติเมตร.....	36
ภาพ 18 ลักษณะการเจริญเติบโตของพรมมิที่เจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน นาน 6 สัปดาห์; การเจริญเติบโตของพรมมิในสารละลายธาตุอาหาร EC 1.00 (ก), 1.50 (ข) และ 2.00 mS/cm (ค) สเกลบาร์ = 20 เซนติเมตร.....	42

ภาพ 19 ลักษณะการเจริญเติบโตของพรมมิที่เจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH ต่างต่าง กัน นาน 6 สัปดาห์; พรมมิที่เจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH 5.5 (ก) 6.5 (ข) และ 7.5 (ค) สเกลบาร์ = 20 เซนติเมตร.....	50
ภาพ 20 การเตรียมต้นพันธุ์พรมมิก่อนปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์อายุ 1 เดือน.....	84
ภาพ 21 ลักษณะการงอกของรากพรมมิ อายุ 4 วัน.....	84
ภาพ 22 ระบบปลูกไฮโดรโปนิกส์แบบ NFT.....	85
ภาพ 23 ระบบปลูกไฮโดรโปนิกส์แบบ NFT (ข้าว) และ DFT (ขวา).....	85
ภาพ 24 พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ DFT สารละลายธาตุอาหาร EC 1.5 mS/cm pH 6.5 อายุ 6 สัปดาห์.....	86
ภาพ 25 การคลุมพลาสติกหลังการฉีดพ่นด้วย MeJA แต่ละความเข้มข้น.....	86
ภาพ 26 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร Bacoside A ₃ (พีค 1), Bacopaside II (พีค 2), Bacopaside X (พีค 3) และ Bacopasaponin C (พีค 4) จากสารมาตรฐาน และจากตัวอย่างพรมมิ หลังถูกฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μ M) เป็นเวลา 2 วัน.....	87
ภาพ 27 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร Bacoside A ₃ (พีค 1), Bacopaside II (พีค 2), Bacopaside X (พีค 3) และ Bacopasaponin C (พีค 4) จากสารมาตรฐาน และจากตัวอย่างพรมมิ หลังถูกฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μ M เป็นเวลา 4 วัน.....	88
ภาพ 28 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร Bacoside A ₃ (พีค 1), Bacopaside II (พีค 2), Bacopaside X (พีค 3) และ Bacopasaponin C (พีค 4) จากสารมาตรฐาน และจากตัวอย่างพรมมิ หลังถูกฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μ M) เป็นเวลา 6 วัน.....	89
ภาพ 29 กราฟมาตรฐานของสาร Bacoside A ₃ , Bacopaside II, Bacopaside X และ Bacopasaponin C	90

อักษรย่อ

ซม.	=	เซนติเมตร
มม.	=	มิลลิเมตร
A	=	Absorbance
°C	=	องศาเซลเซียส
DFT	=	Deep flow technique
DRFT	=	Dynamic root floating technique
dS/m	=	Decisiemens per metre
EC	=	Electrical conductivity
GA	=	Gibberelic acid
H ⁺	=	Hydrogen ion
HCO ₃ ⁻	=	Bicarbonate
HPLC	=	High performance liquid chromatography
HPO ₄ ²⁻	=	Hydrogen phosphate
H ₂ PO ₄ ⁴⁻	=	Dihydrogen phosphate
JA	=	Jasmonic acid
LFW	=	Leaf fresh weight
MeJA	=	Methyl jasmonate
mmhos/cm	=	Millimhos per centimeter
mS/cm	=	milliseimens per centimetre
NH ₄ ⁺	=	Ammonium ion
NFT	=	Nutrient film technique
nm	=	Nanometre
NO ₃ ⁻	=	Nitrate ion
OH ⁻	=	Hydroxide ion
pH	=	Power of hydrogen ion concentration
SA	=	Salicylic acid
W	=	Watt
µl	=	Microliter
µM	=	Micromolar
µm	=	Micrometer
µS/cm	=	Microsiemens per centimetre

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พรมมิ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bacopa monnieri* (L.) Wettst. มีชื่อภาษาฮินดี คือ Brahmi ชื่อภาษาอังกฤษ คือ Water hyssop (เต็ม สมิตินันท์, 2544) จัดอยู่ในวงศ์ Plantaginaceae (Charoenphon et al., 2016) เป็นพืชล้มลุกขนาดเล็ก ลำต้นเลื้อยแผ่ไปตามพื้นดิน ชอบขึ้นตามพื้นที่ชุ่มชื้น หรือมีน้ำขัง พบได้ทั่วไปในเขตร้อน เขตร้อนชื้น และกึ่งร้อนชื้น (Russo & Borrelli, 2005; สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืชกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2558) พรมมิใช้เป็นยาสมุนไพรในตำราอายุรเวท (Ayurvedic medicine) ของอินเดียมานานกว่า 3000 ปี โดยใช้ส่วนต้นที่อยู่เหนือดินเป็นยาอายุวัฒนะ มีสรรพคุณช่วยเพิ่มความจำ และบำรุงสมอง (Calabrese et al., 2008) ในปัจจุบันพบมีรายงานการวิจัยฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของพรมมิหลายด้าน เช่น ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์การต้านเซลล์มะเร็ง ลดอาการซึมเศร้า ฤทธิ์การฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ฤทธิ์ด้านการขยายหลอดเลือด (Charoenphon et al., 2016; Haque et al., 2017; Kamkaew et al., 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่มีผลในการป้องกันระบบประสาท และการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Nemetchek, Stierle, Stierle, & Lurie, 2017; Peth-Nui et al., 2012) สารออกฤทธิ์สำคัญในต้นพรมมิเป็นสารกลุ่ม triterpenoid saponin ชื่อว่า Bacoside A มีฤทธิ์ช่วยเพิ่มความจำและไม่มีผลข้างเคียงใดๆ (Calabrese et al., 2008; Kongkeaw, Dilokthornsakul, Thanarangsarit, Limpeanchob, & Scholfield, 2014) ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพจากสารสกัดพรมมิออกมาจำนวนมากทั่วโลก รวมทั้งในประเทศไทย แต่ในประเทศไทยยังมีแหล่งเพาะปลูกพรมมิเพื่อใช้ในการผลิตสำหรับอุตสาหกรรมยาและอาหารเสริมน้อยมาก อีกทั้งยังเป็นการปลูกบนดินที่มีน้ำท่วมขัง (Phrompittayarat et al., 2011; กรกนก อิงคินันท์ et al., 2553) ซึ่งการใช้แหล่งน้ำธรรมชาติในการเพาะปลูก มีโอกาสสูงที่พืชจะปนเปื้อนสารพิษตกค้าง เนื่องจากมีการชะล้างจากการทำเกษตรกรรมและปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพรมมิเป็นพืชที่ดูดซับสารตกค้างและโลหะหนักในดินได้ง่าย (Hussain, 2010; Pierce, Pezeshki, Larsen, & Moore, 2009)

ดังนั้นการเพาะปลูกบนดินที่มีน้ำท่วมขังอาจปนเปื้อนสารพิษจากยาฆ่าแมลงหรือสารโลหะหนักที่ถูกชะลงในแหล่งน้ำได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การเพาะปลูกบนดินที่มีน้ำท่วมขังนั้นต้องใช้เวลาในการปลูกนาน 3-4 เดือน จึงจะสามารถเก็บเกี่ยวได้ และพบสาร Saponins เฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.9 ของน้ำหนักแห้งเท่านั้น (Phrompittayarat et al., 2011; กรกนก อิงคินันท์ et al., 2553) ปัจจุบันการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นที่นิยมในด้านการเกษตรเพื่อช่วยเพิ่มผลผลิตและลดระยะเวลาในการเก็บเกี่ยว ซึ่งเป็นเทคโนโลยีทางการเกษตรที่สามารถปลูกพืชได้โดยไม่ใช้ดิน โดยรากพืชสามารถนำสารอาหารไปใช้ได้โดยตรงผ่านสารละลายธาตุอาหาร การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์จึงเป็นส่วนสำคัญในการช่วยเพิ่มผลผลิต ลดระยะเวลาในการเพาะปลูก ป้องกันการปนเปื้อนสารพิษในดินหรือแหล่งน้ำในธรรมชาติ (ดิเรก ทองอร่าม, 2550) และสามารถควบคุมคุณภาพของพรมมิที่จะนำไปผลิตในระดับอุตสาหกรรมยาและอาหารเสริมได้ ซึ่งการปลูกพรมมิให้มีผลผลิตสูงและมีคุณภาพขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์ซึ่งมีหลากหลายระบบในปัจจุบัน ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่สามารถวัดได้จากค่าการนำไฟฟ้า (EC) และค่า pH ของสารละลายธาตุอาหาร เนื่องจากการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นระบบที่สารละลายหมุนเวียนอยู่ในระบบ การจัดการธาตุอาหารให้อยู่ในสภาพสมดุลและเหมาะสมกับความต้องการของพืชตลอดการปลูก จึงมีผลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยจะเน้นที่การควบคุมค่า pH และค่า EC ของสารละลายธาตุอาหาร (อานัฐ ตันโซ, 2548) และปัจจุบันมีรายงานการใช้สารควบคุมการเจริญเติบโต MeJA ในปริมาณที่เหมาะสมในการช่วยเพิ่มการสะสมสารทุติยภูมิ หรือสารต้านอนุมูลอิสระในพืช (Largia, Pothiraj, Shilpha, & Ramesh, 2015; Lucho-Constantino et al., 2017) เนื่องจากในธรรมชาติ เมื่อเกิดบาดแผลจากโรค หรือและการเข้าทำลายกักกินของแมลงศัตรูพืช ภายในต้นพืชจะส่งสัญญาณเพื่อกระตุ้นให้มีการผลิตสารทุติยภูมิ เพื่อใช้ในกระบวนการปกป้องตัวเองจากโรค หรือแมลงศัตรูพืช โดย MeJA เป็นสัญญาณจากสารควบคุมการเจริญเติบโตไปกระตุ้นให้พืชเกิดการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ ดังนั้น เพื่อให้พรมมิสามารถผลิตสาร Bacoside A ได้สูงขึ้น จึงต้องศึกษาถึงผลของ MeJA ที่มีต่อการสะสมของสาร Bacoside A ซึ่งเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญของพรมมิ

ดังนั้น การศึกษาครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์ ปัจจัยบางประการ และสารควบคุมการเจริญเติบโตที่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตและการสะสมสาร Bacoside A ของพรมมิ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของพืชสมุนไพร และเพื่อนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตยาและอาหารเสริมเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในอนาคต

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการปลูกพรมมิด้วยระบบการปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (NFT) และแบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชในรางปลูกระดับลึก (DFT)
2. เพื่อศึกษาระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร โดยวัดจากค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่เหมาะสมในการปลูกพรมมิภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์
3. เพื่อศึกษาค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมในการปลูกพรมมิภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์
4. เพื่อศึกษาผลของสารควบคุมการเจริญเติบโต MeJA ต่อการสะสมสาร bacoside A ในพรมมิภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

เนื่องจากพรมมิเป็นพืชสมุนไพรที่มีสรรพคุณที่สำคัญในการป้องกันระบบประสาท ป้องกันสาเหตุของการเกิดโรคอัลไซเมอร์ และสรรพคุณด้านอื่นๆ อีกมากมาย ซึ่งมีการนำมาผลิตเป็นอาหารเสริมจำนวนมากในปัจจุบัน แต่วิธีการเพาะปลูกพรมมิเพื่อนำไปผลิตในภาคอุตสาหกรรมยาและอาหารเสริมยังคงให้ผลผลิตและปริมาณสารสำคัญในการออกฤทธิ์ที่ต่ำ รวมทั้งอาจเกิดการปนเปื้อนสารพิษตกค้างจากดินหรือแหล่งน้ำ การศึกษาวิจัยนี้จะสามารถพัฒนาการปลูกพืชสมุนไพรพรมมิด้วยระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์ที่เหมาะสม รวมทั้งทราบถึงความเข้มข้น และค่า pH ของสารละลายธาตุ

อาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ เพื่อให้ได้ผลผลิตปริมาณมาก มีคุณภาพสม่ำเสมอ ปราศจากโรคและสารปนเปื้อนจากดินและแหล่งน้ำธรรมชาติ และสามารถชักนำให้พรมมิเพิ่มการสะสมสารสำคัญคือ bacoside ให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น โดยใช้สารควบคุมการเจริญเติบโต MeJA ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจของพืชสมุนไพร และเพื่อนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมยาและอาหารเสริม เพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในอนาคต

1.4 ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบการปลูกพรมมิด้วยระบบการปลูกไฮโดรโปนิกส์ แบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (NFT) และแบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชในรางปลูกระดับลึก (DFT) โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ครึ่งสูตร
2. ศึกษาระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร โดยวัดจากค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland
3. ศึกษาค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland และปรับค่า EC ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ (ตามผลการทดลองข้อ 2)
4. ศึกษาผลของสารควบคุมการเจริญเติบโต MeJA ในความเข้มข้น และระยะเวลาในการกระตุ้นที่เหมาะสม เพื่อชักนำให้พรมมิเพิ่มการสะสมสาร Bacoside A ได้มากขึ้น ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ โดยใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ปรับค่า EC และ pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ (ตามผลการทดลองข้อ 2 และ 3)

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

พรมมิ หมายถึง พรมมิ (*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ที่พบในประเทศไทย และแถบทวีปเอเชีย

Hydroponic system หมายถึง การปลูกพืชที่ไม่ใช้ดินและวัสดุปลูก (Nonsubstrate หรือ Water culture) ทำการปลูกพืชลงบนสารละลายธาตุอาหารพืชโดยให้รากพืชสัมผัสกับสารละลายธาตุอาหารโดยตรง

Bacoside A หมายถึง สารออกฤทธิ์ของต้นพรมมิ (*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ประกอบด้วยสาร Bacoside A₃, Bacopaside II, Bacopaside X และ Bacopasaponin C

1.6 สมมุติฐานของการวิจัย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ คือ ระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์, ค่า EC และ pH ของสารละลายธาตุอาหาร และสารควบคุมการเจริญเติบโต ซึ่งมีผลต่อการสะสมสารทุติยภูมิในพืช ดังนั้น การปลูกพรมมิในระบบไฮโดรโปนิคส์ภายใต้ปัจจัยดังกล่าวที่เหมาะสมจะสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและชักนำให้มีการสะสมสาร Bacoside A เพิ่มมากขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ลักษณะและความสำคัญของพรมมิ

พรมมิ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Bacopa monnieri* (L.) Wettst. เป็นพืชสมุนไพร จัดอยู่ในวงศ์ Plantaginaceae พืชสกุล *Bacopa* เคยถูกจัดให้อยู่ในวงศ์ Scrophulariaceae แต่หลังจากที่ได้มีการศึกษาโดยใช้ข้อมูลทางชีววิทยาระดับโมเลกุลเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของการจัดหมวดหมู่ พบว่าพืชหลายสกุลที่เคยอยู่ในวงศ์ Scrophulariaceae ได้ถูกย้ายไปอยู่ในวงศ์อื่นๆ ปัจจุบันพืชสกุล *Bacopa* มีทั้งหมด 69 ชนิด (กรกนก อิงคินันท์ et al., 2558) พบได้ทั่วไปในเขตร้อน เขตร้อนชื้น และกึ่งร้อนชื้น สำหรับประเทศไทยพบพรมมิอยู่ทั่วทุกภาค ภาคเหนือ เช่น จังหวัดแม่ฮ่องสอน ภาคใต้ เช่น ที่เขาสามร้อยยอด จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ และเกาะรา จังหวัดพังงา เป็นต้น ซึ่งจะขึ้นอยู่บริเวณที่ชื้นมีน้ำท่วมถึง หรือมีน้ำขัง (Russo & Borrelli, 2005; กรกนก อิงคินันท์, 2561; สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืชกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2558) พรมมิ มีชื่อในภาษาฮินดี คือ Brahmi มีชื่อในภาษาอังกฤษ คือ Water hyssop และในบางท้องถิ่นของประเทศไทยเรียกพรมมิว่า ผักมิ (เต็ม สมิตินันท์, 2544) ในประเทศไทยพบพืชสกุลนี้เพียง 3 ชนิด คือ *B. monnieri* (L.) Wettst. (พรมมิ) *B. caroliniana* Roxb. (ลานไพลิน) และ *B. floribunda* (R. Br.) Wettst. (ผักสามหลั่น) แต่มีเพียง *B. monnieri* (L.) Wettst. หรือ พรมมิ ชนิดเดียวเท่านั้นที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีปริมาณมากที่สุด และสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตยาและอาหารเสริมได้ (กรกนก อิงคินันท์, 2561) นอกจากนั้น พรมมียังนิยมใช้เป็นพืชประดับตู้ปลาสวยงาม และเป็นพืชสมุนไพร (สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืชกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2558)

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ พรมมิ เป็นพืชล้มลุกขนาดเล็ก อายุหลายปี (perennial plant) ปลายยอดชูเหนือน้ำ (ภาพ 1 ก) ลำต้นตั้งตรง กลมอวบน้ำ ไม่มีขน มีรากออกตามข้อยึดติดกับดิน ใบเป็นใบเดี่ยว ออกแบบตรงข้ามสลับตั้งฉากในแต่ละข้อ ไม่มีก้านใบ แผ่นใบรูปไข่กลับ ขนาดใบยาวประมาณ 1-1.5 เซนติเมตร กว้างประมาณ 0.5 เซนติเมตร ปลายใบป้าน โคนมนไม่เรียบ มีรอยหยักตื้นๆ 2-3 ครั้งที่ขอบปลายใบ โคนใบแคบติดกับลำต้น แผ่นใบไม่มีขนปกคลุม

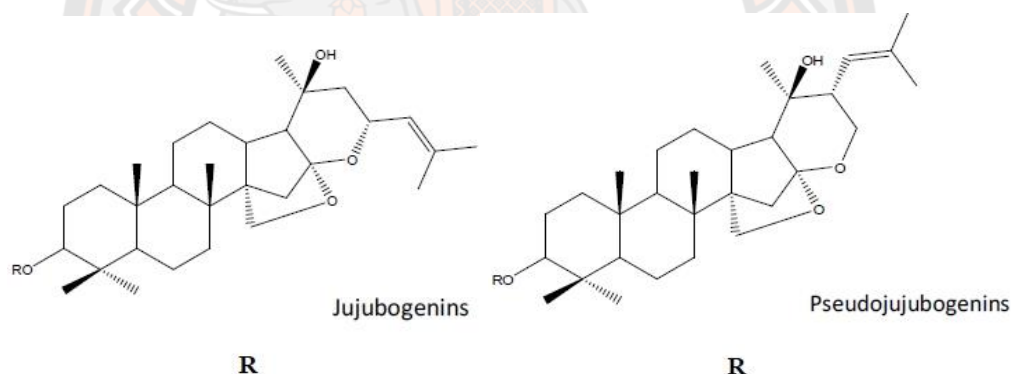
ทั้งด้านล่างและด้านบน ใบอบน้ำ เส้นใบเห็นไม่ชัดเจน ดอกเป็นดอกเดี่ยวออกที่ซอกใบทั้งสองข้างที่ตรงกันข้าม (ภาพ 1 ค) ก้านดอกยาวประมาณ 3-5 เซนติเมตร (ภาพ 1 ค) วงกลีบเลี้ยง 5 กลีบ ขนาดไม่เท่ากัน วงกลีบดอกเชื่อมติดกันที่ฐาน มี 5 กลีบ (ภาพ 1 ข) หลุดร่วงง่ายทั้งวง ความยาวของกลีบดอกประมาณ 1 เซนติเมตร เกสรเพศผู้ มี 4 อัน แบบ didynamous stamen (2+2) ผล เป็นผลเดี่ยว ผลแห้งแบบแตกตรงกลางพู (loculicidal dehiscent) เมล็ด ขนาดเล็กมีววดลายเป็นริ้ว ขนาดประมาณ 0.1 เซนติเมตร (กรกนก อิงคินันท์ et al., 2558; สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, 2558)



ภาพ 1 การเจริญเติบโตของพรมมิในบ่อน้ำ (ก) ลักษณะดอกพรมมิ (ข) และลักษณะลำต้น ใบ และการออกดอกของพรมมิ (ค) สเกลบาร์ = 1 เซนติเมตร

พรมมิถูกใช้เป็นยาสมุนไพรในการแพทย์อายุรเวท (Ayurvedic medicine) ของอินเดียมา มากกว่า 3000 ปี (Russo & Borrelli, 2005) โดยใช้ส่วนที่อยู่เหนือดินเป็นยาอายุวัฒนะ ช่วยเพิ่มความจำ และบำรุงสมอง (Calabrese et al., 2008) สำหรับตำรายาไทยนั้น พบว่าใช้ขับโลหิต แก้ไข ขับพิษร้อน ขับเสมหะ บำรุงหัวใจ แก้ลมบ้าหมู และบำรุงประสาท (ชาญชัย สาดแสงจันทร์, 2556; พิ

ชานันท์ ลีแก้ว, 2555) ในปัจจุบันพบว่ามียารงานการศึกษาฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของพรมมิหลายด้าน เช่น ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์การต้านเซลล์มะเร็ง ลดอาการซึมเศร้า ฤทธิ์การฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ฤทธิ์ด้านการขยายหลอดเลือด เป็นต้น (Charoenphon et al., 2016; Haque et al., 2017; Kamkaew et al., 2011) โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่มีผลในการป้องกันระบบประสาท และการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (Nemetchek et al., 2017; Peth-Nui et al., 2012) องค์ประกอบหลักทางเคมีของพรมมิเป็นสารกลุ่มซาโปนินไกลโคไซด์ (saponin glycosides) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มหลัก ได้แก่ Jujubogenin ประกอบด้วย Bacoside A₃ และ Bacopaside X และกลุ่ม PseudoJujubogenin ประกอบด้วย Bacopaside II และ Bacopasaponin C (ภาพ 2) นอกจากนี้ยังพบสารกลุ่ม alkaloids สารกลุ่ม glycoside, flavonoid และ steroid เป็นองค์ประกอบในพรมมิ



ภาพ 2 ลักษณะโครงสร้างของสาร saponin glycosides ในพรมมิ

ที่มา: Phrompittayarat et al. (2011)

สารกลุ่มซาโปนินเป็นกลุ่มที่ออกฤทธิ์เพิ่มความจำ โดยสารหลักที่มีปริมาณมากที่สุดเรียกว่า Bacoside A ประกอบด้วย Bacoside A₃, Bacopaside II, Bacopasaponin C และ Bacopaside X (Nuengchamng, Sookying, & Ingkaninan, 2016) สำหรับวิธีการตรวจสอบสารกลุ่มซาโปนินในพรมมิ เพื่อใช้ในการควบคุมมาตรฐานวัตถุดิบในการผลิตยา มีรายงานการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค HPLC พบว่าพรมมิส่วนที่อยู่เหนือน้ำความยาว 10-20 เซนติเมตรจากยอด มีปริมาณของสารกลุ่มซา

โปนินสูงที่สุดเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.9 ของน้ำหนักแห้ง และพบว่าพรมมิที่สามารถทำการเก็บเกี่ยวได้ อายุ 3-4 เดือนขึ้นไปจึงจะมีปริมาณสารซาโปนินปริมาณสูงและเหมาะสำหรับการเก็บเกี่ยว (Phrompittayarat et al., 2011; กรกนก อิงคินันท์ et al., 2553)

ปัจจุบัน มีรายงานการศึกษาฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของสารที่พบในพรมมิหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาที่มีผลในการป้องกันระบบประสาท และการป้องกันการเกิดโรคอัลไซเมอร์ โดยมีการศึกษาทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และในสัตว์ทดลอง การทดสอบความเป็นพิษเฉียบพลันและพิษเรื้อรัง ตลอดจนการทดลองทางการแพทย์ โดยพบว่าสารสกัดจากสมุนไพรรพรมมิ มีฤทธิ์ในการป้องกันเซลล์ประสาทไม่ให้ถูกทำลาย ความบกพร่องทางการเรียนรู้และความจำ เช่น โรคอัลไซเมอร์ เกิดจากการตายของเซลล์ประสาทส่วน Hippocampus และ Frontal cortex โดยโปรตีน beta amyloid เป็นสาเหตุสำคัญต่อการตายของเซลล์ประสาท และการเกิดโรคอัลไซเมอร์ (อรรระวี คงสมบัติ, สุทธิสา ถาน้อย, & เสมอ ถาน้อย, 2554) การศึกษาฤทธิ์ด้านการปกป้องเซลล์ประสาทของสารสกัดพรมมิ โดยการเพาะเลี้ยงเซลล์ประสาท พบว่าสารสกัดพรมมิสามารถป้องกันเซลล์ประสาทที่ถูกทำลายด้วยโปรตีน beta amyloid ได้ โดยสารสกัดจากพรมมิมีกกลไกในการต้านสารอนุมูลอิสระ ยับยั้งการเกิด oxidative stress บนเซลล์ประสาท และการยับยั้งการทำงานของ Acetylcholinesterase (AChE) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ไปทำลายสารสื่อประสาทคือ Acetylcholine หากมีการหลั่ง AChE ในปริมาณมากจะทำให้ Acetylcholine ลดลง และเป็นสาเหตุให้การทำงานของระบบประสาทมีประสิทธิภาพน้อยลง (Limpeanchob, Jaipan, Rattanakaruna, Phrompittayarat, & Ingkaninan, 2008) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงาน อรรระวี คงสมบัติ et al. (2554) และ Uabundit Uabundit, Wattanathorn, Mucimapura, and Ingkaninan (2010) พบว่าสัตว์ทดลองที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยโปรตีน beta amyloid มีความจำลดลงโดยวัดจากรูปแบบการทดสอบที่ให้สัตว์ทดลองได้ทดสอบ และวัดจากระดับของ lipid peroxidation ที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อสัตว์ได้รับสารสกัดจากพรมมิขนาด 20, 40 และ 80 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว พบว่าสารสกัดทุกขนาดส่งผลให้สัตว์ทดลองมีการเรียนรู้และความจำเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับปกติ โดยมีระดับของ lipid peroxidation ที่ลดลง และมีจำนวนเซลล์ประสาทมากขึ้น โดยให้ผลใกล้เคียงกับยา

Donepezil ซึ่งเป็นยาสำหรับรักษาผู้ป่วยภาวะสมองเสื่อม และสมุนไพรแปะก๊วย นอกจากนั้นยังพบว่าสารสกัดพรมมี มีผลทำให้ช่วยเพิ่มการไหลเวียนโลหิตบริเวณหลอดเลือดแดงบนเยื่อหุ้มสมอง โดยไม่มีผลต่อความดันโลหิตและอัตราการเต้นของหัวใจในสัตว์ทดลอง (Kamkaew, Norman Scholfield, Ingkaninan, Taepavarapruk, & Chootip, 2013)

สำหรับการทดลองทางการแพทย์พบว่า การรับประทานสารสกัดพรมมีปริมาณ 300 มิลลิกรัม ต่อวัน เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ มีผลทำให้ความสามารถในการเรียนรู้ และความสามารถในการจดจำเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งยังมีความสนใจและจดจ่อมากขึ้นเช่นกัน เนื่องมาจากการลดลงของ AChE ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ไปทำลายสารสื่อประสาท การรับประทานสารสกัดพรมมีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเรียนรู้และความจำ ทั้งในผู้สูงอายุและผู้ที่อยู่ในวัยกลางคน (Calabrese et al., 2008; Kongkeaw et al., 2014; Peth-Nui et al., 2012) และสำหรับการศึกษาความเป็นพิษเฉียบพลัน และพิษเรื้อรัง จากการได้รับสารสกัดพรมมีนั้น พบว่าไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษเฉียบพลัน และพิษเรื้อรังทั้งในสัตว์ทดลองและในมนุษย์ (Calabrese et al., 2008; Sireeratawong, Jaijoy, Khonsung, Lertprasertsuk, & Ingkaninan, 2016)

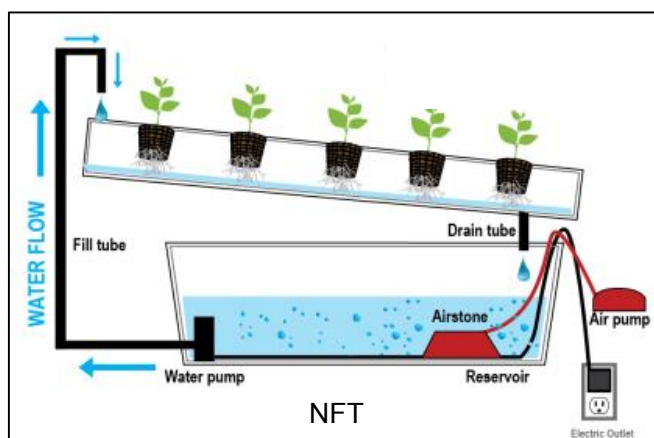
2.2 การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ (Hydroponic systems)

Hydroponics เป็นการปลูกพืชที่ไม่ใช้ดินและวัสดุปลูก (Nonsubstrate หรือ Water culture) เป็นการปลูกพืชลงในสารละลายธาตุอาหารพืชโดยให้รากพืชสัมผัสกับสารละลายธาตุอาหารโดยตรง ปัจจุบันการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นที่นิยมและเป็นที่ยอมรับทั่วโลก เนื่องจากสามารถผลิตพืชได้อย่างต่อเนื่องตลอดปี เพิ่มรอบการผลิตได้มากแต่ใช้พื้นที่น้อย สามารถผลิตพืชในบริเวณที่แห้งแล้งที่สุดของโลกได้ อายุการเก็บเกี่ยวสั้นกว่าและได้คุณภาพสูงกว่าการปลูกพืชบนดิน เนื่องจากมีการจัดการที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมต่างๆ ให้เหมาะสมต่อพืชได้ นอกจากนั้นยังสามารถลดปัญหาการปนเปื้อนสารพิษในดินหรือแหล่งน้ำที่ถูกระงับจากการทำเกษตรกรรม อีกทั้งยังช่วยประหยัดค่าสารเคมีในการกำจัดวัชพืชและการกำจัดแมลง

(ดิเรก ทองอร่าม, 2550) การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีการไหลวนของสารละลายธาตุอาหารที่ได้รับความนิยมในประเทศไทยมี 3 ระบบ ดังนี้

2.2.1. ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ (Nutrient film technique; NFT)

เป็นการปลูกพืชโดยการให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ บนรางปลูกอย่างต่อเนื่อง รากพืชจะได้รับสารละลายธาตุอาหารโดยตรง โดยสารละลายธาตุอาหารที่ไหลจะหนาประมาณ 1-3 มิลลิเมตร (ภาพ 3) ต้นพืชจะเติบโตขึ้นในถ้วยที่ใช้ปลูกซึ่งจะวางอยู่ตรงกลางของราง และเพื่อให้สารละลายธาตุอาหารไหลได้เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ รางจึงต้องตั้งให้ลาดเอียงประมาณ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ทำให้รากพืชได้รับออกซิเจนได้มาก โดยมีอัตราการไหล 1-2 ลิตร/นาที่/ราง แต่ทั้งนี้อัตราการไหลยังจะขึ้นอยู่กับความยาวของรางซึ่งจะต้องให้เพียงพอกับความต้องการในการเจริญเติบโตของพืชด้วย ขนาดรางปลูกพืชกว้าง ตั้งแต่ 5-35 เซนติเมตร สูงประมาณ 5-10 เซนติเมตร ความยาวของรางปลูก ตั้งแต่ 5-20 เมตร รางปลูกอาจทำจากแผ่นพลาสติกสองหน้า ขาวและดำ หนา 80 - 200 ไมโครเมตร หรือทำจากท่อ PVC ขึ้นรูปเป็นรางสำเร็จรูป โดยจะมีปั๊มดูดสารละลายให้ไหลผ่านรางและรากพืชและหมุนเวียนกลับมายังถังเก็บสารละลายธาตุอาหาร การปลูกพืชด้วยระบบ NFT เป็นการปลูกที่ใช้ปริมาณสารละลายธาตุอาหารน้อยและมีประสิทธิภาพที่สุด เนื่องจากใช้น้ำในระบบน้อย แต่จะมีการสะสมความร้อนของสารละลายธาตุอาหารได้ง่าย และต้องมีเครื่องสำรองไฟเพื่อให้ปั๊มน้ำทำงานตลอดเวลา หากมีปัญหาในกรณีที่ไฟดับ (ดิเรก ทองอร่าม, 2550; อานัฐ ตันโซ, 2548)

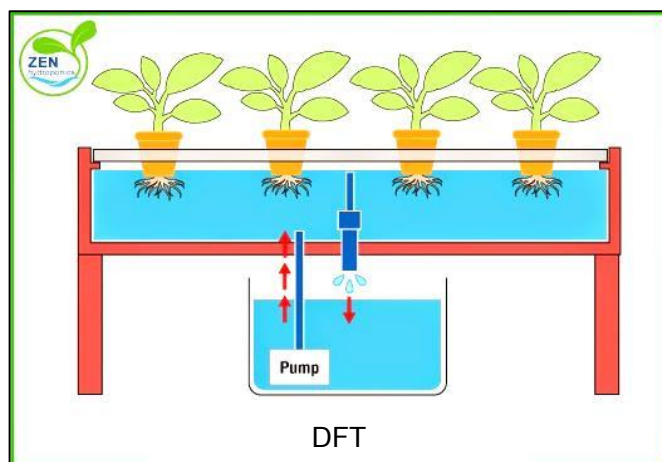


ภาพ 3 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT

ที่มา: <https://howtogrowmarijuana.com/nft-nutrient-film-technique/>

2.2.2. ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านรากพืชในรางปลูกระดับลึก (Deep flow technique; DFT)

เป็นวิธีการปลูกที่ให้สารละลายธาตุอาหารได้ดีกว่าระบบ NFT โดยมีความลึกประมาณ 3-10 เซนติเมตร หรือปริมาณสารละลายธาตุอาหารท่วมราก (ภาพ 4) โดยอาจนำท่อ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2-4 นิ้ว ขึ้นอยู่กับการออกแบบของการปลูก ซึ่งอาจมีการออกแบบระบบในแนวราบหรือแบบขั้นบันไดก็ได้ เพื่อให้พืชเจริญเติบโตได้ดี การวางของท่อจึงไม่จำเป็นต้องวางให้ลาดเอียงเหมือนกับระบบ NFT เพียงแต่ทำการหมุนเวียนสารละลายต้องให้อัตราการไหลที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้กับสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งทำให้รากพืชได้รับออกซิเจนได้เพียงพอ การปลูกพืชด้วยระบบ DFT เป็นระบบที่อุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารค่อนข้างคงที่ ทำให้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขึ้นสูงหรือต่ำเกินไปอย่างช้าๆ และลดปัญหารากแห้งหรือความเสียหายของพืชหากเกิดปัญหาในกรณีที่ไฟดับ เนื่องจากรากพืชแช่อยู่ในสารละลายตลอดเวลา (เฉลิมวุฒิ คำฟูบุตร, 2552; ดิเรก ทองอร่าม, 2550; อานัฐ ตันโซ, 2548)

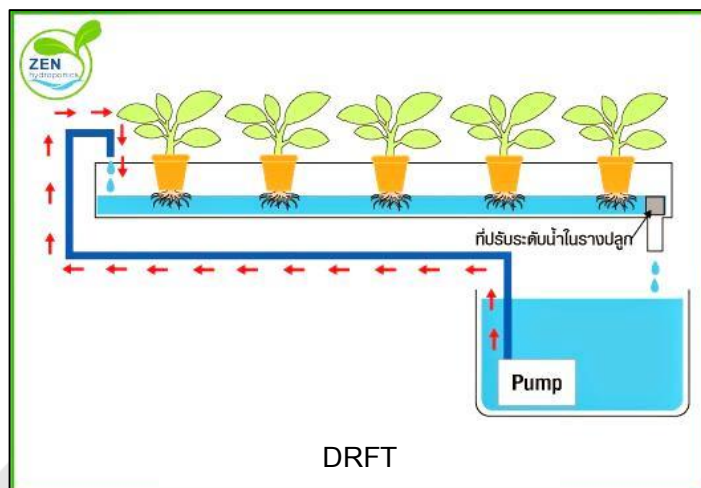


ภาพ 4 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

ที่มา: <http://zen-hydroponics.blogspot.com/2014/11/blog-post.html>

2.2.3. ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบกึ่งน้ำลึก (Dynamic root floating technique; DRFT)

เป็นการปลูกพืชแบบให้สารละลายธาตุอาหารและอากาศไหลผ่านรากพืชในระดับลึกอย่างต่อเนื่องในกระบะปลูก สารละลายจะไหลผ่านรากพืชลึกกว่าระบบ NFT แต่จะลึกน้อยกว่าในระบบ DFT (ภาพ 5) เน้นการปลูกให้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งสร้างรากอากาศเพื่อดูดออกซิเจนเข้าสู่รากเพื่อช่วยในการหายใจ โดยเพิ่มระบบท่อรับน้ำในกระบะที่ช่วยให้ระดับสารละลายธาตุอาหารสูงขึ้นหรือลดลงได้ตามความต้องการของพืช โดยมีปั้มน้ำช่วยในการหมุนเวียนสารละลาย รากปลูกจะไม่ต้องลาดเอียงเหมือนระบบ NFT ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาน้ำแห้งรากเมื่อเกิดไฟฟ้าดับได้ นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการปลูกด้วยเทคนิคนี้ทำมาจากโพลีที่มีความหนาแน่นมาก เพื่อใช้เป็นฉนวนกันความร้อนให้ระบบรากพืช ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในเรื่องอุณหภูมิของน้ำในระบบด้วย (เฉลิมวุฒิ คำฟูบุตร, 2552; ดิเรก ทองอร่าม, 2550; อานัฐ ตันโซ, 2548)



ภาพ 5 ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DRFT

ที่มา: <http://zen-hydroponics.blogspot.com/2014/11/blog-post.html>

2.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตภายใต้การปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์

การปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีการนำสารละลายกลับมาใช้ใหม่อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากเป็นระบบที่สารละลายหมุนเวียนอยู่ในระบบ การจัดการธาตุอาหารให้อยู่ในสภาพสมดุลและเหมาะสมกับความต้องการของพืชตลอดการปลูก จึงมีผลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและความสำเร็จในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน ในทางปฏิบัติในการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเชิงพาณิชย์จะเน้นที่การควบคุมค่า pH และค่า EC ของสารละลายธาตุอาหาร โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.3.1. ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร

ค่าการนำไฟฟ้า หรือค่า EC เป็นค่าที่บอกความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น mmhos/cm หรือ $\mu\text{S}/\text{cm}$ หรือ mS/cm ซึ่ง mS/cm มีค่าเท่ากับ dS/m ค่า EC ที่สูงแสดงถึงสารละลายธาตุอาหารมีความเข้มข้นสูงเช่นเดียวกัน คือมีธาตุอาหารละลายอยู่มาก ค่า EC ที่เหมาะสมในการปลูกพืชแต่ละชนิดด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์จะแตกต่างกัน จากการศึกษาระดับความ

เข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมในการปลูกต้นอูเบียสนานา (*Anubias nana*) ซึ่งเป็นพรรณไม้น้ำที่ใช้เป็นไม้ประดับตกแต่งตู้ปลาด้วยวิธีการปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT โดยศึกษาค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารต่างกัน 3 ระดับ คือ 1, 2 และ 3 mS/cm เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารที่ 2 mS/cm มีผลทำให้ต้นอูเบียสนานาเจริญเติบโตดีที่สุด (จิราพร กุลคำ, 2555) การศึกษาของ Mitrnoi (2007) พบว่า *Echinodorus africanus* ซึ่งเป็นไม้น้ำเจริญเติบโตได้ดีที่สุดในสารละลายธาตุอาหารที่ค่า EC 2 mS/cm ที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT แต่จากการศึกษาค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรรณไม้น้ำชนิดอื่นๆ ที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์พบว่า *Microsorium pteropus* เจริญเติบโตได้ดีที่สุดในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1 mS/cm (Wangwibulkit & Laohavisuti, 2006) และต้นดาวน้อย (*Pogostemon helferi*) เจริญเติบโตได้ดีที่สุดในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1.6 mS/cm (Wangwibulkit & Vajrodaya, 2016) นอกจากนี้ยังมีการปลูกพืชเศรษฐกิจด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์อีกหลายชนิด ซึ่งค่า EC ที่ใช้มีความแตกต่างกัน เช่น ผักกาดหอมที่เจริญเติบโตดีที่สุดและมีสารให้ความขมน้อยที่สุดควรปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 2 dS/m (Seo et al., 2009) สตรอว์เบอร์รี่ (*Fragaria vesca* L.) ให้ผลผลิตที่ดีที่สุดเมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1.3 mS/cm (Caruso, Villari, Melchionna, & Conti, 2011) โดยค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารระหว่าง 1.8-2 mS/cm เหมาะสำหรับการปลูกผักและไม้ประดับทั่วไป แต่ยังมีพืชบางชนิดที่ต้องการสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC สูง เช่น การปลูกมะเขือเทศ ควรปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 3-4 mS/cm และการปลูกแคนตาลูป ควรปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC ระหว่าง 4-6 mS/cm เพราะจะทำให้ผลผลิตมีความหวาน เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารสูง และเหมาะสมกับความต้องการของพืช ส่งผลให้มีการสะสมปริมาณน้ำตาลในผลสูง (ดิเรก ทองอร่าม, 2550) แต่หากค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารสูงเกินไปสำหรับพืชบางชนิด อาจมีปริมาณประจุของธาตุอาหารที่แตกตัวในสารละลายธาตุอาหารในปริมาณมากจนส่งผลกระทบต่อค่าศักย์ไฟฟ้าของน้ำภายในสารละลายธาตุอาหาร และสมดุลของน้ำภายในพืชลดลง มีผลทำให้ความเต่งของเซลล์ การแบ่งเซลล์ และการขยายขนาดของ

เซลล์ภายในพีชลดลง ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพีชลดลงด้วยเช่นกัน (Krishantha, Gunasekera, Sugathadasa, & Prasangka, 2012; คงเอก ศิริงาม, กุณิสรา ชีระวิภา, & ญัฐวดี ไหลหาโคตร, 2557)

ค่า EC เป็นค่าที่บอกความเข้มข้นของธาตุอาหารโดยรวม แต่ไม่สามารถบอกความเข้มข้นของธาตุอาหารแต่ละตัวได้ จึงไม่สามารถทราบว่าธาตุใดมีปริมาณมากเกินไปหรือน้อยเกินไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการถ่ายสารละลายทิ้งเป็นช่วงๆ เพื่อกำจัดธาตุที่พืชไม่ต้องการและมีการสะสมอยู่ในสารละลายธาตุอาหาร ธาตุที่มีปัญหาการสะสมในการปลูกพืชด้วยระบบปิดคือ โซเดียม ซึ่งพืชไม่ดูดไปใช้และมักมีอยู่ในน้ำหรือปุ๋ยที่ใช้เตรียมสารละลายธาตุอาหาร และอาจสูงถึงระดับที่เป็นพิษต่อพืชได้ แนวทางที่จะกำจัดโซเดียมออกจากระบบได้ คือการถ่ายสารละลายทิ้ง นอกจากโซเดียมแล้วยังอาจเกิดการสะสมของจุลธาตุได้ ซึ่งเป็นสาเหตุของความไม่สมดุลของธาตุอาหารในสารละลาย เช่น ความไม่สมดุลของ แอมโมเนียม แคลเซียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม ซึ่งเป็นประจุบวก (Cation) และถูกดูดใช้ในกระบวนการที่คล้ายกัน ถ้าธาตุเหล่านี้อยู่ในสภาพไม่สมดุล เช่น มีแมกนีเซียม หรือโพแทสเซียมมากเกินไป จะทำให้พืชดูดใช้แคลเซียมได้น้อยลง หากต้องการทราบว่าเกิดความไม่สมดุลของสารละลายธาตุอาหารหรือไม่ ต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งต้องเสียเวลาและค่าใช้จ่ายมาก ในทางปฏิบัติเราอาจสังเกตได้จากอาการของพืช แต่วิธีนี้อาจจะเป็นวิธีที่ช้าเกินกว่าจะแก้ไข วิธีที่ดีที่สุดจึงควรเปลี่ยนถ่ายสารละลายธาตุอาหารทิ้งให้หมดก่อนที่ความไม่สมดุลจะรุนแรง แล้วเติมสารละลายที่เตรียมใหม่แทน การเปลี่ยนถ่ายสารละลายโดยทั่วไปมักกำหนดเป็นช่วงแน่นอน เช่น อาจเปลี่ยนถ่ายสายละลายใหม่ทุก 2, 3 หรือ 4 สัปดาห์ (Lee, Yoon, Park, & Yeung, 2015; อานัฐ ต้นโซ, 2548)

2.3.2. ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)

ค่า pH ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ H^+ หรือ OH^- ค่า pH มีความสำคัญมากต่อการเจริญเติบโตของพืชในด้านความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช สารละลายธาตุอาหารโดยทั่วไปควรอยู่ในช่วง 5.5-6.5 เป็นช่วงที่เหมาะสม คือธาตุอาหารอยู่ในรูปที่พืชใช้ได้มากที่สุด เมื่อค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารต่ำกว่า 4 จะเป็นอันตรายต่อรากพืช แต่หากค่า pH ของสารละลายธาตุอาหาร

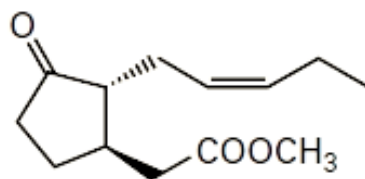
สูงกว่า 7 ติดต่อกันนาน 2-3 วัน จะทำให้การดูดใช้ฟอสฟอรัส เหล็ก และแมงกานีส ผิดปกติ เมื่อเตรียมสารละลายธาตุอาหารใหม่ค่า pH จะเท่ากับ 6 แต่เมื่อเวลาผ่านไปค่า pH จะสูงขึ้น เนื่องจากในการเจริญเติบโตทางลำต้นและใบจะมีการดูดใช้ NO_3^- เป็นส่วนใหญ่ (ดูดใช้ประจุลบมากกว่าบวก) จึงมีการปล่อยอนุมูล HCO_3^- ออกมาในปริมาณเท่ากัน ทำให้ค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารเพิ่มขึ้น จากรายงานการศึกษาวิจัยพบว่า pH ของสารละลายธาตุอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิด โดยพบว่าพรรณไม้ *Anubias barteri* ที่ทำการปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH ระหว่าง 4.7-8.04 และ *Anubias barteri* var. *broad leaf* สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH ระหว่าง 5.7-7.3 โดยปรับค่า EC เท่ากับ 1.5 dS/m ตลอดจนการทดลอง (สุรภี ประชุมพล & นงนุช เลหาหะวิสุทธิ์, 2555) และจากการศึกษาของ ศักดิ์สิทธิ์ บุญดำ and ปริยานุช จุลกะ (2557) พบว่าค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารที่ 5.5 ส่งผลให้ผักกาดฮ่องเต้ (*Brassica chinensis* var. *chinensis*) ที่ปลูกด้วยระบบ NFT มีความสูงของต้นมากที่สุด นอกจากนี้ค่า pH จะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืชแล้วยังพบว่าค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารมีผลต่อการดูดใช้ธาตุอาหารบางตัวของพืชด้วย เช่น ฟอสฟอรัส ซึ่งส่งผลต่อการสะสมสารทุติยภูมิในพืชโดยเฉพาะพืชสมุนไพรบางชนิดที่มีการสะสมน้ำมันหอมระเหย (Lefever, 2013) ดังรายงานของ Seo et al. (2009) พบว่าผักกาดหอมที่มีการดูดใช้ฟอสฟอรัสมากที่สุดมีการสะสมสาร Sesquiterpene lactones (สารที่ทำให้ผักกาดหอมมีรสขม) ปริมาณมากที่สุด ดังนั้น ในการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์จึงต้องวัดค่า pH อย่างสม่ำเสมอ (ดิเรก ทองอร่าม, 2550; อานัฐ ตันโช, 2548)

2.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มการสะสมสารทุติยภูมิในพืชสมุนไพร

ปัจจุบันมีการผลิตยา หรือผลิตภัณฑ์อาหารเสริมที่สกัดจากพืชสมุนไพรเป็นจำนวนมาก ซึ่งการใช้ตัวกระตุ้น (elicitor) เพื่อชักนำให้พืชเพิ่มการสะสมสารทุติยภูมิจึงเป็นกระบวนการสำคัญเพื่อเพิ่มผลผลิตในเชิงพาณิชย์ (Naik & Al-Khayri, 2016) โดยตัวกระตุ้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กลุ่มที่เป็น biotic และ abiotic ตัวกระตุ้นกลุ่ม biotic ได้แก่ สารกลุ่ม

Polysaccharide เช่น chitin, pectin และ chitosan เป็นต้น รวมทั้งสารสกัดจากยีสต์ เชื้อรา และแบคทีเรีย สำหรับตัวกระตุ้นกลุ่ม abiotic ได้แก่ สารเคมี เช่น สารโลหะหนัก (Ag, Cd และ Cu) และธาตุอาหาร สารที่นิยมนำมาใช้ในการกระตุ้นการสร้างสารทุติยภูมิในพืชสมุนไพร และได้ผลเป็น อย่างมากคือ ฮอริโมนพืช หรือสารควบคุมการเจริญเติบโต เช่น JA, MeJA และ SA เป็นต้น (Naik & Al-Khayri, 2016; Ramakrishna & Ravishankar, 2011)

MeJA เป็นฮอริโมนพืชซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกรดจัสโมนิก (Jasmonic acid; JA) และมีหมู่ เมททิล (Methyl) เป็นองค์ประกอบ (ภาพ 6) โดยเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สามารถระเหยได้ ทำ หน้าที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันตัวเองของพืช เพิ่มความต้านทานให้กับพืชเพื่อตอบสนองต่อสิ่งรบกวน ภายนอก เช่น การเกิดบาดแผล การเข้าทำลายของโรคและแมลง ตลอดจนความเครียดต่างๆ (Namdeo, 2007; บุญร่วม คิดคำ, 2557) ในธรรมชาติเมื่อพืชเมื่อเกิดบาดแผลเนื่องจากการเกิดโรค และการเข้าทำลายกัดกินของแมลงศัตรูพืชหรือสัตว์กินพืช พืชจะมีระบบป้องกันตนเองจากโรคพืช และแมลงศัตรูพืชในหลายรูปแบบ ซึ่งรวมไปถึงการส่งสัญญาณจาก MeJA ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณจาก สารควบคุมการเจริญเติบโต จะไปกระตุ้นให้พืชเกิดการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ เช่น สาร saponins, anthocyanin, limonene, menthol และ curcumin เป็นต้น เพื่อด้านทานต่อโรคหรือสัตว์ที่มากัด กิน (Abdelgawad, Khalafaallah, & Abdallah, 2014) ดังมีรายงานการศึกษาการตอบสนอง ของพลู (*Piper betle* L.) เมื่อเกิดสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อม พบว่าพลูจะส่งสัญญาณผ่าน MeJA และเพิ่มการสร้างสาร sesquiterpene (สารทุติยภูมิที่มีสรรพคุณทางยา) ด้วยการกระตุ้นเอนไซม์ sesquiterpene synthase (กำไร วรนุช, รัตติกานต์ บัวเรือง, อนุพันธ์ กงบังเกิด, คำรพ รัตน์สุด, & ชนนิษฐ์ ชูพยัคฆ์, 2558) ซึ่งสารทุติยภูมิเหล่านี้มีฤทธิ์แตกต่างกันไป เช่น มีฤทธิ์ต้านการอักเสบ ฤทธิ์ ต้านแบคทีเรีย หรือเชื้อก่อโรค ฤทธิ์ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด หรือเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เป็น ต้น (Abdelgawad et al., 2014; Cheong & Choi, 2003)



ภาพ 6 โครงสร้างสาร Methyl jasmonate

ปัจจุบันได้มีการศึกษาผลของ MeJA (ความเข้มข้น 0, 50 และ 100 μM) ต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและคุณค่าทางโภชนาการในผักกาดหอมเรดโอดที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ พบว่าการฉีดพ่น MeJA ความเข้มข้น 100 μM สามารถชักนำฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และสารแอนโทไซยานินได้สูงที่สุดเท่ากับ 55.3 ไมโครกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักสด และ 10.7 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ (บุญร่วม คิตคำ, 2557) ปัจจุบันมีการใช้ MeJA เพื่อเพิ่มสารทุติยภูมิในพืชสมุนไพรที่สำคัญอีกเป็นจำนวนมาก (Singh & Dwivedi, 2018) โดยพบว่ามีการใช้ MeJA ในการช่วยเพิ่มการสร้าง Bacoside A ในพรมมิ โดย Lorgia et al. (2015) ได้ศึกษาผลของ MeJA ในการเพิ่มสาร Bacoside A ของพรมมิโดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในอาหารเหลว พบว่าการใช้ MeJA ความเข้มข้น 50 μM สามารถเพิ่มการสะสมสาร Bacoside A ได้มากขึ้น 11.39 เปอร์เซ็นต์

สำหรับประเทศไทยแหล่งการเพาะปลูกพรมมิเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมมีจำนวนน้อยโดยเป็นการปลูกแบบดั้งเดิม คือปลูกบนดินที่มีน้ำท่วมขัง ซึ่งน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติที่ใช้ในการเกษตรมีโอกาสปนเปื้อนสารพิษตกค้างในดิน หรือสารพิษที่ถูกปล่อยลงแหล่งน้ำจากการทำเกษตรกรรมในปัจจุบัน ซึ่งการปลูกพรมมิแบบดั้งเดิมอาจทำให้พืชดูดซับสารพิษตกค้างในดิน หรือปนเปื้อนสารพิษจากยาฆ่าแมลงหรือสารโลหะหนักได้ง่าย (Hussain, 2010; Pierce et al., 2009) อีกทั้งยังพบว่าการปลูกแบบดั้งเดิมจะสามารถทำการเก็บเกี่ยวพรมมิได้ต้องมีอายุนาน 3-4 เดือน จึงจะมีปริมาณสาร saponins สูงและเหมาะสำหรับการเก็บเกี่ยว ซึ่งปริมาณของสารกลุ่ม saponins สูงที่สุดเฉลี่ยเพียงร้อยละ 1.9 ของน้ำหนักแห้งเท่านั้น (Phrompittayarat et al., 2011; กรรณก อิงคินันท์ et al., 2553) ดังนั้น

การปลูกสมุนไพรในระบบไฮโดรโปนิคส์จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญ ที่สามารถควบคุมคุณภาพของ
พรมิ ปริมาณสาร Bacoside A และป้องกันการปนเปื้อนจากสารพิษตกค้างในดินได้ ซึ่งการปลูก
พรมิให้ได้คุณภาพสูงขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการชักนำให้พืช
สะสมสาร Bacoside A มากขึ้น ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่
เหมาะสม คือ ระบบการปลูกไฮโดรโปนิคส์ ค่า EC ค่า pH ของสารละลายธาตุอาหาร และความ
เข้มข้นของ MeJA ต่อการสะสมสาร Bacoside A เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณภาพ ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่า
ทางเศรษฐกิจของพืชสมุนไพร สามารถนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตยาและอาหารเสริม
และเพื่อตอบสนองความต้องการของตลาดในอนาคตต่อไป



บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

1. ชิ้นส่วนยอดพรอมมิ (*Bacopa monnieri* (L.) Wettst.) ความยาวประมาณ 8 ซม.
2. อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสำหรับใช้ในการทดลอง
3. ปั๊มสารละลาย ยี่ห้อ Minjiang รุ่น NS 803 กำลังไฟ 35 W สำหรับหมุนเวียนสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิกส์ (ภาพ 7)



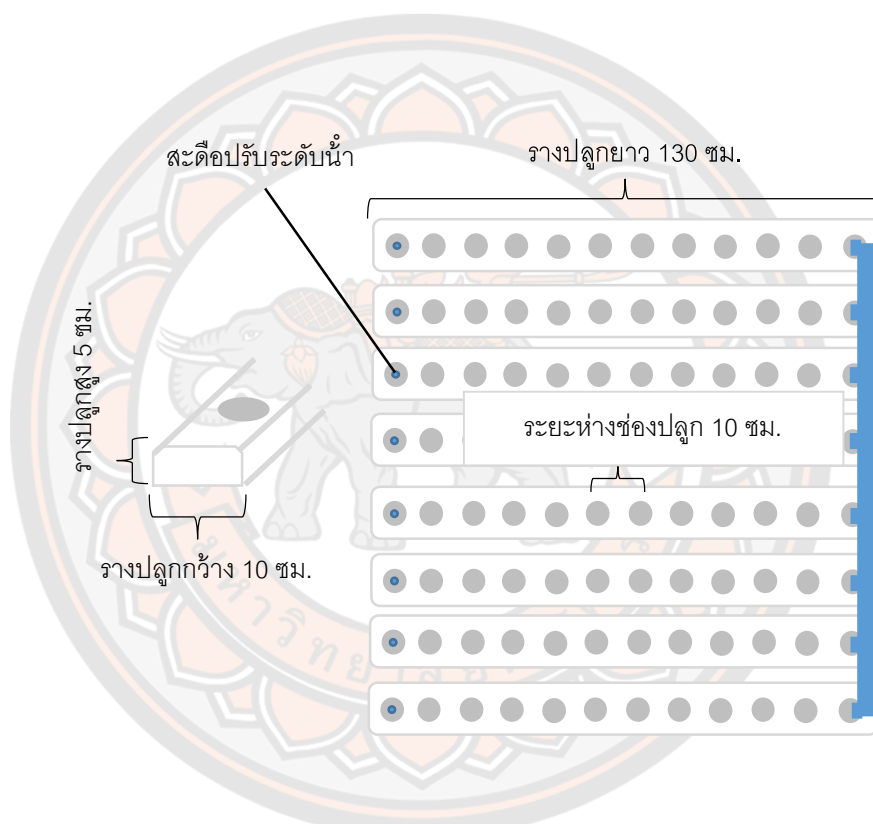
ภาพ 7 ปั๊มสารละลาย ยี่ห้อ Minjiang รุ่น NS 803 กำลังไฟ 35 W

4. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวัดค่า EC, pH และอุณหภูมิสารละลายธาตุอาหาร ได้แก่ เครื่อง TRI-Meter รุ่น pH/EC&TEMP-983 (ภาพ 8)

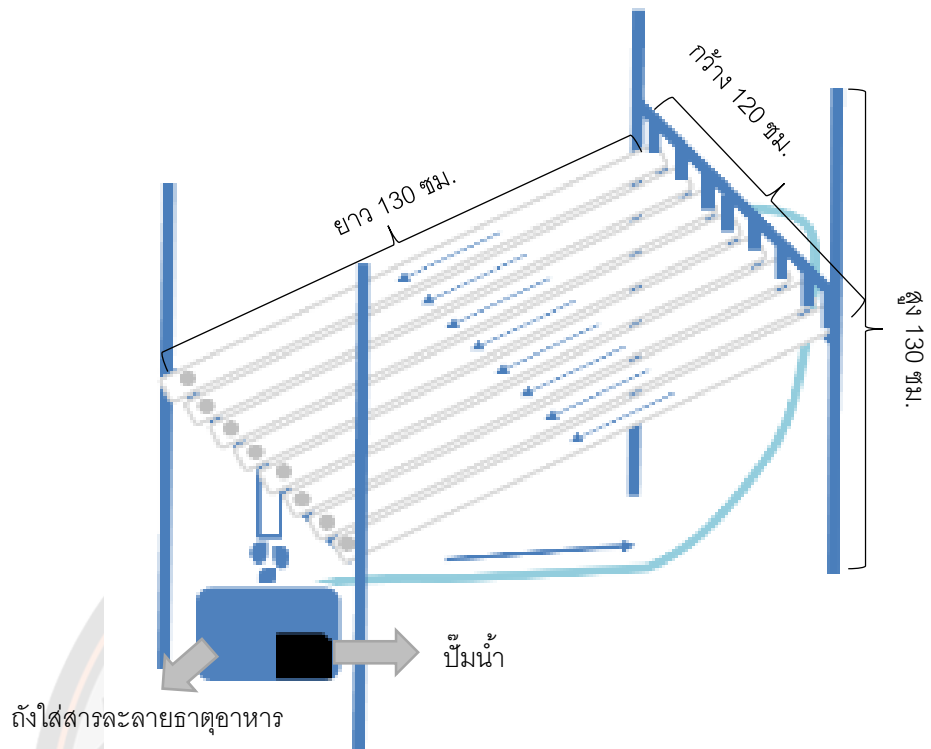


ภาพ 8 เครื่อง TRI-Meter รุ่น pH/EC&TEMP-983

5. ชุดปลูกระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นชุดปลูกสำเร็จรูป จากร้าน Hydroponic-OK อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่ (ภาพ 11) รางปลูกสำเร็จรูปทำจาก uPVC ความกว้าง 10 เซนติเมตร ความยาว 130 เซนติเมตร และมีความสูง 5 เซนติเมตร วางเรียงต่อกัน 8 ราง แต่ละรางมี 10 ช่องปลูก โดยมีระยะห่างระหว่างต้น 10 เซนติเมตร (ภาพ 9) รางปลูกมีความสูงจากพื้นประมาณ 80 เซนติเมตร และถังใส่สารละลายธาตุอาหารขนาด 50 ลิตร โดยมีปั้มน้ำ ปั้มนสารละลายสู่ระบบปลูก (ภาพ 10 และ 11)



ภาพ 9 ลักษณะและขนาดรางปลูกไฮโดรโปนิคส์



ภาพ 10 ลักษณะและขนาดชุดปลูกไฮโดรโปนิคส์



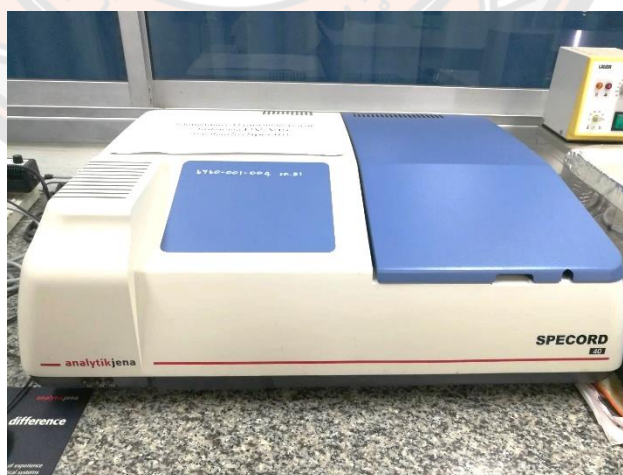
ภาพ 11 ชุดปลูกไฮโดรโปนิคส์ ร้าน Hydroponic-OK อำเภอสารภี จังหวัดเชียงใหม่

6. เครื่องวัดพื้นที่ใบ Leaf Area Meter รุ่น LI-3100C ยี่ห้อ LI-COR ประเทศสหรัฐอเมริกา สำหรับวัดขนาดพื้นที่ใบ (ภาพ 12)



ภาพ 12 เครื่อง Leaf Area Meter รุ่น LI-3100C ยี่ห้อ LI-COR ประเทศสหรัฐอเมริกา

7. เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Analytik Jena ประเทศไทย สำหรับวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (ภาพ 13)



ภาพ 13 เครื่อง UV-Vis Spectrophotometer ยี่ห้อ Analytik Jena ประเทศไทย

8. เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์หาสาร Bacoside A (Bacoside A3, Bacopaside X, Bacopaside II และ Bacopasaponin C) โดยใช้เทคนิค HPLC ได้แก่ เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1100 Series ประเทศเยอรมนี และคอลัมน์ RP-18 column ยี่ห้อ Purospher STAR ขนาด 250 x 4.6 mm. ขนาดอนุภาค 5 ไมโครเมตร ประเทศเยอรมนี (ภาพ 14)



ภาพ 14 เครื่อง HPLC ยี่ห้อ Agilent รุ่น 1100 Series ประเทศเยอรมนี

9. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้แก่ acetone (C_3H_6O) และ absolute ethanol (C_2H_5OH) ยี่ห้อ RCI Labscan

10. สารเคมีสำหรับการสกัดสาร Bacoside A ได้แก่ methanol ยี่ห้อ RCI Labscan (HPLC เกรด)

11. สารเคมีสำหรับวิเคราะห์หาสาร Bacoside A โดยใช้เทคนิค HPLC ได้แก่ 0.2% phosphoric acid (H_3PO_4) AR เกรด, acetonitrile (C_2H_3N) HPLC เกรด ยี่ห้อ RCI Labscan และ สารมาตรฐาน Bacoside A (Bacoside A3, Bacopaside X, Bacopaside II และ Bacopasaponin C, $\geq 95\%$ purity) HPLC เกรด ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

12. สารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช Methyl jasmonate (Methyl 3-oxo-2-(2-pentenyl)cyclopentaneacetate) ยี่ห้อ Sigma-Aldrich ประเทศสหรัฐอเมริกา

13. สารเคมีสำหรับใช้ในการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ดังตาราง 1

ตาราง 1 องค์ประกอบของสารเคมีในสูตรอาหาร Hoagland (Hoagland & Arnon, 1950)

สารเคมี (Stock solution)	ปริมาณที่ใช้ : มิลลิลิตร/ลิตร
1 M KH_2PO_4	1
1 M KNO_3	6
1 M $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	4
1 M $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2
ธาตุอาหารรองและจุลธาตุ	มิลลิกรัม/ลิตร
H_3BO_3	2.86
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.08
$\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.02
ปริมาณที่ใช้ : 1 มิลลิลิตร/ลิตร	
เหล็ก	กรัม/ลิตร
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.50
$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	3.35
ปริมาณที่ใช้ : 10 มิลลิลิตร/ลิตร	

3.2 การเตรียมต้นพันธุ์พรมมิในการทดลอง

พืชทดลองที่ใช้ คือ พรมมิ โดยใช้ส่วนยอดที่ปลูกลงในกระถางดินเป็นเวลา 1 เดือน ความยาวประมาณ 8 เซนติเมตร โดยมีข้อติดอยู่ส่วนปลายตัดด้านล่าง เพื่อให้รากที่งอกจากข้อจุ่มในสารละลายธาตุอาหาร และมีจำนวนใบประมาณ 6 ใบ จากนั้นนำชิ้นส่วนที่ตัดได้ลงปลูกลงในฟองน้ำภายในถ้วยปลูกพลาสติก เพื่อให้พรมมิปรับสภาพและมีรากงอกพร้อมที่จะดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์ โดยนำถ้วยปลูกแช่ในช่องปลูกไฮโดรโปนิคส์ให้สารละลายธาตุอาหารท่วมข้อของชิ้นส่วนพืช เมื่อรากงอกจากนั้นจึงดำเนินการทดลองต่อไป

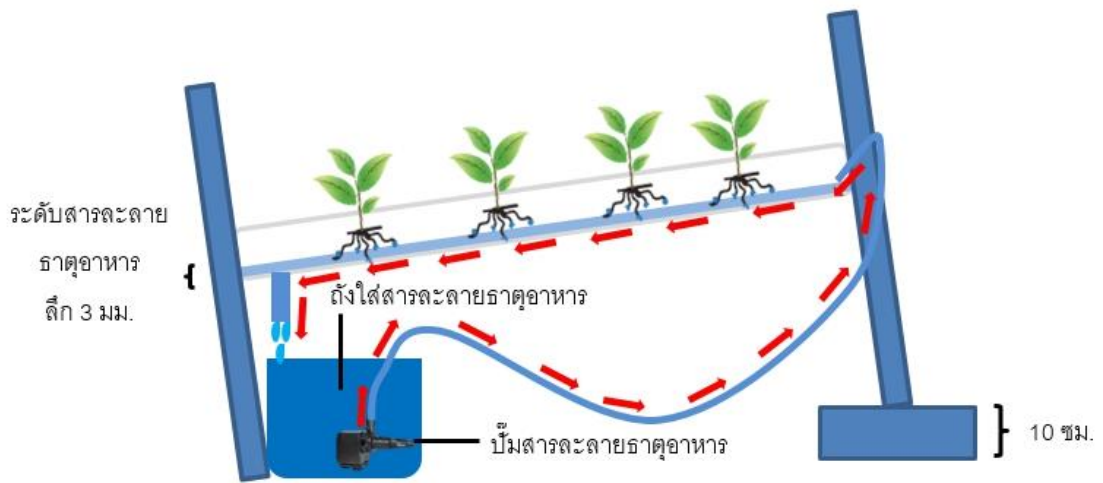
3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการสะสมสาร Bacoside A ของพรมมิภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์

เมื่อทำการปรับสภาพพรมมิเพื่อให้มีรากงอก และนำมาเป็นต้นพันธุ์พรมมิเริ่มต้นในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโต และการสะสมสาร Bacoside A ของพรมมิภายใต้ระบบไฮโดรโปนิคส์ โดยแบ่งปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษาดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

1) การเตรียมระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT

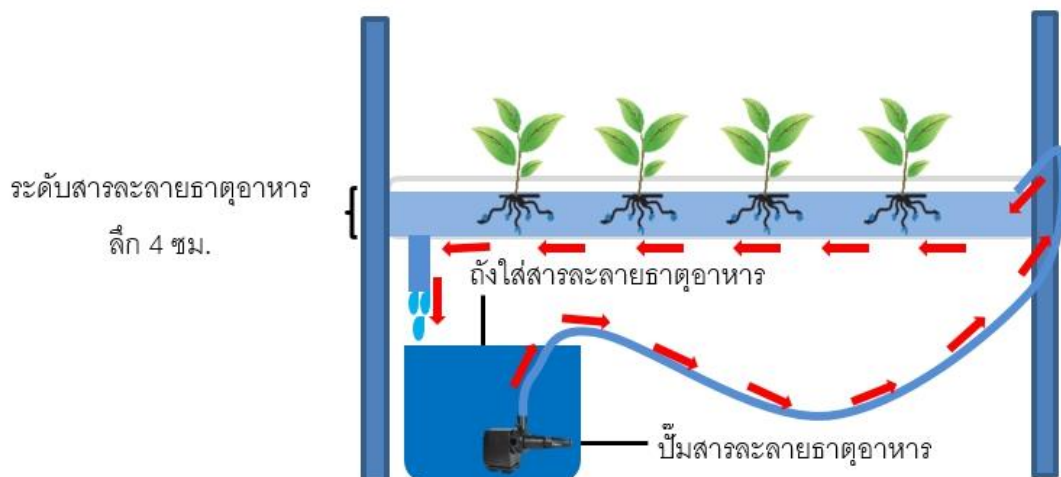
การปลูกพรมมิด้วยระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT ใช้รางปลูกสำเร็จรูป เตรียมสารละลายธาตุอาหารครั้งสูตร Hoagland EC 1.5 mS/cm ในถังเก็บสารละลายปริมาตร 50 ลิตร ฐานของระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT ด้านหนึ่งจะสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง 10 cm เพื่อให้รางปลูกมีความลาดเอียง เมื่อสารละลายธาตุอาหารป้อนเข้าสู่ระบบจะไหลเป็นแผ่นฟิล์มบางๆ ผ่านรากพืช ระดับความลึกของสารละลายธาตุอาหารประมาณ 3-5 มิลลิเมตร อย่างต่อเนื่อง (ภาพ 15)



ภาพ 15 ระดับความลึกของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT

2) การเตรียมระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

การปลูกพรมมิด้วยระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ใช้รางปลูกสำเร็จรูปเตรียมสารละลายธาตุอาหารครั้งสูตร Hoagland EC 1.5 mS/cm ในถังเก็บสารละลายปริมาตร 50 ลิตร จากนั้นปั๊มสารละลายธาตุอาหารเข้าสู่ระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT โดยไหลผ่านรากพืชในระดับลึกอย่างต่อเนื่อง ระดับความลึกของสารละลายธาตุอาหารประมาณ 4 เซนติเมตร (ภาพ 16)



ภาพ 16 ระดับความลึกของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

3) การศึกษาเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT

โดยปลูกพรมมิในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT โดยเตรียมสารละลายธาตุอาหารครึ่งสูตร Hoagland EC 1.5 mS/cm และปรับค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารให้มีค่าระหว่าง 5.8-6.5 ด้วย 10N HCl หรือ 10N NaOH ตลอดการทดลอง เป็นเวลา 6 สัปดาห์ และปลูกพรมมิในดินเหนียวที่มีน้ำขังในบ่อปูนซีเมนต์ (เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 80 ซม.) เป็นชุดควบคุม (Control) เพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโต ทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายธาตุอาหารใหม่ในสัปดาห์ที่ 4 และบันทึกผลการทดลองทุก 2 สัปดาห์ โดยการชั่งน้ำหนักสดรวม น้ำหนักแห้งรวม วัดความยาวลำต้น น้ำจำนวนยอด จำนวนใบ และวัดพื้นที่ใบรวม

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

การศึกษามูลของค่า EC ในสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโต แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 : ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1.0 ± 0.2 mS/cm
(25% Hoagland's solution)

ชุดที่ 2 : ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1.5 ± 0.2 mS/cm
(50% Hoagland's solution)

ชุดที่ 3 : ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 2.0 ± 0.2 mS/cm
(75% Hoagland's solution)

นำส่วนยอดพรมมิปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT (ผลจากการทดลองที่ 1) ใช้สารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland วัดค่า EC ให้ตรงแต่ละชุดการทดลอง และปรับค่า pH

ของสารละลายธาตุอาหารให้มีค่าระหว่าง 5.8-6.5 ตลอดการทดลอง เป็นเวลา 6 สัปดาห์ ทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายธาตุอาหารใหม่ในสัปดาห์ที่ 4 และบันทึกผลการทดลอง ทุก 2 สัปดาห์ โดยการชั่งน้ำหนักสดรวม น้ำหนักแห้งรวม วัดความยาวลำต้น นับจำนวนยอด จำนวนใบ วัดพื้นที่ใบรวม และวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

การวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง มีวิธีดังนี้

ชั่งน้ำหนักใบสดของพรมมิแต่ละชุดการทดลอง 0.05 กรัม ทำการบดด้วยโกร่งบดให้ละเอียด จากนั้นเติมสารสกัด โดยใช้ 80% acetone : absolute ethanol (1:1) ผสมให้เข้ากัน และดูดสารสกัดใส่หลอดไมโครเซ็นทริฟิวก์ขนาด 1.5 มิลลิลิตร นำสารสกัดที่ได้ปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที ดูดส่วนใสเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง UV-Vis Spectrophotometer โดยค่าการดูดกลืนแสงของคลอโรฟิลล์ เอ วัดที่ความยาวคลื่น 663 nm, คลอโรฟิลล์ บี ที่ 645 nm และแคโรทีนอยด์ ที่ 441 nm จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณรงควัตถุ โดยการคำนวณจากวิธีของ ดังนี้

$$\text{คลอโรฟิลล์ เอ} = [(12.25 \times A_{663}) - (2.55 \times A_{645})] \times [1 / (100 \times \text{LFW})]$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ บี} = [(20.30 \times A_{645}) - (4.91 \times A_{663})] \times [1 / (100 \times \text{LFW})]$$

$$\text{คลอโรฟิลล์ เอ+บี} = [(7.34 \times A_{663}) + (17.76 \times A_{645})] \times [1 / (100 \times \text{LFW})]$$

$$\text{แคโรทีนอยด์} = [(4.46 \times A_{441}) - \text{คลอโรฟิลล์ เอ} + \text{คลอโรฟิลล์ บี}] \times$$

$$[1 / (100 \times \text{LFW})]$$

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายธาตุอาหาร ในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

การศึกษามผลของค่า pH ในสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโต แบ่งเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 : ปลุกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH 5.5 ± 0.2

ชุดที่ 2 : ปลุกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH 6.5 ± 0.2

ชุดที่ 3 : ปลุกในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH 7.5 ± 0.2

โดยนำส่วนยอดพรมมิ ปลุกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT (ผลจากการทดลองที่ 1) ใช้สารละลายธาตุอาหารครึ่งสูตร Hoagland EC 1.5 mS/cm (ผลจากการทดลองที่ 2) ตลอดการทดลอง เป็นเวลา 6 สัปดาห์ ทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายใหม่ในสัปดาห์ที่ 4 และบันทึกผลการทดลองทุก 2 สัปดาห์ โดยการชั่งน้ำหนักสดรวม น้ำหนักแห้งรวม วัดความยาวลำต้น นับจำนวนยอด จำนวนใบ วัดพื้นที่ใบรวม และวิเคราะห์ปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง

การทดลองที่ 4 ศึกษาผลของ Methyl jasmonate (MeJA) ต่อการสะสมสาร Bacoside A ของพรมมิที่ปลุกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

การศึกษามผลของ MeJA ต่อการสะสมสาร Bacoside A โดยแบ่งเป็น 4 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 : ชุดควบคุม (Control) ไม่ทำการฉีดพ่น MeJA

ชุดที่ 2 : ฉีดพ่น MeJA ความเข้มข้น $50 \mu\text{M}$

ชุดที่ 3 : ฉีดพ่น MeJA ความเข้มข้น $150 \mu\text{M}$

ชุดที่ 4 : ฉีดพ่น MeJA ความเข้มข้น $250 \mu\text{M}$

โดยนำส่วนยอดพรมมิ ปลุกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT (ผลจากการทดลอง ที่ 1) ใช้สารละลายธาตุอาหารครึ่งสูตร Hoagland ค่า EC 1.5 mS/cm (ผลจากการทดลอง ที่ 2) และปรับค่า pH ในสารละลายธาตุอาหารเท่ากับ 6.5 (ผลจากการทดลองที่ 3) ตลอดการทดลอง ทำการเปลี่ยนถ่ายสารละลายใหม่ในสัปดาห์ที่ 4 บันทึกผลการทดลองหลังฉีดพ่น เป็นระยะเวลา 2, 4 และ 6 วัน โดยการชั่งน้ำหนักแห้งรวม และวิเคราะห์ปริมาณสาร Bacoside A (Bacoside A3, Bacopaside X, Bacopaside II และ Bacopasaponin C) ด้วยเทคนิค HPLC โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) การเตรียมตัวอย่างพืชและการสกัดสาร Bacoside A

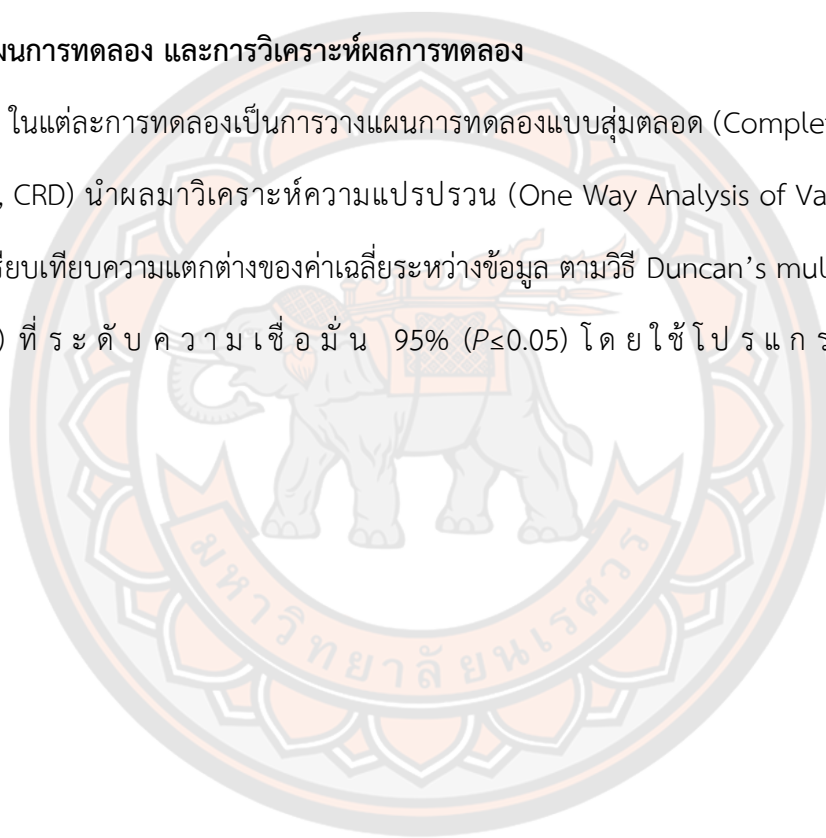
การสกัดสารจากพรมมิโดยนำตัวอย่างพรมมิจากการปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT หลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ระดับความเข้มข้น และระยะเวลาเก็บเกี่ยวหลังการฉีดพ่น ที่แตกต่างกัน นำมาอบที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง สกัดสารจากพรมมิโดยนำมาบดให้ละเอียดเป็นผง จากนั้นชั่งตัวอย่างปริมาณ 0.1 กรัม แล้วเติมเมทานอลปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไป vortex 1 นาที sonicate เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบ ต่อนาที เป็นเวลา 3 นาที ดูดส่วนใสเก็บที่อุณหภูมิ 4 °C ไม่ให้โดนแสง หลังจากนั้นทำการสกัดซ้ำอีก 2 ครั้ง นำสารละลายที่สกัดได้รวมกัน และนำไป vortex 1 นาที ทำการเจือจางโดยดูดสารสกัดพรมมิ ที่ได้ปริมาตร 250 μ l และปรับปริมาตรด้วยเมทานอลให้เป็น 1,000 ไมโครลิตร (1 มิลลิลิตร) จากนั้นนำสารสกัดที่เจือจางแล้วกรองผ่าน nylon syringe filter ขนาด 0.45 ไมโครเมตร แล้วเก็บสารสกัดที่กรองได้ในขวดสีชาแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -80 °C จากนั้นนำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์หาสาร Bacoside A ต่อไป (ดัดแปลงจาก Phrompittayarat et al. (2011) และ Mishra, Mishra, Tiwari, and Jha (2013))

2) การวิเคราะห์หาสาร Bacoside A (Bacoside A3, Bacopaside X, Bacopaside II และ Bacopasaponin C) โดยใช้เทคนิค HPLC

การวิเคราะห์หาสาร Bacoside A ด้วยเทคนิค HPLC โดยใช้คอลัมน์ RP-18 column และใช้ 0.2% Phosphoric acid : Acetonitrile (65:35) เป็น mobile phase ใช้ระยะเวลาในการชะ 30 นาที ใช้อัตราการชะที่ 1 มิลลิลิตรต่อนาที โดยปริมาตรที่ฉีด คือ 10 ไมโครลิตร และตรวจวัดสัญญาณด้วยเครื่อง UV detector ที่ความยาวคลื่น 205 นาโนเมตร (Mishra et al., 2013; Phrompittayarat et al., 2011)

3.4 แผนการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในแต่ละการทดลองเป็นการวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete Randomized Design, CRD) นำผลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (One Way Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างข้อมูล ตามวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ ระดับ ความ เชื่อ มั่น 95% ($P \leq 0.05$) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป



บทที่ 4 ผลการวิจัย

4.1 ผลการทดลองที่ 1 ผลของระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

เพื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ 2 แบบ โดยแบ่งตามปริมาณระดับสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland (Hoagland's solution; half strength) ไหลผ่านรากพืชในราง คือ ให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านแบบแผ่นฟิล์มบาง (NFT) และให้สารละลายธาตุอาหารไหลผ่านแบบระดับน้ำลึก (DFT) โดยการปลูกพรมมิในวงบ่อที่บรรจุดินที่มีน้ำท่วมขังเป็นชุดควบคุม (treatment control) เมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ 2, 4 และ 6 สัปดาห์ เก็บข้อมูลลักษณะการเจริญเติบโต (6 ลักษณะ) ได้แก่ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวต้น จำนวนยอด จำนวนใบและพื้นที่ใบ ได้ผลการทดลองดังนี้

1) น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

ผลการศึกษา พบว่า พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้งแบบ คือ NFT และ DFT นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มีน้ำหนักสดสูงกว่าปลูกในแบบ Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยในสัปดาห์ที่ 4 และ 6 พรมมิที่ปลูกในแบบ DFT (เฉลี่ย 40.77 และ 106.01 กรัม/ต้น ตามลำดับ) มีน้ำหนักสดสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ NFT (เฉลี่ย 31.79 และ 69.18 กรัม/ต้น ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 2) หรืออาจกล่าวได้ว่าพรมมิที่ปลูกแบบ DFT มีน้ำหนักสดสูงกว่า NFT ประมาณ 1.28 และ 1.53 เท่า ที่ 4 และ 6 สัปดาห์ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักแห้งของพรมมิ พบว่าสอดคล้องกับน้ำหนักสดต้น คือ พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้งแบบ NFT และ DFT นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ พบว่า มีน้ำหนักแห้งสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพรมมิที่ปลูกในแบบ NFT และ DFT ในสัปดาห์ที่ 2 และ 4 พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน แต่มีความแตกต่างกันในสัปดาห์ที่ 6 โดยพรมมิที่ปลูกด้วยแบบ DFT มีน้ำหนักแห้ง (เฉลี่ย 8.48 กรัม/ต้น) สูงกว่าแบบ NFT (เฉลี่ย 7.14 กรัม/ต้น) (ตาราง 2) หรือประมาณ 1.19 เท่า

เมื่อพิจารณาทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ ทั้งแบบ NFT และ DFT ในสัปดาห์ที่ 2, 4 และ 6 พบว่า มีค่าสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ Control แต่ในสัปดาห์สุดท้ายของทดลอง (สัปดาห์ที่ 6) พบว่า พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์แบบ DFT มีน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด เมื่อเทียบกับ แบบ NFT และ Control

ตาราง 2 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิกส์ แบบ NFT และ DFT นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

น้ำหนัก	เวลา (สัปดาห์)	ระบบปลูก		
		Control	NFT	DFT
น้ำหนักสด	2	1.16 ± 0.57 ^b	4.58 ± 0.24 ^a	4.89 ± 0.20 ^a
	4	3.60 ± 0.29 ^c	31.79 ± 1.50 ^b	40.77 ± 1.55 ^a
	6	14.64 ± 0.64 ^c	69.18 ± 3.38 ^b	106.01 ± 2.98 ^a
น้ำหนักแห้ง	2	0.07 ± 0.01 ^b	0.30 ± 0.01 ^a	0.28 ± 0.01 ^a
	4	0.21 ± 0.01 ^b	2.26 ± 0.14 ^a	2.42 ± 0.10 ^a
	6	0.84 ± 0.03 ^c	7.14 ± 0.57 ^b	8.48 ± 0.44 ^a

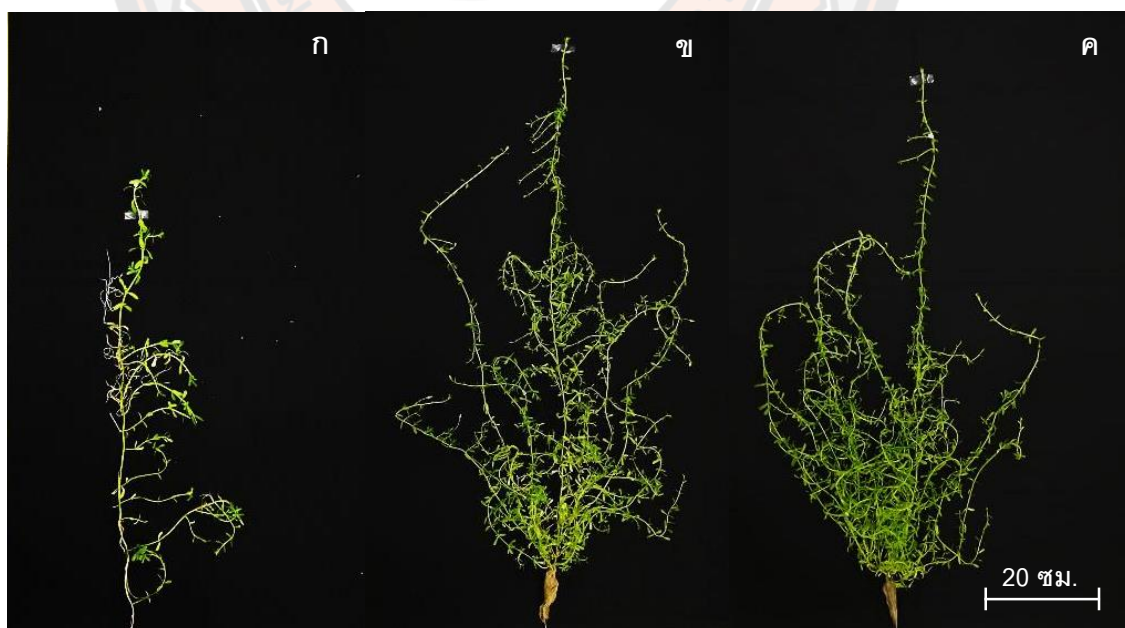
หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2) ความยาวต้นและจำนวนยอด

หลังจากปลูกพรมมิ ในระบบไฮโดรโปนิกส์ทั้งแบบ NFT และ DFT นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ ทำการบันทึก ความยาวต้นและจำนวนยอด ผลการทดลองพบว่า ความยาวต้นที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ทั้ง 2 แบบ มีค่าสูงกว่าที่ปลูกในแบบ Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p \leq 0.05$) เมื่อพิจารณาค่าความยาวพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT ในสัปดาห์ที่ 2, 4 และ 6 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน (ไม่แตกต่างทางสถิติ) อย่างไรก็ตาม ในสัปดาห์ที่ 6 พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT มีความยาวต้น (เฉลี่ย 99.60 เซนติเมตร) สูงกว่าแบบ DFT (เฉลี่ย 95.60 เซนติเมตร) (ตาราง 3)

เมื่อพิจารณาจำนวนยอดของพรมมิ ในสัปดาห์ที่ 2, 4 และ 6 พบว่า พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้ง 2 แบบ คือ NFT และ DFT ยังคงมีจำนวนยอดสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะความยาวต้น จากการเปรียบเทียบจำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในแบบ NFT และ DFT พบว่า จำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในแบบ DFT ที่ 2 สัปดาห์ (เฉลี่ย 16.92 และ 16.46 ยอด ตามลำดับ) และ 6 สัปดาห์ (เฉลี่ย 53.40 และ 58.67 ยอด ตามลำดับ) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่ในสัปดาห์ที่ 4 พบว่า จำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในแบบ DFT (เฉลี่ย 40.00 ยอด) สูงกว่าแบบ NFT (เฉลี่ย 34.08 ยอด) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 3 และภาพ 17)



ภาพ 17 ลักษณะการเจริญเติบโตของพรมมิที่เจริญเติบโตในดิน (ก) ในระบบ NFT (ข) และระบบ DFT (ค) เป็นระยะเวลา 6 สัปดาห์ สเกลบาร์ = 20 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาทั้งความยาวต้น และจำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้งแบบ NFT และ DFT ในสัปดาห์ที่ 2, 4 และ 6 พบว่า มีค่าสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ Control โดยในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT มีความยาวต้นสูงที่สุด (เฉลี่ย 99.60 เซนติเมตร) ส่วนพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT มีจำนวนยอดสูงที่สุด (เฉลี่ย 58.67 ยอด) (ตาราง 3 และภาพ 17)

ตาราง 3 ความยาวต้น (เซนติเมตร) และจำนวนยอด (ยอด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

ลักษณะ	เวลา (สัปดาห์)	ระบบปลูก		
		Control	NFT	DFT
ความยาวต้น	2	14.73 ± 0.54 ^b	24.46 ± 1.03 ^a	24.00 ± 0.76 ^a
	4	35.23 ± 1.15 ^b	63.75 ± 1.51 ^a	62.82 ± 2.24 ^a
	6	87.00 ± 2.04 ^b	99.60 ± 1.93 ^a	95.60 ± 2.81 ^a
จำนวนยอด	2	3.77 ± 0.53 ^b	16.92 ± 0.44 ^a	16.46 ± 0.47 ^a
	4	10.31 ± 0.71 ^c	34.08 ± 1.00 ^b	40.00 ± 0.92 ^a
	6	21.60 ± 0.83 ^b	53.40 ± 3.85 ^a	58.67 ± 2.64 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3) จำนวนใบและพื้นที่ใบ

เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของระบบไฮโดรโปนิคส์ (แบบ NFT และ DFT) และแบบ Control ต่อจำนวนใบและพื้นที่ใบของพรมมิที่ ผลการทดลองพบว่า จำนวนใบของพรมมิ ที่ปลูก

ในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้ง 2 แบบ นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มากกว่าในแบบ Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้ง 2 แบบ นาน 2 สัปดาห์ พบว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ NFT (เฉลี่ย 131.17 ใบ/ต้น) มีจำนวนใบ มากกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ DFT (เฉลี่ย 118.00 ใบ/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนในสัปดาห์ที่ 4 จำนวนใบของพรมมิที่ปลูกในแบบ DFT (เฉลี่ย 509.00 ใบ/ต้น) มีค่าสูงกว่าแบบ NFT (เฉลี่ย 482.00 ใบ/ต้น) แต่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ขณะที่จำนวนใบของพรมมิที่ปลูกในแบบ DFT นาน 6 สัปดาห์ (เฉลี่ย 1,376.20 ใบ/ต้น) มีค่าสูงกว่าแบบ NFT (เฉลี่ย 958.60 ใบ/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งมีค่าสูงกว่าประมาณ 1.44 เท่า (ตาราง 4)

เมื่อพิจารณาพื้นที่ใบของพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้ง 2 แบบ นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ พบว่า มีค่าสูงกว่าที่ปลูกในแบบ Control อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้ง 2 แบบ พบว่า ในสัปดาห์ที่ 2 พรมมิที่ปลูกในแบบ NFT มีพื้นที่ใบ (เฉลี่ย 71.28 ตารางเซนติเมตร/ต้น) สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ DFT (เฉลี่ย 66.35 ตารางเซนติเมตร/ต้น) แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ และเมื่อพิจารณาพื้นที่ใบของพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT นาน 4 และ 6 สัปดาห์ (เฉลี่ย 344.33 และ 1146.17 ตารางเซนติเมตร/ต้น ตามลำดับ) สูงกว่าแบบ NFT (เฉลี่ย 258.61 และ 670.72 ตารางเซนติเมตร/ต้น ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 4) หรืออาจกล่าวได้ว่าพรมมิที่ปลูกแบบ DFT มีพื้นที่ใบสูงกว่าแบบ NFT ประมาณ 1.33 และ 1.71 เท่า ใน 4 และ 6 สัปดาห์ ตามลำดับ

จากผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ทั้งแบบ NFT และ DFT มีจำนวนใบและพื้นที่ใบสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในแบบ Control โดยพรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT มีจำนวนใบ และมีพื้นที่ใบสูงที่สุด

ตาราง 4 จำนวนใบ (ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT นาน 2 4 และ 6 สัปดาห์

ลักษณะ	เวลา (สัปดาห์)	ระบบปลูก		
		Control	NFT	DFT
จำนวนใบ	2	26.50 ± 1.28 ^c	131.17 ± 3.87 ^a	118.00 ± 3.94 ^b
	4	86.60 ± 5.26 ^b	482.00 ± 6.15 ^a	509.00 ± 15.16 ^a
	6	127.30 ± 8.83 ^c	958.60 ± 45.23 ^b	1376.20 ± 24.88 ^a
พื้นที่ใบ	2	20.88 ± 2.95 ^b	71.28 ± 6.38 ^a	66.35 ± 5.32 ^a
	4	59.17 ± 4.92 ^c	258.61 ± 16.25 ^b	344.33 ± 20.61 ^a
	6	132.66 ± 14.47 ^c	670.72 ± 57.13 ^b	1146.17 ± 48.58 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ 2 แบบ คือ แบบ NFT และ DFT โดยมีการปลูกพรมมิในวงบ่อที่บรรจุดินที่มีน้ำท่วมขังเป็นชุดควบคุม (treatment control) นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ พบว่า พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT นาน 6 สัปดาห์ มีน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนยอด จำนวนใบ พื้นที่ใบ สูงที่สุด ซึ่งผลการทดลองโดยรวมบ่งชี้ว่าการปลูกพรมมิด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ แบบ DFT เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพรมมิ ส่งผลให้มีผลผลิตสูงสุด

4.2 ผลการทดลองที่ 2 ผลของค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

เพื่อศึกษาค่าการนำไฟฟ้า (EC) ที่แสดงค่าความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ภายใต้ระบบ DFT (จากผลการทดลองข้อ 4.1) ในการทดลองนี้ใช้ค่า EC 3 ระดับ ได้แก่ EC 1.00, 1.50 และ 2.00 mS/cm เมื่อสิ้นสุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 2, 4 และ 6 เก็บข้อมูลลักษณะการเจริญเติบโต (7 ลักษณะ) ได้แก่ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวต้น จำนวนยอด จำนวนใบ พื้นที่ใบ และปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง ได้ผลการทดลองดังนี้

1) น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

ผลการศึกษา พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 และ 2.00 mS/cm นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มีน้ำหนักสดสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm โดยพรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC 1.50 และ 2.00 mS/cm นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มีน้ำหนักสดใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตาราง 5) อย่างไรก็ตามพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 นาน 6 สัปดาห์ มีแนวโน้มให้น้ำหนักสด (เฉลี่ย 107.16 กรัม/ต้น) สูงสุด (ตาราง 5)

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพรมมิ ที่ปลูกในสารละลาย EC ทั้งสามระดับ นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ พบว่า มีค่าใกล้เคียงกัน (ตาราง 5) โดยในสัปดาห์ที่ 6 พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 (เฉลี่ย 8.63 กรัม/ต้น) มีแนวโน้มให้น้ำหนักแห้งสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 (เฉลี่ย 7.92 กรัม/ต้น) และ EC 2.00 mS/cm (เฉลี่ย 7.34 กรัม/ต้น) ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 5)

ผลการทดลองนี้บ่งชี้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 mS/cm มีน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งสูงสุด

ตาราง 5 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (กรัม/ตัน) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

น้ำหนัก	เวลา (สัปดาห์)	ค่า EC ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)		
		1.00	1.50	2.00
น้ำหนักสด	2	8.86 ± 0.79 ^a	10.06 ± 0.63 ^a	10.52 ± 0.53 ^a
	4	29.47 ± 1.27 ^a	32.12 ± 1.64 ^a	32.49 ± 1.68 ^a
	6	65.85 ± 3.48 ^b	107.16 ± 3.25 ^a	102.61 ± 5.76 ^a
น้ำหนักแห้ง	2	0.50 ± 0.04 ^b	0.58 ± 0.04 ^{ab}	0.63 ± 0.04 ^a
	4	1.87 ± 0.06 ^a	1.96 ± 0.11 ^a	2.08 ± 0.12 ^a
	6	7.92 ± 0.57 ^a	8.63 ± 0.31 ^a	7.34 ± 0.53 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

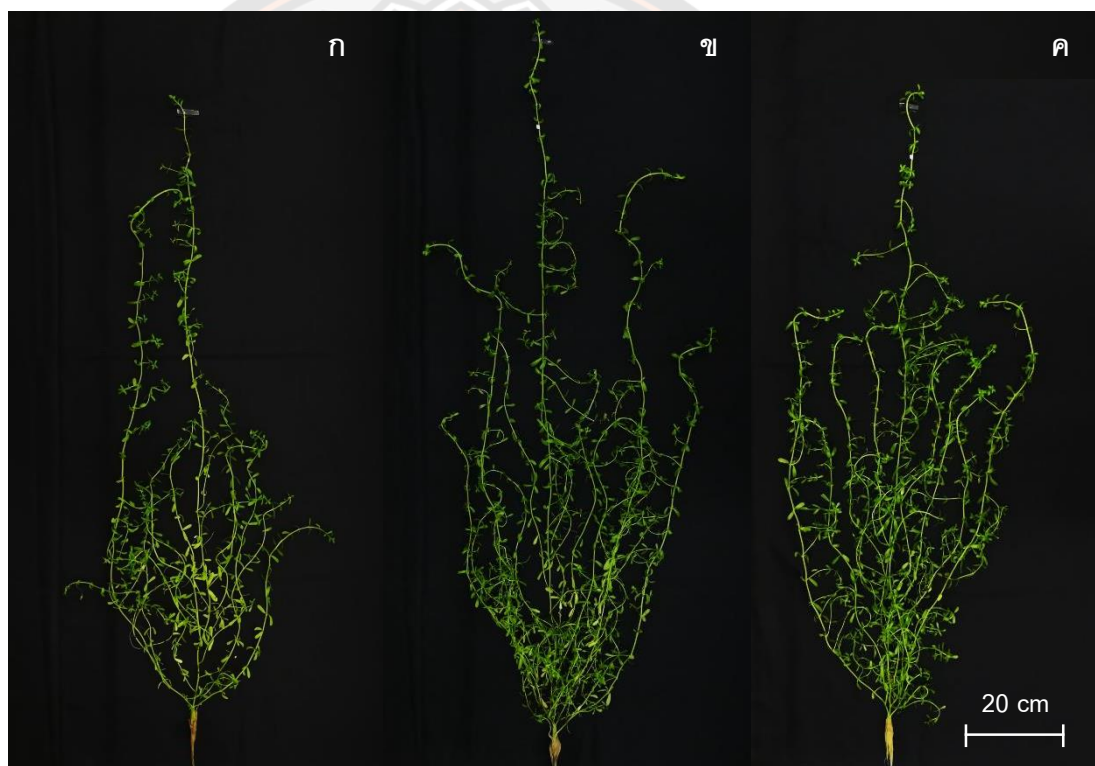
2) ความยาวต้นและจำนวนยอด

เมื่อพิจารณาความยาวพรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ นาน 2, และ 4 สัปดาห์ พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00, 1.50 และ 2.00 mS/cm มีความยาวต้นและจำนวนยอดใกล้เคียงกัน (ตาราง 6 และภาพ 18) โดยในสัปดาห์ที่ 6 โดยพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 มีความยาวต้น (เฉลี่ย 150.40 เซนติเมตร/ต้น) สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 2.00 (เฉลี่ย 136.60 เซนติเมตร/ต้น) และ 1.00 mS/cm (เฉลี่ย 125.00 เซนติเมตร/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 6 และภาพ 18)

ส่วนจำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC แตกต่างกัน นาน 2, และ 4 สัปดาห์ พบว่า มีจำนวนยอดใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 6) โดยในสัปดาห์ที่ 6 พรมมิที่ปลูก

ในสารละลาย EC 1.50 (เฉลี่ย 43.42 ยอด/ต้น) และ 2.00 mS/cm (เฉลี่ย 42.50 ยอด/ต้น) มีจำนวนยอดสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm (เฉลี่ย 34.70 ยอด/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 6 และภาพ 18)

เมื่อพิจารณาความยาวต้นและจำนวนยอด ของพรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า สัปดาห์สุดท้ายของการทดลอง (สัปดาห์ที่ 6) พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 mS/cm มีความยาวต้น และจำนวนยอดสูงที่สุด



ภาพ 18 ลักษณะการเจริญเติบโตของพรมมิที่เจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน นาน 6 สัปดาห์; การเจริญเติบโตของพรมมิในสารละลายธาตุอาหาร EC 1.00 (ก), 1.50 (ข) และ 2.00 mS/cm (ค) สเกลบาร์ = 20 เซนติเมตร

ตาราง 6 ความยาวต้น (เซนติเมตร/ต้น) และจำนวนยอด (ยอด/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC ต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

ลักษณะ	เวลา (สัปดาห์)	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)		
		1.00	1.50	2.00
ความยาวต้น	2	45.38 ± 1.56 ^a	47.08 ± 0.95 ^a	48.38 ± 0.74 ^a
	4	91.70 ± 2.65 ^a	90.70 ± 2.39 ^a	90.70 ± 1.97 ^a
	6	125.00 ± 2.78 ^c	150.40 ± 2.99 ^a	136.60 ± 2.27 ^b
จำนวนยอด	2	17.46 ± 1.04 ^a	18.92 ± 0.75 ^a	19.15 ± 0.71 ^a
	4	29.20 ± 0.99 ^a	29.40 ± 1.19 ^a	28.60 ± 0.79 ^a
	6	34.70 ± 1.14 ^b	43.42 ± 0.93 ^a	42.50 ± 1.51 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3) จำนวนใบและพื้นที่ใบ

จากการทดลองเพื่อศึกษาค่า EC ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมินาน 2 และ 4 สัปดาห์ ในด้านจำนวนใบ พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00, 1.50 และ 2.00 mS/cm มีจำนวนใบใกล้เคียงกัน (ตาราง 7 และภาพ 18) โดยในสัปดาห์ที่ 6 พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 (เฉลี่ย 1090.60 ใบ/ต้น) และ 2.00 mS/cm (เฉลี่ย 989.20 ใบ/ต้น) มีจำนวนใบสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm (เฉลี่ย 796.40 ใบ/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 7 และภาพ 18)

เมื่อพิจารณาพื้นที่ใบ พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 และ 2.00 mS/cm นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มีพื้นที่ใบสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm

ซึ่งในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า พรหมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 (เฉลี่ย 802.71 ตารางเซนติเมตร/ต้น) และ 2.00 mS/cm (เฉลี่ย 800.07 ตารางเซนติเมตร/ต้น) มีพื้นที่ใบใกล้เคียงกัน และสูงกว่าพรหมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm (เฉลี่ย 468.16 ตารางเซนติเมตร/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 7 และภาพ 18)

จากการทดลอง พบว่า พรหมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 และ 2.00 mS/cm มีจำนวนใบและพื้นที่ใบสูงกว่าพรหมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm โดยพรหมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 mS/cm มีจำนวนใบสูงที่สุด ในขณะที่มีพื้นที่ใบใกล้เคียงกับพรหมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 2.00 mS/cm

ตาราง 7 จำนวนใบ (ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร/ต้น) ของพรหมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC ต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

ลักษณะการเจริญเติบโต	เวลา (สัปดาห์)	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)		
		1.00	1.50	2.00
จำนวนใบ	2	138.00 ± 09.98 ^a	156.92 ± 07.09 ^a	161.46 ± 06.59 ^a
	4	414.40 ± 15.73 ^a	428.00 ± 17.27 ^a	403.40 ± 19.32 ^a
	6	796.40 ± 43.36 ^b	1090.60 ± 33.61 ^a	989.20 ± 57.20 ^a
พื้นที่ใบ	2	199.93 ± 15.35 ^a	224.89 ± 16.82 ^a	256.15 ± 24.74 ^a
	4	462.94 ± 41.03 ^b	525.79 ± 31.24 ^{ab}	614.62 ± 35.67 ^a
	6	468.16 ± 06.89 ^b	802.71 ± 15.10 ^a	800.07 ± 13.05 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4) ปริมาณรังควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง

จากการศึกษาผลของ EC ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ด้านปริมาณรังควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 และ 2.00 mS/cm มีคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC 1.50 และ 2.00 mS/cm นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 8) อย่างไรก็ตามพรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.50 นาน 6 สัปดาห์ มีแนวโน้มให้ปริมาณ คลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ (เฉลี่ย 6.42 และ 2.05 มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด ตามลำดับ) สูงสุด (ตารางที่ 8)



ตาราง 8 ปริมาณรังควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC ต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

รงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง	เวลา (สัปดาห์)	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)		
		1.00	1.50	2.00
คลอโรฟิลล์รวม (เอ และ บี)	2	6.38 ± 0.25 ^b	7.25 ± 0.20 ^a	6.62 ± 0.18 ^b
	4	6.48 ± 0.45 ^b	7.79 ± 0.28 ^a	8.39 ± 0.27 ^a
	6	3.55 ± 0.31 ^b	6.42 ± 0.22 ^a	5.94 ± 0.24 ^a
แคโรทีนอยด์	2	1.82 ± 0.07 ^c	2.13 ± 0.04 ^a	1.96 ± 0.03 ^b
	4	1.97 ± 0.09 ^b	2.21 ± 0.09 ^a	2.36 ± 0.03 ^a
	6	1.21 ± 0.10 ^b	2.05 ± 0.06 ^a	1.89 ± 0.07 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการศึกษาค่า EC (1.00, 1.50 และ 2.00 mS/cm) ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ภายใต้ระบบ DFT สามารถสรุปได้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า EC 1.50 mS/cm นาน 6 สัปดาห์ มีการเจริญเติบโต ทั้ง 7 ลักษณะ ได้แก่ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวต้น จำนวนยอด จำนวนใบ พื้นที่ใบ และปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง สูงที่สุด

4.3 ผลการทดลองที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายธาตุอาหาร

ในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพรมมิตีที่สูงสุด ขึ้นอยู่กับระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT (จากผลการทดลองข้อ 4.1) ที่มีค่า EC เท่ากับ 1.5 mS/cm (จากผลการทดลองข้อ 4.2) ดังนั้นการทดลองนี้จึงต้องการศึกษาผลของค่า pH (5.5, 6.5 และ 7.5) ในสารละลายธาตุอาหารสูตร Hoagland ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ภายใต้ระบบ DFT และ EC 1.5 mS/cm ซึ่งผลการทดลองพบว่า

1) น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

ผลการศึกษา พบว่า ในสัปดาห์ที่ 2 พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 7.5 และ 6.5 มีน้ำหนักสดสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 9) ส่วนพรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH ทั้ง 3 ระดับ นาน 4 และ 6 สัปดาห์ มีน้ำหนักสดไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตาราง 9) โดยพบว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 นาน 6 สัปดาห์ มีแนวโน้มให้น้ำหนักสด (เฉลี่ย 92.18 กรัม/ต้น) สูงกว่าที่ pH 5.5 (เฉลี่ย 84.95 กรัม/ต้น) และ 7.5 (เฉลี่ย 81.78 กรัม/ต้น) (ตาราง 9)

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพรมมิ พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 7.5 และ 6.5 มีน้ำหนักแห้งสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 9) แต่ในสัปดาห์ที่ 4 พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH ทั้ง 3 ระดับมีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างกัน และสัปดาห์ที่ 6 พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 และ 7.5 (เฉลี่ย 6.11 และ 5.62 กรัม/ต้น ตามลำดับ) มีน้ำหนักแห้งสูงกว่าที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 (เฉลี่ย 5.10 กรัม/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 มีแนวโน้มของน้ำหนักแห้งสูงสุด (ตาราง 9)

จากค่าน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH แตกต่างกัน (5.5, 6.5 และ 7.5) สรุปได้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 มีน้ำหนักสดเฉลี่ย และน้ำหนักแห้งสูงสุดเฉลี่ยที่สุด

ตาราง 9 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH ต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

น้ำหนัก	เวลา (สัปดาห์)	pH ของสารละลายธาตุอาหาร		
		5.5	6.5	7.5
น้ำหนักสด	2	1.05 ± 0.12 ^c	1.86 ± 0.14 ^b	2.28 ± 0.12 ^a
	4	21.23 ± 1.97 ^a	25.93 ± 1.99 ^a	25.15 ± 1.60 ^a
	6	84.95 ± 4.15 ^a	92.18 ± 3.52 ^a	81.78 ± 4.77 ^a
น้ำหนักแห้ง	2	0.07 ± 0.01 ^c	0.10 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^a
	4	1.29 ± 0.12 ^a	1.58 ± 0.14 ^a	1.65 ± 0.11 ^a
	6	5.10 ± 0.26 ^b	6.11 ± 0.27 ^a	5.62 ± 0.36 ^{ab}

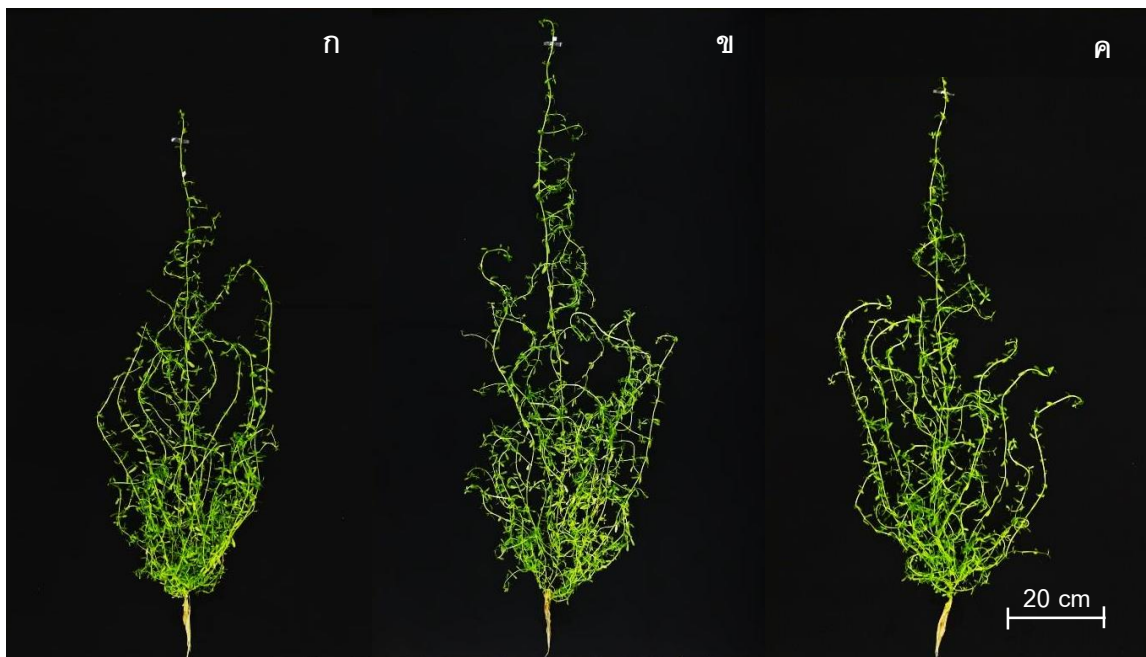
หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2) ความยาวต้นและจำนวนยอด

เมื่อเปรียบเทียบความยาวพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH แตกต่างกัน พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 และ 7.5 นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์ มีความยาวต้นสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 10 และภาพ 19) โดยในสัปดาห์ที่ 6 พบว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 มีความยาวต้น (เฉลี่ย 130.27 เซนติเมตร/ต้น) สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 (เฉลี่ย 107.91 เซนติเมตร/ต้น) และ pH 7.5 (เฉลี่ย 114.55 เซนติเมตร/ต้น) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 10 และภาพ 19)

จากการทดลอง พบว่า จำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 และ 7.5 นาน 2 และ 4 สัปดาห์ มีจำนวนยอดสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 (ตาราง 10 และภาพ 19) ส่วนในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า จำนวนยอดของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH ทั้ง 3 ระดับ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 (เฉลี่ย 47.09 ยอด/ต้น) มีแนวโน้มให้จำนวนยอดสูงสุด (ตาราง 10 และภาพ 19)

เมื่อพิจารณาทั้งความยาวต้น และจำนวนยอด พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 มีการเจริญเติบโตด้านความยาวต้น และจำนวนยอดสูงสุด



ภาพ 19 ลักษณะการเจริญเติบโตของพรมมิที่เจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH แตกต่างกัน นาน 6 สัปดาห์; พรมมิที่เจริญเติบโตในสารละลายธาตุอาหารที่มีค่า pH 5.5 (ก) 6.5 (ข) และ 7.5 (ค) สเกลบาร์ = 20 เซนติเมตร

ตาราง 10 ความยาวต้น (เซนติเมตร/ต้น) และจำนวนยอด (ยอด/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ pH ต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

ลักษณะ	เวลา (สัปดาห์)	pH ของสารละลายธาตุอาหาร		
		5.5	6.5	7.5
ความยาวต้น	2	16.00 ± 0.98 ^c	22.42 ± 1.12 ^b	25.42 ± 0.77 ^a
	4	65.33 ± 2.98 ^b	78.27 ± 3.57 ^a	83.73 ± 1.55 ^a
	6	107.91 ± 2.18 ^b	130.27 ± 2.83 ^a	114.55 ± 2.68 ^b
จำนวนยอด	2	6.42 ± 0.80 ^b	8.25 ± 0.64 ^{ab}	9.75 ± 0.63 ^a
	4	25.87 ± 1.59 ^a	27.73 ± 1.99 ^a	30.20 ± 1.19 ^a
	6	43.36 ± 2.00 ^a	47.09 ± 1.17 ^a	43.00 ± 1.90 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3) จำนวนใบและพื้นที่ใบ

จากการทดลองเพื่อศึกษาค่า pH ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ด้านจำนวนใบและพื้นที่ใบ พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 และ 7.5 นาน 2 สัปดาห์ มีจำนวนใบและพื้นที่ใบเฉลี่ย สูงกว่าที่ pH 5.5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ที่ 4 สัปดาห์ ในทุกระดับ pH พบว่ามีจำนวนใบและพื้นที่ใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตาราง 11 และภาพ 19)

ในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 มีแนวโน้มให้จำนวนใบ (เฉลี่ย 993.09 ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (เฉลี่ย 818.43 ตารางเซนติเมตร/ต้น) สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 และ 7.5 (ตาราง 11 และภาพ 19)

จากการทดลองนี้บ่งชี้ว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 นาน 6 สัปดาห์ ส่งผลทำให้จำนวนใบและพื้นที่ใบสูงที่สุด

ตาราง 11 จำนวนใบ (ใบ/ต้น) และพื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร/ต้น) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH แตกต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

ลักษณะ	เวลา (สัปดาห์)	pH ของสารละลายธาตุอาหาร		
		5.5	6.5	7.5
การเจริญเติบโต	2	35.83 ± 03.54 ^b	48.50 ± 02.57 ^a	53.33 ± 02.81 ^a
	4	374.67 ± 25.38 ^a	425.47 ± 29.74 ^a	444.53 ± 20.60 ^a
	6	905.27 ± 42.56 ^{ab}	993.09 ± 46.96 ^a	845.09 ± 50.68 ^b
พื้นที่ใบ	2	28.47 ± 02.04 ^b	46.43 ± 03.41 ^a	45.52 ± 03.97 ^a
	4	275.16 ± 18.40 ^a	280.47 ± 23.68 ^a	312.35 ± 13.05 ^a
	6	565.27 ± 24.23 ^b	818.43 ± 30.36 ^a	737.08 ± 24.39 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4) ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง

เมื่อพิจารณาผลของ pH ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ ด้านปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ ของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 7.5 นาน 2 และ 4 สัปดาห์ สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 และ 6.5 (ตารางที่ 12) แต่ในสัปดาห์ที่ 6 พบว่า ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 และ 7.5 สูงกว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 5.5 โดยปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์ของพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 (เฉลี่ย 8.02 และ 2.25 มิลลิกรัม/กรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ) และ 7.5 (เฉลี่ย 7.77 และ 2.20 มิลลิกรัม/กรัม น้ำหนักสด ตามลำดับ) ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 12)

ผลโดยรวมสรุปว่าพรมมิที่ปลูกในสารละลาย pH 6.5 มีแนวโน้มให้ปริมาณคลอโรฟิลล์รวม และแคโรทีนอยด์สูงสุด

ตาราง 12 ปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH ต่างกัน เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์

รงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง	เวลา (สัปดาห์)	pH ของสารละลายธาตุอาหาร		
		5.5	6.5	7.5
คลอโรฟิลล์รวม (เอ และ บี)	2	6.11 ± 0.20 ^{ab}	6.03 ± 0.18 ^b	6.64 ± 0.18 ^a
	4	4.49 ± 0.49 ^b	4.80 ± 0.22 ^{ab}	5.53 ± 0.14 ^a
	6	6.80 ± 0.20 ^b	8.02 ± 0.43 ^a	7.77 ± 0.49 ^{ab}
แคโรทีนอยด์	2	1.62 ± 0.06 ^a	1.61 ± 0.05 ^a	1.73 ± 0.05 ^a
	4	1.39 ± 0.13 ^b	1.42 ± 0.06 ^b	1.65 ± 0.04 ^a
	6	1.97 ± 0.06 ^b	2.25 ± 0.09 ^a	2.20 ± 0.12 ^{ab}

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากการทดลองศึกษาผลของค่า pH (ที่ 5.5, 6.5 และ 7.5) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ที่ EC 1.5 mS/cm ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ สามารถสรุปได้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH 6.5 นาน 6 สัปดาห์ มีการเจริญเติบโตโดยรวมของทั้ง 7 ลักษณะ (น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ความยาวต้น จำนวนยอด จำนวนใบ พื้นที่ใบ และปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง) สูงที่สุด

5) ปริมาณสาร Bacoside A

จากผลการทดลองที่ผ่านมา (ข้อ 4.1, 4.2 และ 4.3) พบว่า พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบ DFT ภายใต้ค่า EC 1.5 mS/cm และ pH 6.5 ของสารละลายธาตุอาหาร มีการเจริญเติบโตดีที่สุด

ดังนั้นเพื่อศึกษาระยะเวลาเก็บเกี่ยวพรมมิ (2, 4 และ 6 สัปดาห์) ที่ปลูกในสภาวะดังกล่าว (DFT, EC 1.5 mS/cm และ pH 6.5) ต่อปริมาณการสะสมสาร Bacoside A ซึ่งผลการทดลองพบว่า พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิิกส์นาน 6 สัปดาห์ มีปริมาณสาร Bacoside A (166.50 มิลลิกรัม/ต้น) สูงกว่าพรมมิที่ปลูกนาน 2 และ 4 สัปดาห์ (10.40 และ 42.97 มิลลิกรัม/ต้น ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 13) โดยคิดเป็น 16.01 เท่า (คำนวณจาก $166.50/10.40$) และ 3.87 เท่า (คำนวณจาก $166.50/42.97$) เท่า ซึ่งบ่งชี้ได้ชัดเจนว่าพรมมิที่ปลูกในสภาวะดังกล่าว (DFT, EC 1.5 mS/cm และ pH 6.5) นาน 6 สัปดาห์ คือระยะเก็บเกี่ยวที่ส่งผลให้พรมมิมิมีปริมาณการสะสมสาร Bacoside A สูงสุด (ตาราง 13)

ตาราง 13 ปริมาณสาร Bacoside A ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ EC 1.50 mS/cm pH 6.5 เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์

Bacoside A	ปริมาณสาร Bacoside A (มิลลิกรัม/ต้น)		
	เวลา (สัปดาห์)		
	2	4	6
Bacoside A ₃	2.15 ± 0.14 ^c	8.86 ± 0.51 ^b	23.46 ± 0.83 ^a
Bacopaside II	4.25 ± 0.27 ^c	19.23 ± 1.10 ^b	39.60 ± 1.41 ^a
Bacopaside X	0.39 ± 0.02 ^c	2.35 ± 0.13 ^b	14.93 ± 0.53 ^a
Bacopasaponin C	3.64 ± 0.23 ^c	12.38 ± 0.71 ^b	88.34 ± 3.14 ^a
Bacoside A	10.40 ± 0.66 ^c	42.97 ± 2.45 ^b	166.50 ± 5.92 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.4 ผลการทดลองที่ 4 ผลของ Methyl jasmonate (MeJA) ต่อการสะสมสาร Bacoside A ในพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

1) ปริมาณสาร Bacoside A

จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่า พรมมิเจริญเติบโตและมีการสะสมปริมาณสาร Bacoside A สูงสุด เมื่อปลูกภายใต้ระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT (จากผลการทดลองข้อ 4.1) สารละลายธาตุอาหารที่มีค่า EC 1.5 mS/cm (จากผลการทดลองข้อ 4.2) และ pH 6.5 (จากผลการทดลองข้อ 4.3) หากต้องการเพิ่มปริมาณการสะสม Bacoside A ในพรมมิ แนวทางหนึ่งที่สามารถทำได้ คือ การใช้สาร MeJA ซึ่งเป็นฮอร์โมนพืชที่มีคุณสมบัติในการชักนำการสังเคราะห์และการสะสมสารทุติยภูมิในพืช ดังนั้นเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้น MeJA ที่เหมาะสม ต่อการสังเคราะห์สาร Bacoside A จึงทำการทดลองโดยฉีดพ่นสาร MeJA ความเข้มข้น 4 ระดับ (0, 50, 150 และ 250 μM) บนพรมมิที่อายุ 6 สัปดาห์ (ปลูกภายใต้สภาวะดังกล่าวข้างต้น) หลังจากนั้นนาน 2, 4 และ 6 วัน ทำการวิเคราะห์ปริมาณสาร Bacoside A ในพรมมิ โดยได้ผลการทดลอง ดังนี้

ผลการศึกษา พบว่า หลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น 250 μM เป็นเวลา 2 วัน สามารถกระตุ้นให้พรมมิสังเคราะห์และสะสมสาร Bacoside A รวม (ประกอบด้วย Bacoside A3, Bacopaside II, Bacopaside X และ Bacopasaponin C) ได้สูงที่สุด (29.43 มิลลิกรัม/กรัม) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับกรรมวิธีอื่นๆ (ตาราง 14) โดยการสร้างสาร Bacoside A3, Bacopaside II, Bacopaside X และ Bacopasaponin C (เฉลี่ย 4.83, 9.53, 2.67 และ 12.40 มิลลิกรัม/กรัม น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ) มีแนวโน้มสูงกว่าพรมมิที่ถูกฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น และระยะเวลาอื่นๆ (ตาราง 15)

สำหรับการฉีดพ่น MeJA ความเข้มข้น 50 และ 150 μM สามารถกระตุ้นให้พรมมิสร้างสาร Bacoside A3, Bacopaside II และ Bacopaside X ให้มีปริมาณมากขึ้นได้หลังจากฉีดพ่นเป็นระยะเวลา 2 วัน ส่วนกรรมวิธีหลังฉีดพ่นสาร MeJA ทุกระดับความเข้มข้น (50, 150 และ 250 μM) นาน 4 และ 6 วัน ส่งผลทำให้ปริมาณ Bacoside A3, Bacopaside II

และ Bacopaside X มีแนวโน้มลดลง (ตาราง 15) ในทางตรงกันข้าม หลังฉีดพ่นสาร MeJA ความเข้มข้น 50 และ 150 μM นาน 2 วัน พบว่า สาร Bacopasaponin C มีปริมาณต่ำสุด จากนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ 4-6 วัน (ตาราง 15)

จากผลการทดลอง กล่าวได้ว่าการฉีดพ่น MeJA ที่ความเข้มข้น 250 μM เป็นเวลา 2 วัน สามารถกระตุ้นให้พรมมีสะสมปริมาณสาร Bacoside A สูงสุด ประมาณ 1.5 เท่า เทียบกับกรรมวิธีที่ไม่ได้รับการฉีดพ่นด้วย MeJA

ตาราง 14 ปริมาณสาร Bacoside A ของพรมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้นและเวลาที่แตกต่างกัน เมื่ออายุ 6 สัปดาห์

MeJA (μM)	ระยะเวลาหลังการกระตุ้น	ปริมาณสาร Bacoside A รวม (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)
0	2	19.70 \pm 0.40 ^{cd}
	4	17.67 \pm 1.07 ^d
	6	20.53 \pm 0.55 ^{bcd}
50	2	22.77 \pm 1.54 ^{bc}
	4	20.73 \pm 1.15 ^{bcd}
	6	21.80 \pm 0.94 ^{bcd}
150	2	24.53 \pm 1.19 ^b
	4	20.67 \pm 0.30 ^{bcd}
	6	20.27 \pm 0.62 ^{bcd}
250	2	29.43 \pm 1.99 ^a
	4	21.83 \pm 1.10 ^{bcd}
	6	21.10 \pm 0.26 ^{bcd}

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) \pm ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$)

ตาราง 15 ปริมาณสาร Bacoside A ของพรหมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้นและเวลาที่แตกต่างกัน เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์

MeJA (μM)	ระยะเวลา หลังการ กระตุ้น	ปริมาณสาร Bacoside A (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักแห้ง)			
		Bacoside A ₃	Bacopaside II	Bacopaside X	Bacopasaponin C
0	2	3.10 \pm 0.15 ^{bcd}	6.87 \pm 0.12 ^{bc}	1.33 \pm 0.15 ^{bcd}	8.40 \pm 0.17 ^d
	4	2.27 \pm 0.15 ^d	4.10 \pm 0.06 ^e	0.70 \pm 0.17 ^d	10.60 \pm 0.75 ^{abcd}
	6	2.90 \pm 0.18 ^{bcd}	5.48 \pm 0.09 ^{cde}	1.05 \pm 0.19 ^{cd}	11.10 \pm 0.24 ^{abc}
50	2	3.83 \pm 0.20 ^{abc}	8.27 \pm 0.52 ^{ab}	1.83 \pm 0.09 ^{abc}	8.83 \pm 0.77 ^{cd}
	4	3.48 \pm 0.63 ^{bcd}	6.38 \pm 0.85 ^d	1.10 \pm 0.23 ^{cd}	9.78 \pm 0.57 ^{bcd}
	6	2.88 \pm 0.06 ^{bcd}	5.95 \pm 0.27 ^{cd}	1.08 \pm 0.22 ^{cd}	11.90 \pm 0.50 ^{ab}
150	2	4.03 \pm 0.24 ^{ab}	9.20 \pm 0.00 ^a	1.77 \pm 0.15 ^{bc}	9.53 \pm 0.86 ^{bcd}
	4	2.80 \pm 0.06 ^{bcd}	5.87 \pm 0.09 ^{cde}	0.97 \pm 0.19 ^{cd}	11.03 \pm 0.55 ^{abc}
	6	2.57 \pm 0.32 ^{cd}	5.27 \pm 0.44 ^{cde}	0.80 \pm 0.06 ^d	11.63 \pm 0.50 ^{ab}
250	2	4.83 \pm 0.52 ^a	9.53 \pm 0.47 ^a	2.67 \pm 0.39 ^a	12.40 \pm 0.71 ^a
	4	2.88 \pm 0.24 ^{bcd}	5.58 \pm 0.26 ^{cde}	1.10 \pm 0.25 ^{cd}	12.28 \pm 0.46 ^a
	6	2.83 \pm 0.19 ^{bcd}	5.50 \pm 0.35 ^{cde}	1.00 \pm 0.23 ^{cd}	11.77 \pm 0.09 ^{ab}

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) \pm ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.01$)

2) น้ำหนักแห้ง

จากการศึกษาและเปรียบเทียบน้ำหนักแห้ง พบว่า น้ำหนักแห้งของพรหมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น 4 ระดับ (0, 50, 150 และ 250 μM) เป็นระยะเวลา 2 วัน (เฉลี่ย 4.06, 3.80, 3.84 และ 4.02 กรัม/ต้น ตามลำดับ) และ 4 วัน (เฉลี่ย 4.14, 3.82, 3.86 และ 4.06 กรัม/ต้น ตามลำดับ) พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ตาราง 16) แต่เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักแห้งของพรหมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น 4 ระดับ (0, 50, 150 และ 250 μM)

เป็นระยะเวลา 6 วัน พบว่า น้ำหนักแห้งของพรมมิที่ไม่ได้รับการฉีดพ่นด้วย MeJA (0 μM) มีน้ำหนักแห้ง (4.88 กรัม/ต้น) สูงกว่า น้ำหนักแห้งของพรมมิที่ถูกฉีดพ่นด้วยความเข้มข้นอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่น้ำหนักแห้งของพรมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ความเข้มข้นอื่นๆ (50, 150 และ 250 μM) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่า หลังการฉีดพ่นพรมมิด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น 250 μM นาน 2 วัน ส่งผลให้พรมมิมีน้ำหนักแห้งไม่แตกต่างจากพรมมิที่ไม่ได้รับการฉีดพ่นด้วย MeJA

ตาราง 16 น้ำหนักแห้งของพรมมิหลังฉีดพ่นด้วย MeJA ที่ความเข้มข้น และเวลาที่แตกต่างกันเมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์

MeJA (μM)	ระยะเวลาหลังการกระตุ้น	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น)
0	2	4.06 \pm 0.19 ^b
	4	4.14 \pm 0.16 ^b
	6	4.88 \pm 0.19 ^a
50	2	3.80 \pm 0.12 ^b
	4	3.82 \pm 0.10 ^b
	6	3.83 \pm 0.22 ^b
150	2	3.84 \pm 0.09 ^b
	4	3.86 \pm 0.25 ^b
	6	4.11 \pm 0.19 ^b
250	2	4.02 \pm 0.12 ^b
	4	4.06 \pm 0.08 ^b
	6	4.14 \pm 0.23 ^b

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) \pm ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$)

จากการทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า หลังฉีดพ่น MeJA ที่ความเข้มข้น 250 μM เป็นระยะเวลา 2 วัน สามารถกระตุ้นให้พรมมิสะสมสาร Bacoside A ได้มากที่สุด และน้ำหนักแห้งของพรมมิไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับพรมมิที่ไม่ได้ฉีดพ่นด้วยสาร MeJA



บทที่ 5 อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ในการปลูกพรมมิ ได้แก่ การศึกษาระบบการปลูก, ค่า EC และ pH ของสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ รวมถึงการศึกษาความเข้มข้นของ MeJA ต่อการสะสมสาร bacoside A ในพรมมิ ภายใต้การปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์ พบว่า

5.1 การทดลองที่ 1 ผลของระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT และ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

จากการทดลองที่ 1 ผลการทดลองชี้ชัดว่าพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ แบบ DFT และ NFT ส่งผลให้พรมมิมีการเจริญเติบโตสูงกว่าพรมมิที่ปลูกในวงบ่อที่บรรจุดินที่มีน้ำท่วมขัง (control) อย่างไรก็ตามพบว่า พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ แบบ DFT ส่งผลให้พรมมิมีการเจริญเติบโตสูงสุด

เนื่องจากระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นวิธีการปลูกพืชไร้ดิน ที่สามารถควบคุม ค่า pH และค่า EC ให้เหมาะสมต่อการแตกตัวเป็นไอออนของสารละลายธาตุอาหารที่ประโยชน์ต่อพืช (Raviv & Lieth, 2008) และเป็นวิธีการที่ให้รากพืชสัมผัสธาตุอาหารได้อย่างสมบูรณ์ โดยสารละลายธาตุอาหารจะไหลผ่านรากพืชอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้การไหลเวียนของธาตุอาหารยังเป็นการเพิ่มการไหลเวียนอากาศที่ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ดังนั้น พรมมิที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิคส์จะสามารถดูดใช้สารอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าพืชที่ปลูกในดิน จากการรายงานพบว่าระบบไฮโดรโปนิคส์ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตของผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) เป็นสองเท่าของการปลูกในดิน (Awad et al., 2017; Domingues, Takahashi, Camara, & Nixdorf, 2012) รายงานว่าระบบไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้วัสดุปลูกจาก ถ่านชีวภาพ (biochar) ที่ผลิตจากข้าว และ perlite สามารถเพิ่มการเจริญเติบโตของผักได้ เช่น กะหล่ำปลี (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.), ผักชีลาว (*Anethum graveolens* L.), เมลโลว์ (*Malva verticillata* L.), ผักกาดหอม (*Lactuca sativa* L.) และกวางตุ้งญี่ปุ่น (*Brassica rapa* var. *rosularis*)

จากการทดลองนี้ พบว่า พรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ แบบ DFT ส่งผลให้พรมมิมีการเจริญเติบโตสูงที่สุด (เมื่อเทียบกับระบบ NFT) เนื่องจากระบบ DFT ให้สารละลายธาตุอาหารที่ความลึก 4 เซนติเมตร อัตราการไหล 1.5 ลิตร/นาที่ ในขณะที่ระบบ NFT มีความลึกของสารละลาย 1 ถึง 3 มิลลิเมตร ที่อัตราการไหล 1.0 ลิตร / นาที่ ดังนั้น พรมมิที่ปลูกด้วยระบบ DFT จึงมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการดูดใช้สารอาหารที่จำเป็น ส่งผลให้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นของส่วนรกราก และลำต้น และเนื่องจากการเจริญเติบโตของรากเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมการดูดซึมแร่ธาตุของพืช จากการทดลองพบว่าลักษณะ และคุณภาพรากของพรมมิที่ปลูกในระบบ DFT มีความสมบูรณ์กว่าในระบบ NFT และแม้ระบบ DFT จะเป็นระบบที่รากพืชแช่อยู่ในสารละลายธาตุอาหารในระดับลึก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพรมมิเป็นพืชน้ำที่ปรับตัวให้อยู่ในน้ำได้โดยการมีกลุ่มเซลล์ Aerenchyma ขนาดใหญ่ในรากและลำต้น (Anju, Naresh, & Avinash, 2017) ซึ่งทำให้มีออกซิเจนเพียงพอสำหรับการหายใจของเซลล์ในรากและเพิ่มการเจริญเติบโตของราก ในขณะที่พืชบางชนิดอาจจะพบกับปัญหารากเน่า เนื่องจากมีออกซิเจนในระดับต่ำในสารละลายธาตุอาหาร ซึ่งส่งผลให้การหายใจของเซลล์รากลดลง และนำไปสู่การลดการเจริญเติบโตของพืช (ดิเรก ทองอร่าม, 2550)

นอกจากนี้ยังพบว่า สารละลายธาตุอาหารของระบบ DFT มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช้ากว่า และมีอุณหภูมิต่ำกว่าระบบ NFT เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมที่สำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการดูดซึมสารอาหารในสารละลายบริเวณราก (Raviv & Lieth, 2008) และมีผลโดยตรงต่อผลผลิตและคุณภาพของพืช (Costa et al., 2011) Masaru, Uenishi, Miyamoto, and Suzuki (2016) รายงานว่า อุณหภูมิในบริเวณรากที่สูงขึ้น ส่งผลให้การเจริญเติบโตของสตรอเบอร์รี่ลดลง ในขณะที่อุณหภูมิบริเวณรากต่ำ ทำให้มีการผลิตชีวมวลที่สูงขึ้น นอกจากนี้ อุณหภูมิสูงยังมีผลเสียต่อโครงสร้างของเมมเบรน กิจกรรมของเอนไซม์ และการสังเคราะห์โปรตีน ซึ่งในที่สุดทำให้มีผลต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชทั้งหมด (Mohammed & Tarpley, 2011; Nxawe, Ndakidemi, & Laubscher, 2010) ดังนั้น การที่พรมมิที่ปลูกด้วยระบบ NFT มีการเจริญเติบโตที่น้อยกว่าระบบ DFT อาจเป็นผลมาจากการตอบสนองต่อความเครียดจากความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิของสารละลายธาตุอาหารมักสูงกว่าระบบ DFT ซึ่งความเครียดจากความร้อนเป็น

ปัญหาที่รุนแรงยิ่งขึ้นในเขตร้อนชื้น อานันท์ ตันโซ (2548) รายงานว่าการปลูกข้าว (*Oryza sativa* L.) ในสารละลายธาตุอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ได้ผลผลิตข้าวสูงกว่าการปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีอุณหภูมิสูง และจากรายงานของ Pramanik, Nagai, Asao, and Matsui (2000) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าสารละลายธาตุอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้รากของแตงกวามีการเจริญเติบโตดีกว่า และมีน้ำหนักแห้งสูงกว่าสารละลายธาตุอาหารที่มีอุณหภูมิสูง

สรุปผลการทดลองที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการปลูกพรมมิด้วยระบบ DFT และ NFT ส่งผลให้พรมมิ มีการเจริญเติบโตสูงกว่าการปลูกในดินที่มีน้ำท่วมขังแบบดั้งเดิม โดยการปลูกพรมมิด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT เป็นระบบที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพรมมิมากที่สุดเนื่องจากส่งผลให้พรมมิมีน้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนยอด จำนวนใบ พื้นที่ใบ สูงที่สุด



5.2 การทดลองที่ 2 ผลของค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโป

นิกส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

จากการทดลองที่ 2 ผลการทดลองบ่งชี้ว่า ค่า EC 1.50 mS/cm ภายใต้ระบบ DFT ส่งผลให้พรมมิมีการเจริญเติบโตสูงสุด (เมื่อเทียบกับที่ EC 1.00 และ 2.00 mS/cm) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานวิจัย พบว่า ค่า EC 1.6 mS/cm ภายใต้ระบบ DFT ส่งผลให้ต้นดาวน้อย (*Pogostemon helferi*) ที่เป็นพืชน้ำ มีการเจริญเติบโตดีที่สุด (Wangwibulkit & Vajrodaya, 2016) นอกจากนี้ยังพบว่า EC 1.5 mS/cm เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของ พรมมิไม้สนากุญแจ (*Anubias barteri*) (สุรณี ประชุมพล & นงนุช เลาะห์วิสุทธิ, 2555) อย่างไรก็ตาม ความเหมาะสมของค่า EC ต่อการเจริญเติบโต นั้นขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ตัวอย่างเช่น ค่า EC 2.4 mS/cm ส่งผลให้ผักกนอย (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*) มีการเจริญเติบโตและมีคุณภาพดีที่สุด (Ding et al., 2018) ค่า EC 2.5 mS/cm เหมาะสำหรับการปลูกผักกาดหอม (Quy, Sinsiri, Chitchamnonng, Boontiang, & Kaewduangta, 2018) และโหระพา (*Ocimum basilicum* cv. Genova) (Sgherri, Cecconami, Pinzino, Navari-Izzo, & Izzo, 2010) EC 1.0 dS/m เหมาะสำหรับการปลูกสตรอว์เบอร์รี่ (*Fragaria × ananassa*) (Lee et al., 2015) และมันฝรั่งหัวเล็ก (*Solanum tuberosum* L.) (Novella, Andriolo, Bisognin, Cogo, & Bandinelli, 2008) เป็นต้น

จากรายงานการวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความเหมาะสมของค่า EC ในสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโต ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ทั้งนี้อาจเนื่องจาก ค่า EC ของสารละลายธาตุอาหารเป็นตัวบ่งชี้ถึงปริมาณการแตกตัวของไอออนในสารละลายธาตุอาหารที่มีอยู่บริเวณรอรากพืช (Nemali & van Iersel, 2004) ที่เป็นประโยชน์และมีผลต่อความสามารถในการดูดใช้น้ำและธาตุอาหารของพืช (Khayyat et al., 2009) และส่งผลต่อการพัฒนาด้านการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพของพืช (Keutgen & Pawelzik, 2009)

กรณีที่สารละลายมีค่า EC ต่ำ ทำให้มีปริมาณธาตุอาหารน้อย แต่มีปริมาณน้ำมาก ส่งผลให้พืชดูดน้ำเข้าสู่เซลล์ในปริมาณมาก ดังนั้นพืชได้รับปริมาณธาตุอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการใน

การเจริญเติบโต (Caruso et al., 2011) และแสดงอาการของการขาดธาตุอาหาร (เช่น ไนโตรเจน) เช่น เกิดอาการใบเหลืองบริเวณส่วนล่างของลำต้นสเตอร์เบอร์รี่ (Gibson, Nelson, Pitchay, & Whipker, 2001) ซึ่งมีอาการสอดคล้องกับการทดลองที่ 4.2 เมื่อปลูกพรมมิในสารละลาย EC 1.00 mS/cm

ในทางกลับกันหากปลูกพืชในสารละลายที่มีค่า EC สูงเกินไป ทำให้มีปริมาณธาตุอาหารในสารละลายสูง (หรือมีค่า water potential ต่ำ) (Quy et al., 2018) ส่งผลให้รากพืชสามารถดูดน้ำ และธาตุอาหารลดลง ทำให้พืชมีอาการขาดน้ำ อีกทั้งยังส่งผลให้อัตราการหายใจของพืชลดลง ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการลดการเจริญเติบโตของพืช (Stefanov et al., 2016)

จากรายงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าค่า EC ที่สูงหรือต่ำเกินไปกับความต้องการของพืชมีผลทำให้ปริมาณธาตุอาหาร N, P และ Mg ภายในต้นพืชลดลง อีกทั้งยังพบว่า S ที่มากเกินไปมีผลทำให้ Mg และ Ca ภายในต้นพืชมีปริมาณลดลงเช่นกัน (Seo et al., 2009) แสดงให้เห็นว่าค่า EC ที่ไม่เหมาะสมส่งผลต่อความไม่สมดุลของธาตุอาหารภายในต้นพืช โดยเฉพาะธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช (N และ P) และธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ (Mg และ Fe) ซึ่งใช้สำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง (Roosta & Rezaei, 2014) ทำให้พืชมีการเจริญเติบโต และมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง เมื่อปลูกในสารละลายที่มีค่า EC ที่ต่ำหรือสูงมากกว่าความต้องการของพืช (Albornoz & Heinrich Lieth, 2015; D'Anna, Incalcaterra, Moncada, & Miceli, 2003; Seo et al., 2009)

นอกจากนี้จากการทดลองที่ 4.2 เป็นที่น่าสังเกตว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลาย EC 1.00 mS/cm พบว่ามีน้ำหนักสดต่ำที่สุด แต่มีน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกับที่สารละลาย EC 1.5 และ 2.0 mS/cm ทั้งนี้อาจเนื่องจากน้ำหนักแห้งขึ้นอยู่กับปริมาณการสะสมของ crude fiber ในต้นพืช ตัวอย่างเช่น ผักฉ่อย (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*) พบว่า ค่า EC ต่ำ ทำให้น้ำหนักสดลดลง แต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณการสะสมของ crude fiber ไม่เปลี่ยนแปลงทั้งในน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง (Ding et al., 2018) ซึ่ง crude fiber เป็นสาร polysaccharide (Almodares, Jafarinia, & Hadi, 2009) ส่วนใหญ่สะสมบริเวณผนังเซลล์

(cell wall) เนื้อเยื่อสเคอเรนไคมา (sclerenchyma) เนื้อเยื่อคอลเลนไคมา (collenchyma) และเนื้อเยื่อลำเลียง (vascular tissue) (Smiechowska & Dmowski, 2006)

สรุปผลการทดลองที่ 2 บ่งชี้ชัดเจนว่าค่า EC 1.5 mS/cm ของสารละลายธาตุอาหารแบบ DFT เหมาะสำหรับการปลูกพรมมิด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ โดยพรมมิมีการเจริญเติบโต (ทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง) สูงที่สุด รวมทั้งมีปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงที่สุด



5.3 การทดลองที่ 3 ผลของค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT ต่อการเจริญเติบโตของพรมมิ

ในระบบการปลูกพืชด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ ค่า pH ของสารละลายธาตุอาหารเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญ เนื่องจาก pH มีบทบาทสำคัญต่อการแตกตัวเป็นไอออนของธาตุอาหารในรูปที่แตกต่างกัน (Roosta & Rezaei, 2014; Téllez & Merino, 2012) เช่น การแตกตัวของธาตุ N ในสารละลายที่พืชสามารถดูดใช้ได้มี 2 รูปแบบคือ NO_3^- หรือ NH_4^+ โดยในสภาวะเป็นกรด รากพืชสามารถดูด NO_3^- ได้ดีกว่า NH_4^+ ส่วนในสภาวะที่เป็นด่าง พืชดูดใช้ NH_4^+ มากกว่า แต่โดยส่วนมากพืชจะดูดใช้ N ในรูป NO_3^- มากกว่า (Jones, 2014; Kim et al., 2005)

จากการทดลองที่ 3 ผลการทดลองบ่งชี้ว่า พรมมิที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH 6.5 ภายใต้ระบบ DFT และ EC 1.50 mS/cm นาน 6 สัปดาห์ มีการเจริญเติบโต และมีปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงสูงที่สุด (เมื่อเทียบกับ pH 5.5 และ pH 7.5) เนื่องจากสารละลายธาตุอาหารที่เป็นกรดมีการแตกตัวของ N อยู่ในรูป NO_3^- สูงกว่า NH_4^+ ทำให้พืชสามารถดูดไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้ดี (Kim et al., 2005) รวมถึง P ซึ่งเป็นธาตุอาหารหลักอีกชนิดหนึ่งที่ถูกตรึงหรือเปลี่ยนเป็นสารประกอบได้ง่ายตาม pH ของสภาพแวดล้อม โดย P ที่พืชสามารถดูดใช้อยู่ในรูปของฟอสเฟตไอออน คือ H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} ซึ่งช่วง pH ที่ P ทั้ง 2 รูปจะสมดุลกันคือช่วง pH 6.5 – 7.0 (Téllez & Merino, 2012) นอกจากนี้ pH 6.5 ของสารละลายธาตุอาหารส่งผลให้เพิ่มการดูดใช้ P, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn และ Cu ทำให้เพิ่มการเจริญเติบโต ของพืช (Roosta & Rezaei, 2014) ซึ่งการทดลองของ Roosta and Rezaei (2014) พบว่าการปลูกกุหลาบด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ โดยใช้สารละลายธาตุอาหารครึ่งสูตร Hoagland pH 6.5 ส่งผลให้กุหลาบมีการเจริญเติบโตดีที่สุด รวมทั้งมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง ปริมาณคลอโรฟิลล์ และมีการสังเคราะห์แสงสูงที่สุด (เมื่อเปรียบเทียบกับ pH 4.5, 5.5 และ 8)

นอกจากนี้ผลการทดลองที่ 4.3 ยังพบว่า สารละลายธาตุอาหารที่ pH 7.5 เริ่มมีการเจริญเติบโตลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก สารละลายที่ pH 7.5 มีการสะสมของไนไตรท์ (NO_2^-)

ปริมาณสูง ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อพืช (Télez & Merino, 2012) และส่งผลให้พืชไม่สามารถดูดใช้ Fe, Cu, Zn, Br และ Mn ได้เนื่องจากเกิดการตกตะกอนของธาตุเหล่านี้ (Tyson, 2007) อีกทั้ง pH 7.5 ซึ่งมีสถานะเป็นด่าง ทำให้พืชมีการดูดใช้ NH_4^+ สูงกว่า NO_3^- ซึ่งการสะสม NH_4^+ ปริมาณสูงในพืช อาจส่งผลทำให้การเจริญเติบโตลดลง เนื่องจาก NH_4^+ เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อพืช และมีผลต่อสารชีวสังเคราะห์ต่างๆ ในพืช เช่น สังเคราะห์สาร Glutamine synthase ปริมาณสูงและสะสมในเนื้อเยื่อพืช (Konishi et al., 2016)

กรณีสารละลายธาตุอาหารที่ pH 5.5 มีการเจริญเติบโตและมีปริมาณรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์แสงน้อยที่สุดอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากในสถานะที่เป็นกรดพืชจะลดการดูดใช้ N, P, K, Ca, Mg และ S (Schubert, Schubert, & Mengel, 1990; Télez & Merino, 2012) สำหรับจุลธาตุ เช่น Fe, Cu, Zn, Br และ Mo จะแตกตัวได้ดีในสถานะเป็นกรด แต่พืชต้องการใช้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยในการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง การหายใจ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่างๆ ในการสร้างและขนส่งสารภายในเซลล์พืช แต่หากมีมากเกินไปก็อาจเป็นพิษต่อพืชและส่งผลให้มีการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโตลดลง (Arduini, Kettner, Godbold, Onnis, & Stefani, 1998; Lefever, 2013; Long et al., 2017) อีกทั้ง Kamaluddin and Zwiazek (2004) ยังพบว่า pH ที่ต่ำส่งผลให้อัตราการไหลของน้ำและการนำไฟฟ้าในรากต้น Birch (*Betula papyrifera*) ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Anugoolprasert, Kinoshita, Naito, Shimizu, and Ehara (2012) พบว่า สารละลายที่ pH ต่ำกว่า 5.7 ส่งผลให้พืชมีอัตราการสังเคราะห์แสงลดลง โดยมีสาเหตุมาจากการลดลงของค่าการนำไฟฟ้าที่ปากใบ และส่งผลให้มีพื้นที่ใบลดลง (Yang, Jiang, Tang, & Chen, 2011) นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า pH ต่ำ ยังยับยั้งการดูดซับ CO_2 ในวอลนัต (*Juglans regia*) (Zhang, Meng, Li, & Wan, 2014) และส้ม (*Citrus sinensis*) (Long et al., 2017)

สรุปผลการทดลองที่ 3 พบว่า พรหมมีที่ปลูกในสารละลายที่มีค่า pH 6.5 เป็น pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพรหมภายใต้ระบบ DFT และ EC 1.50 mS/cm ส่งผลให้มีการเจริญเติบโตทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง รวมถึงการเจริญเติบโตด้านอื่นๆ สูงที่สุด อีกทั้งยังมีปริมาณรงควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสงสูงที่สุด

5.4 การทดลองที่ 4 ผลของ Methyl jasmonate (MeJA) ต่อการสะสมสาร Bacoside A

ในพรมมิที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ DFT

จากการทดลองที่ 4 พบว่า หลังฉีดพ่นด้วย MeJA ความเข้มข้น 250 μM (จากความเข้มข้น 4 ระดับ 0, 50, 150 และ 250 μM) ระยะเวลา 2 วัน (จาก 2, 4 และ 6 วัน) สามารถกระตุ้นให้พรมมิสะสมสาร Bacoside A (Bacoside A₃, Bacopaside II, Bacopaside X และ Bacopasaponin C) ได้มากที่สุด และมีปริมาณลดลงในวันที่ 4 และ 6 นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักแห้งของพรมมิไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับพรมมิที่ไม่ได้ฉีดพ่นด้วยสาร MeJA

เนื่องจาก MeJA เป็นสารควบคุมการเจริญเติบโต หรือฮอร์โมนพืช โดยเป็นตัวส่งสัญญาณที่ทำหน้าที่ควบคุมยีนหลักที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์และเพิ่มการผลิตสารทุติยภูมิหลายชนิดในพืช โดยเป็นกลไกการป้องกันตัวเองของพืชเมื่อพืชถูกทำลาย (Sun, Zou, Zhang, Zhang, & Wang, 2017; Zhao, Zhou, & Wu, 2010) ในธรรมชาติสภาพปกติพืชจะผลิต MeJA ออกมาเพียงเล็กน้อย การนำ MeJA มาใช้เพื่อเพิ่มสารสำคัญ (Buchanan, Gruijssem, & Jones, 2015) ในการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของพืชสมุนไพร และพืชเศรษฐกิจทั้งในระบบปิดและระบบเปิดนั้น มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย (Díaz et al., 2016)

ผลการทดลองที่ 4 สอดคล้องกับการรายงานของ Misra, Maiti, Chanotiya, Shanker, and Ghosh (2014) พบว่าหลังการใช้ MeJA 250 μM เป็นเวลา 2 วันสามารถกระตุ้นให้โหระพา (*Ocimum basilicum*) มีการสะสม oleanolic acid และ ursolic acid สูงที่สุด ซึ่งหลังฉีดพ่น MeJA 250 μM เป็นระยะเวลา 2 วัน สามารถกระตุ้นให้พรมมิสะสมสาร Bacoside A ได้สูงที่สุดเช่นกัน แตกต่างจากการรายงานก่อนหน้านี้ ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการใช้ MeJA ความเข้มข้น 50 μM เพาะเลี้ยงพรมมิในอาหารเหลวในหลอดทดลองเป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ สามารถเพิ่มการสะสมของ Bacoside A ในพรมมิได้ แต่ในสัปดาห์ที่ 4 และ 5 นั้น สาร Bacoside A มีปริมาณลดลง อีกทั้งยังพบว่าการใช้ MeJA ความเข้มข้น 100 และ 150 μM ในอาหารเหลว เป็นระยะเวลา 3 สัปดาห์ ส่งผลให้พรมมิหยุดการเจริญเติบโตและตายในที่สุด (Largia et al., 2015) อีกทั้งยังพบว่าหลังการฉีดพ่น

พรมมิที่ปลูกในดินด้วย MeJA 100 – 200 μM เป็นเวลา 14 วัน สามารถกระตุ้นให้พรมมิสะสมสาร Bacoside A เพิ่มมากขึ้น (Bunjan, Sujipuli, & Prasarnpun, 2018)

นอกจากนั้นยังพบว่ามีการใช้ MeJA เพื่อกระตุ้นการสะสมสารทุติยภูมิกับพืชหลากหลายชนิด เช่น การใช้ MeJA 100 μM ใส่ในสารละลายธาตุอาหารในระบบไฮโดรโปนิคส์เป็นระยะเวลา 7 วัน กระตุ้นการสะสมของสาร Kalopanaxsaponin I ให้เพิ่มขึ้นในต้นเทียนดำ (*Nigella sativa* L.) ได้ (Scholz et al., 2009) และการใช้ MeJA 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร ในการเพาะเลี้ยงเซลล์รากของ *Ajuga bracteosa* เป็นเวลา 14 วัน (Saeed, Ali, Khan, Kayani, & Khan, 2017) จะเห็นได้ว่าการกระตุ้นให้พืชสะสมสารทุติยภูมิเพิ่มขึ้นด้วย MeJA นั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ความเข้มข้น ระยะเวลาที่เหมาะสม และวิธีการเพาะเลี้ยงรวมถึงวิธีการให้ MeJA กับพืช (Namdeo, 2007) หากความเข้มข้นต่ำไปอาจไม่เพียงพอที่จะสามารถกระตุ้นให้เกิดการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้อง และไม่สามารถกระตุ้นให้พืชเพิ่มการสะสมสารทุติยภูมิได้ (Commault et al., 2019) หรือหากมีความเข้มข้นสูงเกินไปอาจทำให้เซลล์พืชตายได้ (Buchanan et al., 2015; Largia et al., 2015) เนื่องจาก MeJA ส่งผลให้มีการลดการแสดงออกของยีน หรือเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการหายใจระดับเซลล์ รวมถึงลดการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อนำสารต่างๆ มาใช้ในกระบวนการการป้องกันตัวเองของพืช (Buchanan et al., 2015) รวมถึงระยะเวลาในการกระตุ้น เนื่องจาก MeJA ที่ทำการฉีดพ่นนั้น จะไม่สามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนได้โดยตรง แต่จะถูกลำเลียงไปยังท่อลำเลียงและเซลล์ต่างๆ ของพืช จากนั้นจะเปลี่ยนรูปเป็น jasmonoyl isoleucine (JA-Ile) เพื่อกระตุ้นยีนและเอนไซม์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างสารทุติยภูมิให้เพิ่มมากขึ้น (Acosta & Farmer, 2010; Tamogami, Noge, Abe, Agrawal, & Rakwal, 2012) แต่หากใช้เวลามากไปก็อาจทำให้สารทุติยภูมิในพืชมีปริมาณการสะสมที่ลดลงได้ (Namdeo, 2007) ทั้งนี้ เนื่องจาก MeJA เป็นสารระเหย (volatile organic compounds; VOCs) ซึ่งจะไม่ได้อยู่ในต้นพืช หรือไม่ได้อยู่ในรูปเดิมเป็นเวลานาน เมื่อไม่มีการกระตุ้นเพิ่มเติม สารทุติยภูมิต่างๆ ที่พืชสะสมเพิ่มขึ้น จะสามารถเปลี่ยนรูปกลายเป็นสารอื่น ที่พืชต้องการใช้ในเมแทบอลิซึมอื่นๆ ต่อไป ซึ่งการเปลี่ยนรูปของสารจะช้าหรือเร็วนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสารทุติยภูมิและอายุของพืชนั้นๆ (Commault et al., 2019; Tamogami et al., 2012)

สรุปการทดลองที่ 4 พบว่า พรหมิที่ฉีดพ่นด้วย MeJA ความเข้มข้น 250 μ M และทำการเก็บเกี่ยวหลังจากการฉีดพ่นเป็นเวลา 2 วัน สามารถกระตุ้นให้พรหมิสะสมสาร Bacoside A ได้สูงที่สุด และไม่ส่งผลต่อน้ำหนักแห้งของพรหมิ



บรรณานุกรม

Primary Sources

Secondary Sources

ภาษาไทย

เฉลิมวุฒิ คำฟูบุตร. (2552). อัตราการไหลของสารละลายธาตุอาหารในระบบการปลูกพืชไร้ดินที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมชนิดผักสลัดใบแดง (โครงการวิศวกรรมชลประทาน ที่ 21/2552).

เต็ม สมิตินันท์. (2544). ชื่อพรรณไม้แห่งประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: ส่วนพฤกษศาสตร์ป่าไม้ สำนักวิชาการป่าไม้ กรมป่าไม้.

กรกนก อิงคินันท์. (2561). พรมมิสมุนไพรบำรุงความจำ ข้อมูลวิชาการและการใช้ประโยชน์. พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

กรกนก อิงคินันท์, วราภรณ์ ภูตะลุน, วรุ พรหมพิทยารัตน์, ศักดิ์ชัย วิทยาอารีย์กุล, ชรินทร์น์ ไตเทียม, อรยา เครื่องทิพย์, . . . ศุภรัตน์ การุณย์วิจิตร. (2553). การศึกษาพัฒนาพรมมิเพื่อใช้เป็นสมุนไพรบำรุงความจำระยะที่ 4 (รายงานการวิจัย). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

กรกนก อิงคินันท์, สุชาดา สุขหรั่ง, นิทรา เนื่องจำนงค์, ปราณี นางงาม, ประภาพรณ เต็มกิจถาวร, & ทองชัย แซ่สง. (2558). การศึกษาเมตาบอโลมิกและลายพิมพ์ดีเอ็นเอของพรมมิและพืชสกุล *Bacopa* ที่พบในประเทศไทย (รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

กำไร วรนุช, รัตติกานต์ บัวเรือง, อนุพันธ์ กงบังเกิด, คำรพ รัตนสุด, & ชนนิษฐ์ ชูพยัคฆ์. (2558). เมทิลจัสโมเนทและการทำให้เกิดแผลกระตุ้นการแสดงออกของยีน sesquiterpene synthase ในเนื้อเยื่อเพาะเลี้ยงพลู. *Thai Journal of Genetics*, 8(3), 182-190.

คงเอก ศิริงาม, กุณิสรา ธีระวิภา, & ณัฐวุฒิ ไหลหาโคตร. (2557). ผลของสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตของผักกาดหอมที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์. *Thai Science and Technology Journal*, 828-836.

จิราพร กุลคำ. (2555). การศึกษาระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมในการผลิตอนุเบียสนานา (*Anubias nana*) แบบไร้ดิน. *วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง*, 6(2), 78-86.

ชาญชัย สาดแสงจันทร์. (2556). พรมมิ สมุนไพรเพื่อสุขภาพสมอง. *วารสารธรรมศาสตร์เวชสาร*, 13(4), 554-560.

- ดิเรก ทองอร่าม. (2550). การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน หลักการจัดการการผลิตและเทคโนโลยีการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย. กรุงเทพมหานคร: พิมพ์ดีการพิมพ์.
- บุญร่วม คัดคำ. (2557). อิทธิพลของเมทิลจัสโมเนตต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและคุณค่าทางโภชนาการในผักกาดหอมเรดโอ๊คที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์. วารสารแก่นเกษตร, 42(1), 652-657.
- พิชานันท์ ลิแก้ว. (2555). “พรมมิ” สมุนไพรรักษาอาการความจำเสื่อม. บทความวิชาการ จุลสารข้อมูลสมุนไพร, 29(3), 16-19.
- ศักดิ์สิทธิ์ บุญดำ, & ปริญญา จุลกะ. (2557). ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างและค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายธาตุอาหารที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและปริมาณไนเตรทของผักกาดฮ่องเต้ที่ปลูกในระบบ Nutrient Film Technique (NFT). วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร, 45(2), 9-12.
- สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืชกรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช. (2558). พืชสมุนไพรในสวนพฤกษศาสตร์และสวนรุกขชาติในประเทศไทย เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร.
- สุรณี ประชุมพล, & นงนุช เลหาหะวิสุทธิ. (2555). ความเป็นกรด-ด่างของสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโตพรรณไม้น้ำสกุลอนุเบียสบาร์เทอร์ในระบบปลูกแบบไร้ดิน. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า, 30(3), 42-51.
- อรรณี คงสมบัติ, สุทธิสา ถาน้อย, & เสมอ ถาน้อย. (2554). การศึกษาเมตาบอลิซึมและลายพิมพ์ ดีเอ็นเอของพรมมิและพืชสกุล *Bacopa* ที่พบในประเทศไทย. พืชญโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- อานัฐ ตันโซ. (2548). การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน *Soiless Culture in Tropics*. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

ภาษาอังกฤษ

- Abdelgawad, Z., Khalafaallah, A. A., & Abdallah, M. (2014). Impact of methyl jasmonate on antioxidant activity and some biochemical aspects of maize plant grown under water stress condition. *Agricultural Sciences*, 5(12), 1077.
- Acosta, I. F., & Farmer, E. E. (2010). Jasmonates. *The Arabidopsis book/American Society of Plant Biologists*, 8.
- Albornoz, F., & Heinrich Lieth, J. (2015). Over fertilization limits lettuce productivity because of osmotic stress. *Chilean journal of agricultural research*, 75(3), 284-290.
- Almodares, A., Jafarinia, M., & Hadi, M. (2009). The effects of nitrogen fertilizer on chemical compositions in corn and sweet sorghum. *Agriculture and Environment Science*, 6, 441-446.

- Anju, V., Naresh, C., & Avinash, P. (2017). Anatomical markers and Phytochemical study of different plant parts of *Bacopa monnieri* (L.) Wettst. *international journal of life sciences*, 5(3), 379-386.
- Anugoolprasert, O., Kinoshita, S., Naito, H., Shimizu, M., & Ehara, H. (2012). Effect of low pH on the growth, physiological characteristics and nutrient absorption of sago palm in a hydroponic system. *Plant Production Science*, 15(2), 125-131.
- Arduini, I., Kettner, C., Godbold, D., Onnis, A., & Stefani, A. (1998). The influence of pH on root morphology and mineral content of *Pinus pinaster* Ait. seedlings. *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 132(1), 3-9.
- Awad, Y. M., Lee, S.-E., Ahmed, M. B. M., Vu, N. T., Farooq, M., Kim, I. S., . . . Al-Wabel, M. (2017). Biochar, a potential hydroponic growth substrate, enhances the nutritional status and growth of leafy vegetables. *Journal of cleaner production*, 156, 581-588.
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2015). *Biochemistry and molecular biology of plants*: John Wiley & Sons.
- Bunjan, W., Sujipuli, K., & Prasarnpun, S. (2018). Effect of methyl jasmonate elicitation on biomass, gene expression and saponin accumulation in *Bacopa monnieri*. *International Journal of Biosciences*, 13(4), 369-377.
- Calabrese, C., Gregory, W. L., Leo, M., Kraemer, D., Bone, K., & Oken, B. (2008). Effects of a standardized *Bacopa monnieri* extract on cognitive performance, anxiety, and depression in the elderly: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *The journal of alternative and complementary medicine*, 14(6), 707-713.
- Caruso, G., Villari, G., Melchionna, G., & Conti, S. (2011). Effects of cultural cycles and nutrient solutions on plant growth, yield and fruit quality of alpine strawberry (*Fragaria vesca* L.) grown in hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 129(3), 479-485.
- Charoenphon, N., Anandsongvit, N., Kosai, P., Sirisidthi, K., Kangwanrangsan, N., & Jiraungkoorskul, W. (2016). Brahmi (*Bacopa monnieri*): Up-to-date of memory boosting medicinal plant: A review. *Indian Journal Of Agricultural Research*, 50(1).
- Cheong, J.-J., & Choi, Y. D. (2003). Methyl jasmonate as a vital substance in plants.

TRENDS in Genetics, 19(7), 409-413.

- Commault, A. S., Fabris, M., Kuzhiumparambil, U., Adriaans, J., Pernice, M., & Ralph, P. J. (2019). Methyl jasmonate treatment affects the regulation of the 2-C-methyl-D-erythritol 4-phosphate pathway and early steps of the triterpenoid biosynthesis in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Algal Research*, 39, 101462.
- Costa, L. D., Nicola, T., Gottardi, S., Iacuzzo, F., Cortella, G., Manzocco, L., . . . Cesco, S. (2011). The effect of growth medium temperature on corn salad [*Valerianella locusta* (L.) Laterr] baby leaf yield and quality. *HortScience*, 46(12), 1619-1625.
- D'Anna, F., Incalcaterra, G., Moncada, A., & Miceli, A. (2003). *Effects of different electrical conductivity levels on strawberry grown in soilless culture*. Paper presented at the International Symposium on Managing Greenhouse Crops in Saline Environment 609.
- Díaz, M. R., Lobos, T., Cardemil, L., Nesi, A. N., Retamales, J., Jaakola, L., . . . Fonseca, A. R. (2016). Methyl jasmonate: an alternative for improving the quality and health properties of fresh fruits. *Molecules*, 21(6), 567.
- Ding, X., Jiang, Y., Zhao, H., Guo, D., He, L., Liu, F., . . . Yu, J. (2018). Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system. *PLoS one*, 13(8), 15p.
- Domingues, D. S., Takahashi, H. W., Camara, C. A., & Nixdorf, S. L. (2012). Automated system developed to control pH and concentration of nutrient solution evaluated in hydroponic lettuce production. *Computers and electronics in agriculture*, 84, 53-61.
- Gibson, J. L., Nelson, P. V., Pitchay, D. S., & Whipker, B. E. (2001). Identifying nutrient deficiencies of Bedding plants. *NC. State university floriculture research. Florex*, 4, 1-4.
- Haque, S. M., Chakraborty, A., Dey, D., Mukherjee, S., Nayak, S., & Ghosh, B. (2017). Improved micropropagation of *Bacopa monnieri* (L.) Wettst.(Plantaginaceae) and antimicrobial activity of in vitro and ex vitro raised plants against multidrug-resistant clinical isolates of urinary tract infecting (UTI) and respiratory tract infecting (RTI) bacteria. *Clinical Phytoscience*, 3(1), 17.

- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. *Circular. California agricultural experiment station, 347*(2nd edit).
- Hussain, K. (2010). *Bacopa monnieri* (L.) Pennell-a good biomarker of water pollution/contamination. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 6*(3).
- Jones, J., J. B. (2014). *Complete guide for growing plants hydroponically*: CRC Press.
- Kamaluddin, M., & Zwiazek, J. J. (2004). Effects of root medium pH on water transport in paper birch (*Betula papyrifera*) seedlings in relation to root temperature and abscisic acid treatments. *Tree physiology, 24*(10), 1173-1180.
- Kamkaew, N., Norman Scholfield, C., Ingkaninan, K., Taepavarapruk, N., & Chootip, K. (2013). *Bacopa monnieri* increases cerebral blood flow in rat independent of blood pressure. *Phytotherapy Research, 27*(1), 135-138.
- Kamkaew, N., Scholfield, C. N., Ingkaninan, K., Maneesai, P., Parkington, H. C., Tare, M., & Chootip, K. (2011). *Bacopa monnieri* and its constituents is hypotensive in anaesthetized rats and vasodilator in various artery types. *Journal of ethnopharmacology, 137*(1), 790-795.
- Keutgen, A. J., & Pawelzik, E. (2009). Impacts of NaCl stress on plant growth and mineral nutrient assimilation in two cultivars of strawberry. *Environmental and Experimental Botany, 65*(2-3), 170-176.
- Khayyat, M., Tafazoli, E., Rajaei, S., Vazifeshenas, M., Mahmoodabadi, M., & Sajjadinia, A. (2009). Effects of NaCl and supplementary potassium on gas exchange, ionic content, and growth of salt-stressed strawberry plants. *Journal of plant nutrition, 32*(6), 907-918.
- Kim, H. J., Cho, Y.-S., Kwon, O.-K., Cho, M., Hwang, J.-B., Bae, S.-D., & Jeon, W.-T. (2005). Effect of pH and EC of hydroponic solution on the growth of greenhouse rose. *Asian Journal of Plant Sciences, 4*(4), 348-355.
- Kongkeaw, C., Dilokthornsakul, P., Thanarangsarit, P., Limpeanchob, N., & Scholfield, C. N. (2014). Meta-analysis of randomized controlled trials on cognitive effects of *Bacopa monnieri* extract. *Journal of ethnopharmacology, 151*(1), 528-535.
- Konishi, N., Ishiyama, K., Beier, M. P., Inoue, E., Kanno, K., Yamaya, T., . . . Kojima, S. (2016). Contributions of two cytosolic glutamine synthetase isozymes to ammonium assimilation in *Arabidopsis* roots. *Journal of experimental botany,*

68(3), 613-625.

- Krishantha, G., Gunasekera, H., Sugathadasa, K., & Prasangika, K. (2012). Feasibility study of growing Lunuwila (*Bacopa Monnieri* L.) under hydroponics.
- Largia, M. J. V., Pothiraj, G., Shilpha, J., & Ramesh, M. (2015). Methyl jasmonate and salicylic acid synergism enhances bacoside A content in shoot cultures of *Bacopa monnieri* (L.). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 122(1), 9-20.
- Lee, Y. H., Yoon, C. S., Park, N. I., & Yeoung, Y. R. (2015). Influence of various nutrient concentrations on the growth and yield of summer strawberry cultivars cultivated in a hydroponic system. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 56(4), 421-426.
- Lefever, K. (2013). *Effects of pH and phosphorus concentrations on the cultivation of Salvia chamelaeagnea grown in hydroponics*. Cape Peninsula University of Technology.
- Limpeanchob, N., Jaipan, S., Rattanakaruna, S., Phrompittayarat, W., & Ingkaninan, K. (2008). Neuroprotective effect of *Bacopa monnieri* on beta-amyloid-induced cell death in primary cortical culture. *Journal of ethnopharmacology*, 120(1), 112-117.
- Long, A., Zhang, J., Yang, L.-T., Ye, X., Lai, N.-W., Tan, L.-L., . . . Chen, L.-S. (2017). Effects of low pH on photosynthesis, related physiological parameters, and nutrient profiles of citrus. *Frontiers in Plant Science*, 8, 185.
- Lucho-Constantino, G. G., Zaragoza-Martinez, F., Ponce-Noyola, T., Cerda-García-Rojas, C. M., Trejo-Tapia, G., Esparza-García, F., & Ramos-Valdivia, A. C. (2017). Antioxidant responses under jasmonic acid elicitation comprise enhanced production of flavonoids and anthocyanins in *Jatropha curcas* leaves. *Acta Physiologiae Plantarum*, 39(8), 165.
- Masaru, S., Uenishi, M., Miyamoto, K., & Suzuki, T. (2016). Effect of root-zone temperature on the growth and fruit quality of hydroponically grown strawberry plants. *Journal Agricultural Science*, 8(5), 122-131.
- Mishra, A., Mishra, A. K., Tiwari, O. P., & Jha, S. (2013). HPLC analysis and standardization of Brahmi vati—An Ayurvedic poly-herbal formulation. *Journal of Young Pharmacists*, 5(3), 77-82.

- Misra, R. C., Maiti, P., Chanotiya, C. S., Shanker, K., & Ghosh, S. (2014). Methyl jasmonate-elicited transcriptional responses and pentacyclic triterpene biosynthesis in sweet basil. *Plant physiology*, *164*(2), 1028-1044.
- Mitrnoi, M. (2007). Tissue Culture and Factors Affecting Growth of African Sword Plant (*Echinodorus africanus* K. Ratag) in Deep Flow Technique System (M. Sc. thesis). *King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand*.
- Mohammed, A., & Tarpley, L. (2011). High night temperature and plant growth regulator effects on spikelet sterility, grain characteristics and yield of rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Canadian journal of plant science*, *91*(2), 283-291.
- Mosqueda, M. A. a., & Andreu, L. G. I. (2016). Evaluation of different temporary immersion systems (BIT®, BIG, and RITA®) in the micropropagation of *Vanilla planifolia* Jacks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, *52*(2), 154-160.
- Naik, P. M., & Al-Khayri, J. M. (2016). Abiotic and biotic elicitors–role in secondary metabolites production through in vitro culture of medicinal plants *Abiotic and biotic stress in plants-recent advances and future perspectives*: IntechOpen.
- Namdeo, A. (2007). Plant cell elicitation for production of secondary metabolites: a review. *Pharmacogn Rev*, *1*(1), 69-79.
- Nemali, K. S., & van Iersel, M. W. (2004). Light intensity and fertilizer concentration: I. Estimating optimal fertilizer concentrations from water-use efficiency of wax begonia. *HortScience*, *39*(6), 1287-1292.
- Nemetchek, M. D., Stierle, A. A., Stierle, D. B., & Lurie, D. I. (2017). The Ayurvedic plant *Bacopa monnieri* inhibits inflammatory pathways in the brain. *Journal of ethnopharmacology*, *197*, 92-100.
- Novella, M. B., Andriolo, J. L., Bisognin, D. A., Cogo, C. M., & Bandinelli, M. G. (2008). Concentration of nutrient solution in the hydroponic production of potato minitubers. *Ciência Rural*, *38*(6), 1529-1533.
- Nuengchamnong, N., Sookying, S., & Ingkaninan, K. (2016). LC-ESI-QTOF-MS based screening and identification of isomeric jujubogenin and pseudojujubogenin aglycones in *Bacopa monnieri* extract. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, *129*, 121-134.
- Nxawe, S., Ndakidemi, P., & Laubscher, C. (2010). Possible effects of regulating

- hydroponic water temperature on plant growth, accumulation of nutrients and other metabolites. *African Journal of Biotechnology*, 9(54), 9128-9134.
- Peth-Nui, T., Wattanathorn, J., Muchimapura, S., Tong-Un, T., Piyavhatkul, N., Rangseekajee, P., . . . Vittaya-areekul, S. (2012). Effects of 12-week *Bacopa monnieri* consumption on attention, cognitive processing, working memory, and functions of both cholinergic and monoaminergic systems in healthy elderly volunteers. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2012, 10.
- Phrompittayarat, W., Ingkaninan, K., Jetiyanon, K., Wittaya-Areekul, S., Putalun, W., Tanaka, H., & Khan, I. (2011). Influence of seasons, different plant parts, and plant growth stages on saponin quantity and distribution in *Bacopa monnieri*. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 33(2), 193-199.
- Pierce, S. C., Pezeshki, S. R., Larsen, D., & Moore, M. T. (2009). Hydrology and species-specific effects of *Bacopa monnieri* and *Leersia oryzoides* on soil and water chemistry. *Ecohydrology*, 2(3), 279–286.
- Pramanik, M. H. R., Nagai, M., Asao, T., & Matsui, Y. (2000). Effects of Temperature and Photoperiod on Phytotoxic Root Exudates of Cucumber (*Cucumis sativus*) in Hydroponic Culture, 1953.
- Quy, N. V., Sinsiri, W., Chitchamnong, S., Boontiang, K., & Kaewduangta, W. (2018). Effects of electrical conductivity (EC) of the nutrient solution on growth, yield and quality of lettuce under vertical hydroponic systems. *khon kaen agriculture journal*, 46(3), 613-622.
- Ramakrishna, A., & Ravishankar, G., Aswathanarayana,. (2011). Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. *Plant signaling & behavior*, 6(11), 1720-1731.
- Raviv, M., & Lieth, J. H. (2008). *Soilless Culture: Theory and Practice* (Vol. 1st ed). Amsterdam: Elsevier Science.
- Roosta, H. R., & Rezaei, I. (2014). Effect of Nutrient Solution PH on the Vegetative and Reproductive Growth and Physiological Characteristics of Rose Cv. ‘Grand Gala’ in Hydroponic System. *Journal of plant nutrition*(13). doi: 10.1080/01904167.2014.920377

- Russo, A., & Borrelli, F. (2005). *Bacopa monniera*, a reputed nootropic plant: an overview. *Phytomedicine*, *12*(4), 305-317.
- Saeed, S., Ali, H., Khan, T., Kayani, W., & Khan, M. A. (2017). Impacts of methyl jasmonate and phenyl acetic acid on biomass accumulation and antioxidant potential in adventitious roots of *Ajuga bracteosa* Wall ex Benth., a high valued endangered medicinal plant. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, *23*(1), 229-237.
- Scholz, M., Lipinski, M., Leupold, M., Luftmann, H., Harig, L., Ofir, R., . . . Müller, K. J. (2009). Methyl jasmonate induced accumulation of kalopanaxsaponin I in *Nigella sativa*. *Phytochemistry*, *70*(4), 517-522.
- Schubert, S., Schubert, E., & Mengel, K. (1990). Effect of low pH of the root medium on proton release, growth, and nutrient uptake of field beans (*Vicia faba*). *Plant and Soil*, *124*(2), 239.
- Seo, M. W., Yang, D. S., Kays, S. J., Kim, J.-H., Woo, J. H., & Park, K. W. (2009). Effects of nutrient solution electrical conductivity and sulfur, magnesium, and phosphorus concentration on sesquiterpene lactones in hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Scientia Horticulturae*, *122*(3), 369-374.
- Sgherri, C., Cecconami, S., Pinzino, C., Navari-Izzo, F., & Izzo, R. (2010). Levels of antioxidants and nutraceuticals in basil grown in hydroponics and soil. *Food Chemistry*, *123*(2), 416-422.
- Singh, A., & Dwivedi, P. (2018). Methyl-jasmonate and salicylic acid as potent elicitors for secondary metabolite production in medicinal plants: A review. *Journal Pharmacogn Phytochem*, *7*(1), 750-757.
- Sireeratawong, S., Jaijoy, K., Khonsung, P., Lertprasertsuk, N., & Ingkaninan, K. (2016). Acute and chronic toxicities of *Bacopa monnieri* extract in Sprague-Dawley rats. *BMC complementary and alternative medicine*, *16*(1), 249.
- Smiechowska, M., & Dmowski, P. (2006). Crude fibre as a parameter in the quality evaluation of tea. *Food Chemistry*, *94*(3), 366-368.
- Stefanov, M., Yotsova, E., Rashkov, G., Ivanova, K., Markovska, Y., & Apostolova, E. L. (2016). Effects of salinity on the photosynthetic apparatus of two Paulownia lines. *Plant physiology and biochemistry*, *101*, 54-59.

- Sun, T., Zou, L., Zhang, L., Zhang, J., & Wang, X. (2017). Methyl jasmonate induces triterpenoid biosynthesis in *Inonotus baumii*. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*(2), 312.
- Tamogami, S., Noge, K., Abe, M., Agrawal, G. K., & Rakwal, R. (2012). Methyl jasmonate is transported to distal leaves via vascular process metabolizing itself into JA-Ile and triggering VOCs emission as defensive metabolites. *Plant Signaling and Behavior*, 7(11).
- Téllez, L. I. T., & Merino, F. C. G. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems *Hydroponics-a standard methodology for plant biological researches* (pp. 23): IntechOpen.
- Tyson, R. V. (2007). *Reconciling pH for ammonia biofiltration in a cucumber/tilapia aquaponics system using a perlite medium*. University of Florida.
- Uabundit, N., Wattanathorn, J., Mucimapura, S., & Ingkaninan, K. (2010). Cognitive enhancement and neuroprotective effects of *Bacopa monnieri* in Alzheimer's disease model. *Journal of ethnopharmacology*, 127(1), 26-31.
- Wangwibulkit, M., & Laohavisuti, N. (2006). Propagation of Java fern *Microsorium pteropus*(Blume) Ching, 1961. *Technical Paper*(20), 36.
- Wangwibulkit, M., & Vajrodaya, S. (2016). Ex-situ propagation of *Pogostemon helferi* (Hook. f.) Press using tissue culture and a hydroponics system. *Agriculture and Natural Resources*, 50(1), 20-25.
- Yang, L.-T., Jiang, H.-X., Tang, N., & Chen, L.-S. (2011). Mechanisms of aluminum-tolerance in two species of citrus: Secretion of organic acid anions and immobilization of aluminum by phosphorus in roots. *Plant Science*, 180(3), 521-530.
- Zhang, C., Meng, P., Li, J., & Wan, X. (2014). Interactive effects of soil acidification and phosphorus deficiency on photosynthetic characteristics and growth in *Juglans regia* seedlings. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38(12), 1345-1355.
- Zhao, J. L., Zhou, L. G., & Wu, J. Y. (2010). Effects of biotic and abiotic elicitors on cell growth and tanshinone accumulation in *Salvia miltiorrhiza* cell cultures. *Applied microbiology and biotechnology*, 87(1), 137-144.







ภาพ 20 การเตรียมต้นพันธุ์พรมมิก่อนปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์อายุ 1 เดือน



ภาพ 21 ลักษณะการงอกของรากพรมมิ อายุ 4 วัน



ภาพ 22 ระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT



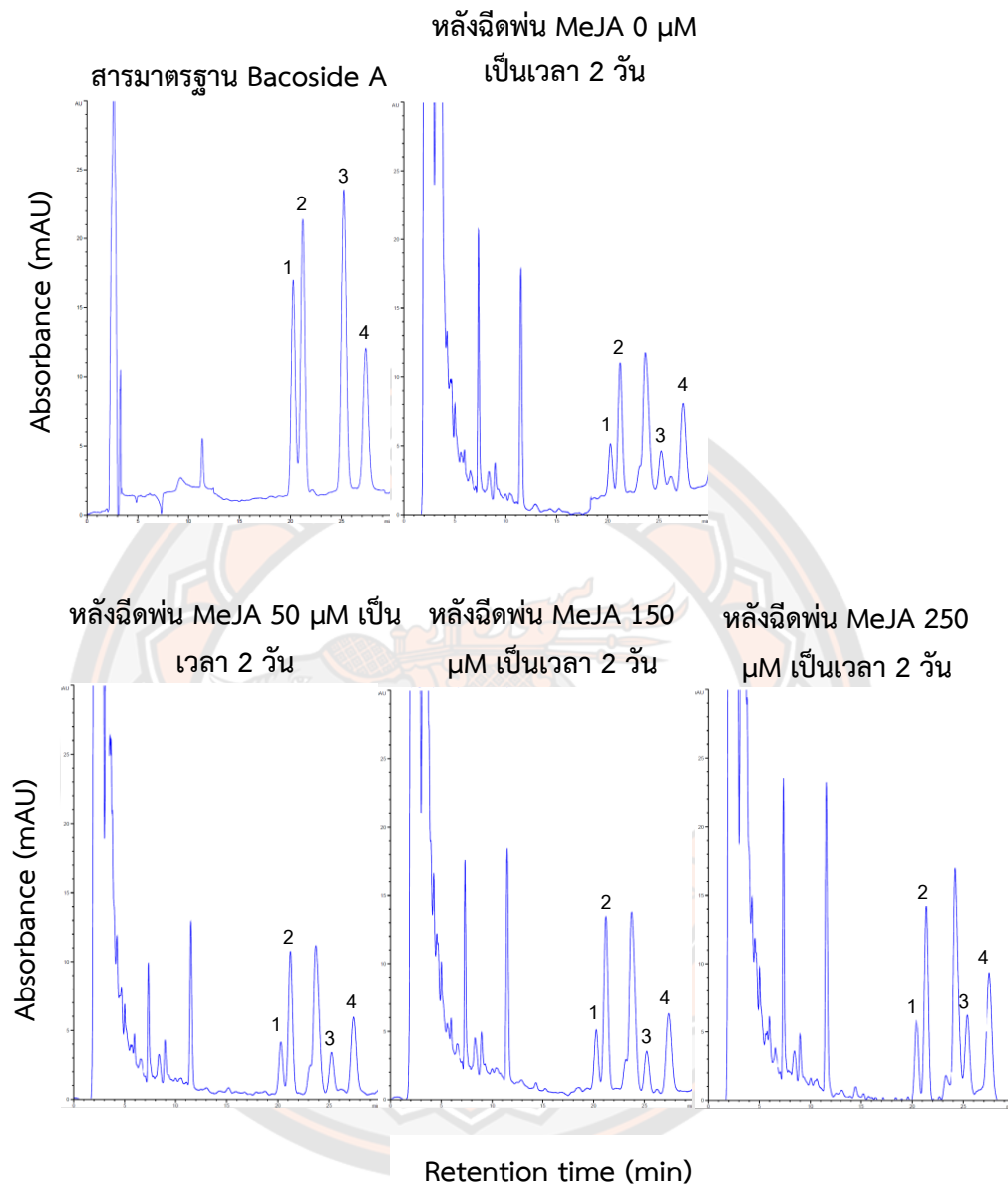
ภาพ 23 ระบบปลูกไฮโดรโปนิคส์แบบ NFT (ซ้าย) และ DFT (ขวา)



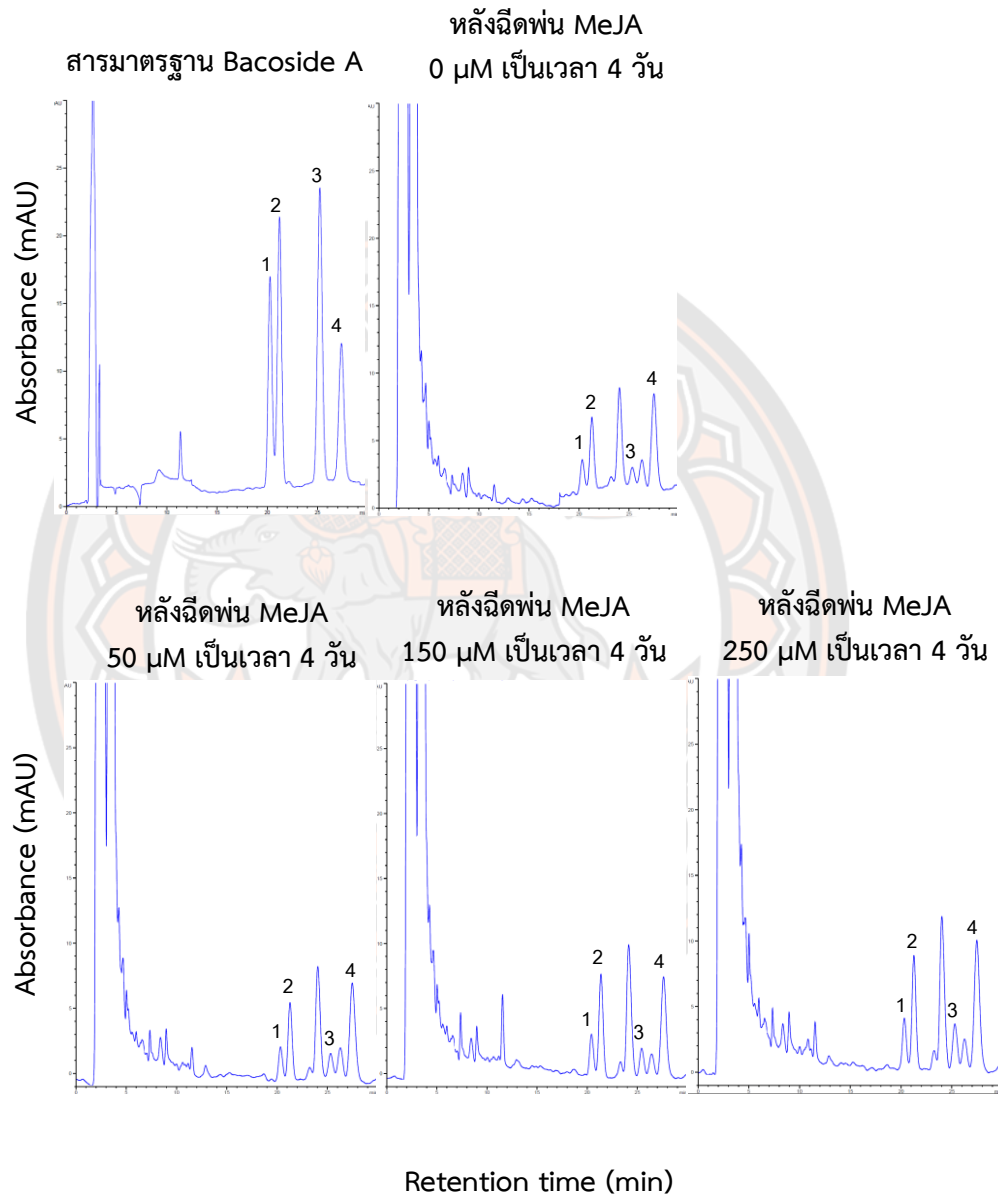
ภาพ 24 พรมมิที่ปลูกด้วยระบบโตรโปนิคส์แบบ DFT สารละลายธาตุอาหาร EC 1.5 mS/cm pH 6.5 อายุ 6 สัปดาห์



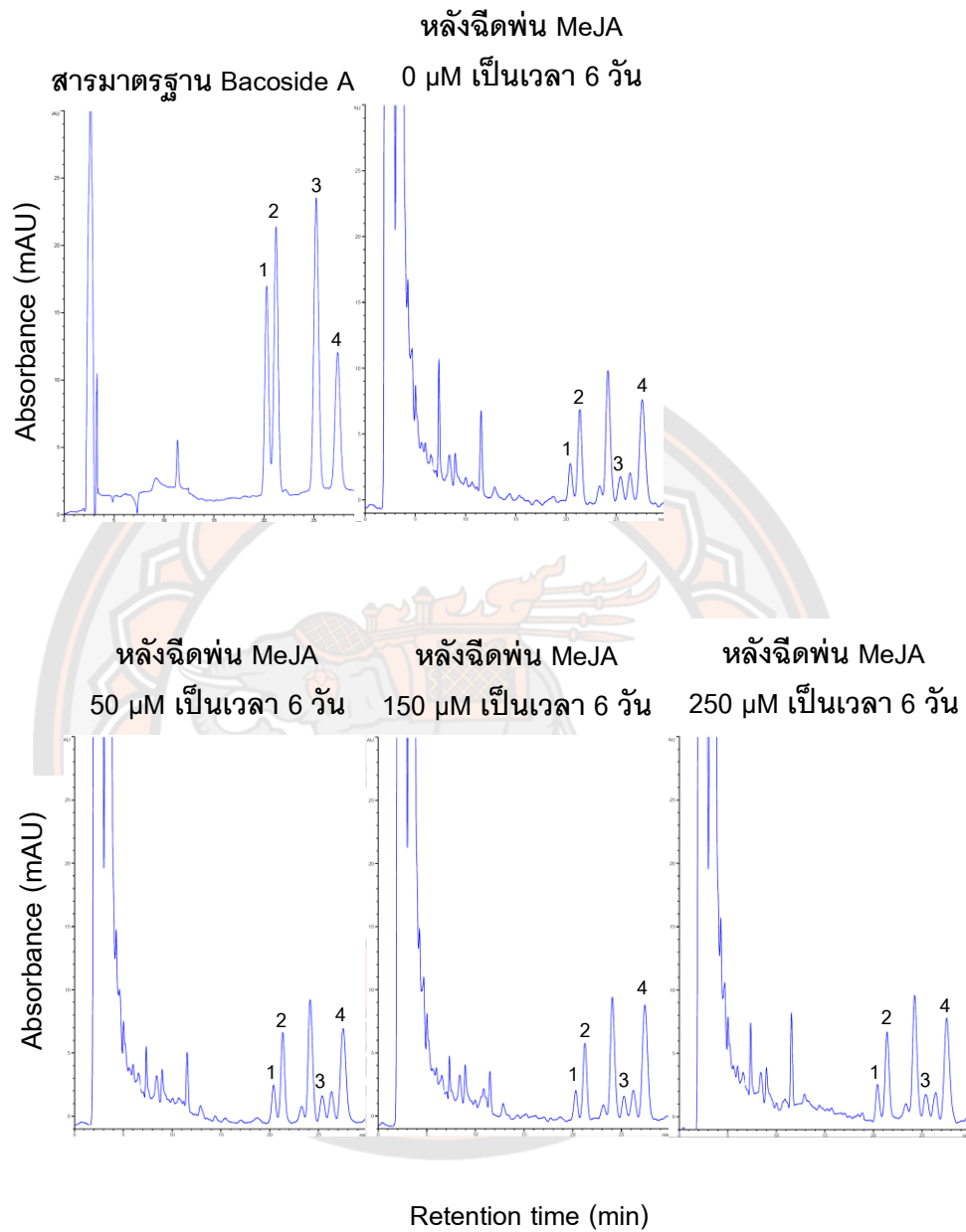
ภาพ 25 การคลุมพลาสติกหลังการฉีดพ่นด้วย MeJA แต่ละความเข้มข้น



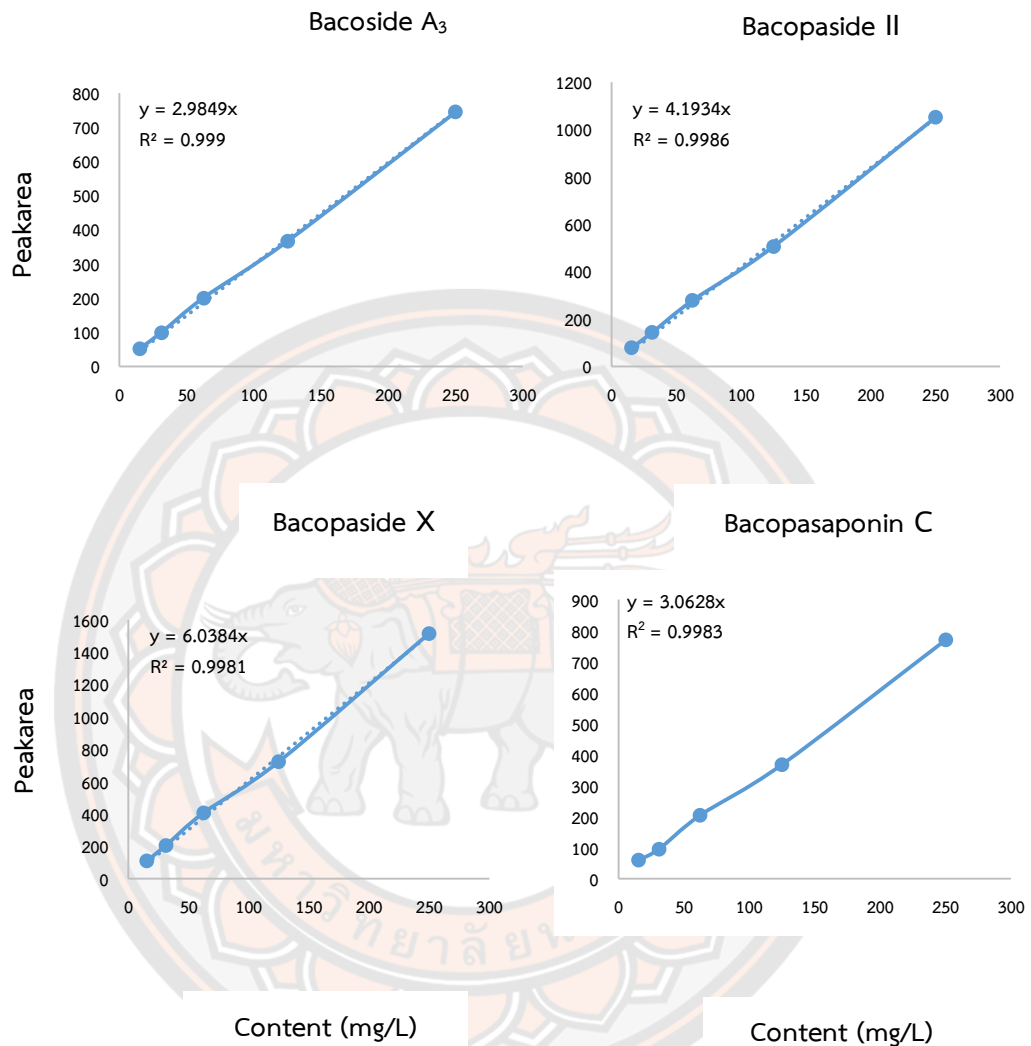
ภาพ 26 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร Bacoside A₃ (พีค 1), Bacopaside II (พีค 2), Bacopaside X (พีค 3) และ Bacopasaponin C (พีค 4) จากสารมาตรฐาน และจากตัวอย่างพรมมิหลังถูกฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μM) เป็นเวลา 2 วัน



ภาพ 27 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร Bacoside A₃ (พีค 1), Bacopaside II (พีค 2), Bacopaside X (พีค 3) และ Bacopasaponin C (พีค 4) จากสารมาตรฐาน และจากตัวอย่างพรมมิหลังถูกฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μM) เป็นเวลา 4 วัน



ภาพ 28 โครมาโตแกรม HPLC ของสาร Bacoside A₃ (พีค 1), Bacopaside II (พีค 2), Bacopaside X (พีค 3) และ Bacopasaponin C (พีค 4) จากสารมาตรฐาน และจากตัวอย่างพรมมิหลังถูกฉีดพ่นด้วย MeJA (0, 50, 150 และ 250 μ M) เป็นเวลา 6 วัน



ภาพ 29 กราฟมาตรฐานของสาร Bacoside A₃, Bacopaside II, Bacopaside X และ Bacopasaponin C

ตาราง 17 ปริมาณรังควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหาร ที่ EC ต่างกัน นาน 2, 4 และ 6 สัปดาห์

รงควัตถุในการ สังเคราะห์ ด้วยแสง	เวลา (สัปดาห์)	ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายธาตุอาหาร (mS/cm)		
		1.00	1.50	2.00
		คลอโรฟิลล์ เอ	2	4.82 ± 0.18 ^b
	4	4.80 ± 0.32 ^b	5.69 ± 0.17 ^a	6.06 ± 0.16 ^a
	6	2.67 ± 0.24 ^b	4.89 ± 0.17 ^a	4.52 ± 0.18 ^a
คลอโรฟิลล์ บี	2	1.61 ± 0.07 ^b	1.87 ± 0.07 ^a	1.70 ± 0.05 ^{ab}
	4	1.73 ± 0.13 ^b	2.17 ± 0.12 ^a	2.40 ± 0.12 ^a
	6	0.91 ± 0.08 ^b	1.59 ± 0.06 ^a	1.46 ± 0.06 ^a
คลอโรฟิลล์รวม (เอ และ บี)	2	6.38 ± 0.25 ^b	7.25 ± 0.20 ^a	6.62 ± 0.18 ^b
	4	6.48 ± 0.45 ^b	7.79 ± 0.28 ^a	8.39 ± 0.27 ^a
	6	3.55 ± 0.31 ^b	6.42 ± 0.22 ^a	5.94 ± 0.24 ^a
แคโรทีนอยด์	2	1.82 ± 0.07 ^c	2.13 ± 0.04 ^a	1.96 ± 0.03 ^b
	4	1.97 ± 0.09 ^b	2.21 ± 0.09 ^a	2.36 ± 0.03 ^a
	6	1.21 ± 0.10 ^b	2.05 ± 0.06 ^a	1.89 ± 0.07 ^a

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error) ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตาราง 18 ปริมาณรังควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง (มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักสด) ของพรมมิที่ปลูกด้วยสารละลายธาตุอาหารที่ pH แตกต่างกัน เมื่ออายุ 2, 4 และ 6 สัปดาห์

รังควัตถุในการสังเคราะห์ด้วยแสง	เวลา (สัปดาห์)	pH ของสารละลายธาตุอาหาร		
		5.5	6.5	7.5
คลอโรฟิลล์ เอ	2	4.71 ± 0.15 ^{ab}	4.63 ± 0.14 ^b	5.10 ± 0.14 ^a
	4	3.42 ± 0.36 ^b	3.71 ± 0.18 ^{ab}	4.26 ± 0.11 ^a
	6	5.07 ± 0.14 ^a	5.75 ± 0.24 ^a	5.62 ± 0.31 ^a
คลอโรฟิลล์ บี	2	1.45 ± 0.05 ^a	1.45 ± 0.05 ^a	1.60 ± 0.05 ^a
	4	1.11 ± 0.13 ^b	1.13 ± 0.05 ^b	1.32 ± 0.03 ^a
	6	1.78 ± 0.10 ^b	2.34 ± 0.21 ^a	2.21 ± 0.19 ^{ab}
คลอโรฟิลล์รวม (เอ และ บี)	2	6.11 ± 0.20 ^{ab}	6.03 ± 0.18 ^b	6.64 ± 0.18 ^a
	4	4.49 ± 0.49 ^b	4.80 ± 0.22 ^{ab}	5.53 ± 0.14 ^a
	6	6.80 ± 0.20 ^b	8.02 ± 0.43 ^a	7.77 ± 0.49 ^{ab}
แคโรทีนอยด์	2	1.62 ± 0.06 ^a	1.61 ± 0.05 ^a	1.73 ± 0.05 ^a
	4	1.39 ± 0.13 ^b	1.42 ± 0.06 ^b	1.65 ± 0.04 ^a
	6	1.97 ± 0.06 ^b	2.25 ± 0.09 ^a	2.20 ± 0.12 ^{ab}

หมายเหตุ: ข้อมูลในตารางคือ ค่าเฉลี่ย (mean) ± ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (standard error)

ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ไม่เหมือนกันที่อยู่ในแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่าง

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)