



ปัญหาพิเศษ

อิทธิพลของไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวโมเลกุลและการ
ตอบสนองทางสรีรวิทยาของรากและใบหม่อนในระบบแอโรโปนิคส์
**Effects of Chitosan on Biomolecular Changes and Physiological
Responses of Mulberry Roots and Leaves in an Aeroponic System**

นางสาวฐิตินันท์ ช่วยชนะ

ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DEPARTMENT OF AGRONOMY

FACULTY OF AGRICULTURE KASETSART UNIVERSITY



ใบรับรองปัญหาพิเศษ

คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วิทยาศาสตร์เกษตร)

ปริญญา

.....
วิทยาศาสตร์เกษตร

.....
พืชไร่นา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง อิทธิพลของไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวโมเลกุลและการตอบสนองทางสรีรวิทยา
ของรากและใบหม่อนในระบบแอโรโปนิคส์

Effects of Chitosan on Biomolecular Changes and Physiological Responses of Mulberry
Roots and Leaves in an Aeroponic System

นามผู้วิจัย จูตินัน ช่วยชนะ

ได้รับการพิจารณาเห็นชอบโดย

Digitally signed by
Apidet Rakpenthai
Date: 2026.03.27
17:12:59 +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

อิทธิพลของไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวโมเลกุลและการตอบสนองทางสรีรวิทยา
ของรากและใบหม่อนในระบบแอโรโปนิคส์

Effects of Chitosan on Biomolecular Changes and Physiological Responses of Mulberry

Roots and Leaves in an Aeroponic System

โดย

นางสาวฐิตินันท์ ช่วยชนะ

เสนอ

ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

DEPARTMENT OF AGRONOMY

FACULTY OF AGRICULTURE KASETSART UNIVERSITY

บทคัดย่อ

นางสาวจิตินัน ช่วยชนะ 2569: อิทธิพลของไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวโมเลกุล และการตอบสนองทางสรีรวิทยา ของรากและใบหม่อนในระบบแอโรโพนิคส์ ปัญหา พิเศษปริญญาตรี สาขาวิทยาศาสตร์เกษตร ภาควิชาพืชไร่นา
อาจารย์ที่ปรึกษา: อภิเดช รักเป็นไทย ,Dr.rer.nat. 30 หน้า

ต้นหม่อน (*Morus* sp.) พันธุ์สกลนครเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญในภาคอุตสาหกรรม ปัจจุบันแนวทางการเพิ่มการผลิตสารทุติยภูมิภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุมได้รับความสนใจอย่างมากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการให้ไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงระดับโมเลกุลของราก ควบคู่กับการตอบสนองทางสรีรวิทยาของรากและใบในต้นหม่อนที่ปลูกในระบบแอโรโพนิคส์ ต้นหม่อนที่ปลูกอายุ 2.5 เดือน โดยในช่วง 2 สัปดาห์สุดท้ายของการทดลองซึ่งได้รับสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 0.04% (w/v) และเปรียบเทียบกับต้นหม่อนที่ได้รับสารละลายธาตุอาหารครบถ้วน (FN) ผลการทดลองพบว่า การให้ไคโตซานไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าดัชนีคลอโรฟิลล์ (SPAD Green Index) ค่าน้ำหนักใบจำเพาะ (specific leaf weight; SLW) และความยาวรากจำเพาะ (specific root length; SRL) ระหว่างชุดการทดลอง แม้ว่าการตอบสนองทางสรีรวิทยาจะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ทรานสคริปโตมิกส์ของเนื้อเยื่อรากพบการเปลี่ยนแปลงระดับโมเลกุลอย่างเด่นชัดหลังการให้ไคโตซาน โดยพบการกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ ได้แก่ ยีนที่เข้ารหัสเอนไซม์ *trans-resveratrol di-O-methyltransferase*, *(3S,6E)-nerolidol synthase 1* และ *(-)-limonene synthase* การเพิ่มขึ้นของการแสดงออกของยีนเหล่านี้บ่งชี้ว่า ไคโตซานทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นทางชีวภาพ (biotic elicitor) ที่มีประสิทธิภาพในระบบการผลิตหม่อนแบบแอโรโพนิค โดยช่วยกระตุ้นการสังเคราะห์สารทุติยภูมิที่มีมูลค่าสูงทางเศรษฐกิจได้

คำสำคัญ: การใช้ไคโตซาน, การแสดงออกของยีน, หม่อน, สารทุติยภูมิ

จิตินัน ช่วยชนะ

ลายมือชื่อนิติ



Digitally signed by
Apidet Rakpenthai
Date: 2026.03.27
17:13:43 +07'00'

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษหลัก

31 / 03 / 69

ABSTRACT

Titinan Chuaychana. 2026: Effects of Chitosan on Biomolecular Changes and Physiological Responses of Mulberry Roots and Leaves in an Aeroponic System
Bachelor's special problem in Agricultural Science, Department of Agronomy. Special problem advisor: Apidet Rakpenthai, Dr.rer.nat. 30 pages.

Mulberry (*Morus* sp.) cultivar 'Sakon Nakhon' is an important industrial crop, particularly for the production of high-value secondary metabolites. Strategies to enhance secondary metabolite production under controlled cultivation are gaining increasing attention. This study aimed to investigate the effects of chitosan application on molecular changes in root tissues, together with physiological responses in roots and leaves of aeroponically grown mulberry plants. 2.5-month-old plants grown in an aeroponic system were treated with 0.04% (w/v) chitosan during the final two weeks and compared with plants supplied with a full nutrient (FN) solution. The results showed that chitosan application did not affect plant growth. No significant differences were observed in SPAD Green Index, specific leaf weight (SLW), or specific root length (SRL) between treatments, indicating stable physiological performance. Although no significant physiological differences were detected, transcriptomic analysis of root tissues revealed pronounced molecular changes following chitosan application. Genes associated with secondary metabolite biosynthesis were significantly upregulated, including those encoding *trans-resveratrol di-O-methyltransferase*, *(3S,6E)-nerolidol synthase 1*, and *(-)-limonene synthase*. The upregulation of these genes indicates that chitosan functions as an effective biotic elicitor in aeroponic mulberry production, promoting the biosynthesis of high-value secondary metabolites without adversely affecting plant growth.

Keywords: chitosan application, gene expression, mulberry, secondary metabolites

Titinan Chuaychana

Student's signature



Digitally signed by
Apidet Rakpenthai
Date: 2026.03.27
17:14:10 +07'00'

Special Problem Advisor's signature

31 / 03 / 69

กิตติกรรมประกาศ

ปัญหาพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและคำแนะนำจากหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ทางวิชาการ และแนวทางในการดำเนินงานเป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.อภิเดช รักเป็นไทย อาจารย์ที่ปรึกษาปัญหาพิเศษ ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ รวมทั้งสละเวลาในการตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้เล่มปัญหาพิเศษฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุตเชตต์ นาคะเสถียร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้คำชี้แนะและข้อคิดเห็นอันเป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานปัญหาพิเศษฉบับนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการกลาง คณะเกษตร และโรงเรือนของคณะเกษตร ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์สำหรับการดำเนินการทดลองและเก็บตัวอย่าง

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้การสนับสนุนงบประมาณในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งทุนวิจัยสำหรับนักวิจัย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ขอกราบขอบพระคุณกรมหม่อมไผ่ สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ ในพระบรมราชชนนีพันปีหลวง ที่ได้อนุเคราะห์ต้นพันธุ์หม่อน สำหรับการดำเนินงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ผู้เป็นกำลังใจสำคัญ ที่ได้ให้การสนับสนุนในทุกด้านเสมอมา จนทำให้ปัญหาพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

นางสาวฐิตินันท์ ช่วยชนะ

17/03/69

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	14
อุปกรณ์	14
วิธีการ	15
สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย	21
ผลและวิจารณ์	22
สรุป	26
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	27
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	30

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สูตรธาตุอาหารที่มีไนโตรเจนครบถ้วน (Full Nitrogen:FN)	16
2	สูตรธาตุอาหารที่เพิ่มโคโคซาน	17
3	ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD	23
4	ยีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น (Upregulated genes)	23
5	ยีนที่มีการแสดงออกลดลง (Downregulated genes)	25

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดง Volcano plot ของการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนภายใต้สภาวะไคโตซาน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมสมบูรณ์ โดยพบว่ามียีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)	24

อิทธิพลของไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงทางชีวโมเลกุลและการตอบสนองทาง สรีรวิทยาของรากและใบหม่อนในระบบแอโรโพนิคส์

Effects of Chitosan on Biomolecular Changes and Physiological Responses of Mulberry Roots and Leaves in an Aeroponic System

คำนำ

ต้นหม่อน (*Morus* sp.) พันธุ์สกุลนครเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีบทบาทสำคัญในภาคการเกษตรและอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ทั้งในด้านอาหาร ยา และผลิตภัณฑ์สุขภาพ โดยเฉพาะสารทุติยภูมิที่พบในหม่อน ซึ่งมีคุณค่าทางชีวภาพและมีศักยภาพเชิงพาณิชย์สูง ปัจจุบันการเพิ่มปริมาณสารสำคัญดังกล่าวภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุม เช่น ระบบแอโรโพนิคส์ ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถควบคุมปัจจัยการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ไคโตซาน (chitosan) เป็นสารชีวภาพที่ได้จากไคติน ซึ่งพบในเปลือกกุ้ง ปู และแมลง โดยได้รับความสนใจอย่างมากในด้านการเกษตร เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นตัวกระตุ้นทางชีวภาพ (biotic elicitor) ที่สามารถกระตุ้นกระบวนการป้องกันตนเองของพืช และส่งเสริมการสร้างสารทุติยภูมิที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ โดยไม่ส่งผลกระทบเชิงลบต่อการเจริญเติบโตของพืช

ดังนั้น งานปัญหาคณิตศาสตร์จึงมุ่งศึกษาผลของการให้ไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลของราก ควบคู่กับการตอบสนองทางสรีรวิทยาของรากและใบในต้นหม่อนที่ปลูกในระบบแอโรโพนิคส์ เพื่อประเมินศักยภาพของไคโตซานในการเป็นสารกระตุ้นการสร้างสารทุติยภูมิ โดยอาศัยการวิเคราะห์ทั้งในระดับสรีรวิทยาและระดับทรานสคริปโตมิกส์

ผลการศึกษาที่ได้จะช่วยเพิ่มองค์ความรู้เกี่ยวกับบทบาทของไคโตซานในการกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบการผลิตหม่อนให้มีประสิทธิภาพและมูลค่าสูงขึ้นในอนาคต

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาผลของไคโตซานต่อการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลของรากควบคุมกับการตอบสนองทางสรีรวิทยาทั้งในรากและใบของต้นหม่อนที่ปลูกในระบบแอโรโปนิคส์

การตรวจเอกสาร

1. ความสำคัญของหม่อน (*Morus alba* L.)

หม่อน (*Morus alba* L.) เป็นพืชเศรษฐกิจและพืชสมุนไพรที่มีความสำคัญในหลายมิติ ทั้งด้านอุตสาหกรรมไหม โภชนาการ และสุขภาพ โดยมีงานวิจัยจำนวนมากสนับสนุนถึงประโยชน์ทั้งในเชิงวิทยาศาสตร์และการนำไปใช้จริง (Butt et al., 2008)

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 (กรมหม่อนไหม, 2563)

1.2 ด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม

ใบหม่อนเป็นอาหารหลักของตัวไหม (*Bombyx mori*) ซึ่งบริโภคใบหม่อนเพียงชนิดเดียวในการเจริญเติบโต ส่งผลให้หม่อนมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมไหม โดยมีการผลิตไหมทั่วโลกประมาณ 1,000–1,500 ตันต่อปี และประเทศจีนเป็นผู้ผลิตหลักคิดเป็นประมาณ 80% ของผลผลิตโลก (Butt et al., 2008) นอกจากนี้ หม่อนยังเป็นพืชที่ให้ผลผลิตใบสูงประมาณ 20–40 ตันต่อเฮกตาร์ต่อปี สามารถเก็บเกี่ยวได้ 4–6 ครั้งต่อปี และมีความทนทานต่อสภาพแวดล้อม เช่น ความแห้งแล้ง และดินเค็ม (CABI, 2019) ในด้านการใช้ประโยชน์อื่น ๆ เนื้อไม้ของหม่อนมีความแข็งแรง เหมาะสำหรับการทำเฟอร์นิเจอร์ เปลือกสามารถนำไปผลิตกระดาษคุณภาพสูง และผลสามารถนำไปแปรรูปเป็นอาหาร เช่น ไวน์ หรือใช้เป็นสีย้อมธรรมชาติ (Healthline, 2019) ในประเทศไทย หม่อนยังสร้างรายได้จากผลิตภัณฑ์หลากหลาย เช่น ไหมสด ใบหม่อนแห้ง และชาใบหม่อน ซึ่งมีการส่งออกไปยังประเทศจีนและญี่ปุ่น (กรมหม่อนไหม, 2563)

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 ช่วยลดการอักเสบและระดับคอเลสเตอรอลใน (Butt et al., 2008) ในด้านการบริโภค ใบหม่อนสามารถนำไปชงชาแทนชาเขียวหรือใช้ประกอบอาหาร เช่น ผัก

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

1.4 ด้านเภสัชวิทยาและสุขภาพ

หม่อนมีศักยภาพสูงในด้านเภสัชวิทยา โดยเฉพาะใบหม่อนที่มีสารสำคัญ เช่น 1-deoxynojirimycin (DNJ) ซึ่งสามารถยับยั้งเอนไซม์ α -glucosidase และช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือด หลังอาหาร จึงมีประโยชน์ต่อผู้ป่วยโรคเบาหวาน (กรมหม่อนไหม, 2563) ส่วนผลและรากของหม่อนมีรายงานว่าสามารถต้านมะเร็ง ลดไขมันในเลือด และลดการอักเสบของตับ รวมถึงมีสารสำคัญ เช่น quercetin และ rutin ที่ช่วยป้องกันโรคหัวใจ (Herbal Reality, 2025) นอกจากนี้ กิ่งและเปลือกของหม่อนยังมีฤทธิ์ต้านจุลชีพ ต้านไวรัส และช่วยลดอาการอักเสบ โดยมีการใช้ในแพทย์แผนจีนเพื่อบำรุงร่างกาย (Butt et al., 2008) ทั้งนี้ งานวิจัยแบบ meta-analysis ยังยืนยันว่าหม่อนสามารถช่วยลดค่า HbA1c ในผู้ป่วยเบาหวานได้ อย่างไรก็ตาม ควรบริโภคในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากอาจเกิดผลข้างเคียง เช่น อาการท้องเสีย (Wang et al., 2016; Herbal Reality, 2025)

2. หม่อนพันธุ์สกุลนคร

หม่อนพันธุ์สกุลนครเป็นสายพันธุ์ที่พัฒนาโดยกรมหม่อนไหม เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะจังหวัดสกลนคร ซึ่งมีสภาพแห้งแล้งและอาศัยน้ำฝนเป็นหลัก พันธุ์นี้มีลักษณะเด่นด้านการให้ผลผลิตสูง ทนแล้ง และสามารถปรับตัวได้ดีต่อสภาพแวดล้อม (กรมหม่อนไหม, 2563)

2.1 ลักษณะพันธุ์กรรมและการพัฒนา

หม่อนพันธุ์สกุลนครได้รับการรับรองพันธุ์ในปี พ.ศ. 2547 โดยเกิดจากการผสมระหว่างพันธุ์คูณไพ (tetraploid; $2n=56$ เพศเมีย) กับพันธุ์ลุน 40 ($2n=28$ เพศผู้) ซึ่งให้ผลผลิตสูงกว่าพันธุ์บุรีรัมย์ 60 ประมาณ 30% (DOA Plant, n.d.) ต่อมาได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ต่อเนื่องเป็นพันธุ์สกลนคร 85 (SKN-M95-2-10) โดยผสมระหว่างพันธุ์คูณไพ ($2n=56$) กับพันธุ์โคเซน ($2n=28$) และผ่านการทดสอบที่ศูนย์หม่อนไหมเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร พบว่ามีความต้านทานโรครากเน่าใกล้เคียงกับพันธุ์คูณไพ (กรมหม่อนไหม, 2563)

2.2 คุณสมบัติทางการเกษตรและการปรับตัว

หม่อนพันธุ์สกลนครมีความสามารถในการปรับตัวต่อสภาพแวดล้อมได้ดี โดยเฉพาะในพื้นที่แห้งแล้งของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สามารถเจริญเติบโตได้ดีภายใต้ระบบเกษตรอาศัยน้ำฝน อีกทั้งยังมีความทนทานต่อโรครากเน่าและดินเค็ม นอกจากนี้ ใบหม่อนมีคุณภาพดีและมีปริมาณ

โปรตีนสูง เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงไหมอุตสาหกรรม (*Bombyx mori*) ส่งผลให้สามารถเพิ่มผลผลิต และคุณภาพของเส้นไหมได้

2.3 การเจริญเติบโตและผลผลิต

หม่อนพันธุ์สกกลนครมีอัตราการเจริญเติบโตดี สามารถออกรากได้ง่ายเมื่อปักชำกิ่งแขนงที่มีอายุประมาณ 5 เดือนขึ้นไป และสามารถปลูกด้วยท่อนพันธุ์โดยตรงได้ (กรมหม่อนไหม, 2563) ในด้านผลผลิต พบว่าสามารถเพิ่มรายได้ให้เกษตรกรในพื้นที่จังหวัดสกกลนครได้ประมาณ 20–30% เมื่อเทียบกับพันธุ์เดิม และกรมหม่อนไหมแนะนำให้ปลูกร่วมกับพันธุ์ศรีสะเกษ 84 ในฤดูแล้งเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (กรมหม่อนไหม, 2563)

2.4 การขยายพันธุ์และการปลูก

การขยายพันธุ์หม่อนพันธุ์สกกลนครนิยมใช้วิธีการปักชำกิ่งแขนงหรือท่อนพันธุ์ โดยปลูกในระยะ 2×2 เมตร ในดินร่วนที่มีค่า pH ประมาณ 6–7 ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และสามารถเริ่มเก็บเกี่ยวใบได้ในรอบที่ 4 ภายในปีแรก (กรมหม่อนไหม, 2563) พันธุ์นี้ยังได้รับการส่งเสริมให้ปลูกในพื้นที่หมู่บ้านหม่อนไหม เพื่อใช้เลี้ยงไหมและรองรับการส่งออกไปยังประเทศจีนและญี่ปุ่น

2.5 บทบาทต่อเศรษฐกิจและชุมชน

หม่อนพันธุ์สกกลนครมีบทบาทสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจชุมชน โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดสกกลนคร ซึ่งมีการนำไปพัฒนาเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงเกษตรและผลิตภัณฑ์ OTOP เช่น สวนหม่อนไหมที่เป็นแหล่งเรียนรู้และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตร

3. บทบาทของไคโตซานต่อพืช

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากกระบวนการดื้อะซิติเลชันของไคติน (chitin) ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญในเปลือกของสัตว์น้ำ เช่น กุ้งและปู โดยมีคุณสมบัติเด่น ได้แก่ ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ ความไม่เป็นพิษ และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งผลให้ไคโตซานได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในการประยุกต์ใช้ทางการเกษตร โดยเฉพาะในด้านการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช การเพิ่มความต้านทานต่อโรค และการปรับตัวต่อสภาวะเครียด (Rinaudo, 2006; Malerba & Cerana, 2016; Sharif et al., 2018)

3.1 ผลต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาการของพืช

มีรายงานว่าไคโตซานสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในหลายชนิด โดยกระตุ้นการแบ่งเซลล์และการขยายตัวของเซลล์ ส่งผลให้พืชมีการพัฒนาในด้านความยาวราก ความสูงต้น และพื้นที่ใบเพิ่มขึ้น (Khan et al., 2002) นอกจากนี้ ไคโตซานยังสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ และประสิทธิภาพในการสังเคราะห์แสง รวมถึงส่งเสริมการเปิดปากใบและการแลกเปลี่ยนก๊าซ (Pichyangkura & Chadchawan, 2015) ในด้านโภชนาการพืช มีรายงานว่าไคโตซานสามารถช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพการดูดซึมธาตุอาหารทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตที่สมบูรณ์และให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น (El Hadrami et al., 2010; Sharif et al., 2018)

3.2 บทบาทในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของพืช

ไคโตซานทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันของพืช (elicitor) โดยสามารถกระตุ้นการทำงานของระบบป้องกันภายในพืช เช่น การเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO) และ phenylalanine ammonia-lyase (PAL) ซึ่งมีบทบาทในการสร้างสารป้องกันโรค (Hadwiger, 2013; Malerba & Cerana, 2016) นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่าไคโตซานสามารถกระตุ้นการสร้างประกอบฟีนอลิกและไฟโตอิเล็กซิน ซึ่งช่วยเพิ่มความต้านทานต่อเชื้อรา แบคทีเรีย และไวรัสในพืช (Sharif et al., 2018)

3.3 บทบาทในการยับยั้งจุลินทรีย์

ไคโตซานมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะเชื้อราสาเหตุโรคพืช ผ่านกลไกการรบกวนโครงสร้างของผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้เกิดการรั่วไหลของสารภายในเซลล์และส่งผลให้เซลล์ตาย (Rinaudo, 2006; El Hadrami et al., 2010) นอกจากนี้ ยังสามารถยับยั้งการสังเคราะห์โปรตีนและสารพันธุกรรมของจุลินทรีย์บางชนิด ส่งผลให้การเจริญเติบโตของเชื้อโรคลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (El Hadrami et al., 2010)

3.4 บทบาทต่อการทนต่อสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อม

มีรายงานว่าไคโตซานสามารถช่วยเพิ่มความสามารถของพืชในการทนต่อสภาวะเครียด เช่น ความแห้งแล้ง ความเค็ม และอุณหภูมิสูง โดยช่วยปรับสมดุลทางสรีรวิทยา เช่น การควบคุมการเปิด-ปิดปากใบ และการรักษาสมดุลน้ำในเซลล์ (El Hadrami et al., 2010) นอกจากนี้ ไคโตซานยังช่วยกระตุ้นระบบเอนไซม์ออกซิแดนซ์ เช่น superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) และ peroxidase (POD) ซึ่งช่วยลดความเสียหายจากอนุมูลอิสระภายใต้สภาวะเครียด (Pichyangkura & Chadchawan, 2015; Sharif et al., 2018)

3.5 บทบาทในระดับชีวโมเลกุล

ในระดับโมเลกุล ไคโตซานสามารถทำหน้าที่เป็นโมเลกุลสัญญาณ (signal molecule) ที่กระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโรค เช่น *pathogenesis-related proteins* (PR proteins) และเกี่ยวข้องกับเส้นทางการส่งสัญญาณของพืช ได้แก่ salicylic acid (SA) และ jasmonic acid (JA) pathways ซึ่งมีบทบาทสำคัญในระบบภูมิคุ้มกันของพืช (Hadwiger, 2013; Malerba & Cerana, 2016)

3.6 การประยุกต์ใช้ไคโตซานในระบบการผลิตพืช

ไคโตซานสามารถนำมาใช้ในทางการเกษตรได้หลายรูปแบบ เช่น การพ่นทางใบ การแช่เมล็ด และการใช้ในระบบปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน เช่น ไฮโดรโปนิกส์และแอโรโปนิกส์ โดยมีรายงานว่าสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของพืช รวมถึงลดการใช้สารเคมีทางการเกษตร (El Hadrami et al., 2010; Sharif et al., 2018)

นอกจากนี้ งานวิจัยในช่วงหลัง (ปี 2020 เป็นต้นมา) รายงานว่าไคโตซานสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตและการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในพืชสมุนไพรหลายชนิด รวมถึงต้นหม่อน (*Morus alba* L.) โดยเฉพาะเมื่อใช้ในระบบปลูกพืชแบบควบคุมสภาพแวดล้อม เช่น แอโรโปนิกส์ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรและคุณภาพของผลผลิต (Katiyar et al., 2020)

4. ผลของการเพิ่มไคโตซานต่อพืช

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นสารชีวภาพที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในการประยุกต์ใช้ทางการเกษตร เนื่องจากสามารถส่งผลต่อการตอบสนองของพืชในหลายระดับ ทั้งด้านการเจริญเติบโต กระบวนการทางสรีรวิทยา องค์ประกอบทางชีวเคมี และระดับโมเลกุล ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของไคโตซานขึ้นอยู่กับความเข้มข้น วิธีการให้ และชนิดของพืช (Pichyangkura & Chadchawan, 2015; Sharif et al., 2018) โดยทั่วไปมีรายงานว่า การใช้ไคโตซานในความเข้มข้นต่ำถึงปานกลาง (ประมาณ 50–200 มก./ลิตร) สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชได้ ในขณะที่ความเข้มข้นสูงอาจส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโต

4.1 ผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

มีรายงานว่าไคโตซานสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในหลายชนิด โดยเพิ่มความสูงของต้น ความยาวราก จำนวนใบ และน้ำหนักชีวมวล ทั้งนี้อาจเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นการแบ่งเซลล์และการขยายตัวของเซลล์ รวมถึงการพัฒนาของระบบราก ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหารและน้ำ (Khan et al., 2002)

4.2 ผลต่อกระบวนการทางสรีรวิทยา

การใช้ไคโตซานมีรายงานว่าสามารถเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ และอัตราการสังเคราะห์แสง รวมถึงมีผลต่อการควบคุมการเปิด-ปิดปากใบ ส่งผลให้พืชมีประสิทธิภาพในการใช้น้ำดีขึ้น (El Hadrami et al., 2010) นอกจากนี้ไคโตซานอาจช่วยลดการสูญเสียน้ำของพืชภายใต้สภาวะเครียด

4.3 ผลต่อองค์ประกอบทางชีวเคมี

ไคโตซานสามารถกระตุ้นการสร้างสารประกอบทุติยภูมิ เช่น สารประกอบฟีนอลิก ฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการป้องกันความเสียหายของเซลล์ นอกจากนี้

ยังมีรายงานว่าสามารถเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) และ peroxidase (POD) (Malerba & Cerana, 2016; Sharif et al., 2018)

4.4 ผลต่อความต้านทานต่อโรคพืช

ไคโตซานทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นที่สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของพืช โดยส่งผลให้เกิดการสร้างโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันโรค และสารป้องกันอื่น ๆ เช่น ไฟโตอิเล็กซิน ซึ่งช่วยลดความรุนแรงของโรคที่เกิดจากเชื้อราและแบคทีเรีย (Hadwiger, 2013)

4.5 ผลต่อการทนต่อสภาวะเครียด

มีรายงานว่าไคโตซานสามารถช่วยเพิ่มความสามารถของพืชในการทนต่อสภาวะเครียดจากสิ่งแวดล้อม เช่น ความแห้งแล้ง ความเค็ม และอุณหภูมิสูง โดยเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นระบบแอนติออกซิแดนซ์และการลดความเสียหายของเซลล์ (El Hadrami et al., 2010; Sharif et al., 2018)

4.6 ผลในระดับโมเลกุล

ในระดับโมเลกุล ไคโตซานมีรายงานว่าสามารถกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียดและการป้องกันโรค เช่น ยีนในกลุ่ม pathogenesis-related proteins รวมถึงยีนที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางสัญญาณของฮอร์โมนพืช เช่น salicylic acid และ jasmonic acid (Malerba & Cerana, 2016)

4.7 ตัวอย่างการให้ไคโตซานผ่านสารละลายธาตุอาหาร

การให้ไคโตซานผ่านสารละลายธาตุอาหารเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับระบบปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน เช่น ไฮโดรโปนิคส์และแอโรโปนิคส์ เนื่องจากช่วยให้พืชสามารถดูดซึมสารได้อย่างต่อเนื่อง มีรายงานว่าการใช้ไคโตซานในความเข้มข้นประมาณ 50–200 มก./ลิตร ในสารละลายธาตุอาหาร สามารถเพิ่มความยาวราก จำนวนรากแขนง และน้ำหนักชีวมวลของพืช รวมถึงเพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบ (Pichyangkura & Chadchawan, 2015) นอกจากนี้ยังอาจช่วยกระตุ้นการสร้างสารต้านอนุมูลอิสระ และเพิ่มความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียดในระบบปลูกแบบควบคุม (Sharif et al., 2018)

4.8 การประยุกต์ใช้ในพืชเศรษฐกิจ

ในพืชเศรษฐกิจหลายชนิด มีรายงานว่าการใช้ไคโตซานสามารถเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผลผลิต รวมถึงการสะสมสารสำคัญในพืชสมุนไพร เช่น หม่อน (*Morus alba* L.) โดยเฉพาะในระบบปลูกแบบควบคุม (Katiyar et al., 2020)

5. การตอบสนองในระดับสรีรวิทยา และระดับโมเลกุล

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากไคติน ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารกระตุ้น (elicitor) ที่สามารถเหนี่ยวนำการตอบสนองของพืชในหลายระดับ โดยเฉพาะในระบบรากซึ่งเป็น

อวัยวะหลักในการรับรู้สัญญาณและดูดซึมสารจากสิ่งแวดล้อม การตอบสนองของพืชต่อไคโตซาน เริ่มต้นจากการรับรู้สัญญาณที่ผิวเซลล์ และถ่ายทอดผ่านกระบวนการส่งสัญญาณภายในเซลล์ (signal transduction) ไปสู่การเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุล ก่อนจะแสดงผลในระดับสรีรวิทยา ส่งผลต่อการเจริญเติบโตและความสามารถในการปรับตัวของพืช (Pichyangkura & Chadchawan, 2015; Malerba & Cerana, 2016)

5.1 การตอบสนองในระดับสรีรวิทยาของราก

ในระดับสรีรวิทยา ไคโตซานมีผลต่อการเจริญเติบโตและโครงสร้างของระบบรากอย่างชัดเจน โดยสามารถกระตุ้นการยืดตัวของรากหลัก (primary root elongation) และส่งเสริมการเกิดรากแขนง (lateral root formation) ซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของระบบรากมีความซับซ้อนและมีประสิทธิภาพในการดูดซึมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ไคโตซานยังช่วยเพิ่มจำนวนรากพิเศษ (adventitious roots) และเพิ่มมวลชีวภาพของราก (root biomass) ส่งผลให้พืชมีความสามารถในการดูดซึมน้ำและธาตุอาหารได้มากขึ้น โดยเฉพาะในระบบปลูกแบบควบคุม เช่น ไฮโดรโปนิคส์และแอโรโปนิคส์ ไคโตซานยังมีบทบาทในการปรับปรุงการทำงานของเยื่อหุ้มเซลล์ราก โดยช่วยเพิ่มความสามารถในการลำเลียงไอออน (ion transport) ผ่านโปรตีนตัวพา (transport proteins) และช่องไอออน (ion channels) ซึ่งส่งผลให้การดูดซึมธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังมีผลต่อสมดุลน้ำภายในพืช โดยมีรายงานว่าไคโตซานสามารถช่วยควบคุมศักย์น้ำ (water potential) และลดการสูญเสียน้ำของพืช ส่งผลให้พืชสามารถทนต่อสภาวะเครียด เช่น ความแห้งแล้งและความเค็มได้ดีขึ้น (El Hadrami et al., 2010)

5.2 การตอบสนองในระดับโมเลกุลของราก

ในระดับโมเลกุล ไคโตซานถูกตรวจจับโดยตัวรับ (receptors) บนผิวเซลล์ราก ซึ่งนำไปสู่การกระตุ้นกระบวนการส่งสัญญาณภายในเซลล์ เช่น การเปลี่ยนแปลงของระดับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+} influx) การสร้าง reactive oxygen species (ROS) และการกระตุ้นโปรตีนไคเนส (protein kinases) กระบวนการเหล่านี้นำไปสู่การควบคุมการแสดงออกของยีน (gene expression) ที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการตอบสนองต่อความเครียด เช่น ยีนในกลุ่ม pathogenesis-related proteins (PR proteins) และยีนที่เกี่ยวข้องกับระบบป้องกันของพืช (Hadwiger, 2013) นอกจากนี้ ไคโตซานยังมีบทบาทในการควบคุมเส้นทางการส่งสัญญาณของฮอร์โมนพืช โดยเฉพาะ auxin ซึ่งมีผลต่อการแบ่งเซลล์และการยืดตัวของราก รวมถึงการควบคุมการเกิดรากแขนง นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับ salicylic acid และ jasmonic acid ซึ่งมีบทบาทในการป้องกันโรคและการตอบสนองต่อสิ่งรบกวนภายนอก (Malerba & Cerana, 2016) การเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลยังรวมถึงการกระตุ้นการสร้างโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการลำเลียงสาร (transport proteins) และโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกัน

ความเสียหายของเซลล์ ซึ่งช่วยให้รากสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นภายใต้สภาวะเครียด

5.3 ความเชื่อมโยงระหว่างระดับโมเลกุลและสรีรวิทยา

การตอบสนองของพืชต่อไคโตซานมีลักษณะเป็นลำดับขั้น โดยเริ่มจากการรับรู้สัญญาณในระดับโมเลกุล ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของการแสดงออกของยีนและการทำงานของโปรตีน จากนั้นจะแสดงผลในระดับสรีรวิทยา เช่น การเพิ่มความยาวราก การแตกแขนงของราก และการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหาร ความสัมพันธ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่า การตอบสนองในระดับโมเลกุลเป็นพื้นฐานสำคัญที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงในระดับสรีรวิทยา และมีบทบาทสำคัญต่อการปรับตัวของพืชในสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง

6. กลไกการกระตุ้นของไคโตซานในพืช

ไคโตซาน (Chitosan) เป็นพอลิเมอร์ชีวภาพที่ได้จากไคติน ซึ่งมีบทบาทสำคัญในฐานะสารกระตุ้น (elicitor) ที่สามารถเหนี่ยวนำการตอบสนองของพืชทั้งในระดับโมเลกุลและระดับสรีรวิทยา กลไกการออกฤทธิ์ของไคโตซานเกี่ยวข้องกับการรับรู้สัญญาณที่ผิวเซลล์ การส่งสัญญาณภายในเซลล์ และการควบคุมการแสดงออกของยีน ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงในระดับสรีรวิทยาของพืช เช่น การเจริญเติบโตของระบบรากและความสามารถในการทนต่อสภาวะเครียด (Pichyangkura & Chadchawan, 2015; Malerba & Cerana, 2016)

6.1 การรับรู้สัญญาณ (Recognition)

กลไกเริ่มต้นจากการที่ไคโตซานจับกับตัวรับ (receptor) บนเยื่อหุ้มเซลล์พืช ซึ่งสามารถตรวจจับโมเลกุลที่มีลักษณะคล้ายองค์ประกอบของเชื้อโรค เช่น ไคติน ทำให้พืชรับรู้ไคโตซานในฐานะสัญญาณกระตุ้น (elicitor signal) และกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันโดยกำเนิดของพืช (plant innate immunity) (Hadwiger, 2013; Pichyangkura & Chadchawan, 2015)

6.2 การส่งสัญญาณภายในเซลล์ (Signal Transduction)

ภายหลังการรับรู้ จะเกิดกระบวนการส่งสัญญาณภายในเซลล์อย่างรวดเร็ว โดยมีเหตุการณ์สำคัญ ได้แก่ การเพิ่มขึ้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+} influx) การสร้าง reactive oxygen species (ROS) เช่น hydrogen peroxide (H_2O_2) และการกระตุ้นโปรตีนไคเนสในกลุ่ม mitogen-activated protein kinases (MAPKs) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสัญญาณรอง (secondary messengers) ในการถ่ายทอดสัญญาณไปยังนิวเคลียส (El Hadrami et al., 2010; Malerba & Cerana, 2016)

6.3 การควบคุมการแสดงออกของยีน (Gene Expression)

สัญญาณจากกระบวนการส่งสัญญาณภายในเซลล์จะกระตุ้น transcription factors ส่งผลให้เกิดการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันและการเจริญเติบโตของพืช เช่น ยีนในกลุ่ม

pathogenesis-related proteins (PR proteins) ได้แก่ *chitinase* (CHI) และ β -1,3-*glucanase* รวมถึงยีนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการป้องกัน เช่น *phenylalanine ammonia-lyase* (PAL) และยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารทุติยภูมิ เช่น *chalcone synthase* (CHS) และ *dihydroflavonol reductase* (DFR) (Hadwiger, 2013; Malerba & Cerana, 2016)

6.4 การควบคุมเส้นทางสัญญาณของฮอร์โมนพืช

ไคโตซานมีบทบาทในการควบคุมเส้นทางสัญญาณของฮอร์โมนพืช โดยเฉพาะ *jasmonic acid* (JA) และ *salicylic acid* (SA) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่อความเครียดและการป้องกันโรค รวมถึง *auxin* ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการเจริญของระบบราก การทำงานร่วมกันของฮอร์โมนเหล่านี้ช่วยให้พืชสามารถปรับสมดุลระหว่างการเจริญเติบโตและการป้องกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Malerba & Cerana, 2016)

6.5 การแสดงผลในระดับสรีรวิทยา (Physiological Responses)

ผลจากการเปลี่ยนแปลงในระดับโมเลกุลจะนำไปสู่การแสดงออกในระดับสรีรวิทยา เช่น การเพิ่มความยาวของราก การเกิดรากแขนง การเพิ่มมวลชีวภาพของราก และการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุอาหารและน้ำ นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความสามารถของพืชในการทนต่อสภาวะเครียด เช่น ความเค็ม ความแห้งแล้ง และอุณหภูมิสูง (El Hadrami et al., 2010)

6.6 การบูรณาการของกลไก (Integrated Mechanism)

กลไกการทำงานของไคโตซานเป็นกระบวนการแบบบูรณาการ โดยเริ่มจากการรับรู้สัญญาณที่ผิวเซลล์ นำไปสู่การส่งสัญญาณภายในเซลล์ การควบคุมการแสดงออกของยีน และการเปลี่ยนแปลงในระดับสรีรวิทยา กระบวนการดังกล่าวช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและเสริมสร้างความสามารถในการป้องกันของพืช ทำให้ไคโตซานเป็นสารที่มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ทางการเกษตร

7. ระบบแอโรโพนิกส์ในการศึกษาพืช

7.1 หลักการของระบบแอโรโพนิกส์

ระบบแอโรโพนิกส์ (Aeroponics) เป็นวิธีการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน (soilless culture) โดยรากพืชถูกแขวนลอยอยู่ในอากาศ และได้รับน้ำและธาตุอาหารในรูปของละอองฝอย (nutrient mist) ซึ่งช่วยให้รากสามารถรับออกซิเจนได้อย่างเพียงพอ ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำและธาตุอาหารสูงกว่าระบบการปลูกแบบดั้งเดิม (Lakhari et al., 2018) ระบบดังกล่าวแตกต่างจากการปลูกในดินและระบบไฮโดรโปนิคส์ เนื่องจากไม่มีวัสดุปลูก ทำให้สามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) ค่า pH และความชื้น ได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้

เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการศึกษาทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะงานวิจัยด้านสรีรวิทยาและระดับโมเลกุลของพืช (Barak et al., 1996)

7.2 ข้อดีของระบบแอรโอโพนิกส์ในการวิจัยพืช

ระบบแอรโอโพนิกส์มีข้อดีหลายประการที่เอื้อต่อการศึกษาศาสตร์ โดยเฉพาะความสามารถในการควบคุมองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ ซึ่งช่วยให้สามารถปรับเปลี่ยนสภาวะธาตุอาหารได้ตามต้องการการไม่มีดินช่วยลดความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมและลดการปนเปื้อนจากจุลินทรีย์ ส่งผลให้ผลการทดลองมีความแม่นยำ น่าเชื่อถือ และสามารถทำซ้ำได้ (Ritter et al., 2001) อีกทั้งยังช่วยให้สามารถสังเกตลักษณะของระบบราก และเก็บตัวอย่างรากเพื่อการวิเคราะห์ได้โดยไม่ทำลายโครงสร้าง

นอกจากนี้ ระบบแอรโอโพนิกส์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้น้ำและธาตุอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมการให้สารละลายได้ตรงตามความต้องการของพืช และลดการสูญเสียจากการชะล้าง (Lakhiar et al., 2018)

7.3 การประยุกต์ใช้ในการควบคุมธาตุอาหาร

ระบบแอรโอโพนิกส์ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการศึกษาการตอบสนองของพืชต่อการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหาร เนื่องจากสามารถควบคุมองค์ประกอบของสารละลายธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ และสามารถกำหนดความเข้มข้นของธาตุอาหารแต่ละชนิดได้อย่างอิสระ ระบบดังกล่าวช่วยให้สามารถศึกษาผลของธาตุอาหารทั้งธาตุอาหารหลัก เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม รวมถึงธาตุอาหารรองและจุลธาตุ ได้อย่างชัดเจน โดยสามารถปรับเพิ่มหรือลดธาตุอาหารเฉพาะชนิดเพื่อศึกษาผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ศึกษาการตอบสนองของพืชต่อสภาวะขาดธาตุอาหาร (nutrient deficiency) หรือความไม่สมดุลของธาตุอาหาร โดยสามารถวิเคราะห์ผลกระทบได้ทั้งในระดับสรีรวิทยา เช่น การเปลี่ยนแปลงของอัตราการผลิตคลอโรฟิลล์ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง และในระดับโมเลกุล เช่น การแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึม การลำเลียง และการใช้ประโยชน์ของธาตุอาหารภายในพืช (Zhang et al., 2016)

7.4 ข้อจำกัดของระบบแอรโอโพนิกส์

แม้ว่าระบบแอรโอโพนิกส์จะมีข้อดีหลายประการ แต่ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณา เช่น ความซับซ้อนของระบบ และความจำเป็นในการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง เช่น ปั๊มน้ำและหัวพ่นละออง หากเกิดความขัดข้องอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ระบบแอรโอโพนิกส์อาจไม่สามารถสะท้อนสภาพแวดล้อมจริงในแปลงปลูกได้ทั้งหมด โดยเฉพาะปฏิสัมพันธ์ระหว่างรากพืชกับดินและจุลินทรีย์ในดิน (Lakhiar et al., 2018)

7.5 ความสำคัญต่อการศึกษาพืชหม่อน

การใช้ระบบแอโรโพนิกส์ในการศึกษาพืชหม่อนช่วยให้สามารถควบคุมปัจจัยด้านธาตุอาหารได้อย่างแม่นยำ โดยเฉพาะธาตุอาหารที่มีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ระบบดังกล่าวยังเอื้อต่อการศึกษการตอบสนองของพืชหม่อนทั้งในระดับสรีรวิทยาและระดับโมเลกุล เช่น การเจริญเติบโตของระบบราก การเปลี่ยนแปลงของปริมาณคลอโรฟิลล์ และการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมและการใช้ธาตุอาหาร ดังนั้น ระบบแอโรโพนิกส์จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการศึกษากลไกการตอบสนองของพืชหม่อนต่อการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหาร และสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงการจัดการธาตุอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพืชได้

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

วัสดุพืชทดลอง

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

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 ตู้อบลมร้อน
- 2.8 เครื่องวัดค่า SPAD Index
- 2.9 อุปกรณ์วัดความยาวราก (ไม้บรรทัด)
3. สารเคมีและสารละลายธาตุอาหาร
 - 3.1 สารละลายธาตุอาหารประกอบด้วย (Macronutrients, Micronutrients)
 - 3.2 ปรับค่า pH ของสารละลายให้อยู่ที่ประมาณ 6.5

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 จากนั้นนำท่อนพันธุ์มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาดเพื่อลดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อน ท่อนพันธุ์ที่คัดเลือกแล้วนำไปแช่ในสารป้องกันและกำจัดโรคพืชคาร์เบนดาซิมร่วมกับสารเร่งราก ฟุจิสตาร์ท เป็นระยะเวลาประมาณ 10 นาที หลังจากนั้นนำท่อนพันธุ์ไปบ่มเพื่อกระตุ้นการแตกตาข้างและการเกิดราก โดยวางท่อนพันธุ์ไว้ในที่มีด คลุมด้วยผ้าชุบน้ำ และพ่นน้ำสะอาดทุก ๆ 2 วัน เป็นระยะเวลาประมาณ 7 วัน หรือจนเริ่มสังเกตเห็นการเจริญของตาข้างและราก

2. การติดตั้งระบบปลูกพืชแบบแอโรโปนิคส์

ทำการประกอบระบบปลูกพืชแนวตั้งแบบแอโรโปนิคส์จำนวน 3 ชุด ณ โรงเรือนทดลอง คณะเกษตร หลังจากนั้นนำท่อนพันธุ์หม่อนที่ผ่านการบ่มเพาะแล้วใส่ลงในวัสดุปลูกชนิดฟองน้ำ และติดตั้งลงในช่องปลูกของระบบแอโรโปนิคส์ โดยจัดให้ระบบรากของพืชลอยอยู่ในอากาศเพื่อให้รากพืชได้รับความชื้นและออกซิเจนอย่างเพียงพอตลอดระยะเวลาการทดลอง

3. การเตรียมสารละลายธาตุอาหาร

สารละลายธาตุอาหารที่ใช้ในการทดลองเตรียมจากสารเคมีที่เป็นธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง โดยเริ่มจากการชั่งตวงสารแต่ละชนิดตามปริมาณที่คำนวณไว้ จากนั้นนำไปละลายในน้ำ (DI water) เพื่อปรับปริมาตรให้ได้สารละลายตั้งต้น (Stock solution) สารละลายตั้งต้นที่เตรียมแล้วนำไปเก็บรักษาในตู้เก็บสารเคมีเพื่อใช้ในการผสมสารละลายธาตุอาหารสำหรับการทดลอง

4. การผสมสารละลายธาตุอาหารและการจัดการวิธีการทดลอง

เตรียมน้ำปราศจากไอออน (DI water) ปริมาตรรวม 120 ลิตร แบ่งใส่ถังบรรจุจำนวน 3 ถัง ถังละ 40 ลิตร จากนั้นนำสารละลายตั้งต้นมาผสมในถังน้ำ DI จำนวน 2 ถัง ตามปริมาณที่คำนวณไว้ให้ครบทุกธาตุอาหาร เพื่อใช้เป็นกรรมวิธีที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ (Full nitrogen; FN) ขณะที่อีก 1 ถังใช้เป็นกรรมวิธีควบคุมโดยใช้น้ำ DI ไม่เติมสารละลายธาตุอาหาร (DI) เป็นเวลา 2.5 เดือน

สำหรับการใช้โคโคซาน มีการเติมโคโคซานลงในสารละลายธาตุอาหารของกรรมวิธีทดลองในความเข้มข้น 0.04% โดยยังคงระดับของธาตุอาหารอื่นให้เท่ากับกรรมวิธี FN เพื่อศึกษาผลของโคโคซานต่อการตอบสนองของพืช ทั้งนี้ สูตรสารละลายธาตุอาหารขั้นสุดท้ายของแต่ละกรรมวิธีแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 หลังจากผสมสารละลายธาตุอาหารแล้ว ทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้อยู่ในช่วงประมาณ 6.5 โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือกรดไฮโดรคลอริก (HCl) จากนั้นนำสารละลายไปใส่ในถังของระบบปลูกแอโรโปนิคส์

ตารางที่ 1 สูตรธาตุอาหารที่มีไนโตรเจนครบถ้วน (Full Nitrogen:FN)

Compound	Final Concentration	Volume of Stock Solution for 40 mL
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

ตารางที่ 2 สูตรธาตุอาหารที่เพิ่มไคโตซาน

Compound	Final Concentration	Volume of Stock Solution for 40 mL
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
Chitosan (ไคโตซาน)	0.04% (w/v) หรือ 0.4 g/L	18 g/40 L

5.แผนการทดลองและระยะเวลาการทดลอง

การทดลองวางแผนแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยประกอบด้วย 3 กรรมวิธี ได้แก่ กรรมวิธีที่ได้รับไนโตรเจนเต็มที่ (Full Nitrogen solution; FN) กรรมวิธีที่ใช้น้ำปราศจากไอออน (Deionized water; DI) และกรรมวิธีเพิ่มไคโตซาน(Chitosan) โดยแต่ละกรรมวิธีมีจำนวน 4 ซ้ำ การทดลองดำเนินการโดยใช้พืชหม่อนอายุ 2 เดือน และให้พืชได้รับทรีตเมนต์เป็นระยะเวลา 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

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

โดยคูณ 1000 เพื่อแปลงหน่วยจากกรัมเป็นมิลลิกรัม ผลลัพธ์แสดงค่าเป็นหน่วย มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตร (mg/cm²)

6.3 การวัดค่า Specific Root Length (SRL)

ทำการวัดค่า Specific Root Length (SRL) เพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดลักษณะการเจริญของระบบราก โดยทำการนำดินหม่อนออกจากระบบแอโรโปนิกส์อย่างระมัดระวัง จากนั้นล้างรากด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสารละลายที่ติดอยู่ โดยหลีกเลี่ยงการทำให้รากขาดหรือเสียหาย ทำการวัดความยาวรากทั้งหมดของแต่ละต้น แล้วนำรากไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนกระทั่งมีน้ำหนักคงที่ ก่อนนำมาชั่งน้ำหนักรากแห้ง ค่า Specific Root Length (SRL) คำนวณจากอัตราส่วนของความยาวรากทั้งหมดต่อมวลรากแห้ง โดยแสดงค่าเป็นหน่วยเมตรต่อกรัม (m/g)

7. การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์การแสดงออกของยีน

7.1 การเก็บตัวอย่างพืช

หลังจากสิ้นสุดการให้ทรिटเมนต์เป็นระยะเวลา 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 ตามมาตรฐานหลังการสกัด 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. ใช้โปรแกรม R Studio ในการวิเคราะห์ข้อมูล

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

สถานที่และระยะเวลาการทำวิจัย

1. สถานที่การทำวิจัย

โรงเรียนทดลองคณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

2. ระยะเวลาการทำวิจัย

เดือน พฤษภาคม 2567 ถึง เดือน ตุลาคม 2568

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาผลของการให้ไคโตซานต่อการตอบสนองของต้นหม่อนพันธุ์สกกลนครที่ปลูกในระบบเอโรโปนิคส์เป็นระยะเวลา 2.5 เดือน โดยประเมินทั้งด้านสรีรวิทยาและระดับชีวโมเลกุล พบว่า ในด้านสรีรวิทยา ได้แก่ ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD Green Index) น้ำหนักจำเพาะของใบ (Specific Leaf Weight; SLW) และความยาวจำเพาะของราก (Specific Root Length; SRL) ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างชุดที่ได้รับไคโตซานกับชุดควบคุม โดยค่า SLW และ SRL มีค่าใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าไคโตซานไม่ส่งผลต่อการสะสมมวลชีวภาพของใบและการพัฒนาระบบรากในช่วงเวลาที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนีความเขียวของใบมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในชุดที่ได้รับไคโตซาน แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งอาจสะท้อนถึงการกระตุ้นกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์หรือประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงในระดับหนึ่ง (El Hadrami et al., 2010; Pichyangkura & Chadchawan, 2015)

ในด้านชีวโมเลกุล พบว่าไคโตซานมีผลต่อการแสดงออกของยีนอย่างชัดเจน โดยยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันพืชและการสร้างสารทุติยภูมิ ได้แก่ *nerolidol synthase 1*, *trans-resveratrol di-O-methyltransferase* และ *(-)-limonene synthase* มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสร้างสารระเหยและสารต้านอนุมูลอิสระที่มีบทบาทในกลไกการป้องกันพืช (Degenhardt et al., 2009; Schmidlin et al., 2008; Lückner et al., 2001) ในขณะเดียวกัน ยีนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการพัฒนา เช่น *WAT1-related protein (At1g70260)*, *Nuclear transcription factor Y subunit B-1* และ *Cytochrome P450 78A5-like* มีการแสดงออกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสะท้อนถึงการชะลอกระบวนการแบ่งเซลล์และการพัฒนาอวัยวะของพืช (Ranocha et al., 2013; Petroni et al., 2012; Anastasiou et al., 2007)

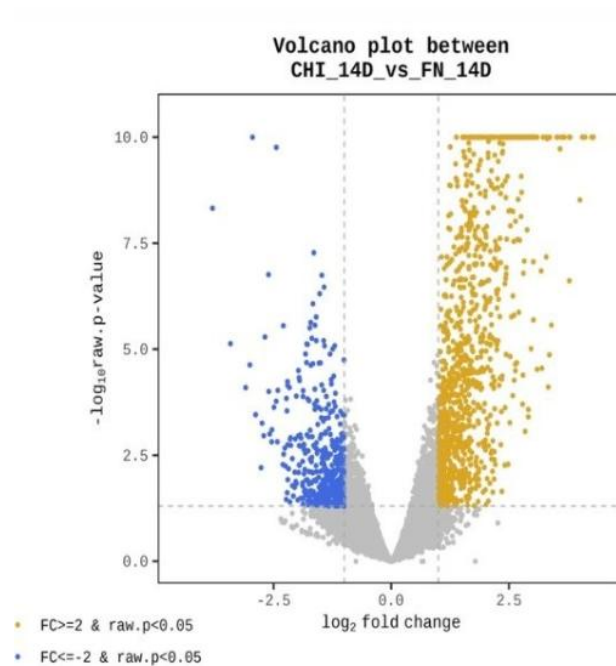
ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ไคโตซานทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น (elicitor) โดยพืชรับรู้เสมือนเกิดสภาวะความเครียด ส่งผลให้เกิดกระบวนการส่งสัญญาณภายในเซลล์ เช่น การเพิ่มขึ้นของ reactive oxygen species (ROS) และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งนำไปสู่การกระตุ้นการทำงานของ transcription factors และการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีน (Hadwiger, 2013; Pichyangkura & Chadchawan, 2015) ส่งผลให้พืชปรับสมดุลการทำงานจากการเจริญเติบโตไปสู่การป้องกัน โดยมีการเพิ่มการสร้างต้านอนุมูลอิสระและสารทุติยภูมิ ขณะที่กระบวนการเจริญเติบโตถูกชะลอลงชั่วคราว อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงในระดับชีวโมเลกุลยังไม่สะท้อนออกมาในระดับสรีรวิทยาอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเนื่องมาจากระยะเวลาการทดลองหรือความเข้มข้นของไคโตซานที่ใช้ยังไม่เหมาะสม (El Hadrami et al., 2010)

โดยสรุป โคโคซานมีบทบาทในการกระตุ้นระบบป้องกันของต้นหม่อนในระดับชีวโมเลกุลได้อย่างชัดเจน แม้ว่าจะยังไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาภายนอกอย่างมีนัยสำคัญภายใต้สภาวะการทดลองนี้

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD

Variable	Treatment	Mean	LSD Group	F-value	p-value
SLW	DI	3.724925	a	2.494	0.138
	FN	2.267250	a		
	CHI	2.267250	a		
SPAD	DI	37.0125	b	11.63	0.0032
	FN	45.8150	a		
	CHI	43.4725	a		
SRL	DI	91.6345	a	0.434	0.661
	FN	131.5450	a		
	CHI	125.8200	a		

หมายเหตุ: ตัวอักษร a และ b ที่กำกับหลังค่าเฉลี่ย เป็นผลจากการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี LSD (Least Significant Difference) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรเหมือนกันภายในตัวแปรเดียวกัน แสดงว่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) ในขณะที่ค่าเฉลี่ยที่มีตัวอักษรแตกต่างกันแสดงว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่า F-value และ p-value ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยค่า p-value < 0.05 แสดงว่ากรรมวิธีมีผลแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และค่า p-value < 0.01



ภาพที่ 1 แสดง Volcano plot ของการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนภายใต้สภาวะไคโตซานเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมสมบูรณ์ โดยพบว่ามียีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้นและลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 4 ยีนที่มีการแสดงออกเพิ่มขึ้น (Upregulated genes)

Gene symbol	Description	Fold change
LOC21408693	<i>(3S,6E)-nerolidol synthase 1</i>	+19.1
LOC21386345	<i>trans-resveratrol di-O-methyltransferase</i>	+13.7
LOC21401476	<i>(-)-limonene synthase</i>	+11.6

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

ตารางที่ 5 ยีนที่มีการแสดงออกลดลง (Downregulated genes)

Gene symbol	Description	Fold change
LOC21410424	<i>WAT1-related protein (At1g70260)</i>	-8.0
LOC21406308	<i>Nuclear transcription factor Y subunit B-1 (NF-YB1)</i>	-6.8
LOC112095278	<i>Cytochrome P450 78A5-like (CYP78A5-like)</i>	-6.4

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

สรุป

การศึกษาผลของการให้ไคโตซานต่อการตอบสนองของต้นหม่อนพันธุ์สกนกรที่ปลูกในระบบแอโรโพนิกส์เป็นระยะเวลา 2.5 เดือน พบว่า ในด้านสรีรวิทยา การให้ไคโตซานไม่ส่งผลให้ค่าดัชนีความเขียวของใบ (SPAD Green Index) น้ำหนักจำเพาะของใบ (Specific Leaf Weight; SLW) และความยาวจำเพาะของราก (Specific Root Length; SRL) แตกต่างจากชุดควบคุม โดยค่าที่วัดได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง แม้ว่าค่าดัชนีความเขียวของใบในชุดที่ได้รับไคโตซานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยก็ตาม ในขณะเดียวกัน ในระดับชีวโมเลกุลพบว่าไคโตซานส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีนอย่างชัดเจน โดยยีนที่เกี่ยวข้องกับการป้องกันพืชและการสร้างสารทุติยภูมิมีการแสดงออกเพิ่มขึ้น ขณะที่ยีนที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตและการพัฒนามีการแสดงออกลดลง สะท้อนให้เห็นว่าไคโตซานมีบทบาทเป็นสารกระตุ้นที่ทำให้พืชปรับการทำงานจากการเจริญเติบโตไปสู่การป้องกัน ส่งผลให้เกิดการกระตุ้นระบบป้องกันและการสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในระดับชีวโมเลกุล ดังนั้น แม้ไคโตซานจะยังไม่แสดงผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาอย่างเด่นชัดภายใต้สภาวะการทดลองนี้ แต่มีศักยภาพในการกระตุ้นระบบป้องกันของต้นหม่อนในระดับชีวโมเลกุลได้อย่างชัดเจน

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

1. หนังสือ (Book)

กรมหม่อนไหม. (2563). หม่อนและไหม: ความสำคัญและการใช้ประโยชน์. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

Food and Agriculture Organization. (2020). *Silk production and trade*. FAO Statistics Division.

2. วารสารทางวิชาการ

Anastasiou, E., Kenz, S., Gerstner, O., et al. (2007). Control of plant organ growth by KLUH/CYP78A5- dependent intercellular signaling. *Developmental Cell*, 13(6), 843–856.
<https://doi.org/10.1016/j.devcel.2007.09.002>

Barak, P., Smith, J. D., Krueger, A. R., & Peterson, L. A. (1996). Measurement of short-term nutrient uptake rates in plants using aeroponics. *Plant, Cell & Environment*, 19(3), 237–242.

Butt, M. S., Nazir, A., Sultan, M. T., & Schroën, K. (2008). *Morus alba* L.: Nature's functional tonic. *Trends in Food Science & Technology*, 19(10), 505–512.

Chan, E. W. C., Lye, P. Y., & Wong, S. K. (2016). Phytochemistry, pharmacology, and clinical trials of *Morus alba*. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 14(1), 17–30.

Degenhardt, J., Gershenzon, J., Baldwin, I. T., & Kessler, A. (2009). Attracting friends to feast on foes: The role of sesquiterpene synthases in indirect plant defense. *Plant Physiology*, 149(2), 574–586. <https://doi.org/10.1104/pp.108.130831>

El Hadrami, A., Adam, L. R., El Hadrami, I., & Daayf, F. (2010). Chitosan in plant protection. *Marine Drugs*, 8(4), 968–987. <https://doi.org/10.3390/md8040968>

Hadwiger, L. A. (2013). Multiple effects of chitosan on plant systems: Solid science or hype. *Plant Science*, 208, 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2013.02.004>

Katiyar, D., Hemantaranjan, A., Singh, B., & Bhanu, A. N. (2020). Chitosan: A potential biostimulant in plant production. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(5), 1724–1733.

- Khan, W., Prithiviraj, B., & Smith, D. L. (2002). Effect of foliar application of chitosan on growth of plants. *Plant Science*, 163(3), 475–481.
- Kimura, T., Nakagawa, K., Kubota, H., Kojima, Y., Goto, Y., Yamagishi, K., Oita, S., Oikawa, S., & Miyazawa, T. (2007). Food-grade mulberry powder enriched with 1-deoxynojirimycin suppresses postprandial blood glucose elevation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(14), 5869–5874.
- Lakhari, I. A., Gao, J., Syed, T. N., Chandio, F. A., & 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.
- Lücker, J., Bowen, P., Bohlmann, J., & et al. (2001). Monoterpene synthases of the mint family: Molecular biology and function. *Plant Physiology*, 127(4), 1527–1538. <https://doi.org/10.1104/pp.010345>
- Malerba, M., & Cerana, R. (2016). Chitosan effects on plant systems. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(7), 996.
- Petroni, K., Kumimoto, R. W., Gnesutta, N., et al. (2012). The nuclear factor Y subunits NF-YB2 and NF-YB3 play a key role in Arabidopsis photoperiod-dependent flowering. *Plant Journal*, 70(6), 910–922. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2012.04914.x>
- Pichyangkura, R., & Chadchawan, S. (2015). Biostimulant activity of chitosan in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 196, 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.025>
- Ranocha, P., Denancé, N., Vanholme, R., et al. (2013). Walls are thin 1 (WAT1), an Arabidopsis homolog of Medicago truncatula NODULIN21, is a tonoplast-localized protein required for secondary wall formation in fibers. *Plant Journal*, 73(3), 448–465. <https://doi.org/10.1111/tpj.12077>
- Rinaudo, M. (2006). Chitin and chitosan: Properties and applications. *Progress in Polymer Science*, 31(7), 603–632.
- Ritter, E., Angulo, B., Riga, P., Herrán, C., Relloso, J., & San José, M. (2001). Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato minitubers. *Potato Research*, 44(2), 127–135.

- Schmidlin, L., Viret, O., & Davière, J.-M., et al. (2008). *Trans-resveratrol di-O-methyltransferase*: Functional characterization in grapevine. *Plant Molecular Biology*, 67(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11103-008-9327-7>
- Sharif, R., Mujtaba, M., Rahman, M. U., Shalmani, A., Ahmad, H., Anwar, T., & Wang, X. (2018). The multifunctional role of chitosan in plant protection. *Molecules*, 23(4), 872.
- Thabti, I., Elfalleh, W., Hannachi, H., Ferchichi, A., & Campos, M. G. (2023). Identification and quantification of phytochemical compounds in mulberry. *Food Chemistry*, 210, 137–144.
- Wang, Y., Xiang, L., Wang, C., Tang, C., & He, X. (2016). Antidiabetic and antioxidant effects of mulberry. *Food & Function*, 7(2), 530–536.
- Zhang, H., Forde, B. G., & Davies, W. J. (2016). Nutrient signaling and root development in plants. *Journal of Experimental Botany*, 67(12), 3435–3448.

3. เว็บไซต์

- CABI. (2019). *Mulberry (Morus alba) cultivation and uses*. Retrieved from <https://www.cabi.org/>
Department of Agriculture. (n.d.). *Mulberry cultivation information*. Retrieved from <https://www.doa.go.th/>
- Healthline. (2019). *Mulberry: Benefits, nutrition, and side effects*. Retrieved from <https://www.healthline.com/>
- Herbal Reality. (2025). *Mulberry (Morus alba): Benefits and traditional uses*. Retrieved from <https://www.herbalreality.com/>

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล จูตินัน ช่วยชนะ

วัน เดือน ปี เกิด 4 สิงหาคม 2546

สถานที่เกิด ตรัง

ประวัติการศึกษา มัธยมศึกษา โรงเรียนมัธยมควนพิเศษมูลนิธิ

ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน -

สถานที่ทำงานปัจจุบัน -

ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ -