



ปัญหาพิเศษ

การจำแนกทางสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลของการตอบสนองของรากและใบหม่อนต่อการ
ขาดไนโตรเจนในระบบแอโรโปนิคส์

**Physiological and Biomolecular Characterization of Mulberry Root and Leaf
Responses to Nitrogen Starvation in Aeroponics**

นางสาวกัญญาณัฐ สมสกุล

ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DEPARTMENT OF AGRONOMY

FACULTY OF AGRICULTURE KASETSART UNIVERSITY



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์เกษตร)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์เกษตร

.....
พืชไร่นา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การจำแนกทางสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลของการตอบสนองของรากและใบหม่อนต่อการขาดไนโตรเจนในระบบแอโรโปนิคส์

Physiological and Biomolecular Characterization of Mulberry Root and Leaf Responses to Nitrogen Starvation in Aeroponics

นามผู้วิจัย นางสาวกัญญาณัฐ สมสกุล

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบโดย

Digitally signed by
Apidet Rakpenthai
Date: 2026.03.27
14:40:13 +07'00'

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษหลัก

(..... อภิเดช รักเป็นไทย Dr. rer. nat.)

อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษร่วม

(..... รองศาสตราจารย์สุดเขตต์ นาคะเสถียร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(..... ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปาริชาติ พรหมโชติ, Ph.D.)

วันที่ 31 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2569

ปัญหาพิเศษ

เรื่อง

การจำแนกทางสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลของการตอบสนองของรากและใบหม่อนต่อการขาด
ไนโตรเจนในระบบแอโรโปนิคส์

Physiological and Biomolecular Characterization of Mulberry Root and Leaf Responses to
Nitrogen Starvation in Aeroponics

โดย

นางสาวกัญญาณัฐ สมสกุล

เสนอ

ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DEPARTMENT OF AGRONOMY

FACULTY OF AGRICULTURE KASETSART UNIVERSITY

บทคัดย่อ

นางสาวกัญญาณัฐ สมสกุล 2569: การจำแนกทางสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลของการตอบสนองของรากและใบหม่อนต่อการขาดไนโตรเจนในระบบแอโรโปนิคส์ ปัญหาพิเศษ ปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์เกษตร ภาควิชาพืชไร่นา
อาจารย์ที่ปรึกษา: อภิเดช รักเป็นไทย Dr. rer. nat. 30 หน้า

ภาวะขาดไนโตรเจน (Nitrogen deficiency; N) ส่งผลต่อการปรับตัวของพืชทั้งในระดับสรีรวิทยาและการแสดงออกของยีน อย่างไรก็ตาม กลไกการตอบสนองระยะเริ่มต้นของหม่อน (*Morus alba* L.) ยังมีข้อมูลจำกัด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาและวิเคราะห์กลไกระดับโมเลกุลของหม่อนพันธุ์ ‘สกลนคร’ อายุ 2.5 เดือน ที่ปลูกในระบบแอโรโปนิคส์ โดยให้พืชได้รับสารละลายไนโตรเจนเต็มที่ (Full Nitrogen solution; FN) สารละลายปราศจากไนโตรเจน (Nitrogen-free solution; -N) และน้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) เป็นเวลา 14 วัน ภายใต้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) จำนวน 3 ทรีตเมนต์ ทรีตเมนต์ละ 4 ซ้ำ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการขาดไนโตรเจนทำให้ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD green index) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สะท้อนถึงการลดลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ ขณะที่น้ำหนักใบจำเพาะ (Specific Leaf Weight; SLW) และความยาวรากจำเพาะ (Specific Root Length; SRL) ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แสดงว่ายังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของใบและรากในช่วงเวลาทดลอง การวิเคราะห์ทรานสคริปโตมพบว่ายีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและลำเลียงไนโตรเจน โดยเฉพาะตระกูล *NRT1/PTR family* และ *chloroplastic chaperone protein DnaJ 20* มีการแสดงออกลดลง ขณะที่ยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียดและการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ ได้แก่ *nerolidol synthases*, *MLO-like protein 6* และทรานสคริปชันแฟกเตอร์กลุ่ม *basic helix-loop-helix (bHLH18 และ bHLH36)* มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น โดยสรุป ภายใต้สภาวะปลูกแบบแอโรโปนิคส์ที่ปราศจากไนโตรเจน หม่อนมีการปรับระดับการแสดงออกของยีนอย่างรวดเร็วก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาอย่างชัดเจน

คำสำคัญ: การขาดไนโตรเจน, ความเครียดทางสรีรวิทยา, ทรานสคริปโตมิกส์, หม่อน, แอโรโปนิคส์

กัญญาณัฐ

ลายมือชื่อนิติ



Digitally signed by
Apidet Rakpenthai
Date: 2026.03.27
14:40:54 +07'00'

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษหลัก

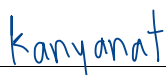
28 / 03 / 69

ABSTRACT

Kanyanat Somsakun. 2026: Physiological and Biomolecular Characterization of Mulberry Root and Leaf Responses to Nitrogen Starvation in Aeroponics. Bachelor's special problem in Agricultural Science, Department of Agronomy. Special problem advisor: Apidet Rakpenthai, Dr. rer. nat. 30 pages.

Nitrogen deficiency (N) influences plant growth and metabolism at both physiological and transcriptional levels. However, the early responses of mulberry (*Morus alba* L.) to N limitation have not been clearly described. In this study, 2.5-month-old cuttings of the 'Sakon Nakhon' cultivar were grown in an aeroponic system and exposed to full nitrogen (FN), nitrogen-free (–N), or deionized water (DI) treatments for 14 days in a completely randomized design with four replicates per treatment. Nitrogen deprivation led to a significant reduction in SPAD green index, reflecting decreased chlorophyll content. In contrast, specific leaf weight (SLW) and specific root length (SRL) were not significantly affected, indicating that leaf and root structure remained stable during the short experimental period. Transcriptome data showed that genes involved in nitrogen uptake and transport, particularly members of the *NRT1/PTR family*, together with *chloroplastic chaperone protein DnaJ 20*, were downregulated under –N conditions. At the same time, genes associated with stress responses and secondary metabolism, including *nerolidol synthases*, *MLO-like protein 6*, and *basic helix–loop–helix transcription factors (bHLH18 and bHLH36)*, were upregulated. These results suggest that, under nitrogen-free aeroponic conditions, mulberry primarily responds through early transcriptional adjustment before visible morphological changes occur.

Keywords: aeroponic, mulberry, N-deficiency, physiological stress, transcriptomic



Student's signature



Digitally signed
by Apidet
Rakpenthai
Date: 2026.03.27
14:41:26 +07'00'

Special Problem Advisor's signature

28 / 03 / 26

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ขอขอบพระคุณภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย รวมถึงขอขอบพระคุณ ดร.อภิเดช รักเป็นไทย และรองศาสตราจารย์ ดร.สุตเชตต์ นาคะเสถียร ที่ได้ให้คำแนะนำ ถ่ายทอดองค์ความรู้ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้แนวคิดและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตร ที่เอื้อเพื่อเครื่องมือ อุปกรณ์ และโรงเรือนสำหรับใช้ในการทดลอง และขอขอบพระคุณ กรมหม่อนไหม ที่ให้ความอนุเคราะห์ท่อนพันธุ์หม่อนพันธุ์ ‘สกลนคร’ สำหรับใช้ในการทดลองครั้งนี้ รวมทั้งขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจสำคัญ จนทำให้ปัญหาพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวกัญญาณัฐ สมสกุล

มีนาคม 2569

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	12
อุปกรณ์	12
วิธีการ	13
สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย	19
ผลและวิจารณ์	20
สรุป	24
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	25
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	30

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สูตรธาตุอาหารที่มีไนโตรเจนครบถ้วน (Full Nitrogen:FN)	14
2	สูตรธาตุอาหารที่ขาดธาตุไนโตรเจน (Nitrogen Free: -N)	15
3	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน(ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ของการวัดค่าทางสรีรวิทยา	21
4	ยีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น (Upregulated genes) ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน	23
5	ยีนที่มีการแสดงออกลดลง (Downregulated genes) ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน	23

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดง Volcano plot การเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีนใน สภาวะขาดไนโตรเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ โดยมียีนบางส่วนเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ	22

การจำแนกทางสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลของการตอบสนองของรากและใบหม่อน ต่อการขาดไนโตรเจนในระบบแอโรโปนิคส์

Physiological and Biomolecular Characterization of Mulberry Root and Leaf Responses to Nitrogen Starvation in Aeroponics

คำนำ

หม่อน (*Morus alba* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมหม่อนไหม และยังเป็นพืชที่มีศักยภาพด้านสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น phenolics, flavonoids, stilbenes และ alkaloids ซึ่งมีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระและด้านการอักเสบ อย่างไรก็ตาม การเจริญเติบโตและความสามารถในการสร้างสารสำคัญของพืชขึ้นอยู่กับ การได้รับธาตุอาหารอย่างเหมาะสม โดยเฉพาะไนโตรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของคลอโรฟิลล์ โปรตีน และกรดนิวคลีอิก

เมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน (Nitrogen deficiency) จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง การเจริญเติบโต และการแสดงออกของยีน รวมถึงอาจกระตุ้นการตอบสนองต่อความเครียดและการสร้างสารทุติยภูมิ อย่างไรก็ตาม กลไกการตอบสนองของหม่อนต่อสภาวะดังกล่าว โดยเฉพาะในระยะเริ่มต้นและในระบบแอโรโปนิคส์ซึ่งสามารถควบคุมธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ ยังมีข้อมูลจำกัด

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยา และวิเคราะห์กลไกระดับโมเลกุลของหม่อนพันธุ์ ‘สกลนคร’ ภายใต้สภาวะการได้รับไนโตรเจนที่แตกต่างกัน ได้แก่ สารละลายไนโตรเจนเต็มที่ สารละลายปราศจากไนโตรเจน และน้ำปราศจากไอออน เพื่อเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการปรับตัวของพืช ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจัดการธาตุอาหารและพัฒนาการผลิตหม่อนให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นในอนาคต

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการตอบสนองของหม่อนภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจนทั้งในระดับสรีรวิทยาและระดับชีวโมเลกุล รวมถึงการวิเคราะห์การแสดงออกของยีน เพื่อประเมินข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับกลไกการตอบสนองของพืชในระบบแอโรโปนิกส์

การตรวจเอกสาร

1. ความสำคัญของหม่อน (*Morus alba* L.)

หม่อน (*Morus alba* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจและพืชสมุนไพรที่มีความสำคัญในหลายมิติ ทั้งด้านอุตสาหกรรมไหม โภชนาการ และสุขภาพ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนถึงประโยชน์ทั้งในเชิงวิทยาศาสตร์และการนำไปใช้จริง (Butt et al., 2023)

1.1 ประวัติศาสตร์และการกระจายพันธุ์

หม่อนมีถิ่นกำเนิดในประเทศจีนตอนเหนือ และมีการปลูกเพื่อใช้เลี้ยงไหมมาเป็นระยะเวลากว่า 5,000 ปี ปัจจุบันมีการกระจายพันธุ์ไปทั่วโลก โดยเฉพาะในภูมิภาคเอเชีย ยุโรป และอเมริกา มีมากกว่า 1,000 สายพันธุ์ แต่ *Morus alba* เป็นสายพันธุ์หลักที่ใช้ในอุตสาหกรรมไหม (CABI, 2019) ในประเทศไทย หม่อนมีการปลูกแพร่หลายในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมไหมและเป็นสมุนไพรพื้นบ้าน (Thabti et al., 2023)

1.2 ด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม

ใบหม่อนเป็นอาหารหลักของตัวไหม (*Bombyx mori*) ซึ่งบริโภคใบหม่อนเพียงชนิดเดียวในการเจริญเติบโต ส่งผลให้หม่อนมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมไหม โดยมีการผลิตไหมทั่วโลกประมาณ 1,000–1,500 ดันต่อปี และประเทศจีนเป็นผู้ผลิตหลักคิดเป็นประมาณ 80% ของผลผลิตโลก (Butt et al., 2023) นอกจากนี้ หม่อนยังเป็นพืชที่ให้ผลผลิตใบสูงประมาณ 20–40 ดันต่อเฮกตาร์ต่อปี สามารถเก็บเกี่ยวได้ 4–6 ครั้งต่อปี และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น ความแห้งแล้ง และดินเค็ม (CABI, 2019) ในด้านการใช้ประโยชน์อื่น ๆ เนื้อไม้ของหม่อนมีความแข็งแรง เหมาะสำหรับการใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เปลือกสามารถนำไปผลิตกระดาษคุณภาพสูง และผลสามารถนำไปแปรรูปเป็นอาหาร เช่น ไวน์ หรือใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติ (Healthline, 2019) ในประเทศไทย หม่อนยังสร้างรายได้จากผลิตภัณฑ์หลากหลาย เช่น ไหมสด ใบหม่อนแห้ง และชาใบหม่อน ซึ่งมีการส่งออกไปยังประเทศจีนและญี่ปุ่น (Thabti et al., 2023)

1.3 ด้านโภชนาการและอาหาร

ผลหม่อนสุกมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยในปริมาณ 100 กรัม ให้พลังงานประมาณ 43 กิโลแคลอรี ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต 9.8 กรัม โปรตีน 1.4 กรัม วิตามินซี 36.4 มิลลิกรัม ธาตุเหล็ก 1.85 มิลลิกรัม และใยอาหาร 1.7 กรัม (Healthline, 2019) นอกจากนี้ หม่อนยังอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น Resveratrol, Anthocyanins และ Flavonoids ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ช่วยลดการอักเสบและระดับคอเลสเตอรอลในเลือด (Butt et al., 2023) ในด้านการบริโภค ใบอ่อน

สามารถนำไปชงชาแทนชาเขียวหรือใช้ประกอบอาหาร เช่น ผัดหรือต้มจืด ส่วนผลหม่อนสามารถนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เช่น แยม ไวน์ และไอศกรีม (Thabti et al., 2023)

1.4 ด้านเภสัชวิทยาและสุขภาพ

หม่อนมีศักยภาพสูงในด้านเภสัชวิทยา โดยเฉพาะใบหม่อนที่มีสารสำคัญ เช่น 1-deoxynojirimycin (DNJ) ซึ่งสามารถยับยั้งเอนไซม์ α -glucosidase และช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดหลังอาหาร จึงมีประโยชน์ต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน (Thabti et al., 2023) ส่วนผลและรากของหม่อนมีรายงานว่าสามารถต้านมะเร็ง ลดไขมันในเลือด และลดการอักเสบของตับ รวมถึงมีสารสำคัญ เช่น Quercetin และ Rutin ที่ช่วยป้องกันโรคหัวใจ (Herbal Reality, 2025) นอกจากนี้ กิ่งและเปลือกของหม่อนยังมีฤทธิ์ต้านจุลชีพ ต้านไวรัส และช่วยลดอาการอักเสบ โดยมีการใช้ในแพทย์แผนจีนเพื่อบำรุงร่างกาย (Butt et al., 2023) ทั้งนี้ งานวิจัยแบบ meta-analysis ยังยืนยันว่าหม่อนสามารถช่วยลดค่า HbA1c ในผู้ป่วยเบาหวานได้ อย่างไรก็ตาม ควรบริโภคในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากอาจเกิดผลข้างเคียง เช่น อาการท้องเสีย (Wang et al., 2016; Herbal Reality, 2025)

2. หม่อนพันธุ์ “สกลนคร”

หม่อนพันธุ์สกลนครเป็นสายพันธุ์ที่พัฒนาโดยกรมหม่อนไหม เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดสกลนคร ซึ่งมีสภาพแห้งแล้งและอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก พันธุ์นี้มีลักษณะเด่นด้านการให้ผลผลิตสูง ทนแล้ง และสามารถปรับตัวได้ดีต่อสภาพแวดล้อม (QSASRD, 2020)

2.1 ลักษณะพันธุ์กรรมและการพัฒนา

หม่อนพันธุ์สกลนครได้รับการรับรองพันธุ์ในปี พ.ศ. 2547 โดยเกิดจากการผสมระหว่างพันธุ์คุณไผ่ (tetraploid; $2n=56$ เพศเมีย) กับพันธุ์ลูน 40 ($2n=28$ เพศผู้) ซึ่งให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ประมาณ 30% (DOA, n.d.) ต่อมาได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ต่อเนื่องเป็นพันธุ์สกลนคร 85 (SKN-M95-2-10) โดยผสมระหว่างพันธุ์คุณไผ่ ($2n=56$) กับพันธุ์โคเชน ($2n=28$) และผ่านการทดสอบที่ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร พบว่ามีความต้านทานโรครากเน่าใกล้เคียงกับพันธุ์คุณไผ่ (QSASRD, 2022)

2.2 คุณสมบัติทางการเกษตรและการปรับตัว

หม่อนพันธุ์สกลนครมีความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมได้ดี โดยเฉพาะในพื้นที่แห้งแล้งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สามารถเจริญเติบโตได้ดีภายใต้ระบบเกษตรอาศัยน้ำฝน อีกทั้งยังมีความทนทานต่อโรครากเน่าและดินเค็ม นอกจากนี้ ใบหม่อนมีคุณภาพดีและมีปริมาณ

โปรตีนสูง เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงไหมอุตสาหกรรม (*Bombyx mori*) ส่งผลให้สามารถเพิ่มผลผลิต และคุณภาพของเส้นไหมได้

2.3 การเจริญเติบโตและผลผลิต

หม่อนพันธุ์สกกลนครมีอัตราการเจริญเติบโตดี สามารถออกรากได้ง่ายเมื่อปักชำกิ่งแขนงที่มีอายุประมาณ 5 เดือนขึ้นไป และสามารถปลูกด้วยท่อนพันธุ์โดยตรงได้ (กรมหม่อนไหม, 2020) ในด้านผลผลิต พบว่าสามารถเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรในพื้นที่จังหวัดสกกลนครได้ประมาณ 20–30% เมื่อเทียบกับพันธุ์เดิม และกรมหม่อนไหมแนะนำให้ปลูกร่วมกับพันธุ์ศรีสะเกษ 84 ในฤดูแล้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Manager Online, 2020)

2.4 การขยายพันธุ์และการปลูก

การขยายพันธุ์หม่อนพันธุ์สกกลนครนิยมใช้วิธีการปักชำกิ่งแขนงหรือท่อนพันธุ์ โดยปลูกในระยะ 2×2 เมตร ในดินร่วนที่มีค่า pH ประมาณ 6–7 ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และสามารถเริ่มเก็บเกี่ยวใบได้ในรอบที่ 4 ภายในปีแรก (QSASRD, 2020) พันธุ์นี้ยังได้รับการส่งเสริมให้ปลูกในพื้นที่หมู่บ้านหม่อนไหม เพื่อใช้เลี้ยงไหมและรองรับการส่งออกไปยังประเทศจีนและญี่ปุ่น

2.5 บทบาทต่อเศรษฐกิจและชุมชน

หม่อนพันธุ์สกกลนครมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจชุมชน โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดสกกลนคร ซึ่งมีการนำไปพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตรและผลิตภัณฑ์ OTOP เช่น สวนหม่อนไหมที่เป็นแหล่งเรียนรู้และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตร

3. บทบาทของไนโตรเจนต่อพืช

3.1 บทบาทของไนโตรเจนในระดับโครงสร้างและสรีรวิทยา

ไนโตรเจน (Nitrogen; N) เป็นธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างพื้นฐานของพืช เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของสารชีวโมเลกุลที่จำเป็น เช่น กรดอะมิโน โปรตีน กรดนิวคลีอิก (DNA และ RNA) คลอโรฟิลล์ และโคเอนไซม์ต่าง ๆ ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมและการเจริญเติบโตของพืช (Taiz et al., 2015; Marschner, 2012) ไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์และเอนไซม์ Rubisco ซึ่งทำหน้าที่ในการตรึงคาร์บอนในกระบวนการ Calvin cycle ส่งผลโดยตรงต่ออัตราการสังเคราะห์แสงและการสะสมชีวมวลของพืช (Evans, 1989) นอกจากนี้ ปริมาณไนโตรเจนในใบยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์และประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสง ในระดับการเจริญเติบโต ไนโตรเจนมีผลต่อการแบ่งเซลล์ การขยายขนาดของเซลล์ และการพัฒนาอวัยวะ เช่น ใบ ลำต้น และราก โดยพืชที่ได้รับไนโตรเจนอย่างเพียงพอจะมีการเจริญเติบโตดี ใบมีสีเขียวเข้ม และมีผลผลิตสูง

ในขณะที่การขาดไนโตรเจนจะทำให้พืชมีอาการใบเหลือง (Chlorosis) และการเจริญเติบโตลดลง (Xu et al., 2012; Anas et al., 2020)

3.2 การดูดซึม การลำเลียง และการควบคุมไนโตรเจนในพืช

พืชสามารถดูดซึมไนโตรเจนได้ในรูปของไนเตรต (NO_3^-) และแอมโมเนียม (NH_4^+) ผ่านระบบราก โดยอาศัยโปรตีนลำเลียงเฉพาะ เช่น Nitrate transporters (NRT) และ Ammonium transporters (AMT) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการนำเข้าไนโตรเจนเข้าสู่เซลล์ (Tsay et al., 2007) หลังจากการดูดซึม ไนโตรเจนจะถูกลำเลียงไปยังส่วนต่าง ๆ ของพืช และเข้าสู่กระบวนการ Assimilation โดยถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะมิโน เช่น Glutamine และ Glutamate ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์โปรตีนและสารชีวโมเลกุลอื่น ๆ (Xu et al., 2012) นอกจากนี้ ไนโตรเจนยังทำหน้าที่เป็นสัญญาณ (Signaling molecule) ที่ควบคุมการแสดงออกของยีนและกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืช เช่น การปรับโครงสร้างระบบรากและการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่มีไนโตรเจนแตกต่างกัน โดยยีนในกลุ่ม NRT1/PTR Family มีบทบาทสำคัญในการควบคุมสมดุลไนโตรเจนภายในพืช (O'Brien et al., 2016; Wang et al., 2012) ดังนั้น การดูดซึมและการควบคุมไนโตรเจนจึงเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจน (Nitrogen Use Efficiency; NUE) และการเจริญเติบโตของพืชในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

4. ผลของการขาดไนโตรเจนต่อพืช

4.1 ผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและสัณฐานวิทยา

การขาดไนโตรเจน (Nitrogen deficiency) เป็นปัจจัยสำคัญที่จำกัดการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากไนโตรเจนมีบทบาทต่อการแบ่งเซลล์และการสังเคราะห์โปรตีน เมื่อไนโตรเจนไม่เพียงพอจะทำให้อัตราการแบ่งเซลล์และการขยายตัวของเซลล์ลดลง ส่งผลให้พืชมีขนาดเล็กลง การเจริญเติบโตชะงัก และผลผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (Marschner, 2012; Xu et al., 2012) ลักษณะอาการที่พบได้ชัดคือ ใบมีสีเหลือง (Chlorosis) โดยเฉพาะใบแก่ เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุที่เคลื่อนย้ายได้ภายในพืช (Mobile nutrient) ทำให้พืชเคลื่อนย้ายไนโตรเจนจากใบแก่ไปยังใบอ่อนเพื่อรักษาการเจริญเติบโตของส่วนยอด (Taiz et al., 2015) นอกจากนี้ยังพบว่าพื้นที่ใบลดลง ความหนาของใบลดลง ลำต้นพอง และจำนวนใบลดลง ในบางกรณี ระบบรากของพืชอาจมีการปรับตัว เช่น การเพิ่มความยาวรากหรือเพิ่มสัดส่วนรากต่อยอด (Root-to-shoot ratio) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดธาตุอาหารจากดิน ซึ่งเป็นกลไกการปรับตัวเพื่อความอยู่รอดภายใต้สภาวะขาดธาตุอาหาร (Hermans et al., 2006)

4.2 ผลกระทบต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของคลอโรฟิลล์และโปรตีนในคลอโรพลาสต์ เมื่อพืชขาดไนโตรเจนจะส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ทำให้ความสามารถในการดูดซับแสงลดลง และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลง (Evans, 1989) นอกจากนี้ เอนไซม์ Rubisco ซึ่งเป็นเอนไซม์หลักในการตรึงคาร์บอนมีปริมาณลดลงภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน ส่งผลให้กระบวนการ Calvin cycle ทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และลดการสร้างน้ำตาลและคาร์โบไฮเดรตในพืช (Lawlor, 2002) การลดลงของไนโตรเจนยังส่งผลต่อโครงสร้างและหน้าที่ของคลอโรพลาสต์ เช่น การเสื่อมสภาพของ Thylakoid membrane และการลดลงของ Electron Transport Rate ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานแสงลดลง (Makino & Osmond, 1991)

4.3 ผลกระทบต่อกระบวนการทางสรีรวิทยาและเมแทบอลิซึม

ภาวะขาดไนโตรเจนส่งผลให้สมดุลระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N balance) ภายในพืชเปลี่ยนแปลง โดยการสังเคราะห์โปรตีนลดลง ขณะที่มีการสะสมของคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง และน้ำตาลเพิ่มขึ้น (Scheible et al., 2004) นอกจากนี้ ยังส่งผลให้กระบวนการเมแทบอลิซึมหลัก เช่น Nitrogen assimilation และ Amino acid metabolism ลดลง ทำให้การสร้างโครงสร้างและเอนไซม์ภายในเซลล์ลดลง ภายใต้สภาวะดังกล่าว พืชมักเกิด Oxidative stress จากการสะสมของ Reactive Oxygen Species (ROS) เช่น Superoxide radicals และ Hydrogen peroxide ซึ่งสามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ โปรตีน และ DNA ได้ หากไม่มีระบบ Antioxidant ที่เพียงพอ (Tewari et al., 2007; Foyer & Noctor, 2005)

4.4 การตอบสนองระดับชีวโมเลกุลและการแสดงออกของยีน

ในระดับโมเลกุล การขาดไนโตรเจนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและลำเลียงไนโตรเจน เช่น *Nitrate transporter (NRT)* และ *Ammonium transporter (AMT)* ซึ่งมีการปรับลดหรือเพิ่มการแสดงออกขึ้นอยู่กับสภาวะของพืช (O'Brien et al., 2016; Wang et al., 2012) นอกจากนี้ ยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียด เช่น Transcription factors (เช่น *bHLH*, *MYB*) และยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันความเสียหายของเซลล์ มักมีการแสดงออกเพิ่มขึ้น การขาดไนโตรเจนยังส่งผลต่อการกระตุ้นเส้นทาง Phenylpropanoid pathway ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างสารทุติยภูมิ เช่น Phenolics, Flavonoids และ Lignin ซึ่งมีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระและช่วยป้องกันความเสียหายจากความเครียด (Dixon & Paiva, 1995; Fritz et al., 2006)

4.5 การปรับตัวของพืชต่อภาวะขาดไนโตรเจน

พืชมีการปรับตัวต่อภาวะขาดไนโตรเจนในหลายระดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ไนโตรเจน (Nitrogen Use Efficiency; NUE) เช่น การเพิ่มสัดส่วนรากต่อยอด การเพิ่มความยาวราก และการเพิ่มพื้นที่ผิวราก เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซึมธาตุอาหาร (Xu et al., 2012) ในระดับสรีรวิทยา พืชอาจลดการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดิน และเพิ่มการจัดสรรทรัพยากรไปยังระบบราก ขณะที่ในระดับโมเลกุลมีการควบคุมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและการใช้ไนโตรเจนอย่างมีประสิทธิภาพ (Anas et al., 2020) นอกจากนี้ พืชยังสามารถปรับเมแทบอลิซึมไปสู่การสร้างสารทุติยภูมิและสารป้องกันความเครียด เพื่อเพิ่มความสามารถในการอยู่รอดภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจนจำกัด (Hermans et al., 2006)

5. Phenylpropanoid pathway และการสร้างสารทุติยภูมิ

5.1 ความสำคัญของสารทุติยภูมิในพืช

สารทุติยภูมิ (secondary metabolites) เป็นสารประกอบที่พืชสังเคราะห์ขึ้นซึ่งไม่ได้เกี่ยวข้องโดยตรงกับการเจริญเติบโตพื้นฐาน แต่มีบทบาทสำคัญในการป้องกันตนเองจากความเครียดทางชีวภาพและสิ่งแวดล้อม เช่น การต้านอนุมูลอิสระ การป้องกันเชื้อโรค และการป้องกันแมลง (Taiz et al., 2015; Wink, 2010) กลุ่มสารทุติยภูมิที่สำคัญ ได้แก่ Phenolic compounds, Flavonoids, Lignin และ Anthocyanins ซึ่งมีบทบาทในการลดความเสียหายจาก Reactive Oxygen Species (ROS) และช่วยเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างเซลล์พืช (Foyer & Noctor, 2005)

5.2 Phenylpropanoid pathway

Phenylpropanoid pathway เป็นเส้นทางเมแทบอลิซึมหลักที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารประกอบฟีนอลิกในพืช โดยเริ่มต้นจากกรดอะมิโน Phenylalanine ซึ่งถูกเปลี่ยนโดยเอนไซม์ Phenylalanine Ammonia-Lyase (PAL) ไปเป็น Cinnamic acid และเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์สารทุติยภูมิต่าง ๆ (Dixon & Paiva, 1995) ในเส้นทางนี้ ยังมีเอนไซม์สำคัญอื่น ๆ เช่น Chalcone synthase (CHS) และ Chalcone isomerase (CHI) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้าง Flavonoids และ Anthocyanins ที่มีบทบาทในการต้านอนุมูลอิสระและป้องกันความเครียด (Vogt, 2010) สารที่ได้จากเส้นทางนี้ เช่น lignin มีบทบาทในการเสริมความแข็งแรงของผนังเซลล์ ขณะที่ Flavonoids และ Phenolics มีบทบาทในการป้องกันความเสียหายจากรังสี UV และ Oxidative stress

5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างไนโตรเจนกับการสร้างสารทุติยภูมิ

ระดับไนโตรเจนในพืชมีผลโดยตรงต่อการควบคุม phenylpropanoid pathway โดยภายใต้สภาวะที่พืชได้รับไนโตรเจนเพียงพอ พืชมักใช้ทรัพยากรไปกับการเจริญเติบโตและการสังเคราะห์

โปรตีนในทางตรงกันข้าม เมื่อพืชอยู่ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N balance) ส่งผลให้คาร์บอนส่วนเกินถูกนำไปใช้ในการสร้างสารทุติยภูมิ เช่น phenolics และ flavonoids มากขึ้น (Hermans et al., 2006; Fritz et al., 2006) การขาดไนโตรเจนยังสามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับ phenylpropanoid pathway เช่น PAL, CHS และ CHI ส่งผลให้มีการสะสมสารต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการตอบสนองต่อความเครียดของพืช (Dixon & Paiva, 1995)

5.4 บทบาทในการตอบสนองต่อความเครียดของพืช

Phenylpropanoid pathway มีบทบาทสำคัญในการตอบสนองต่อความเครียดทั้งแบบชีวภาพและกายภาพ เช่น การขาดธาตุอาหาร ความเค็ม ความแห้งแล้ง และการติดเชื้อภายใต้สภาวะความเครียด พืชมักเพิ่มการสังเคราะห์สารฟีนอลิกและ Flavonoids ซึ่งมีคุณสมบัติเป็น Antioxidant ช่วยลดความเสียหายจาก ROS และป้องกันการเกิด Oxidative damage ภายในเซลล์ (Foyer & Noctor, 2005) สารบางชนิด เช่น Lignin ยังช่วยเพิ่มความแข็งแรงของผนังเซลล์ ทำให้พืชสามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมได้ดีขึ้น (Vogt, 2010)

6. การตอบสนองระดับสรีรวิทยาและชีวโมเลกุล

6.1 การตอบสนองระดับสรีรวิทยา

พืชมีการตอบสนองต่อสภาวะขาดไนโตรเจนในระดับสรีรวิทยาอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโต การลดลงของไนโตรเจนส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ทำให้ใบมีสีซีดหรือเหลือง และส่งผลให้ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD chlorophyll index) ลดลง ซึ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงที่ลดลง (Uddling et al., 2007; Evans, 1989) การขาดไนโตรเจนยังส่งผลต่อโครงสร้างของพืช เช่น การลดลงของพื้นที่ใบ ความหนาแน่นของใบ (Specific Leaf Weight; SLW) และการเปลี่ยนแปลงของระบบราก เช่น การเพิ่มความยาวรากจำเพาะ (Specific Root Length; SRL) เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดธาตุอาหาร (Poorter et al., 2009) ในด้านการจัดสรรทรัพยากร พืชมักมีการเพิ่มสัดส่วนรากต่อยอด (root-to-shoot ratio) ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหารจากสิ่งแวดล้อม (Hermans et al., 2006) นอกจากนี้ยังพบว่าการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดินลดลง ขณะที่ระบบรากมีการปรับตัวเพื่อรองรับสภาวะขาดธาตุอาหาร

6.2 การตอบสนองระดับชีวโมเลกุล

ในระดับชีวโมเลกุล พืชมีการตอบสนองต่อการขาดไนโตรเจนผ่านการเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีน (Gene expression) อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึม

การลำเลียง และการใช้ในโตรเจน เช่น Nitrate transporters (NRT) และ Ammonium transporters (AMT) ซึ่งมีบทบาทในการควบคุมสมดุลไนโตรเจนภายในพืช (Tsay et al., 2007; O'Brien et al., 2016) นอกจากนี้ ยังพบว่ากรดไนโตรเจนสามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียด เช่น Transcription factors ในกลุ่ม basic Helix–Loop–Helix (bHLH), MYB และ WRKY ซึ่งมีบทบาทในการควบคุมเครือข่ายยีนที่เกี่ยวข้องกับการปรับตัวของพืช (Wang et al., 2012) การวิเคราะห์ในระดับ Transcriptome ยังแสดงให้เห็นว่าการขาดไนโตรเจนสามารถกระตุ้นหรือยับยั้งยีนจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึม เช่น การสังเคราะห์โปรตีน การสังเคราะห์แสง และการสร้างสารทุติยภูมิ (Scheible et al., 2004)

6.3 ความเชื่อมโยงระหว่างระดับสรีรวิทยาและชีวโมเลกุล

การตอบสนองของพืชต่อการขาดไนโตรเจนมีความเชื่อมโยงกันระหว่างระดับสรีรวิทยาและระดับชีวโมเลกุล โดยการเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีนจะนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในกระบวนการทางสรีรวิทยา เช่น การลดลงของคลอโรฟิลล์ การลดอัตราการสังเคราะห์แสง และการปรับโครงสร้างของพืช ในระยะเริ่มต้นของการขาดไนโตรเจน การเปลี่ยนแปลงมักเกิดขึ้นในระดับโมเลกุลก่อน เช่น การปรับการแสดงออกของยีนและการส่งสัญญาณภายในเซลล์ จากนั้นจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับสรีรวิทยาและสัณฐานวิทยา (Krapp et al., 2014) ดังนั้น การศึกษาการตอบสนองของพืชทั้งในระดับสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลจึงมีความสำคัญในการทำความเข้าใจกลไกการปรับตัวของพืชต่อสภาวะขาดไนโตรเจน และสามารถนำไปใช้ในการพัฒนาการจัดการธาตุอาหารและการปรับปรุงพันธุ์พืชให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

7. ระบบแอโรโพนิกส์ในการศึกษาพืช

7.1 หลักการของระบบแอโรโพนิกส์

ระบบแอโรโพนิกส์ (Aeroponics) เป็นวิธีการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน โดยรากพืชจะถูกแขวนลอยอยู่ในอากาศ และได้รับน้ำและธาตุอาหารในรูปของละอองฝอย (nutrient mist) ซึ่งช่วยให้รากสามารถรับออกซิเจนได้อย่างเต็มที่ ส่งผลให้เกิดประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำและธาตุอาหารสูง (Lakhari et al., 2018) ระบบนี้แตกต่างจากการปลูกแบบดั้งเดิมและระบบไฮโดรโพนิกส์ เนื่องจากไม่มีวัสดุปลูก ทำให้สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อม เช่น ความเข้มข้นของธาตุอาหาร ค่า pH และความชื้น ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้เหมาะสำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์ (Barak et al., 1996)

7.2 ข้อดีของระบบแอโรโพนิกส์ในการวิจัยพืช

ระบบแอโรโพนิกส์มีข้อดีหลายประการที่ทำให้เหมาะสมสำหรับการศึกษาด้านสรีรวิทยาและชีวโมเลกุลของพืช โดยสามารถควบคุมองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารได้

อย่างแม่นยำ และสามารถปรับเปลี่ยนสภาวะธาตุอาหาร เช่น การขาดไนโตรเจน ได้โดยตรง นอกจากนี้ การไม่มีดินช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์และความแปรปรวนของสภาพดิน ทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือและสามารถทำซ้ำได้ (Ritter et al., 2001) อีกทั้งยังสามารถสังเกตและเก็บตัวอย่างรากได้ง่ายโดยไม่ทำลายโครงสร้างของราก ระบบแอโรโปนิคส์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้น้ำและธาตุอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมการให้สารอาหารได้ตรงตามความต้องการของพืช และลดการสูญเสียจากการชะล้าง (Lakhari et al., 2018)

7.3 การประยุกต์ใช้ในการศึกษาการขาดธาตุอาหาร

ระบบแอโรโปนิคส์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการศึกษาผลของการขาดธาตุอาหาร โดยเฉพาะไนโตรเจน เนื่องจากสามารถกำหนดสูตรสารละลายให้มีหรือไม่มีธาตุอาหารเฉพาะชนิดได้อย่างชัดเจน การศึกษาหลายงานพบว่า การใช้ระบบแอโรโปนิคส์ช่วยให้สามารถตรวจสอบการตอบสนองของพืชต่อการขาดไนโตรเจนได้อย่างแม่นยำ ทั้งในระดับสรีรวิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์และการเจริญเติบโต และในระดับชีวโมเลกุล เช่น การแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและลำเลียงไนโตรเจน (Zhang et al., 2016)

7.4 ข้อจำกัดของระบบแอโรโปนิคส์

แม้ว่าระบบแอโรโปนิคส์จะมีข้อดีหลายประการ แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความซับซ้อนของระบบ การควบคุมอุปกรณ์ เช่น หัวฟั่นละอองและปั๊ม ซึ่งหากเกิดความขัดข้องอาจส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเจริญเติบโตของพืชได้ ระบบแอโรโปนิคส์อาจไม่สามารถสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงในแปลงปลูกได้ทั้งหมด เช่น ปฏิสัมพันธ์ระหว่างรากกับดินหรือจุลินทรีย์ในดิน (Lakhari et al., 2018)

7.5 ความสำคัญต่อการศึกษาพืชหม่อน

การใช้ระบบแอโรโปนิคส์ในการศึกษาพืชหม่อนช่วยให้สามารถควบคุมปัจจัยด้านธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะไนโตรเจน ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและช่วยให้สามารถศึกษาการตอบสนองของรากและใบได้อย่างชัดเจน ทั้งในระดับสรีรวิทยาและระดับชีวโมเลกุล เช่น การเปลี่ยนแปลงของคลอโรฟิลล์และการแสดงออกของยีน ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการทำนายและเข้าใจกลไกการปรับตัวของหม่อนต่อสภาวะขาดไนโตรเจน

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุพืชทดลอง

- 1.1 ใช้ท่อนพันธุ์หม่อน (*Morus alba* L.) พันธุ์ “สกลนคร” ระยะเวลาการปลูก 2.5 เดือน

2. ระบบปลูกและอุปกรณ์

- 2.1 ระบบแอโรโพนิกส์แบบแนวตั้ง (Vertical aeroponic system)
- 2.2 ถังเก็บสารละลายธาตุอาหาร
- 2.3 ปืนน้ำและหัวพ่นละออง (mist nozzle)
- 2.4 ท่อส่งสารละลาย
- 2.5 เครื่องวัด pH
- 2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล
- 2.7 ตู้บลมร้อน
- 2.8 เครื่องวัดค่า SPAD Index
- 2.9 อุปกรณ์วัดความยาวราก (ไม้บรรทัด)

3. สารละลายธาตุอาหาร

- 3.1 สารละลายธาตุอาหารประกอบด้วย Macronutrients และ Micronutrients
- 3.2 ปรับค่า pH ของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 6.5

4. อุปกรณ์วิเคราะห์ระดับชีวโมเลกุล

- 4.1 ชุดสกัด RNA
- 4.2 Liquid nitrogen
- 4.3 เครื่อง Centrifuge
- 4.4 เครื่อง PCR และอุปกรณ์ Reverse transcription
- 4.5 อุปกรณ์เตรียม Library
- 4.6 เครื่อง RNA sequencing (RNA-seq)

วิธีการทดลอง

1. วัสดุพืชและการเตรียมท่อนพันธุ์

การทดลองใช้ท่อนพันธุ์หม่อน (*Morus alba* L.) พันธุ์ “สกลนคร” ซึ่งได้รับจากกรมหม่อนไหม คัดเลือกท่อนพันธุ์ที่มีความสมบูรณ์ แข็งแรง และมีตาข้างจำนวน 4 ตา จากนั้นนำท่อนพันธุ์มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดเพื่อลบล้างสกปรกและสิ่งปนเปื้อน

ท่อนพันธุ์ที่คัดเลือกแล้วนำไปแช่ในสารป้องกันและกำจัดโรคพืชคาร์เบนดาซิมร่วมกับสารเร่งรากฟูจิสตาร์ท เป็นระยะเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นนำท่อนพันธุ์ไปบ่มเพื่อกระตุ้นการแตกตาข้างและการเกิดราก โดยวางท่อนพันธุ์ไว้ในที่มีด คลุมด้วยผ้าชุบน้ำ และพ่นน้ำสะอาดทุก ๆ 2 วัน เป็นระยะเวลาประมาณ 7 วัน หรือจนเริ่มสังเกตเห็นการเจริญของตาข้างและราก

2. การติดตั้งระบบปลูกพืชแบบแอโรโปนิคส์

ทำการประกอบระบบปลูกพืชแนวตั้งแบบแอโรโปนิคส์จำนวน 3 ชุด ณ โรงเรือนทดลอง คณะเกษตร หลังจากนั้นนำท่อนพันธุ์หม่อนที่ผ่านการบ่มเพาะแล้วใส่ลงในวัสดุปลูกชนิดฟองน้ำ และติดตั้งลงในช่องปลูกของระบบแอโรโปนิคส์ โดยจัดให้ระบบรากของพืชลอยอยู่ในอากาศ เพื่อให้รากพืชได้รับความชื้นและออกซิเจนอย่างเพียงพอตลอดระยะเวลาการทดลอง

3. การเตรียมสารละลายธาตุอาหาร

สารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากสารเคมีที่เป็นธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง โดยเริ่มจากการชั่งตวงสารแต่ละชนิดตามปริมาณที่คำนวณไว้ จากนั้นนำไปละลายในน้ำ DI เพื่อปรับปริมาตรให้ได้สารละลายตั้งต้น (Stock solution) สารละลายตั้งต้นที่เตรียมแล้วนำไปเก็บรักษาในตู้เก็บสารเคมีเพื่อใช้ในการผสมสารละลายธาตุอาหารสำหรับการทดลอง

4. การผสมสารละลายธาตุอาหารและการจัดการวิธีการทดลอง

เตรียมน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตรรวม 120 ลิตร แบ่งใส่ถังบรรจุจำนวน 3 ถัง ถึงละ 40 ลิตร จากนั้นนำสารละลายตั้งต้นมาผสมในถังน้ำ DI จำนวน 2 ถัง ตามปริมาณที่คำนวณไว้ให้ครบทุกธาตุอาหาร เพื่อใช้เป็นกรรมวิธีที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ (Full nitrogen; FN) ขณะที่อีก 1 ถังใช้เป็นกรรมวิธีควบคุมโดยใช้น้ำ DI ไม่เติมสารละลายธาตุอาหาร (DI water) เป็นเวลา 2.5 เดือน สำหรับการทดลองภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน (Nitrogen-Free; N-Free) ทำการตัดธาตุไนโตรเจนออกจากสูตรสารละลายธาตุอาหาร โดยเปลี่ยนสารประกอบที่เป็นแหล่งไนโตรเจนเป็นสารประกอบที่ไม่มีไนโตรเจน เพื่อคงระดับของธาตุอาหารอื่นให้เท่ากับกรรมวิธี FN ทั้งนี้ สูตรสารละลายธาตุอาหารขั้นสุดท้ายของแต่ละกรรมวิธีแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 หลังจากผสมสารละลายธาตุอาหารแล้ว ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้อยู่ในช่วงประมาณ 6.5

โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นนำสารละลายไปใส่ในถังของระบบปลูกแอโรโปนิกส์

ตารางที่ 1 สูตรธาตุอาหารที่มีไนโตรเจนครบถ้วน (Full Nitrogen:FN)

Compound	Final Concentration	Volume of Stock Solution for 40 L
Macronutrients	(Mol/L)	mL
KNO ₃	0.002	200
Ca(NO ₃) ₂	0.002	200
MgSO ₄	0.001	200
KH ₂ PO ₄	0.00067	200
Micronutrients		
NaCl	0.00005	200
C ₁₀ H ₁₂ N ₂ NaFeO ₈	0.00005	200
MnSO ₄	0.000005	100
CuSO ₄	0.0000005	100
ZnSO ₄	0.0000005	100
H ₃ BO ₃	0.00000165	10
Na ₂ MoO ₄	0.0000001	100
CoSO ₄	0.00000005	100
NiSO ₄	0.00000005	100

ที่มา: (Tewari et al., 2007)

ตารางที่ 2 สูตรธาตุอาหารที่ขาดธาตุไนโตรเจน (Nitrogen Free: -N)

Compound	Final Concentration	Volume of Stock
		Solution for 40 L
Macronutrients	(Mol/L)	mL
K ₂ SO ₄	0.002	200
CaCl ₂	0.002	200
MgSO ₄	0.001	200
KH ₂ PO ₄	0.00067	200
Micronutrients		
NaCl	0.00005	200
C ₁₀ H ₁₂ N ₂ NaFeO ₈	0.00005	200
MnSO ₄	0.000005	100
CuSO ₄	0.0000005	100
ZnSO ₄	0.0000005	100
H ₃ BO ₃	0.00000165	10
Na ₂ MoO ₄	0.0000001	100
CoSO ₄	0.00000005	100
NiSO ₄	0.00000005	100

ที่มา: (Tewari et al., 2007)

5. แผนการทดลองและระยะเวลาการทดลอง

การทดลองวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยประกอบด้วย 3 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ (Full Nitrogen solution; FN) กรรมวิธีที่ใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) และกรรมวิธีขาดไนโตรเจน (Nitrogen-free solution; -N) โดยแต่ละกรรมวิธีมีจำนวน 4 ซ้ำ การทดลองดำเนินการโดยใช้พืชหม่อนอายุ 2 เดือน และให้พืชได้รับทริตเมนต์เป็นระยะเวลา 14 วัน ภายใต้ระบบแอโรโปนิคส์ โดยมีการเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารตามระยะเวลาที่กำหนด (ตารางที่ 2) และควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช

6. การเก็บตัวอย่างและการเก็บข้อมูลผลการทดลอง

ทำการเก็บข้อมูลเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง โดยเก็บตัวอย่างพืชจากทุกกรรมวิธีและทุกซ้ำอย่างสม่ำเสมอ

6.1. การวัดค่า SPAD Green Index

ทำการวัดค่า SPAD Green Index เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดดัชนีความเขียวในใบหม่อน โดยเลือกวัดจากใบหม่อนที่มีการเจริญเติบโตสมบูรณ์ในตำแหน่งเดียวกันของแต่ละต้น เพื่อให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกัน จากนั้นทำการวัดค่า SPAD ด้วยเครื่องวัดแบบพกพา และบันทึกค่าที่ได้เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ

6.2 การวัดค่า Specific Leaf Weight (SLW)

ทำการวัดค่า Specific Leaf Weight (SLW) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดความหนาและความหนาแน่นของใบหม่อน โดยดำเนินการดังนี้

เลือกใบหม่อนที่มีการเจริญเติบโตสมบูรณ์จากตำแหน่งเดียวกันของแต่ละต้น คือ ใบยอดที่กางเต็มที่ (Uppermost fully expanded leaf) เพื่อให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกัน จากนั้นใช้เครื่องเจาะใบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตร เจาะแผ่นใบจำนวน 3 รูต่อหนึ่งตัวอย่าง โดยหลีกเลี่ยงเส้นกลางใบ แผ่นใบที่ได้จากการเจาะนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ แล้วนำมาชั่งน้ำหนักแห้งรวมของแผ่นใบทั้ง 3 รู (กรัม)

- พื้นที่ของแผ่นใบที่ใช้ในการคำนวณคำนวณจากสูตรพื้นที่วงกลม

$$A = \pi r^2$$

- เส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะเท่ากับ 0.6 เซนติเมตร ทำให้รัศมี (r) เท่ากับ 0.3 เซนติเมตร พื้นที่ของแผ่นใบ 1 รูเท่ากับ

$$A = 3.1416 \times (0.3)^2 = 0.2827 \text{ cm}^2$$

- พื้นที่รวมของแผ่นใบ 3 รูเท่ากับ 0.849 cm² ซึ่งเป็นพื้นที่ใบจริงที่ใช้ในการคำนวณค่า SLW
ค่า Specific Leaf Weight (SLW) คำนวณจากสูตร

$$SLW = \frac{\text{น้ำหนักแห้งรวมของแผ่นใบ 3 รู (g)}}{0.849} \times 1000$$

โดยคูณ 1000 เพื่อแปลงหน่วยจากกรัมเป็นมิลลิกรัม ผลลัพธ์แสดงค่าเป็นหน่วย มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (mg/cm²)

6.3.การวัดค่า Specific Root Length (SRL)

ทำการวัดค่า Specific Root Length (SRL) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดลักษณะการเจริญของระบบราก โดยทำการนำต้นหม่อนออกจากระบบแอโรโปนิกส์อย่างระมัดระวัง จากนั้นล้างรากด้วยน้ำสะอาด เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสารละลายที่ติดอยู่ โดยหลีกเลี่ยงการทำให้รากขาดหรือเสียหาย

ทำการวัดความยาวรากทั้งหมดของแต่ละต้น แล้วนำรากไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักรากแห้ง

ค่า Specific Root Length (SRL) คำนวณจากอัตราส่วนของความยาวรากทั้งหมดต่อมวลรากแห้ง โดยแสดงค่าเป็นหน่วยเมตรต่อกรัม (m/g)

7. การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์การแสดงออกของยีน

7.1 การเก็บตัวอย่างพืช

หลังจากสิ้นสุดการให้ทริตเมนต์เป็นระยะเวลา 14 วัน ทำการเก็บตัวอย่างใบและรากของหม่อนจากแต่ละกรรมวิธี โดยเลือกใบที่พัฒนาเต็มที่และมีตำแหน่งใกล้เคียงกันในแต่ละต้น เพื่อลดความแปรปรวนของข้อมูล ตัวอย่างพืชที่เก็บได้จะถูกนำไปแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) ทันที เพื่อหยุดกระบวนการเมแทบอลิซึมและป้องกันการสลายตัวของ RNA จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -80°C จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ในขั้นตอนถัดไป

7.2 การเตรียมตัวอย่างและการสกัด RNA

นำตัวอย่างพืชที่แช่แข็งมาบดให้ละเอียดในไนโตรเจนเหลวโดยใช้เครื่องบดตัวอย่าง เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของ RNA จากนั้นทำการสกัด RNA โดยใช้ชุดสกัด RNA ตามมาตรฐาน หลังการสกัด ทำการตรวจสอบคุณภาพและความบริสุทธิ์ของ RNA

7.3 การสังเคราะห์ cDNA

นำ RNA ที่ได้มาทำการสังเคราะห์ Complementary DNA (cDNA) โดยใช้เอนไซม์ Reverse transcriptase ตามขั้นตอนของชุดน้ำยาที่ใช้ เพื่อเปลี่ยน RNA ให้อยู่ในรูปที่สามารถนำไปวิเคราะห์การแสดงออกของยีนได้

7.4 การเตรียมไลบรารีและการวิเคราะห์ RNA sequencing

นำ cDNA ที่ได้ไปเตรียมเป็นไลบรารีสำหรับการวิเคราะห์ RNA sequencing (RNA-seq) โดยผ่านขั้นตอนการตัดชิ้นส่วน การเติม Adapter และการเพิ่มปริมาณชิ้นส่วน DNA จากนั้นนำไลบรารีไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง RNA sequencing เพื่อศึกษารูปแบบการแสดงออกของยีนในแต่ละกรรมวิธี

7.5 การวิเคราะห์ข้อมูลการแสดงออกของยีน

ข้อมูลที่ได้จาก RNA sequencing จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางชีวสารสนเทศ โดยทำการจัดเรียงลำดับ (Sequence alignment) กับฐานข้อมูลยีนอ้างอิง และคำนวณระดับการแสดงออกของยีน จากนั้นเปรียบเทียบการแสดงออกของยีนระหว่างกรรมวิธี เพื่อระบุยีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

8. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรม R Studio ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least Significant Difference (LSD) ที่ระดับนัยสำคัญ $p < 0.05$

สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย

1. สถานที่การทำวิจัย

โรงเรียนทดลองของคณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ระยะเวลาการทำวิจัย

เดือน พฤษภาคม 2567 ถึง ตุลาคม 2568

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาการตอบสนองของหม่อน (*Morus alba* L.) พันธุ์สกลนคร ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจนในระบบเอโรโปนิคส์ เป็นเวลา 14 วัน พบว่าพืชมีการตอบสนองทั้งในระดับสรีรวิทยาและระดับชีวโมเลกุลอย่างชัดเจน ในระดับสรีรวิทยา ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD Green Index) ในกลุ่มที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ (FN) มีค่าสูงกว่ากลุ่มขาดไนโตรเจน (-N) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานที่ระบุว่า การขาดไนโตรเจนส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง และกระทบต่อประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงโดยตรง (Taiz et al., 2015; Xu et al., 2012)

ขณะที่ค่าความหนาแน่นของใบ (Specific Leaf Weight; SLW) และค่าความยาวรากจำเพาะ (Specific Root Length; SRL) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แม้จะมีแนวโน้มลดลงในสภาวะขาดไนโตรเจน ซึ่งอาจสะท้อนว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของพืชต้องใช้เวลามากกว่าการตอบสนองทางสรีรวิทยา (Poorter et al., 2009) ในระดับชีวโมเลกุล พบว่าการขาดไนโตรเจนส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีนอย่างมีนัยสำคัญ โดยยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียดและการสร้างสารทุติยภูมิ เช่น *MLO-like protein 6*, *Nerolidol synthase* และ transcription factors กลุ่ม bHLH (bHLH18 และ bHLH36) มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับบทบาทของ transcription factors ในการควบคุมการตอบสนองต่อความเครียดของพืช (Pires & Dolan, 2010; Heim et al., 2003) ในทางตรงกันข้าม ยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและลำเลียงไนโตรเจน เช่น *NRT1/PTR family* รวมถึงยีนที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของคลอโรพลาสต์ เช่น *dnaJ20* มีการแสดงออกลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับการลดลงของการสังเคราะห์แสงภายใต้ภาวะขาดไนโตรเจน (Krapp et al., 2014; Wang et al., 2012) จากผลการทดลองสามารถวิจารณ์ได้ว่า การตอบสนองของพืชต่อภาวะขาดไนโตรเจนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระดับชีวโมเลกุลก่อน โดยมีการปรับการแสดงออกของยีนเพื่อรองรับความเครียด ขณะที่การเปลี่ยนแปลงในระดับสรีรวิทยาเริ่มปรากฏชัดในรูปของการลดลงของคลอโรฟิลล์ ส่วนการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างยังไม่เด่นชัดในระยะสั้น ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดที่ว่า การตอบสนองต่อความเครียดของพืชมักเริ่มจากระดับยีนก่อน (Hawkesford et al., 2012)

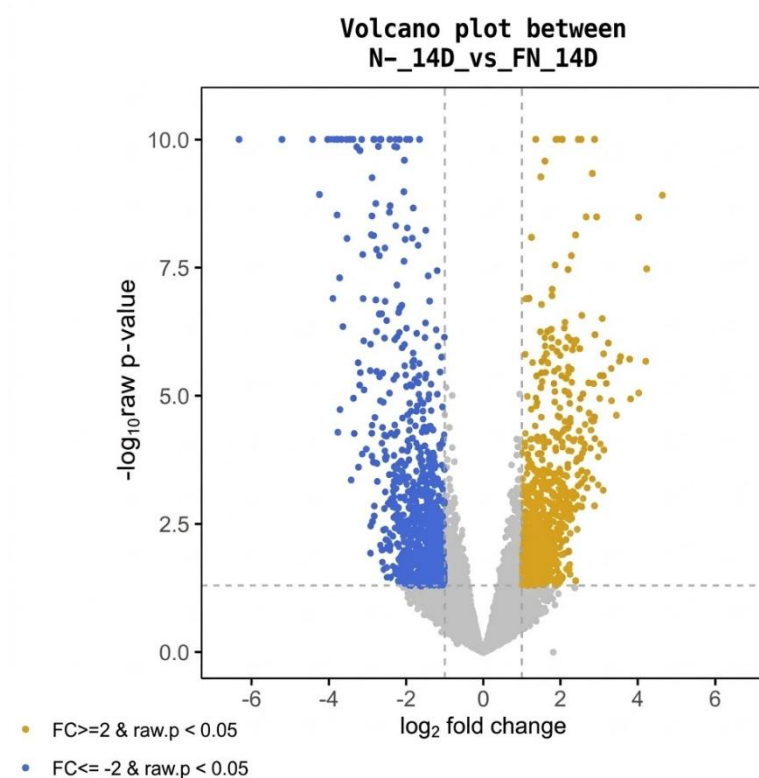
นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของยีนที่เกี่ยวข้องกับสารทุติยภูมิยังบ่งชี้ถึงการปรับตัวของพืชผ่านการเสริมระบบป้องกันต่อ oxidative stress (Nakabayashi & Saito, 2015)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD ของการวัดค่าทางสรีรวิทยา

Variable	Treatment	Mean	LSD Group	F-value	p-value
SPAD	DI	37.0125	b	11.14	0.0037**
	FN	45.8150	a		
	N-Free	39.8425	b		
SLW	DI	3.7249	a	3.132	0.0928
	FN	2.2673	ab		
	N-Free	1.3809	b		
SRL	DI	91.6345	a	0.654	0.543
	FN	131.5450	a		
	N-Free	108.1627	a		

หมายเหตุ: ตัวอักษร a, b และ ab หลังค่าเฉลี่ย เป็นผลจากการเปรียบเทียบด้วยวิธี LSD ที่ระดับ $p < 0.05$ โดยค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันในตัวแปรเดียวกัน (SPAD, SLW หรือ SRL) หมายถึงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรต่างกันหมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ค่า F-value และ p-value ได้จากการวิเคราะห์ ANOVA โดย $p\text{-value} < 0.05$ แสดงว่ากรรมวิธีมีผลแตกต่างกัน และเครื่องหมาย ** หมายถึงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ $p < 0.01$



ภาพที่ 1 แสดง Volcano plot การเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีนในสภาวะขาดไนโตรเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ โดยมียีนบางส่วนเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4 ยีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น (Upregulated genes) ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน

Gene Symbol	Description	Fold Change (FC)
LOC21398162	<i>MLO-like protein 6</i>	+24.9
LOC21408694	<i>Nerolidol synthase</i>	+16.3
LOC21399161	<i>Transcription Factor bHLH18</i>	+11.5
LOC21405927	<i>Transcription Factor bHLH36</i>	+10.9

หมายเหตุ: ค่า Fold Change (FC) แสดงถึงระดับการเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีน โดยค่าบวก (+) หมายถึงการแสดงออกเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับสภาวะควบคุม (FN)

ตารางที่ 5 ยีนที่มีการแสดงออกลดลง (Downregulated genes) ภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจน

Gene Symbol	Description	Fold Change (FC)
LOC21399652	<i>Chaperone Protein dnaJ20</i>	-80.8
LOC21406081	<i>Protein NRT1/PTR FAMILY 7.3</i>	-19.1

หมายเหตุ: ค่า Fold Change (FC) แสดงถึงระดับการเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีน โดยค่าลบ (-) หมายถึงการแสดงออกลดลง เมื่อเทียบกับสภาวะควบคุม (FN)

สรุป

การศึกษาการตอบสนองของหม่อนพันธุ์สกุลนครภายใต้สภาวะขาดไนโตรเจนในระบบแอโรโปนิคส์ พบว่าพืชมีการตอบสนองทั้งในระดับสรีรวิทยาและระดับชีวโมเลกุลอย่างชัดเจน ในระดับสรีรวิทยา การขาดไนโตรเจนส่งผลให้ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการลดลงของคลอโรฟิลล์และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ขณะที่ค่าความหนาแน่นของใบ (SLW) และความยาวรากจำเพาะ (SRL) ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของพืชยังไม่เกิดขึ้นในระยะเวลาดังกล่าว ในระดับชีวโมเลกุล พบว่าการขาดไนโตรเจนส่งผลให้ยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียดและการสร้างสารทุติยภูมิมีการแสดงออกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมไนโตรเจนและการสังเคราะห์แสงมีการแสดงออกลดลง โดยสรุป หม่อนมีการตอบสนองต่อภาวะขาดไนโตรเจนผ่านการปรับตัวในระดับการแสดงออกของยีนก่อน ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในระดับสรีรวิทยาในลำดับถัดไป องค์ความรู้ที่ได้จากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาการจัดการธาตุอาหาร และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืช รวมถึงการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการตอบสนองของพืชต่อความเครียดในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

หนังสือ

Marschner, P. 2012. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. 3rd ed. Academic Press.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., and Murphy, A. 2015. **Plant Physiology and Development**. 6th ed. Sinauer Associates.

หนังสือที่มีผู้เขียนแยกเฉพาะบท (Edited book)

CABI. 2019. **Morus alba (white mulberry)**. In: *Invasive Species Compendium*. CAB International, Wallingford, UK.

วารสารทางวิชาการ

Anas, M., Liao, F., Verma, K. K., Sarwar, M. A., Mahmood, A., Chen, Z. L., Li, Q., Zeng, X. P., and Liu, Y. 2020. **Fate of nitrogen in agriculture and environment: Agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency**. *Biological Research* 53: 47.

Barak, P., Smith, J. D., Krueger, A. R., and Peterson, L. A. 1996. **Measurement of short-term nutrient uptake rates in cranberry by aeroponics**. *Plant, Cell & Environment* 19(2): 237–242.

Butt, M. S., Nazir, A., Sultan, M. T., and Schroën, K. 2023. **Morus alba L. nature's functional tonic**. *Trends in Food Science & Technology* 123: 135–146.

Dixon, R. A., and Paiva, N. L. 1995. **Stress-induced phenylpropanoid metabolism**. *The Plant Cell* 7(7): 1085–1097.

Evans, J. R. 1989. **Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants**. *Oecologia* 78: 9–19.

- Foyer, C. H., and Noctor, G. 2005. **Oxidant and antioxidant signalling in plants: A revaluation of the concept of oxidative stress.** *Plant, Cell & Environment* 28(8): 1056–1071.
- Fritz, C., Palacios-Rojas, N., Feil, R., and Stitt, M. 2006. **Regulation of secondary metabolism by the carbon–nitrogen status in tobacco plants.** *Plant, Cell & Environment* 29(9): 1434–1448.
- Hawkesford, M. J., Kopriva, S., and De Kok, L. J. 2012. **Nutrient use efficiency in plants.** *Annual Plant Reviews* 41: 1–25.
- Heim, K. E., Tagliaferro, A. R., and Bobilya, D. J. 2003. **Flavonoid antioxidants: Chemistry, metabolism and structure–activity relationships.** *Journal of Nutritional Biochemistry* 13(10): 572–584.
- Hermans, C., Hammond, J. P., White, P. J., and Verbruggen, N. 2006. **How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation?** *Trends in Plant Science* 11(12): 610–617.
- Krapp, A., David, L. C., Chardin, C., Girin, T., Marmagne, A., Leprince, A. S., Chaillou, S., and Ferrario-Méry, S. 2014. **Nitrate transport and signalling in Arabidopsis.** *Journal of Experimental Botany* 65(3): 789–798.
- Lakhiar, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., and Buttar, N. A. 2018. **Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics.** *Journal of Plant Interactions* 13(1): 338–352.
- Lawlor, D. W. 2002. **Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems.** *Journal of Experimental Botany* 53(370): 773–787.

- Makino, A., and Osmond, B. 1991. **Effects of nitrogen nutrition on nitrogen partitioning between chloroplasts and mitochondria in pea and wheat.** *Plant Physiology* 96(2): 355–362.
- Nakabayashi, R., and Saito, K. 2015. **Integrated metabolomics for abiotic stress responses in plants.** *Current Opinion in Plant Biology* 24: 10–16.
- O'Brien, J. A., Vega, A., Bouguyon, E., Krouk, G., Gojon, A., Coruzzi, G., and Gutiérrez, R. A. 2016. **Nitrate transport, sensing, and responses in plants.** *Molecular Plant* 9(6): 837–856.
- Pires, N., and Dolan, L. 2010. **Origin and diversification of basic-helix-loop-helix proteins in plants.** *Molecular Biology and Evolution* 27(4): 862–874.
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., and Villar, R. 2009. **Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis.** *New Phytologist* 182(3): 565–588.
- Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herrán, C., Relloso, J., and San José, M. 2001. **Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers.** *Plant Cell, Tissue and Organ Culture* 65: 141–146.
- Scheible, W. R., Morcuende, R., Czechowski, T., Fritz, C., Osuna, D., Palacios-Rojas, N., Schindelasch, D., Thimm, O., Udvardi, M. K., and Stitt, M. 2004. **Genome-wide reprogramming of primary and secondary metabolism in response to nitrogen.** *Plant Physiology* 136(1): 2483–2499.
- Tewari, R. K., Kumar, P., and Sharma, P. N. 2007. **Oxidative stress and antioxidant responses in young leaves of mulberry plants grown under nitrogen, phosphorus or potassium deficiency.** *Journal of Integrative Plant Biology* 49(3): 313–322.

- Thabti, I., Elfalleh, W., Hannachi, H., and Ferchichi, A. 2023. **Mulberry (*Morus* spp.) as a potential functional food: A review.** *Journal of Food Composition and Analysis* 115: 105016.
- Tsay, Y. F., Chiu, C. C., Tsai, C. B., Ho, C. H., and Hsu, P. K. 2007. **Nitrate transporters and peptide transporters.** *FEBS Letters* 581(12): 2290–2300.
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., and Pleijel, H. 2007. **Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings.** *Photosynthesis Research* 91: 37–46.
- Vogt, T. 2010. **Phenylpropanoid biosynthesis.** *Molecular Plant* 3(1): 2–20.
- Wang, Y. Y., Hsu, P. K., and Tsay, Y. F. 2012. **Uptake, allocation and signaling of nitrate.** *Trends in Plant Science* 17(8): 458–467.
- Wang, Y., Xiang, L., Wang, C., Tang, C., and He, X. 2016. **Antidiabetic effects of mulberry (*Morus alba* L.): A systematic review and meta-analysis.** *Journal of Ethnopharmacology* 189: 322–331.
- Wink, M. 2010. **Functions and biotechnology of plant secondary metabolites.** *Annual Plant Reviews* 39: 1–19.
- Xu, G., Fan, X., and Miller, A. J. 2012. **Plant nitrogen assimilation and use efficiency.** *Annual Review of Plant Biology* 63: 153–182.
- Zhang, H., Forde, B. G., and Li, B. 2016. **Nutrient signaling networks and nitrogen utilization in plants studied using aeroponic systems.** *Plant Physiology and Biochemistry* 108: 1–8.

บทความทางวิชาการจากเว็บไซต์

กรมหม่อนไหม. 2563. **ข้อมูลพันธุ์หม่อนและการปลูก**. แหล่งที่มา: <https://qsds.go.th>

Department of Agriculture (DOA). n.d. **Mulberry breeding and variety development in Thailand**. Department of Agriculture, Thailand. แหล่งที่มา: <https://www.doa.go.th>

Healthline. 2019. **Mulberries: Nutrition facts and health benefits**.
แหล่งที่มา: <https://www.healthline.com/nutrition/mulberries>

Herbal Reality. 2025. **Morus alba: Herbal medicine profile**.
แหล่งที่มา: <https://www.herbalreality.com/herb/mulberry/>

Manager Online. 2020. **Mulberry farmers in Sakon Nakhon increase income with improved varieties**. แหล่งที่มา: <https://mgronline.com>

Queen Sirikit Department of Sericulture (QSASRD). 2020. **Mulberry variety “Sakon Nakhon”: Characteristics and cultivation in Northeast Thailand**. แหล่งที่มา: <https://qsds.go.th>

Queen Sirikit Department of Sericulture (QSASRD). 2022. **Development and evaluation of mulberry variety “Sakon Nakhon 85 (SKN-M95-2-10)”**. แหล่งที่มา: <https://qsds.go.th>

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกัญญาณัฐ สมสกุล
วัน เดือน ปี เกิด	4 ธันวาคม 2546
สถานที่เกิด	จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
ประวัติการศึกษา	มัธยมปลาย โรงเรียนอังกาบวิทยา
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	ได้รับรางวัลชนะเลิศและคะแนนโหวตสูงสุดในงาน นำเสนอ ผลงานทางวิชาการ ภาคโปสเตอร์ ของหลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เกษตร
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-