



รายงานการวิจัย

การพัฒนาปุ๋ยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
Development of environmentally friendly fertilizer

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว



รายงานการวิจัย

การพัฒนาปุ๋ยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Development of environmentally friendly fertilizer

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดวงกมล แม่นศิริ

สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

กันยายน 2564

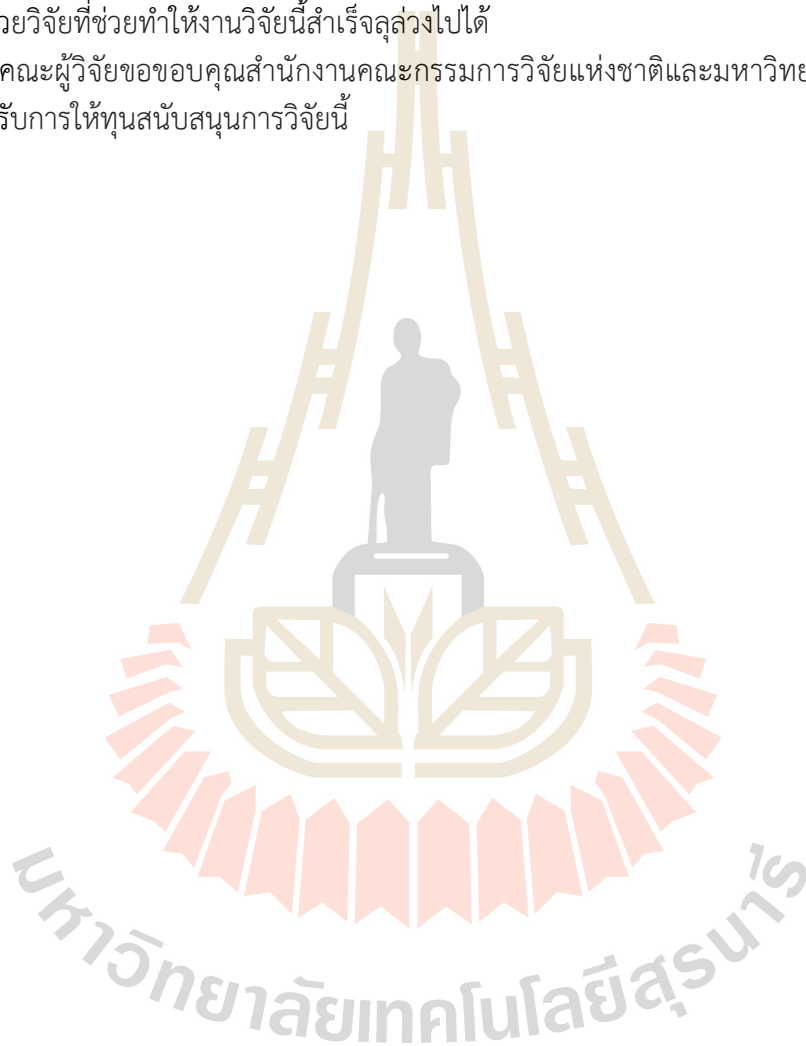
กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยข้าวนครราชสีมา จ.นครราชสีมา ในการเอื้อเฟื้อตัวอย่าง เมล็ดพันธุ์ข้าวสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ นายกรวิชัย โอภาสเสถียร นักศึกษาระดับปริญญาตรี นายเอนจิ ที และนางสาว ศิริินภา พงษ์พีระ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในฐานะผู้ช่วยวิจัยที่ช่วยทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีสำหรับการให้ทุนสนับสนุนการวิจัยนี้

คณะผู้วิจัย
กันยายน 2564



บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ออนูภาคนาโนหลายด้าน เพราะคุณสมบัติจำเพาะของอนูภาคนาโน เช่น ทางการแพทย์ เครื่องสำอาง เทคโนโลยีชีวภาพ อิเล็กทรอนิกส์ และด้านการเกษตร งานวิจัยนี้ได้ทดสอบผลของอนูภาคนาโน 3 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ ทอง และไฮดรอกซีอะพาไทต์ ต่อข้าวเพื่อศึกษาผลกระทบต่อพืชและศักยภาพในการนำไปใช้ในงานด้านการเกษตร ทำการสังเคราะห์อนูภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล สังเคราะห์อนูภาคนาโนทองโดยใช้สารสกัดจาก *Tiliacora triandra* และสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้สารสกัดจากว่านหางจระเข้ *Aloe vera* จากนั้นศึกษาผลกระทบของอนูภาคนาโนเหล่านี้ต่อข้าวจากการงอกไปจนถึงวันที่เจ็ดที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ติดตามการงอก ความยาวของราก ความเครียดของพืช การตายของเซลล์ เพื่อระบุผลของอนูภาคในการเจริญเติบโตของต้นกล้า รวมถึงความเป็นพิษของอนูภาคนาโนต่อเซลล์ ผลการทดลองพบว่าอนูภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ และอนูภาคนาโนทองนั้น ไม่ได้ให้ผลในเชิงบวกหรือลบกับต้นกล้า ขณะที่ผลของไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถกระตุ้นการงอกได้สูงถึง 95-98.38% นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถกระตุ้นความยาวของรากได้ดี ที่ความเข้มข้นต่ำ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แตกต่างจากกลุ่มการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งอนูภาคทั้ง 3 ชนิดนี้ยังไม่เป็นพิษต่อพืช เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) เนื่องจากผลการศึกษาเบื้องต้นบ่งชี้ว่าอนูภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์มีแนวโน้มในการเป็นปุ๋ยฟอสฟอรัสได้ดี และมีสารประกอบฟอสฟอรัสและแคลเซียมเป็นองค์ประกอบหลัก จึงได้ทำการติดตามผลของอนูภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อข้าวในระยะการเจริญเติบโต 130 วัน จากนั้นบันทึกความสูงของต้น ความกว้างของใบ จำนวนรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง น้ำหนัก 1000 เมล็ด ผลการศึกษาโดยรวมพบว่าอนูภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จากการใช้สารสกัดว่านหางจระเข้ไม่เป็นพิษต่อต้นข้าว ช่วยส่งเสริมการงอก ความยาวของราก และผลผลิต และมีศักยภาพในการนำมาพัฒนาใช้เป็นปุ๋ยนาโนในทางการเกษตรได้

คำสำคัญ: ปุ๋ยนาโน, การเกษตรกรรม, อนูภาคนาโน

Abstract

At present, nanoparticles have been applied in many fields due to their specific properties. Examples include applications in medicine, cosmetics, biotechnology electronics and agriculture. This study tested magnesium ferrite, gold and hydroxyapatite nanoparticles on rice to investigate their effect on plant and their potential to be applied in agriculture. The synthesis of magnesium ferrite nanoparticles was conducted using hydrothermal method. Gold nanoparticles were synthesized using *Tiliacora triandra* extract and hydroxyapatite nanoparticles were synthesized by using *Aloe vera* extract. The effects of these nanoparticles on rice from germination to day 7 at different concentrations. Germination, root length, plant stress, cell death were studied to indicate the effect of the nanoparticles on seedling growth and the toxicity of nanoparticles to cells. The results showed that magnesium ferrite nanoparticles and gold nanoparticles did not have either positive or negative effect on seedlings. In contrast, hydroxyapatite nanoparticles stimulated germination up to 95-98.38%. It also significantly stimulated root length at low concentration of 100 mg/L. These nanoparticles were not toxic to the plants when compared with the control group. No statistically significant difference ($P \leq 0.05$) was observed. Since hydroxyapatite nanoparticles had been shown to have potential as phosphorus fertilizer and they contain phosphorus and calcium components, they were used in further experiment which observed the effect they had on rice growth until 130 days. The height, leaf width, number of panicle, number of seeds per panicle, weight of 1000 seeds were recorded. The overall results indicated that hydroxyapatite nanoparticles synthesized from using *Aloe vera* extract was not toxic to rice. They promoted germination, root length and yield. And they have potential to be applied as nano-phosphorus fertilizer in agriculture.

Key words: nanofertilizer, agriculture, nanoparticles

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญรูปภาพ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม.....	3
2.1 อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์.....	5
2.2 อนุภาคนาโนทอง.....	6
2.3 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	6
2.4 แนวโน้มเทคโนโลยีนาโนในอนาคต.....	7
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	8
3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน.....	8
3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	8
3.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองโดยใช้สารละลายใบย่านาง.....	8
3.1.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่มีส่วนผสมของเจลาตินและเจลาติน- กลูโคส.....	8
3.1.4 การสังเคราะห์อนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้สารละลายวานหางจระเข้.....	9
3.2 ตรวจสอบลักษณะของอนุภาคนาโน.....	10
3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	10
3.2.1.1 อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์.....	10
3.2.1.2 อนุภาคนาโนทอง.....	11
3.2.1.3 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์	11

สารบัญ

	หน้า
3.2.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis)	12
3.2.2.1 อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์.....	12
3.2.2.2 อนุภาคนาโนทอง	12
3.2.2.3 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	13
3.2.3 การวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชัน.....	13
3.2.3.1 อนุภาคนาโนทอง.....	13
3.2.3.2 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	13
3.3 การศึกษาผลของอนุภาคนาโนต่อข้าวในระหว่างการงอกและระยะต้นกล้า 7 วัน	13
3.3.1 การเพาะเมล็ดและการเตรียมสารละลาย.....	13
3.3.2 การวัดการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระหว่างการงอก 7 วัน.....	14
3.3.2.1 การวัดอัตราการงอกของเมล็ด.....	14
3.3.2.2 การวัดความยาวของรากและยอด.....	14
3.3.2.3 การหาปริมาณน้ำสัมพันธ์ในต้นกล้าตามวิธีของ Barrs และ Weatherly	15
3.3.2.4 การตรวจวัดเซลล์ที่ตาย (Cell death assay).....	15
3.3.2.5 การตรวจหาปริมาณ Malondialdehyde (MDA).....	16
3.4 การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว	16
3.4.1 การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์.....	16
3.4.2 การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	19
บทที่ 4 ผลและอภิปรายผล.....	21
4.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	21
4.1.1 ผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อข้าวในระหว่างการงอก.....	23
4.1.1.1 ผลต่อความยาวเฉลี่ยของราก และความยาวเฉลี่ยของยอด เมื่อได้รับอนุภาคเป็นเวลา 7 วัน.....	23
4.1.1.2 การหาปริมาณเซลล์ที่ตายด้วยวิธี Cell death assay.....	29
4.1.1.3 ปริมาณ Malondialdehyde.....	32
4.1.1.4 ปริมาณน้ำสัมพันธ์ (Relative water content)	33

สารบัญ

หน้า

4.1.2 ผลของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว ในระยะปลูกในดิน (อายุ 28 – 35 วัน)	35
4.1.2.1 อัตราการเติบโต.....	35
4.1.2.2 น้ำหนักสดของลำต้นข้าวเมื่ออายุ 35 วัน.....	36
4.1.2.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี.....	37
4.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทอง.....	43
4.2.1 ผลของอนุภาคทองต่อข้าวต่อข้าว.....	46
4.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์.....	49
4.3.1 ผลของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อข้าวในระยะ 7 วัน.....	51
4.4 ผลของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อข้าวในระยะการเจริญเติบโต 130 วัน.....	54
4.4.1 การวัดความสูง และความกว้างของใบ.....	56
4.4.2 จำนวนรวงต่อกระถาง.....	57
4.4.3 จำนวนเมล็ดต่อรวง.....	58
4.4.4 น้ำหนักเมล็ด 1000 เมล็ด.....	59
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	61
เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย.....	62
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	70
ผลงานตีพิมพ์ที่เกิดจากงานวิจัย.....	74
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของต้นแคณ (Duncan’s multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 1.....	76
ภาคผนวก ข การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของ ต้นแคณ (Duncan’s multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 1.....	77
ภาคผนวก ข เปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของต้นแคณ (Duncan’s multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 2.....	78
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของ ต้นแคณ (Duncan’s multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 2.....	79
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของ ต้นแคณ (Duncan’s multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 3.....	80
ภาคผนวก ฉ การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของ ต้นแคณ (Duncan’s multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 3.....	81

สารบัญ

หน้า

ภาคผนวก ง การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของ ดันแคน (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 4.....	82
ภาคผนวก จ การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของ ดันแคน (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 4.....	83
ภาคผนวก ฉ การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสี ย้อม Evans Blue โดยวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 1.....	84
ภาคผนวก ช การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสี ย้อม Evans Blue โดยวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 2.....	85
ภาคผนวก ซ การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ของสีย้อม Evans Blue โดยวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 3.....	86
ภาคผนวก ฌ การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ของสีย้อม Evans Blue โดยวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 4.....	87
ภาคผนวก ฎ การเปรียบเทียบปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์โดยวิธีของ (Duncan's multiple range test) จากการทดลองครั้งที่ 1.....	88
ภาคผนวก ฏ การเปรียบเทียบปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์โดยวิธีของ (Duncan's multiple range test) จากการทดลองครั้งที่ 2.....	89
ภาคผนวก ฐ การเปรียบเทียบปริมาณน้ำสัมพัทธ์โดยวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) จากการทดลองครั้งที่ 1.....	90
ภาคผนวก ฑ การเปรียบเทียบปริมาณน้ำสัมพัทธ์โดยวิธีของดันแคน (Duncan's multiple range test) จากการทดลองครั้งที่ 2.....	91
ภาคผนวก ท การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตด้วยวิธีแบบดันแคน (Duncan's multiple range test).....	92
ภาคผนวก ฒ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดด้วยวิธีแบบดันแคน (Duncan's multiple range test).....	93
ภาคผนวก ณ การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ด้วยวิธีแบบดันแคน (Duncan's multiple range test).....	94
ภาคผนวก ด การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์บี ด้วยวิธีแบบดันแคน (Duncan's multiple range test).....	95

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 2.1 การเปรียบเทียบปุ๋ยฟอสฟอรัส 3 แบบ: ละลายน้ำ อนุภาคนาโน และปุ๋ยเกล็ดที่ใช้ทั่วไป.....	5
ภาพที่ 3.1 แบบแผนการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน.....	10
ภาพที่ 3.2 ผลระนาบของอนุภาคเมื่อทำการเทียบค่า d-spacing กับสารมาตรฐาน.....	11
ภาพที่ 3.3 การเรียงเมล็ดข้าวในจานเพาะเชื้อโดยหัวลูกศรคือส่วนของจมูกข้าว.....	14
ภาพที่ 3.4 การเตรียมการแช่ข้าวในสารละลาย Evans blue และการชะล้างด้วยน้ำกลั่น.....	16
ภาพที่ 3.5 วิธีการวัดความยาวและความกว้างของใบ	17
ภาพที่ 3.6 การเลือกใบสำหรับการวัดพื้นที่ เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโต	18
ภาพที่ 3.7 ผลจากการบดใบพีชด้วย Acetone 80% และการกรองส่วนที่บดได้ด้วย กรวยบุชเนอร์.....	19
ภาพที่ 3.8 การวัดความสูงของต้นข้าว ความยาวใบ และความกว้างของใบ.....	20
ภาพที่ 4.1 แบบแผนการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างของอนุภาคนาโนแมกนีเซียม เฟอร์ไรต์.....	22
ภาพที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของอนุภาคนาโนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) histogram แสดงเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ข).....	23
ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 1.....	24
ภาพที่ 4.4 ความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 1.....	24
ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 2.....	26
ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 3.....	27
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 4.....	28
ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม Evans Blue ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2.....	30
ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม Evans Blue ในการทดลองครั้งที่ 3 และ 4	31
ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างรากเมื่อถูกย้อมด้วยสีย้อม Evans blue.....	31
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์ ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2.....	33
ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2.....	34
ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของรากข้าวที่ชุดการทดลอง ความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชุดควบคุม) กำลังขยาย 8,000 เท่า (ก) ภาพถ่ายจาก กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของรากข้าวที่ชุดการทดลองความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชุดควบคุม) กำลังขยาย 8,000 เท่า (ข).....	35

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 4.14	กราฟแสดงอัตราการเติบโตโดยวัดจากขนาดของใบตามความเข้มข้น.....	36
ภาพที่ 4.15	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดของต้นข้าวเทียบตามความเข้มข้น.....	37
ภาพที่ 4.16	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์เอ เทียบตามความเข้มข้น.....	38
ภาพที่ 4.17	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์บี เทียบตามความเข้มข้น.....	39
ภาพที่ 4.18	UV-vis spectra ของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน.....	44
ภาพที่ 4.19	ฮิสโทแกรมแสดงขนาดของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส, 65 องศาเซลเซียส และ 25 องศาเซลเซียส.....	44
ภาพที่ 4.20	ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนของทองรูปแบบต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ในสารสกัดใบย่านางที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 65 องศาเซลเซียส และ 80 องศาเซลเซียส.....	45
ภาพที่ 4.21	แบบแผน SAED ของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้ในสารสกัดใบย่านาง.....	45
ภาพที่ 4.22	แบบแผน XRD ของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ	45
ภาพที่ 4.23	การตอบสนองของต้นอ่อนของข้าวต่ออนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ในสารสกัดใบย่านาง ได้แก่ ความยาวราก ความยาวยอด และอัตราการงอก.....	46
ภาพที่ 4.24	ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (a) และการตายของเซลล์ในรากโดยวัดจากการปล่อยสี Evans blue จากเซลล์ (b).....	47
ภาพที่ 4.25	สเปกตรัม FTIR ของสารสกัดใบย่านางและอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้.....	48
ภาพที่ 4.26	ภาพ TEM ของเซลล์รากกลุ่มควบคุมที่กำลังขยาย 2,500 เท่า กลุ่มที่ทดสอบด้วยอนุภาคนาโนของทองที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และกำลังขยาย 4,000 เท่า.....	48
ภาพที่ 4.27	รูปร่างของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ การกระจายขนาดอนุภาคและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย Peak การเลี้ยวเบนแสดงเป็น peak 2 θ สเปกตรัม EDX แสดงแคลเซียมและฟอสฟอรัส โหมดการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ระหว่าง 400-4000 cm ⁻¹	50
ภาพที่ 4.28	การงอกเฉลี่ย (A) ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (B) ความยาวของราก (C) ความยาวของ (D)ยอดหลังจากสัมผัสกับอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์ (18-46-0) และ (15-15-15) ในสารละลายใน 7 วัน (n = 5).....	53
ภาพที่ 4.29	ระยะและระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าว (สถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ IRRI).....	54
ภาพที่ 4.30	สรีรวิทยาของข้าวหลังเพาะปลูกได้ 35, 60 และ 90 วัน.....	55

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 4.31 สรีรวิทยาของต้นข้าวหลังเก็บเกี่ยว 130 วัน.....	56
ภาพที่ 4.32 ความสูงของต้นข้าวหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และปุ๋ยเชิงพาณิชย์.....	57
ภาพที่ 4.33 ความกว้างของใบข้าวหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และปุ๋ยเชิงพาณิชย์.....	57
ภาพที่ 4.34 จำนวนรวงต่อกระถางหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และปุ๋ยเชิงพาณิชย์.....	58
ภาพที่ 4.35 จำนวนเมล็ดต่อรวงหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และปุ๋ยเชิงพาณิชย์.....	59
ภาพที่ 4.36 น้ำหนักเมล็ด 1000 เมล็ดหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และปุ๋ยเชิงพาณิชย์.....	60



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการเทียบค่า d-spacing ของสารมาตรฐานกับสารที่สังเคราะห์ขึ้น.....	11
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Interplanar spacing (d-spacing) ของอนุภาคตัวอย่างกับสารมาตรฐาน ด้วยเทคนิค Selected Area Electron Diffraction (SAED-TEM).....	22
ตารางที่ 4.22 ตัวอย่างรายงานการทดสอบผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อพืช.....	42

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

นาโนเทคโนโลยีหมายถึงเทคโนโลยีประยุกต์ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์วัสดุหรืออุปกรณ์ในระดับของอะตอม โมเลกุลหรือชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กในช่วงประมาณ 1 ถึง 100 นาโนเมตรซึ่งจะส่งผลให้วัสดุหรืออุปกรณ์ต่าง ๆ มีคุณสมบัติที่พิเศษขึ้นทั้ง ทางด้านกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งแบ่งได้เป็นสามระดับ ได้แก่ วัสดุนาโน เครื่องมือที่ใช้เทคโนโลยีนานา และระบบการทำงานที่อาศัยเทคโนโลยีนานา อย่างไรก็ตาม งานทางด้านวัสดุนาโนดูเหมือนจะมีความก้าวหน้าไปมากที่สุด มีการนำวัสดุนาโนไปประยุกต์ใช้ในหลายด้าน เช่น อนุภาคนาโนของเงิน (silver nanoparticles) ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคต่าง ๆ เนื่องจากการมีความสามารถในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบ (Burrell et al., 1999; Wijnhoven et al., 2009) รวมถึงสายพันธุ์ที่ต้านทานต่อยาปฏิชีวนะ (Percival et al., 2007) ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนของเงิน ได้แก่ การใช้ในบรรจุภัณฑ์อาหาร สิ่งทอที่ต้านทานการเกิดกลิ่น อุปกรณ์เครื่องใช้ในบ้าน (เช่น ตู้เย็น และเครื่องซักผ้า) และอุปกรณ์ทางการแพทย์ เป็นที่น่าสนใจว่า การศึกษาหาแนวทางการประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในทางการเกษตรได้เริ่มต้นขึ้นไม่นานนัก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชต่ออนุภาคนาโนมีพื้นฐานมาจากสองประเด็นหลัก ได้แก่ ความห่วงกังวลในเรื่องพิษในสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปลดปล่อยอนุภาคนาโนสู่สิ่งแวดล้อม และกลไกการตอบสนองของพืชต่ออนุภาคนาโนเพื่อหาแนวทางในการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ตัวอย่างเช่นการนำอนุภาคนาโนมาใช้เป็นปุ๋ยเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงมีการใช้ปุ๋ยในการเพาะปลูกในปริมาณมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรและความต้องการอาหารที่มากขึ้น ความต้องการปุ๋ยจึงมากขึ้นด้วย ซึ่งทำให้การพึ่งพาปุ๋ยจากธรรมชาติที่ฟาร์มผลิตได้เองอาจไม่เพียงพอ การเกษตรกรรมจึงมีแนวโน้มพึ่งพาปุ๋ยที่ต้องใช้ทรัพยากรประเภทใช้แล้วหมดไปในกระบวนการผลิตมากขึ้น จึงมีโอกาสที่หากไม่มีการพัฒนาใดๆ ปุ๋ยในอนาคตจะมีคุณภาพด้อยลง และราคาสูงขึ้น (Wellmer and Becker-Platen, 2002) ในขณะที่ปุ๋ยถูกผลิตขึ้นโดยใช้ทรัพยากรประเภทใช้แล้วหมดไป กลับไม่สามารถถูกนำไปใช้โดยพืชได้อย่างเต็มที่ ส่วนที่พืชไม่ได้นำไปใช้จะสะสมในน้ำใต้ดิน หรือแหล่งน้ำต่าง ๆ เป็นสาเหตุของการเกิดยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) ซึ่งเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ (Conley et al., 2009)

ปัญหาดังกล่าวจึงทำให้เกิดงานวิจัยเพื่อพัฒนาปุ๋ยให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และถึงแม้ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้า ๆ จะถูกผลิตขึ้นและมีการจดสิทธิบัตรไปบ้าง ความรู้และนวัตกรรมใหม่ๆ ในงานวิจัยทางด้านนี้ยังคงเป็นที่ต้องการเพื่อแก้ปัญหาที่ยังคงมีอยู่ รวมถึงปัจจุบัน มนุษย์เริ่มหันมาสนใจวิธีการปลูกพืชแบบใหม่ เช่น ปลูกข้าวในกระถาง หรือการทำฟาร์มแนวตั้ง (vertical farming)

ดังนั้นการวิจัยเพื่อหาปุ๋ยแบบใหม่จึงเป็นองค์ความรู้ที่สำคัญสำหรับรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว เพื่อสังเคราะห์ปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม รวมทั้งมีความยั่งยืนทางด้านอาหารและสิ่งแวดล้อมไปพร้อมกัน คณะผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบผลของอนุภาคนาโนต่อพืช ทั้งอนุภาคที่มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้ด้านอื่น เนื่องจากการมีคุณสมบัติการเป็นแม่เหล็ก หรือการนำไฟฟ้า ได้แก่ อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ ($MgFe_2O_4$) และอนุภาคนาโนของทอง (gold nanoparticles) เพื่อศึกษาความเป็นพิษของพืช หรือผลทางบวกต่อพืชที่อาจจะมีได้ และอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) เนื่องจากมีธาตุที่พืชต้องการมาก (macronutrients) ได้แก่ ฟอสฟอรัสและแคลเซียม โดยมีการสังเคราะห์อนุภาคนาโน การศึกษาลักษณะของอนุภาค และการศึกษาผลที่เกิดต่อข้าวขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งเป็นข้าวสายพันธุ์สำคัญของประเทศไทย โดยทดสอบวัสดุทั้งสามในระยะงอกแล้วจึงเลือกวัสดุที่ให้ผลดีไปศึกษาในระยะกล้าต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อทดสอบผลกระทบของวัสดุนาโนสามชนิด ได้แก่ อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ อนุภาคนาโนของทอง และอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ ต่อการงอกของข้าวขาวดอกมะลิ 105
2. เพื่อประเมินศักยภาพเบื้องต้นของวัสดุนาโนที่ทดสอบในการใช้เป็นปุ๋ย

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

สังเคราะห์วัสดุนาโนสามชนิด ได้แก่ อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ อนุภาคนาโนของทอง และอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากนั้นทำการศึกษาลักษณะของอนุภาค และทดสอบผลของอนุภาคนาโนต่อการงอกของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพื่อคัดเลือกอนุภาคที่ให้ผลดีไปศึกษาผลต่อข้าวในระยะกล้าต่อไป ผลที่ได้จะเป็นการประเมินศักยภาพเบื้องต้นของวัสดุนาโนที่ทดสอบในการใช้เป็นปุ๋ย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ด้านวิชาการ

ได้ข้อมูลเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคนาโนชนิดที่ศึกษาต่อพืชที่เป็นประโยชน์ในการต่อยอดงานวิจัยสำหรับการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนในทางการเกษตรได้ต่อไป เช่น การผลิตปุ๋ยชนิดใหม่ และได้เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารวิชาการ

1.4.2 ด้านการพัฒนาทรัพยากรบุคคล

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยของนักศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยานิพนธ์ของนักศึกษาระดับปริญญาโท และวิทยานิพนธ์ของนักศึกษาระดับปริญญาเอก

1.4.3 หน่วยงานที่ใช้ประโยชน์จากผลการวิจัย

ผลเชิงบวกของอนุภาคนาโนต่อการงอกและการเจริญของข้าวอาจเป็นที่สนใจต่อกลุ่มวิจัยหรือภาคเอกชนที่มองเห็นนวัตกรรมเพื่อส่งเสริมการเกษตร เช่น การพัฒนาปุ๋ยนาโนต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

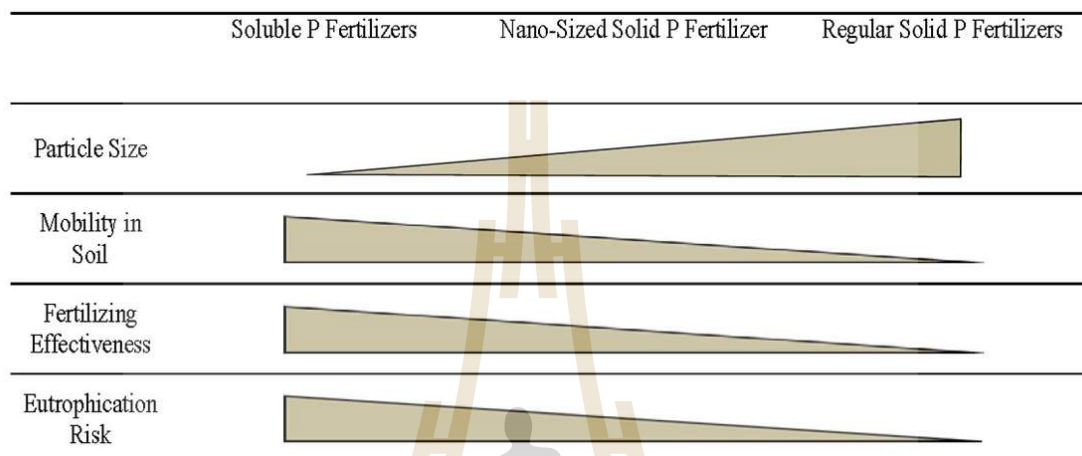
อนุภาคนาโนคือวัสดุที่ได้ออกแบบให้มีมิติที่อยู่ในช่วง 1-100 นาโนเมตร (Kregling et al., 2010) ทำให้วัสดุดังกล่าวมีคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีภาพที่เหมาะสมกับการนำความร้อน สมบัติทางไฟฟ้าและทางกล สูงกว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสที่เพิ่มขึ้น พลังงานพื้นผิวสูง และเอฟเฟกต์ควอนตัม (Arivalagan et al., 2011) วัสดุนาโนนอกจากจะถูกสังเคราะห์ขึ้นแล้ว ยังสามารถพบได้ในธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น หินภูเขา ควันไฟป่า เป็นต้น หรือแม้กระทั่งผลที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ควันเชื่อม การเผาไหม้ถ่านหิน เป็นต้น อนุภาคนาโนถูกนำมาประยุกต์ใช้ในวงกว้าง จึงมีผลิตภัณฑ์มากมายที่ใช้ประโยชน์จากนาโนเทคโนโลยี ตัวอย่างเช่นในผลิตภัณฑ์สิ่งทอมีการผสมอนุภาคนาโนของเงิน (silver nanoparticles: AgNPs) ลงไปในเส้นใย เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติในการต่อต้านแบคทีเรีย โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli* (Yeo et al., 2003) หรือในทางการแพทย์ที่ประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนประเภทที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กอย่างเช่น อนุภาคนาโนของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CoFe_2O_4) นำมาใช้ในการบำบัดโรคมะเร็ง เป็นวัสดุขนส่งยาขนาดเล็ก หรือใช้ในการวินิจฉัยโรค (Baldi et al., 2007; Amiri and Shokrollahi, 2013; Romih et al., 2015 อ้างถึงใน Lopez-Moreno et al., 2016) เป็นที่น่าสนใจว่า การศึกษาหาแนวทางการประยุกต์ใช้วัสดุนาโนในทางการเกษตรได้เริ่มต้นขึ้นไม่นานนัก งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของพืชต่ออนุภาคนาโนมีพื้นฐานมาจากสองประเด็นหลัก ได้แก่ ความห่วงกังวลในเรื่องพิษในสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการปลดปล่อยอนุภาคนาโนสู่สิ่งแวดล้อม และกลไกการตอบสนองของพืชต่ออนุภาคนาโนโดยมุ่งเน้นการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

Hong et al. (2005a; b) ได้รายงานผลเชิงบวกของอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ในการกระตุ้นกิจกรรมของคลอโรพลาสต์ใน *Spinach oleracea* โดยคาดว่าอนุภาคที่เข้าไปในคลอโรพลาสต์มีผลในการเร่งการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ในพืชชนิดเดียวกันนี้พบว่าอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์มีผลเพิ่มอัตราการงอกของเมล็ด และส่งผลบวกในระยะที่พืชเติบโต อนุภาคนาโนชนิดนี้ได้กระตุ้นให้พืชมีมวลชีวภาพ มีคลอโรฟิลล์ และอัตราการสังเคราะห์แสงมากกว่าพืชชนิดเดียวกันในกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับอนุภาคนาโนของไทเทเนียมไดออกไซด์ (Zhang et al., 2005) นอกจากนี้ ท่อนานาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ถูกนำมาทดสอบผลต่ออัตราการงอกในมะเขือเทศ (Khodakovskaya et al., 2009) พบว่าเมล็ดที่ได้รับท่อนานาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้น (multiwalled carbon nanotube) เริ่มงอกเร็วกว่าและมีอัตราการงอกสูงกว่ากลุ่มควบคุม ต้นมะเขือเทศที่งอกจากเมล็ดซึ่งได้รับการกระตุ้นโดยท่อนานาโนคาร์บอนมีมวลชีวภาพมากกว่ากลุ่มทดลองทั้งในส่วนใบ ลำต้น และรากถึง 2.5 เท่า คณะวิจัยได้ทำงานทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าท่อนานาโนคาร์บอนสามารถผ่านเปลือกหุ้มเมล็ด (seed coat) เข้าไปในเมล็ดได้ แล้วมีผลกระตุ้นให้พืชดูดน้ำเข้าเมล็ดได้มากขึ้นจึงทำให้เกิดการงอกเร็วขึ้นและมีจำนวนเมล็ดที่งอกได้มากกว่า คุณสมบัติจำเพาะบางอย่างของท่อนานาโนคาร์บอนที่

แตกต่างกันกระตุ้นการตอบสนองทางสรีรวิทยาของมะเขือเทศได้แตกต่างกัน (Villagarcia et al., 2012) คุณสมบัติเหล่านั้นได้แก่ ระดับการกระจายตัวหรือการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค ชนิดของหมู่ฟังก์ชันบนผิวของอนุภาค ท่อนาโนคาร์บอนที่กระตุ้นการเจริญเติบโตของมะเขือเทศได้ดีที่สุดตามรายงานนี้คือท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นที่กระจายตัวดีและมีหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามก็ดีสำหรับการกระตุ้นการแสดงออกของโปรตีนที่ water channel พบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นให้ผลค่อนข้างดีโดยไม่จำเพาะต่อหมู่ฟังก์ชันแบบใดแบบหนึ่งชัดเจนนัก นอกเหนือจากการทดสอบดังกล่าวมา ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียว (single walled carbon nanotube) ได้ถูกนำมาติดกับ quantum dot เป็น carbon nanotube-quantum dot conjugates เพื่อหาแนวทางในการสร้างระบบติดตามวัสดุนาโนในต้นพืช จึงศึกษา conjugates ดังกล่าวในเรื่องผลกระทบต่อเมล็ดมะเขือเทศเปรียบเทียบกับเมล็ดที่งอกในอาหารมาตรฐาน ในอาหารที่เติมท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวอย่างเดียว และในอาหารที่เติม quantum dot อย่างเดียว (Alimohammadi et al., 2011) พบว่าในขณะที่ท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังชั้นเดียวให้ผลเชิงบวกต่อพืช การเติม quantum dot กลับทำให้เกิดการเร่งการตายของใบ และการยับยั้งการเจริญของราก อีกทั้งยังพบว่าท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นสามารถแสดงผลเชิงบวกในการกระตุ้นการแบ่งเซลล์ของยาสูบในแคลลัสจากการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Khodakovskaya et al., 2012) ทำให้เกิดการแบ่งเพิ่มจำนวนเซลล์ได้มากกว่ากลุ่มควบคุม 55-64% อย่างไรก็ตามก็การเจริญของเซลล์ถูกยับยั้งเมื่อความเข้มข้นของท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเพิ่มสูงขึ้น เป็นที่น่าสนใจว่า ผลการศึกษาทางชีวโมเลกุลได้แสดงให้เห็นว่าเซลล์ที่ถูกกระตุ้นการเจริญโดยท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นมีการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์และการขยายผนังเซลล์ รวมถึงยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โปรตีนที่ควบคุมการดูดน้ำเข้าเซลล์เพิ่มมากขึ้นกว่ากลุ่มควบคุม ความสัมพันธ์ของท่อนาโนคาร์บอนต่อกลไกการดูดน้ำของพืชดูจะเป็นคำอธิบายหลักว่าทำไมท่อนาโนคาร์บอน จึงกระตุ้นการงอกและการเจริญของเซลล์ได้ เช่นกันกับในการศึกษาในถั่วชิกพี (chick pea; *Cicer arietinum*) (Tripathi et al., 2011) ที่พบว่าท่อนาโนคาร์บอนส่งเสริมการเจริญเติบโตของทุกส่วนในพืช ได้แก่ ราก ลำต้น และการแตกกิ่ง แต่ท่อนาโนคาร์บอน ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มีการติดหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) เข้าที่ผิวเพื่อสร้างคุณสมบัติละลายน้ำ ได้แก่ carboxylic acid group ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงให้เห็นว่าท่อนาโนคาร์บอนได้เข้าไปในเนื้อเยื่อราก จึงมีความเป็นไปได้ว่าท่อนาโนคาร์บอนเหล่านั้นจะทำตัวเสมือนเป็นท่อแคปิลลารีเพิ่มเติมในราก และมีส่วนช่วยเพิ่มการขนส่งน้ำในพืช

อนุภาคนาโนไฮดร็อกซีอะพาไทต์เป็นอนุภาคนาโนที่ได้รับความสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เนื่องจากมีองค์ประกอบเหมือนกันสารประกอบที่พบในกระดูกและฟัน และยังมีองค์ประกอบเป็นธาตุที่พืชต้องการ งานวิจัยของ Liu และ Lal (2014) รายงานศักยภาพของอนุภาคนาโนอะพาไทต์ (apatite nanoparticle) ในฐานะปุ๋ยฟอสฟอรัสเปรียบเทียบกับปุ๋ยทั่วไป โดยมีแนวคิดพื้นฐานที่คำนึงถึงการรักษาหรือเพิ่มประสิทธิภาพของปุ๋ยและการลดศักยภาพในการก่อปัญหายูโทรฟิเคชัน ที่ว่า ปุ๋ยเกล็ดมีประสิทธิภาพไม่สูงเท่าปุ๋ยละลายน้ำ แต่ปุ๋ยละลายน้ำทำให้เกิดยูโทรฟิเคชัน อนุภาคนาโนที่มีขนาดเล็กและไม่ละลายน้ำจึงอาจเป็นคำตอบสำหรับการรักษาประสิทธิภาพของปุ๋ยและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากปุ๋ยได้ (ภาพที่ 2.1) ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนอะพาไทต์ มีผลส่งเสริมการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองอย่างมีนัยสำคัญ ถั่วเหลืองในชุดทดลองให้ผลดีกว่าชุดควบคุมทั้งในด้านความ

สูง (เพิ่มขึ้น 32.6%) มวลชีวภาพ (เพิ่มขึ้น 18.2% สำหรับส่วนเหนือดิน และเพิ่มขึ้น 41.2% สำหรับส่วนใต้ดิน) และผลผลิต (เพิ่มขึ้น 20.4%) ผู้วิจัยเสนอว่าอนุภาคนาโนอะพาไทต์ อาจจัดเป็นปุ๋ยฟอสฟอรัสชนิดใหม่ได้



ภาพที่ 2.1 การเปรียบเทียบปุ๋ยฟอสฟอรัส 3 แบบ: ละลายน้ำ อนุภาคนาโน และปุ๋ยเกล็ดที่ใช้ทั่วไปใน 4 ประเด็น ได้แก่ ขนาด การเคลื่อนย้ายในดิน ประสิทธิภาพในการเป็นปุ๋ย และความเสี่ยงต่อการก่อปัญหายูโทรฟิเคชัน (Liu and Lal, 2014)

2.1 อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์

อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ ($MgFe_2O_4$) ที่เตรียมจากวิธี Sol-gel synthesis จะมีคุณสมบัติของความเป็นแม่เหล็กซึ่งวัดได้จาก vibrating sample magnetometer (VSM) ขึ้นอยู่กับวิธีที่เตรียมรวมถึงขนาดของอนุภาค (Pradeep et al., 2008) โดยขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมและอุณหภูมิที่ใช้ในการเตรียม เช่น การสังเคราะห์อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์โดยวิธี thermal-treatment method เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 673 เคลวิน เป็น 973 เคลวิน ขนาดอนุภาคจะเพิ่มจาก 5 นาโนเมตร เป็น 8 นาโนเมตร (Goodarz Naseri et al., 2014) หรือถ้าสังเคราะห์โดย electrospinning method อนุภาคจะมีขนาดเพิ่มจาก 15 ± 4 นาโนเมตรเป็น 24 ± 3 นาโนเมตร ถ้าหากอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์เพิ่มจาก 500 องศาเซลเซียสเป็น 800 องศาเซลเซียส (Maensiri et al., 2008) เนื่องจากอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์เป็นหนึ่งในอนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติ superparamagnetic ซึ่งมีการรายงานการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนที่มีคุณสมบัติดังกล่าวในหลาย ๆ แนวทางเช่น การขนส่งยาในร่างกายสิ่งมีชีวิต หรือสามารถประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี magnetic resonance imaging หรือ MRI ได้อีกด้วย (Premanathan et al., 2011; Sanpui et al., 2011 อ้างถึงใน Kanagesan et al., 2016)

2.2 อนุภาคนาโนทอง

อนุภาคนาโนของทองคำมีศักยภาพในการนำไปประยุกต์ใช้ที่หลากหลาย เช่น คุณสมบัติต้านจุลชีพ ทำให้มีแนวคิดในการนำไปผสมพลาสติกเพื่อผลิตพลาสติกต้านเชื้อรา การใช้นำส่ง DNA สำหรับประยุกต์ใช้ในการแพทย์และการเกษตร คุณสมบัติในการนำไฟฟ้าของอนุภาคทำให้มีการประยุกต์ใช้ในเครื่องตรวจจับ (sensor) สำหรับควบคุมคุณภาพของอาหาร และเครื่องดื่ม เป็นต้น ตัวอย่างเหล่านี้แสดงให้เห็นโอกาสที่อนุภาคนาโนของทองคำจะปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม ถึงแม้ทองคำจะมีคุณสมบัติเบื้องต้นไม่เป็นพิษแต่เมื่อทองคำมีขนาดในระดับนาโนคุณสมบัติหลายอย่างอาจเปลี่ยนแปลงไปได้โดยเฉพาะความเป็นพิษเมื่ออยู่ในสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่มาของแนวคิดในการศึกษาผลของอนุภาคนาโนของทองคำต่อพืช

ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองคำโดยใช้สารสกัดจากพืชเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีสารตั้งต้นทองคำคือโกลด์ (III) คลอไรด์ไฮเดรต (HAuCl_4) หรือที่เรียกว่าไฮโดรเจน tetrachloroaurate (III) ไฮเดรต ($\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเตรียมในรูปของคอลลอยด์โดยกำหนดให้อนุภาคมีขนาดอยู่ในช่วง 100 ถึง 10000 Å ทำการกระจายอย่างสม่ำเสมอ ในกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนมีพืชทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์และทำให้สารคอลลอยด์เกิดความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากวัสดุชีวภาพเหล่านี้ให้ผลเป็นสองเท่าของสารที่ทำให้เกิดความคงตัว (Elaissari, 2008; Kumar et al., 2011) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นสภาวะการทำปฏิกิริยาของซัสเตรสระหว่างทองคำและวัสดุจากพืชนั้น สามารถเกิดผลลัพธ์ที่แตกต่างกันได้ ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ปริมาณของสารสกัดจากพืช ความเข้มข้นของสารสกัดจากพืช/ สารตั้งต้นสีทองและค่า pH โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแตกต่างกันออกไป เป็นสาเหตุทำให้ลักษณะสัญญาณวิทยา ขนาด จึงเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยขึ้นอยู่กับสภาวะของปฏิกิริยานั้นๆ (Kharissova et al., 2013) มีรายงานว่าขนาดของอนุภาคนาโนทองคำสามารถสังเกตได้จากสีของโลหะ หากคอลลอยด์มีโลหะสีทองหรือสีเหลืองเป็นประกาย จะมีรูปแบบอนุภาคขนาดใหญ่หรือสูงถึง 100 นาโนเมตร มีสีแดงสดจะมีขนาดอนุภาค 30 นาโนเมตร และในทางกลับกันหากคอลลอยด์เป็นสีม่วงจะบ่งบอกได้ว่าขนาดของอนุภาคนั้นมีขนาดเล็กกว่า 30 นาโนเมตร และสีน้ำตาลจะพบว่ามีขนาดเล็กที่สุด (Mongillo, 2007)

2.3 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

ไฮดรอกซีอะพาไทต์มีสูตรโครงสร้างคือ $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2)$ เป็นวัสดุผงละเอียดที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบ hexagonal ซึ่งคล้ายกับกระดูกและฟันของมนุษย์ โดยไฮดรอกซีอะพาไทต์มีลักษณะรูปร่างเป็นแท่งและมีองค์ประกอบคือ มีแคลเซียม อยู่ 39.68% และฟอสฟอรัส 18.45% โดยน้ำหนัก และมีอัตราส่วนระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 2.151 โดยน้ำหนักหรือ 1.67 โดยมวล ถ้าอัตราส่วนระหว่างแคลเซียม ต่อฟอสฟอรัส น้อยกว่า 1.67 โดยโมล จะได้ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีเฟสอื่นปนอยู่ เช่น TTCP (Tetracalcium phosphate, $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$ หรือ $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$) ถ้าอัตราส่วนระหว่าง แคลเซียมมากกว่า 1.67 โดยโมลจะได้เฟส CaO ปนอยู่กับเฟสไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งในเชิงพาณิชย์อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสของไฮดรอกซีอะพาไทต์จะอยู่ในช่วง 1.57- 1.70 (Legeros and Legeros, 1993) ความน่าสนใจของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ในการประยุกต์ใช้มีหลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโครมาโตกราฟี หรือ gas sensor เป็นต้น ผู้วิจัยจึงสังเกตเห็นประโยชน์จากการประยุกต์อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ในงานทางด้านเกษตรเนื่องจากการมีองค์ประกอบเป็นธาตุที่พืช

ต้องการ จึงอาจเป็นแหล่งปุ๋ยฟอสเฟตและแคลเซียม การที่อนุภาคอยู่ในระดับนาโนจะช่วยในการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับพืช ทำให้พืช สามารถนำเอาสารที่เป็นประโยชน์ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับวิธีการสังเคราะห์ งานวิจัยนี้มีความสนใจใช้วิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น ด้วยการใช้นานทางจระเข้ (*Aloe vera* L.) เป็นตัว stabilizer และ reducing ในการสังเคราะห์ ซึ่งมีข้อดีคือมีราคาไม่สูงมากนักรวมถึงเป็นสารที่ได้จากธรรมชาติ จึงไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Klinkaewnarong, 2010) สารสกัดจากทางจระเข้เป็นตัวรีดิวซ์ในการการสังเคราะห์แบบ Sol-gel ได้ดี (Maensiri et al., 2008) ในการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไฮดรอกไซด์อะพาไทต์ในงานวิจัยนี้ ใช้สารตั้งต้นคือ แคลเซียมไนเตรต ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$) และแอมโมเนียมไดไฮโดรเจนออร์โธฟอสเฟต ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)

2.4 แนวโน้มเทคโนโลยีนาโนในอนาคต

Market and Research ยังได้รายงานว่าสหรัฐอเมริกาในปี 2567 ได้ประมาณการไว้ว่าอุตสาหกรรมนาโนเทคโนโลยีทั่วไปจะมีมูลค่าเพิ่มสูงขึ้นถึง 124 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ (การวิจัยและการตลาด, 2020) การประยุกต์ใช้นาโนเทคโนโลยีคาดว่าจะเพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมเกษตร (Chen และ Yada, 2011) เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นคาดว่าจะถึง 9 พันล้านคนภายในปี 2050 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรด้วยการใช้ปุ๋ยเพิ่มขึ้นเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชที่คาดว่าจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ไม่เพียงแต่พัฒนาปุ๋ย แต่ยังตั้งเป้าหมายการผลิตตั้งแต่การแปรรูปจนถึงการกำจัดทิ้ง ตัวอย่างเช่น ตัวนำส่งธาตุอาหารในระดับนาโน ยาฆ่าแมลง และเน้นการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชอย่างมีประสิทธิภาพ เพิ่มการดูดซึมของธาตุอาหารในพืชโดยการสังเคราะห์อนุภาคนาโนให้มีศักยภาพในการปลดปล่อยธาตุอาหารอย่างช้าๆ อาจจะใช้วิธีการห่อหุ้ม หรือการยึดเกาะบนพื้นผิวไอออนิก เพื่อลดการสูญเสียธาตุอาหารจากการไหลบ่าลงสู่แหล่งน้ำ จนเป็นสาเหตุทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำ (Moore et al., 2011; Dasgupta et al., 2015) นอกจากการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านเกษตรแล้ว การตรวจหาเชื้อโรคในพืชก็มีความน่าสนใจในงานด้านวัสดุนาโนไม่น้อย เนื่องจากวัสดุนาโนมีศักยภาพในการทำเป็นผลิตภัณฑ์ส่งเสริมอาหารเพื่อเพิ่มการดูดซึมของธาตุเช่นธาตุเหล็ก ซึ่งเป็นยาต้านจุลชีพเพื่อเพิ่มการถนอมอาหารและการตรวจหาอาหารที่เป็นเชื้อโรค นอกจากนี้การยืดอายุ การเก็บรักษา และลดจำนวนจุลินทรีย์ในอาหารยังคงน่าสนใจในงานการประยุกต์ใช้วัสดุนาโน (Duncan, 2011) การวิจัยและพัฒนาด้านนาโนเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการเกษตรในอนาคตจะมุ่งเน้นและให้ความสนใจอย่างมากในการผลิตอาหาร ความยั่งยืนของนาโนเทคโนโลยี เพื่อการส่งเสริมการทำฟาร์มในปัจจุบันรวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโน

3.1.1 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

ซึ่งสาร magnesium chloride ($MgCl_2$) ปริมาณ 3.3788 กรัม และ ferric chloride ($FeCl_3$) ปริมาณ 6.7575 กรัม ผสมใน ethylene glycol ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันโดยใช้ hot plate stirrer จากนั้นเติม polyethylene glycol ปริมาณ 5 กรัม และ sodium acetate จำนวน 18 กรัม และผสมส่วนประกอบให้เข้ากันโดยใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมงเมื่อได้สารละลายทั้งหมดแล้วให้นำเข้าเครื่อง hydrothermal (รุ่น PARR 5500 Series compact reactor ควบคุมด้วย PARR 4848 reactor controller) ตั้งโปรแกรมให้เกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาแล้วให้ทำการล้างสารด้วย ethyl alcohol และใช้แม่เหล็กช่วยทำให้สารบริสุทธิ์มากขึ้น ทำการล้างประมาณ 4-5 รอบแล้วนำไปทำแห้งด้วยตู้บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงหรือจนกว่าสารจะแห้ง บดสารในโกรงบดยา สูดถ่ายถ่ายสารลงในภาชนะแก้วที่มีฝาปิด เก็บรักษาในที่แห้งและอุณหภูมิต่ำ (Deng et al., 2007)

3.1.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองโดยใช้สารละลายไบนานาง

ทำความสะอาดไบนานางและหั่นละเอียด นำมา 5 กรัม และปรับปริมาตร 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นบริสุทธิ์ในขวดรูปชมพู่ 300 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ภายในหนึ่งสัปดาห์ จากนั้นทำการลดไอออน Au^{3+} โดยการเพิ่ม 10 มิลลิลิตรของสารสกัดไบนานาง เติมสารละลาย 1 mM $HAuCl_4$ 190 มิลลิลิตร เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิต่ออัตราการสังเคราะห์อนุภาคและขนาดหรือรูปร่างของอนุภาค การเตรียมอนุภาคนาโนทองได้ทดสอบในอุณหภูมิที่แตกต่างกันคือ 25 65 และ 80 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารสกัดไบนานางมีการเปลี่ยนแปลงระหว่าง 50 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ในปริมาตรของสารสกัด (6 8 และ 10 มิลลิลิตร จากนั้นตรวจสอบการสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำและสัญญาณวิทยา โดยดำเนินการที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสและความเข้มข้นของ $HAuCl_4$ ที่ 1 mM การลดซับสเตรตสีทองเกิดขึ้นพร้อมกับการเปลี่ยนสีของสารละลาย นำสารละลายอนุภาคนาโนทองคำที่ได้ ไปทำการหมุนเหวี่ยงซ้ำๆที่ 12000 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 60 นาที เพื่อให้เกิดการแยกชั้นในน้ำที่ปราศจากไอออน (Song et al., 2013) สารแขวนลอยถูกเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อที่จะดำเนินการตรวจสอบขั้นตอนต่อไป

3.1.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำที่มีส่วนผสมของเจลาตินและเจลาติน-กลูโคส

สังเคราะห์อนุภาคนาโนทองคำโดยใช้ส่วนผสมของเจลาตินและเจลาติน-กลูโคสในการแยกโกลด์เตตระคลอไรด์ ซึ่งจะลดลงจนเป็นไอออนของทองจนกลายเป็นอนุภาคนาโนทองภายใต้อุณหภูมิ 28 , 40 และ 60 องศาเซลเซียส ทำการละลายเจลาตินโดยนำเจลาตินมา 2 กรัมและเติมน้ำบริสุทธิ์ 190 มิลลิลิตร จากนั้นตามด้วยการเติม $AuCl_4$ 10 มิลลิลิตร สำหรับปฏิกิริยาเจลาติน-กลูโคสนั้นจะ

แตกต่างจากขั้นตอนการใช้เจลาตินโดยการเพิ่ม 2 M กลูโคส ปริมาตร 20 มิลลิตร จากนั้นผสมสาร เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างทั่วถึง เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมงสังเกตสีไวน์แดงสำหรับปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียสนั้นคือปฏิกิริยากลูโคส-เจลาตินและเจลาติน แต่อย่างไรก็ตามจะพบว่าสีนี้จะจางลงเมื่ออุณหภูมิ ลดลง

3.1.4 การสังเคราะห์อนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้สารละลายว่านหางจระเข้

เตรียมอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้สารละลายว่านหางจระเข้ ซึ่งเป็นการสังเคราะห์ โดยวิธีของ Maensiri และคณะ (2008) ในงานวิจัยนี้ได้มีการเตรียมสารละลายในอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ระหว่าง ว่านหางจระเข้ ต่อน้ำ (deionized water) คือ 35:100 ในขณะที่ผสมนั้น จะให้ความร้อนร่วม ด้วยที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำเอาสารละลายมากรอง เอาส่วนเจลของว่านหางจระเข้ จนได้เป็นสารละลายที่หนืด จากนั้นนำสารละลายที่ได้คนอย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่งที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นสารละลายว่านหางจระเข้เป็นเนื้อเดียวกัน อย่างสม่ำเสมอ

ทำการสังเคราะห์อนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ใช้เทคนิคโซลเจล สารตั้งต้นที่ใช้ คือ แคลเซียม ไนเตรตและแอมโมเนียมไดไฮโดรเจน ออร์โทฟอสเฟต โดยใช้อัตราส่วนโดยโมลระหว่างแคลเซียมต่อ ฟอสฟอรัส เท่ากับ 1.67 สำหรับขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากการละลายสารตั้งต้นในสารสกัดจากว่านหาง จระเข้ ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งคนอย่างสม่ำเสมอ ทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวไป ทั่วของเหลวอย่างเสถียร เกิดปฏิกิริยาทางพอลิเมอร์จนได้เจลหนืด (มีสภาพเป็นคอลลอยด์แบบเสถียร) จากนั้นนำไปอบที่ Hot air oven ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมงหรือทิ้งไว้ประมาณ 3-4 วัน จนกว่าสารจะแข็งตัว การที่สารแข็งตัวเกิดจากการสร้างพันธะที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย ต่อเนื่งในสามมิติ เป็นกระบวนการเกิดพอลิเมอร์ (Polymerization) ที่คอยควบคุมการยึดเกาะกันของ องค์กรประกอบทางเคมี และช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกออกไปกองอยู่อีกด้านใดด้านหนึ่งมากเกินไป อีก ด้วย ในการเกิดเจล (Gelation) จะอาศัยกลไกการสลายตัวด้วยน้ำ (Hydrolysis) และกลไก การควบแน่น (Condensation) เมื่อถึงครบเวลาที่กำหนด นำมาอบเพื่อทำลายการเกาะตัวกันของอนุภาค เรียกสารตัวอย่างตั้งต้นผสมที่ได้นี้ว่าพรีเคอร์เซอร์ (Precursor) และพรีเคอร์เซอร์นี้จะถูกนำไป ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทำการระเหยของเหลวที่อยู่ในเจลออกไป (Dehydration) โดย ให้ระดับพลังงานความร้อนที่ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดสารประกอบไฮดรอก ซีอะพาไทต์และได้อนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร เมื่อผ่านขั้นตอนการแคลไซด์จนได้เป็นผง ละเอียด ผู้วิจัยก็จะนำผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปศึกษาหาลักษณะของอนุภาค Nanocrystalline phase ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) ศึกษาหาลักษณะสัณฐานวิทยาและขนาดของ อนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ศึกษาปริมาณธาตุที่มีอยู่ในสารประกอบ ด้วยเครื่อง Energy Dispersive X-ray Spectrometer (SEM/EDX) เป็นต้น

3.2 การตรวจสอบลักษณะของอนุภาคนาโน

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

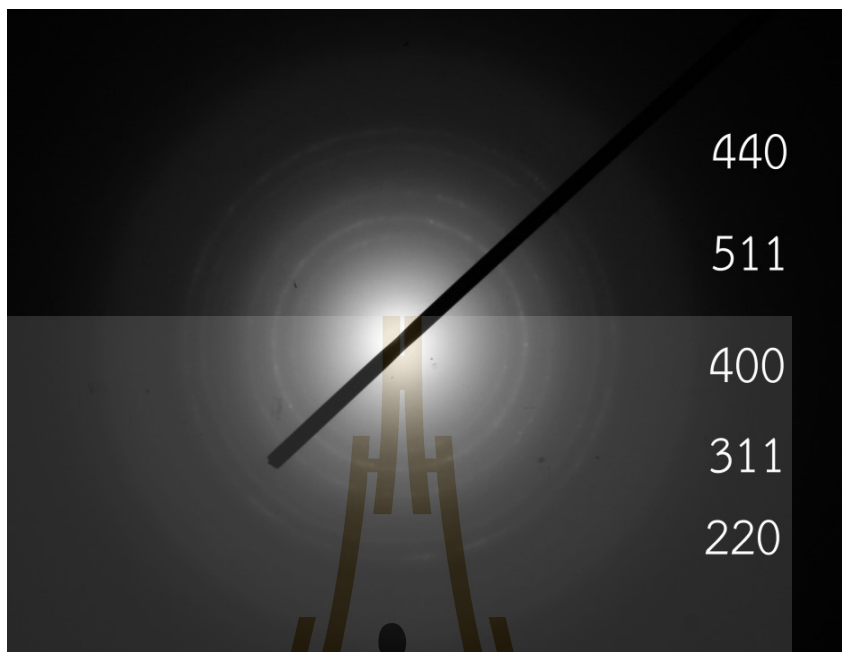
3.2.1.1 อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์

ศึกษาขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy, TEM รุ่น CARL ZEISS EM902) เริ่มโดยการละลายอนุภาคนาโนปริมาณ 0.5 กรัมในเอทานอลปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่อง sonication เพื่อกระจายอนุภาคนาโน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตหยดสารละลายที่ได้ลงบน copper grid เพื่อนำไปส่องภายใต้ TEM ที่กำลังขยายต่าง ๆ การหาขนาดของอนุภาคต้องใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อวิเคราะห์ขนาด

นอกจากนี้ยังทำการยืนยันความเป็นอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิค Selected Area Electron Diffraction ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (SAED-TEM) โดยศึกษารูปแบบการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron diffraction pattern) เพื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคมาตรฐานของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ เมื่อทำการทดสอบเรียบร้อยแล้วจะได้ผลลัพธ์ดังภาพที่ 3.1 ต้องนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม ImageJ เมื่อได้ค่ารัศมีมาแล้วให้นำไปคำนวณตามสูตร $rD=K$ โดย r คือรัศมีการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (หน่วยเป็น pixel) D คือค่า Interplanar spacing (D-spacing) ของอนุภาค (หน่วยคือองศา: A°) และ K คือค่าคงที่ (โดยค่าคงที่ของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเครื่องนี้เท่ากับ $137.8791 A^\circ \cdot \text{pixel}$) ค่าที่นำไปเทียบกับสารมาตรฐานคือค่า D-spacing และสามารถใช้ระบุนาบบของโครงสร้างอนุภาคได้ โดยผลจากการเทียบระบุนาบบจะได้ดังภาพที่ 3.2 และตารางที่ 3.1 จะแสดงผลการเทียบค่า d-spacing ระหว่างสารที่สังเคราะห์ขึ้นกับสารมาตรฐาน



ภาพที่ 3.1 แบบแผนการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน



ภาพที่ 3.2 ผลระนาบของอนุภาคเมื่อทำการเทียบค่า d-spacing กับสารมาตรฐาน

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการเทียบค่า d-spacing ของสารมาตรฐานกับสารที่สังเคราะห์ขึ้น

Miller indices			d-spacing ของสารมาตรฐาน (Å)	d-spacing ของสารที่สังเคราะห์ขึ้น (Å)
h	k	l		
2	2	0	2.9557	2.9971
3	1	1	2.5206	2.6018
4	0	0	2.0900	2.1065
5	1	1	1.6089	1.6454
4	4	0	1.4779	1.5255

หมายเหตุ; k h และ l คือค่าดัชนีมิลเลอร์ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายลักษณะของระนาบผลึกของอนุภาคแต่ละชนิด

3.2.1.2 อนุภาคนาโนทอง

วางตัวอย่างคอลลอยด์ทองคำประมาณ 3 ไมโครลิตรบนกริดทองแดงที่เคลือบคาร์บอนและกระจายแบบบาง (Dubey et al., 2010) จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิเตาอบ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลาประมาณ 15 นาทีก่อนการวิเคราะห์

3.2.1.3 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านในการศึกษาขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโน เริ่มโดยการละลายอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณ 0.5 กรัมในเอทานอลปริมาตร

100 มิลลิลิตร นำเข้าเครื่อง sonication เพื่อกระจายอนุภาคนาโน จากนั้นใช้ไมโครปิเปตหยดสารละลายที่ได้ลงบน copper grid เพื่อนำไปส่องภายใต้ TEM ที่กำลังขยายต่าง ๆ การหาขนาดของอนุภาคต้องใช้โปรแกรม ImageJ เพื่อวิเคราะห์ขนาด

นอกจากนี้ในการศึกษาลักษณะของโครงสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์ยังระบุชนิดของธาตุและปริมาณของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy with energy dispersive X-Ray; SEM/EDX) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดหนึ่งซึ่งทำการสแกนพื้นผิวด้วยลำแสงอิเล็กตรอน ให้ภาพรายละเอียดเกี่ยวกับพื้นผิวของอนุภาคและระบุชนิดของธาตุ เครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงาน (EDX; JEOL JEM 2010 200kv) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ในการระบุธาตุองค์ประกอบของธาตุเชิงปริมาณ โดยใช้ลำแสงเอกซเรย์โฟกัสไปที่ตัวอย่าง จำนวนและพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ปล่อยออกมาจากตัวอย่างสามารถวัดได้ด้วยสเปกโตรมิเตอร์แบบกระจายพลังงาน ในการทดลองนี้ใช้เครื่องวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์แบบกระจายพลังงานเพื่อวิเคราะห์การระบุธาตุของแคลเซียมและฟอสฟอรัสของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยทำความสะอาดผงของตัวอย่างอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ และตากให้แห้งเพื่อกำจัดการปล่อยก๊าซออกจากสารอินทรีย์และน้ำ โดยการกระจายตัวอย่างในตัวทำละลายระเหยง่าย เช่น อะซิโตนและแอลกอฮอล์หลังจากทำความสะอาดแล้ว ทำให้ตัวอย่างแห้งสนิทโดยใช้เตาอบหรือปล่อยให้แห้งด้วยอากาศ จากนั้นนำผงตัวอย่างมากระจายไปบนพื้นผิวของซัสเตรต ใช้เทปคาร์บอนและเทปทองแดงสำหรับการติดตั้ง และใช้ไม้พายกระจายผงอย่างเบา ๆ และกดเบา ๆ เพื่อให้ตัวอย่างยึดติดกับเทป จากนั้นจึงจับตัวอย่างคว่ำและเคาะเพื่อขจัดวัสดุที่หลวม หรืออาจเป่าด้วยแก๊สอัด แล้วจึงทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM/EDX

3.2.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction analysis)

3.2.2.1 อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์

ยืนยันความเป็นอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction (XRD)) โดยการผงตัวอย่างของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ปริมาณ 1 กรัมถูกส่งไปตรวจยืนยันความเป็นอนุภาคนาโนแมกนีเซียมที่ห้องปฏิบัติการ SCD และ XRD อาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในแนวแกน X คือค่ามุมของการเลี้ยวเบน (2θ) ซึ่งมุม 2θ ของพีคแต่ละพีคในกราฟจะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) และสามารถระบุค่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices) ที่ใช้ระบุระบุในแต่ละพีคของกราฟได้

3.2.2.2 อนุภาคนาโนทอง

ปั่นเหรียญคอลลอยด์ทองคำที่ 12000 รอบต่อนาที ที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้งโดยวางในจานโลหะในเครื่องบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (Dubey et al., 2010) นำไปวิเคราะห์ที่เครื่อง Bruker D2 X-ray diffractometer ที่มีการแผ่รังสี $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) นอกจากจะวิเคราะห์โครงสร้างลักษณะเฉพาะของอนุภาคนาโนทองด้วยวิธี XRD แล้วนั้น อีกวิธีหนึ่งที่เป็นที่ยืนยันโครงสร้างของอนุภาคนาโนทอง คือการใช้รังสี

อัลตราไวโอเล็ตจากเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-vis spectroscopy) ทำการวิเคราะห์ในช่วงความยาวคลื่น 400 ถึง 700 นาโนเมตร (Sujitha and Kannan, 2013) ใช้น้ำปราศจากไอออนเป็น Blank

3.2.2.3 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

นำผงตัวอย่างของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ปริมาณ 1 กรัมไปตรวจยืนยันความเป็นอนุภาคนาโนที่ห้องปฏิบัติการ XRD อาคารเครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในแนวแกน X คือค่ามุมของการเลี้ยวเบน (2θ) ซึ่งมุม 2θ ของพีคแต่ละพีคในกราฟจะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) และสามารถระบุค่าดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices) ที่ใช้ระบุระนาบในแต่ละพีคของกราฟ

3.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

3.2.3.1 อนุภาคนาโนทอง

ได้ดำเนินการเพื่อระบุกลุ่มทางชีววิทยาที่จับกับพื้นผิวของอนุภาคนาโนทองคำ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการลดและความเสถียรของพื้นผิวทองคำ การเตรียมตัวอย่างค่อนข้างเหมือนกับการวิเคราะห์ XRD คอลลอยด์ทองสังเคราะห์ภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันถูกหมุนเหวี่ยง (12000 รอบต่อนาที 25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 45 นาทีและล้างหลายครั้งด้วยน้ำกลั่น (Noruzi et al., 2011) ต่อจากนั้นนำตัวอย่างทั้งหมดพร้อมด้วยสารสกัดจาก *T. triandra* มาวิเคราะห์ภายใต้การวิเคราะห์ FTIR spectrometer อยู่ในช่วง $40 - 4000 \text{ cm}^{-1}$

3.2.3.2 อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

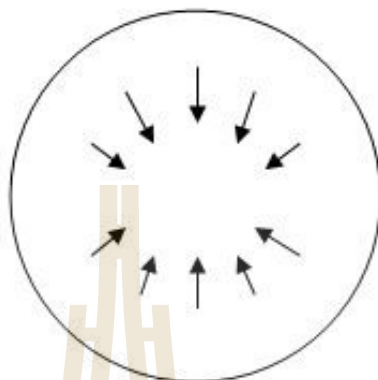
เพื่อระบุกลุ่มฟังก์ชันที่ติดอยู่กับพื้นผิวของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยการทดลองนี้จะทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องรามานสเปกโตรมิเตอร์ (FT-Raman spectrometer) ที่มีสเปกตรัมครอบคลุมช่วงคลื่น $400-4000 \text{ cm}^{-1}$ ตามวิธีของ (Klinkaewnarong et al., 2010)

3.3 การศึกษาผลของอนุภาคนาโนต่อข้าวในระยะการงอกและระยะต้นกล้า 7 วัน

3.3.1 การเพาะเมล็ดและการเตรียมสารละลาย

ก่อนทำการทดลองให้ทำความสะอาดเมล็ดและแช่ในสารละลาย sodium hypochlorite 2.5% เป็นเวลา 15 นาที (Tsi, N. N, 2011) จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นอีก 3 ครั้ง แล้วแช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนตามความเข้มข้นที่กำหนด โดยกำหนดให้อนุภาคนาโนมีความเข้มข้นแตกต่างกันดังนี้ อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์มีความเข้มข้น 0 10 25 50 100 500 1000 และ 2000 มิลลิกรัมต่อลิตร อนุภาคนาโนทองมีความเข้มข้น 10, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์มีความเข้มข้น 0, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการเตรียมสารละลายอนุภาคนาโนนั้นจำเป็นต้องทำการกระจายอนุภาคด้วยเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการวัดค่าความเป็นกรด-เบสด้วย pH meter แล้วจึงนำมาเรียงเมล็ดข้าวในงานเพาะเชื้อที่มีกระดาษกรองเบอร์ 1 ที่ชุ่มด้วยสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนปริมาณ 5 มิลลิลิตร (โดยรูปแบบ

การเรียงเมล็ดข้าวทำตามภาพที่ 3.3) โดยในแต่ละความเข้มข้นทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ ปิดจานเพาะเชื้อด้วยพาราฟิล์ม บ่มในตู้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน



ภาพที่ 3.3 การเรียงเมล็ดข้าวในจานเพาะเชื้อโดยหัวลูกศรคือส่วนของจุ่มกข้าว

3.3.2 การวัดการเจริญเติบโตของต้นข้าวในระยะการงอก 7 วัน

3.3.2.1 การวัดอัตราการงอกของเมล็ด

โดยทำการนับจำนวนเมล็ดที่งอกเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าว หลังจากบ่มเมล็ดไว้เป็นเวลา 7 วัน สามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การงอกโดยคำนวณจากสูตรดังนี้

$$= \frac{\text{จำนวน 100 เมล็ดที่เพาะ}}{\text{จำนวนเมล็ดที่งอก}} \times 100$$

นอกจากนี้ความยาวของรากสัมพันธ์เฉลี่ยจะคำนวณได้จากสูตร

$$= \frac{\text{ค่าเฉลี่ยความยาวรากที่ทดสอบ NP}}{\text{ค่าเฉลี่ยความยาวรากที่ทดสอบในชุดควบคุม}} \times 100$$

3.3.2.2 การวัดความยาวของรากและยอด

หลังจากบ่มเมล็ดข้าวในตู้บ่มเป็นเวลา 7 วัน แล้วทำการนับจำนวนเมล็ดที่งอก วัดความยาวราก และวัดความยาวยอด ของทุก ๆ เมล็ดแล้วทำการคำนวณค่าเฉลี่ยและทำการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้น ในการวัดต้องระวังไม่ให้รากข้าวแห้ง เมื่อได้ผลค่าความยาวราก และความยาวยอดออกมาแล้วให้ทำการเฉลี่ยความยาวในแต่ละซ้ำ จะได้ค่าความยาวเฉลี่ยทั้งหมด 3 ค่าจากการทดลองใน 1 ความเข้มข้น นำไปวิเคราะห์สถิติแบบต้นแคน (Duncan's multiple range test) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และจากนั้นนำค่าเฉลี่ยทั้ง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละความเข้มข้น และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบแนวโน้ม

3.3.2.3 การหาปริมาณน้ำสัมพันธ์ในต้นกล้าตามวิธีของ Barrs และ Weatherley คศ. 1992

ชั่งน้ำหนักของเนื้อเยื่อสดของพืชปริมาณ 100 มิลลิกรัม เพื่อหาค่าน้ำหนักสด (Fresh weight, FW) จากนั้นหาน้ำหนักเต่ง (Turgid weight, TW) โดยการแช่รากในน้ำกลั่นในจานเพาะเชื้อเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อครบ 12 ชั่วโมงให้ชั่งน้ำหนักทันที สำหรับค่าน้ำหนักแห้ง (Dry weight, DW) ทำการวัดโดยการอบเนื้อเยื่อพืชในเตาอบ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำมาชั่งน้ำหนัก เมื่อได้ค่า FW TW และ DW แล้วนำมาหาปริมาณน้ำสัมพันธ์ (Relative water content, RWC) จากสูตร $\%RWC = (FW - DW) \times 100 / TW - DW$ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำใน 1 ความเข้มข้น เมื่อได้ค่าปริมาณ %RWC แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิติแบบต้นแคณ และหาค่าเฉลี่ยปริมาณ %RWC และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและจัดทำกราฟแสดงข้อมูล

3.3.2.4 การตรวจวัดเซลล์ที่ตาย (Cell death assay)

ทำการวัดการตายของเซลล์บริเวณปลายรากด้วยวิธีของ Zanardo และคณะ (2009) ตัดรากให้มีความยาว 3 เซนติเมตรจากส่วนปลายรากแช่ในสารละลาย Evans blue ความเข้มข้น 0.25 % โดยมวลต่อปริมาตร (ละลายผง Evans blue 0.25 กรัม ในน้ำ 100 มิลลิลิตร) ปริมาณ 30 มิลลิลิตรเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นเป็นเวลา 30 นาทีเพื่อล้างสีย้อมส่วนเกินออก แล้วนำรากไปแช่ในสารละลาย N, N-dimethylformamide เป็นเวลา 50 นาที เมื่อครบ 50 นาทีให้วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายที่มีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรโดยใช้ N, N-dimethylformamide เป็น blank ดังภาพที่ 3.4 โดยทำทั้งหมด 3 ซ้ำในแต่ละความเข้มข้น เมื่อได้ค่าการดูดกลืนแสงที่ 600 นาโนเมตรของแต่ละซ้ำแล้ว นำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกลุ่มโดยใช้วิธีแบบต้นแคณ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อจัดทำกราฟแสดงแนวโน้มตามความเข้มข้น



ภาพที่ 3.4 การเตรียมการแช่ข้าวในสารละลาย Evans blue และการชะล้างด้วยน้ำกลั่น

3.3.2.5 การตรวจหาปริมาณ Malondialdehyde (MDA)

ทำการตรวจหาปริมาณ MDA ด้วยวิธีการตัดแปรจากวิธีของ Zhang และคณะ (1992) นำเนื้อเยื่อสดของรากผสมกับ 0.25 % thiobarbituric acid (TBA) ใน 10% trichloroacetic acid (TCA) ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ส่วนผสมทั้งหมดแช่ในน้ำอุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที และแช่ในน้ำแข็งอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการปั่นเหวี่ยงสารผสมเป็นเวลา 5 นาที ความเร็ว 12,000 rpm วัดค่าการดูดกลืนแสงของของเหลวด้านบน (supernatant) ที่ความยาวคลื่น 532 และ 600 นาโนเมตรจากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณปริมาณ MDA จากสูตร MDA content (nmol) = $(A_{532} - A_{600}) \times 1,000 \times 2 / 155 \times (\text{Fresh weight, FW})$ ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำใน 1 ความเข้มข้น เมื่อได้ค่าปริมาณ MDA ทั้ง 3 ค่าแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิติแบบต้นแคณ และหาค่าเฉลี่ยปริมาณ MDA และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเพื่อจัดทำกราฟแสดงผลข้อมูล

3.4 การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนต่อการเจริญเติบโตของต้นข้าว

3.4.1 การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์

ทำการเพาะเมล็ดข้าวตามขั้นตอนที่ 3.1.3 บ่มในตู้อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 48 – 72 ชั่วโมง (ให้รากมีขนาดประมาณ 2-3 เซนติเมตร) จากนั้นให้ทำการย้ายเมล็ดจากจานทดลองไปยังกระถางสำหรับปลูกพืช (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19.5 เซนติเมตร) โดยดินในกระถางให้ผสมกับสารละลายปริมาณ 1 ลิตรตามความเข้มข้น และรดน้ำต้นข้าวด้วยน้ำเปล่าปริมาณ 300 มิลลิลิตรในเวลา

08.30 และ 16.30 ของทุกวัน ทำการปลูกต้นข้าว 12 ต้นต่อ 1 กระจ่าง โดยแต่ละความเข้มข้นทำทั้งหมด 4 กระจ่าง (แต่ละกระจ่างหมายถึง 1 ซ้ำของการทดลอง)

หมายเหตุ: พื้นที่สำหรับวางกระจ่างให้ทำการรองพื้นด้วยแผ่นพลาสติกเพื่อไม่ให้รากของต้นข้าวเติบโตลงไปสู่ดินด้านล่างของกระจ่าง

การหาอัตราการเติบโต โดยวัดการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบ เมื่อต้นข้าวอายุได้ 28 วันให้ทำการวัดความยาวและความกว้างของใบ (ตามภาพ 3.5) ที่มีลักษณะเป็นใบที่มีการเติบโตสูงสุด (Most Recent Mature Leaf: MRML) โดยของข้าวจะเป็นใบที่อยู่บนสุดของกอข้าวตรงกลาง (ดังภาพที่ 3.6) โดยจะทำการวัด 1 ใบในทุก ๆ ต้นที่อยู่ในกระจ่าง และต้องตัดฉลากเพื่อทำการวัดความยาวและความยาวซ้ำในวันที่ 35 ของการทดลอง โดยคำนวณพื้นที่ใบ และอัตราการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใบจากสูตรของ Yoshida (1981)

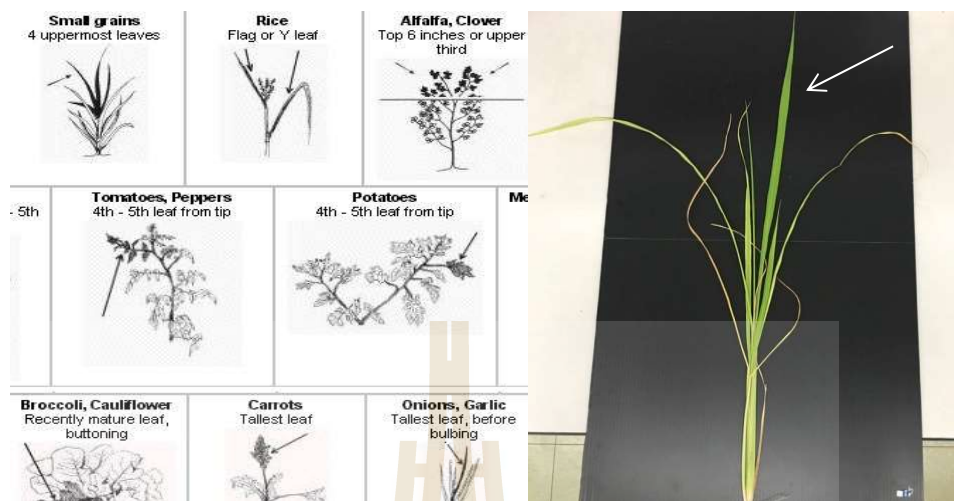
ขนาดใบ (A) (cm.²) = ความยาว (cm.) x ความกว้าง (cm.) x ค่าคงที่ (K = 0.67 – 0.78)

Growth rate (cm²/day) = $A_2 - A_1 / t_2 - t_1$

เมื่อได้ค่าอัตราการเจริญเติบโตของแต่ละต้นแล้ว ให้ทำการเฉลี่ยสำหรับแต่ละซ้ำ และนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิติแบบต้นแคณ จากนั้นหาค่าเฉลี่ยรวมของแต่ละความเข้มข้นเพื่อจัดทำกราฟแสดงผลข้อมูล



ภาพที่ 3.5 วิธีการวัดความยาวและความกว้างของใบ



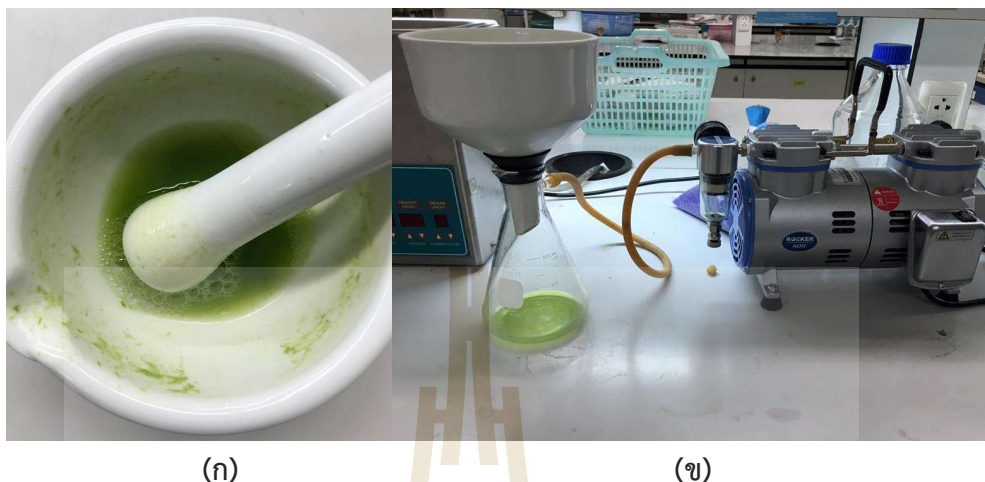
ภาพที่ 3.6 การเลือกใบสำหรับการวัดพื้นที่ เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโต (อ้างอิงจาก http://www.al-labs-eastern.com/taking_plant_sample.aspx)

เมื่อต้นข้าวอายุได้ 35 วันให้ทำการถอนต้นข้าวทุกต้นจากกระถางปลูก โดยการตัดเฉพาะส่วนลำต้นขึ้นมาทำการวัดน้ำหนักสดโดยจะวัดน้ำหนักสดของทุกต้นในแต่ละซ้ำ จากนั้นหารเฉลี่ยด้วยจำนวนต้น ค่าที่ได้คือน้ำหนักสดเฉลี่ยต่อ 1 ต้น นำมาทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติแบบต้นแค่น และหาค่าเฉลี่ยของแต่ละความเข้มข้นเพื่อจัดทำกราฟแสดงผลข้อมูล เมื่อถอนต้นข้าวอายุ 35 วัน แล้วทำการตัดใบที่อยู่บนยอดสูงสุดออกมาทำการหั่นเป็นชิ้นส่วนเล็กๆ ซึ่งน้ำหนักให้ได้ 0.5 กรัม (ใช้ประมาณ 2-3 ใบต่อกระถาง) จากนั้นบดในโกร่งด้วยสารละลาย acetone 80% โดยปริมาตรต่อปริมาตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร เป็นเวลา 5 นาที เติมสารละลาย acetone 80% ปริมาตร 5 มิลลิลิตรและบดในโกร่งต่ออีก 3 นาที (ได้ผลดังภาพ 3.7ก) เทของเหลวที่บดได้และกรองด้วยกรวยบุชเนอร์ (buchner funnel) ตามภาพที่ 3.7ข ซะล้างส่วนที่เหลือในโกร่งด้วยสารละลาย acetone 80% ปริมาตร 15 มิลลิลิตร และ 10 มิลลิลิตรตามลำดับ วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 663 และ 645 นาโนเมตร และคำนวณปริมาณ คลอโรฟิลล์เอ คลอโรฟิลล์บี

$$\text{Chlorophyll a} = (9.78 \times A_{663}) - (0.99 - A_{645})$$

$$\text{Chlorophyll b} = (21.4 - A_{645}) - (4.65 - A_{663})$$

หมายเหตุ: ในการทดลองแต่ละซ้ำจะได้ค่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และปริมาณคลอโรฟิลล์บี อย่างละ 1 ค่า และในการทดลองแต่ละความเข้มข้นทำ 4 ซ้ำ ให้ทำการวิเคราะห์ค่าปริมาณคลอโรฟิลล์ ด้วยวิธีทางสถิติแบบต้นแค่น จากนั้นทำการเฉลี่ยและจัดทำกราฟเพื่อเปรียบเทียบปริมาณคลอโรฟิลล์ของแต่ละความเข้มข้น

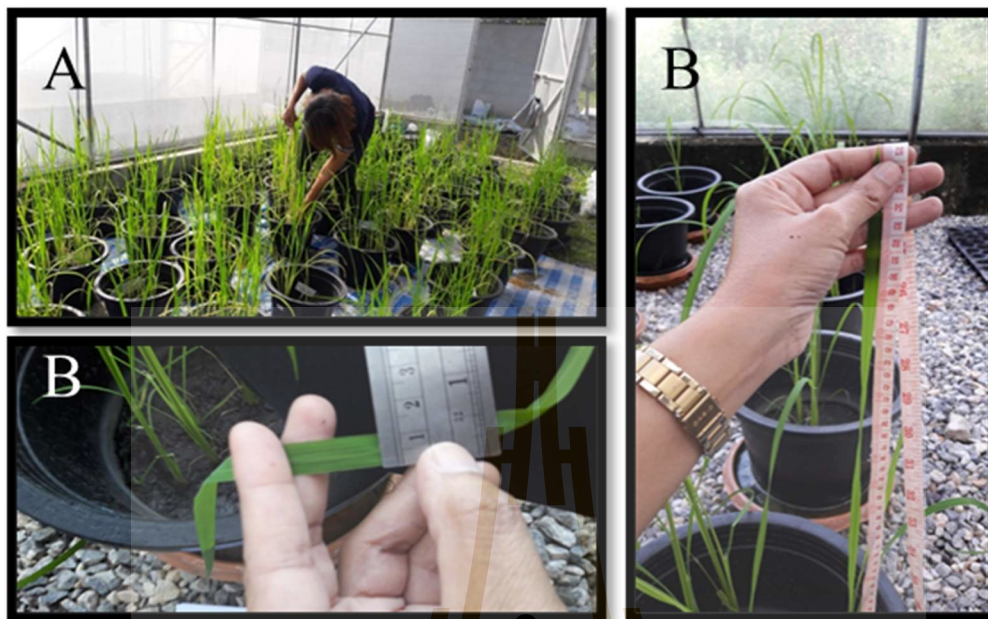


ภาพที่ 3.7 การบดใบพืชด้วย Acetone 80% (ก) และการกรองส่วนที่บดได้ด้วยกรวยบุชเนอร์ (ข)

ใช้โปรแกรม PASW Statistics18 ใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ วิเคราะห์แบบ one-way ANOVA

3.4.2 การศึกษาศักยภาพของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

ทำการเปรียบเทียบสารแขวนลอยของอนุภาคนาโนและปุ๋ยเชิงพาณิชย์ที่มีสูตร 18-46-0 และ 15-15-15 ที่ความเข้มข้น 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำ DI จากนั้นผสมให้เข้ากันด้วย sonication หลังจากการงอกเป็นเวลา 7 วันในจานและบันทึกความยาวรากและยอดเรียบร้อยแล้วทำการย้ายต้นกล้าลงไปปลูกในกระถางพลาสติกในดิน โดยกำหนดให้ดิน 1 กิโลกรัมผสมกับสารละลายอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ 1 ลิตร ในกระถาง 1 ใบจะมีจำนวนเมล็ดทั้งหมดกระถางละ 12 เมล็ดในแต่ละความเข้มข้นจะมีการทำซ้ำความเข้มข้นละ 5 กระถาง จากนั้นทำการติดตามการเจริญเติบโตของข้าวที่สัมผัสกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์เป็นระยะเวลา 130 วัน โดยในวันที่ 60 ให้บันทึกความสูงและความกว้างของใบข้าวใน (ภาพที่ 3.8) โดยทำการเลือกใบที่โตเต็มที่ล่าสุด (MRML) โดยวัดหนึ่งใบของต้นข้าวทุกความเข้มข้น



ภาพที่ 3.8 การวัดความสูงของต้นข้าว (A) ความยาวใบ (B) และความกว้างของใบ (C)

หลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตในเวลา 130 วัน ได้ทำการนับจำนวนเมล็ดต่อกระถาง จำนวนเมล็ดต่อรวง และน้ำหนัก 1,000 เมล็ด ตามวิธีของสถาบันวิจัยข้าวนานาชาติ (IRRI) จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดไปวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้สถิติ One Way Anova และเปรียบเทียบโดยการทดสอบ Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.05



บทที่ 4

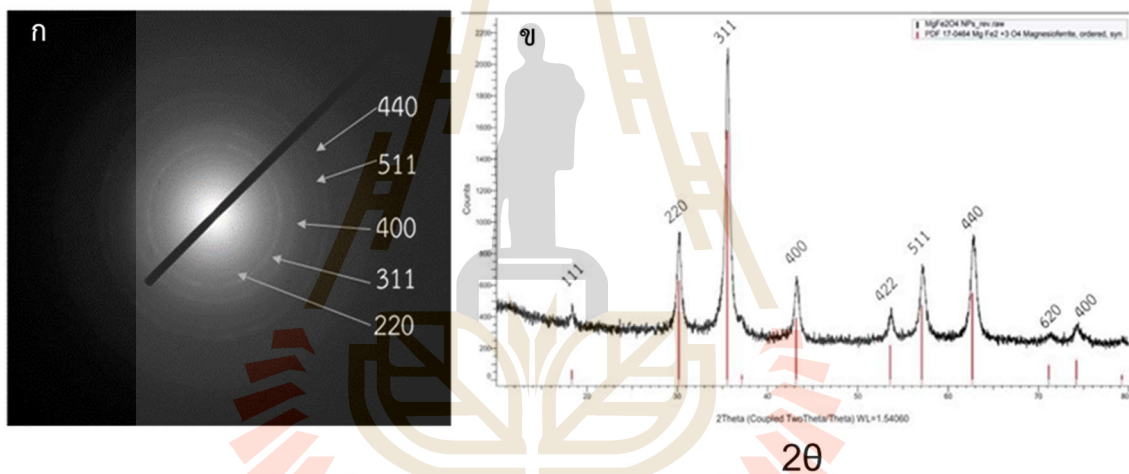
ผลและอภิปรายผล

4.1 ผลการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

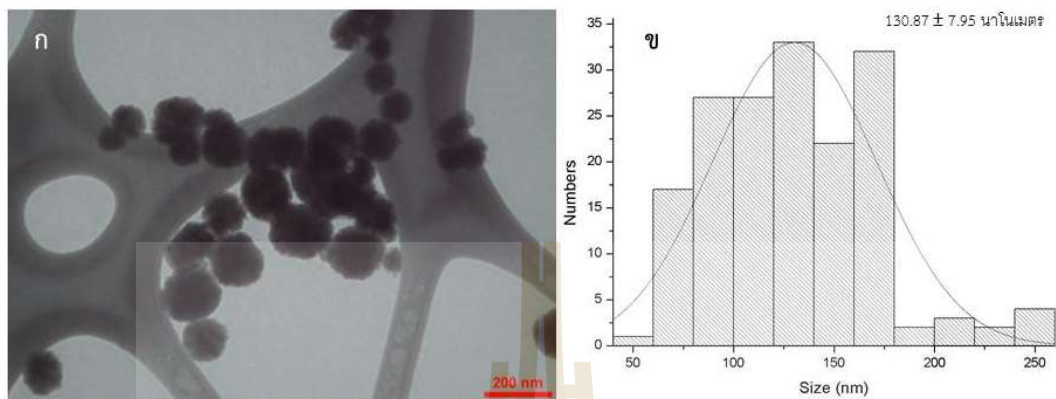
จากการวิเคราะห์อนุภาคที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ทำให้ได้ข้อมูลสำหรับการยืนยันความเป็นอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของอนุภาค ภาพที่ 4.1(ก) แสดงแบบแผนการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ซึ่งเป็นแบบแผนที่บ่งชี้ความเป็น polycrystalline ของอนุภาค โดยมี grain (polycrystallite) ค่อนข้างละเอียด โปรแกรม ImageJ จะทำการหาพื้นที่วงกลมใน ring pattern ซึ่งค่าพื้นที่จะถูกนำไปใช้คำนวณหารัศมีของวงกลม ที่จะทำให้สามารถหาระยะห่างของระนาบ (interplanar spacing ; d-spacing) ใน lattice ได้ ชุดของค่า d-spacing จากทุกวงจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับชุดค่า d-spacing ของสารมาตรฐานในฐานข้อมูล JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) ซึ่งจะทำให้ได้ค่า Miller Indices (hkl) สำหรับนำมาระบุระนาบของ atomic plane บน ring pattern ตารางที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่า d-spacing จากการวิเคราะห์พบว่าชุดของค่า d-spacing มีค่าใกล้เคียงกับชุดค่า d-spacing ของสารมาตรฐานหมายเลข 01-073-1906 ซึ่งได้แก่อนุภาคของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ และรูปที่ 4.1(ข) แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างของอนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้ แนวแกน X คือมุมของการเลี้ยวเบน (2θ) สามารถนำค่า 2θ ของแต่ละพีคบนกราฟไปหาค่า Miller indices และเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานได้ผลว่าตรงกับสารมาตรฐานหมายเลข 01-088-1937 ซึ่งได้แก่อนุภาคของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์เช่นกัน นอกจากนี้เมื่อนำตัวอย่างอนุภาคไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะพบว่าอนุภาคของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์มีลักษณะค่อนข้างกลม ผิวไม่เรียบ ไม่เกาะกลุ่ม ดังภาพที่ 4.2ก และ 4.2ข เมื่อวัดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยจากภาพจะพบว่ามีความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ 130.87 ± 7.95 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่า Interplanar spacing (d-spacing) ของอนุภาคตัวอย่าง กับสารมาตรฐาน ด้วยเทคนิค Selected Area Electron Diffraction (SAED-TEM)

Miller indices			d-spacing ของสารมาตรฐาน (Å°)	d-spacing ของสารที่สังเคราะห์ขึ้น (Å°)
h	k	l		
2	2	0	2.9557	2.9971
3	1	1	2.5206	2.6018
4	0	0	2.0900	2.1065
5	1	1	1.6089	1.6454
4	4	0	1.4779	1.5255



ภาพที่ 4.1 แบบแผนการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และ รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในโครงสร้างของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ (ข)



ภาพที่ 4.2 ลักษณะภายนอกของอนุภาคนาโนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ก) histogram แสดงเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค (ข)

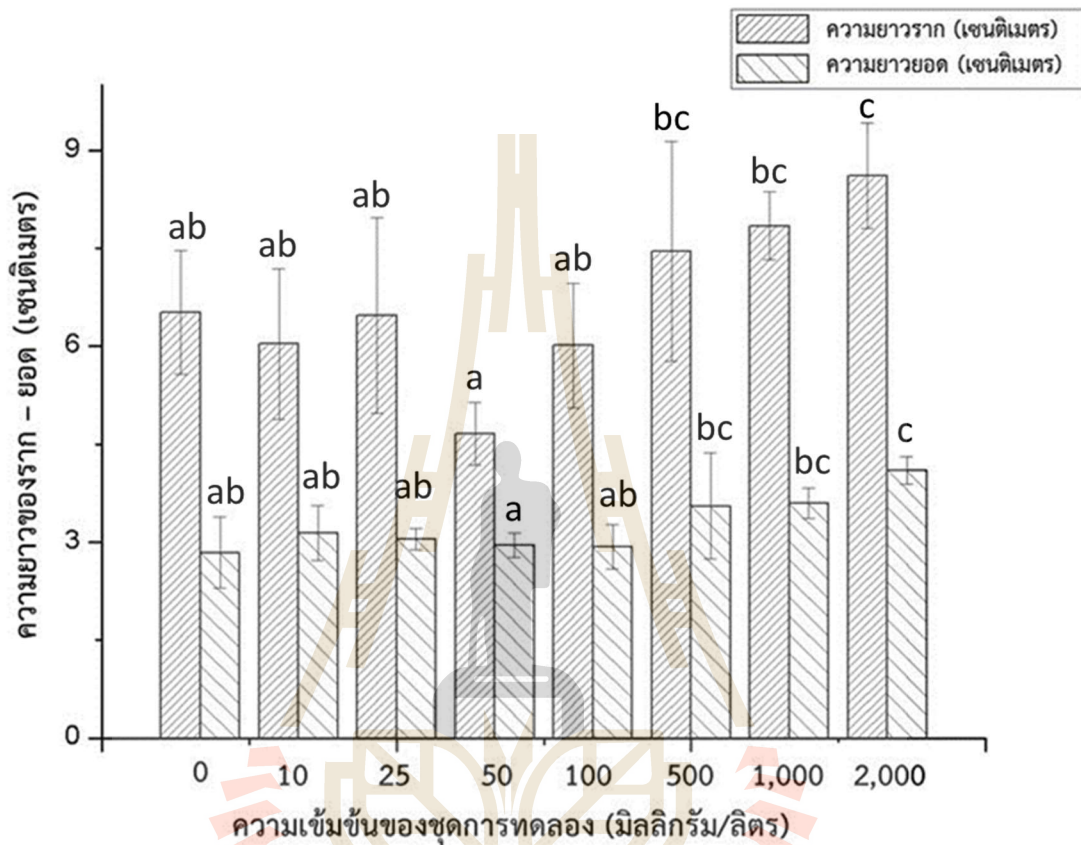
4.1.1 ผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อข้าวในระยะการออก

4.1.1.1 ผลต่อความยาวเฉลี่ยของราก และความยาวเฉลี่ยของยอดเมื่อได้รับอนุภาคเป็นเวลา 7 วัน

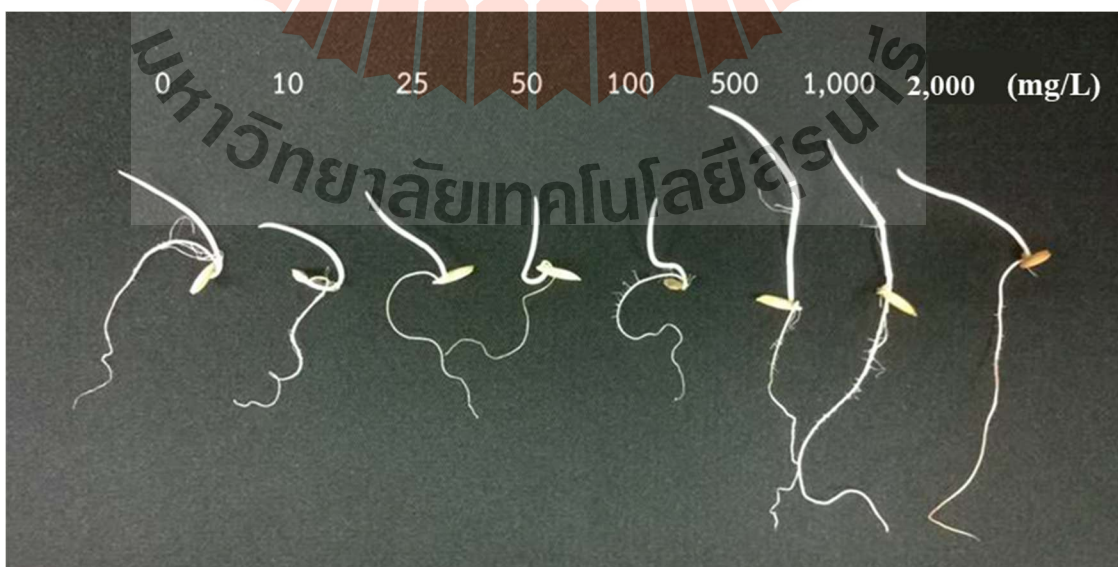
ในการติดตามความยาวเฉลี่ยของรากและยอดของข้าวในการทดลองทั้งหมด 4 ครั้ง ได้ผลดังที่แสดงในภาพที่ 4.3 ถึง 4.7 ตามลำดับ โดยแต่ละกราฟจะแสดงความยาวเฉลี่ยของราก และความยาวเฉลี่ยของยอดคู่กัน

ในการทดลองครั้งที่ 1 พบว่าความยาวยอดเฉลี่ยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้น แต่ความยาวรากเฉลี่ยกลับไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจน เพราะในชุดการทดลองความเข้มข้น 10 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความยาวรากเฉลี่ยน้อยกว่าชุดควบคุมอย่างเห็นได้ชัด และจากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสถิติแบบต้นแค่น (Duncan's multiple range test) จะพบว่าสามารถจัดกลุ่มความยาวรากเฉลี่ยออกเป็น 3 กลุ่มตามตารางที่แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก โดยที่สมาชิกในแต่ละกลุ่มจะมีความยาวรากเฉลี่ยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยชุดการทดลองที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 0 จนถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยชุดการทดลองที่มีความเข้มข้น 0 10 25 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มสุดท้ายประกอบด้วยชุดการทดลองที่มีความเข้มข้น 500 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการจัดกลุ่มโดยวิธีนี้บ่งบอกว่าความยาวรากเฉลี่ยในการทดลองที่ 1 มีความเป็นเนื้อเดียวกันค่อนข้างสูงเพราะมีกลุ่มที่จัดแล้วมีสมาชิกรวมกันอยู่ ยกเว้นในชุดการทดลองความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ความยาวเฉลี่ยของรากจะต่ำกว่าชุดการทดลองความเข้มข้นตั้งแต่ 500 ถึง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และชุดการทดลองความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็จะมีมีความยาวเฉลี่ยของรากมากกว่าชุดการทดลองกลุ่มที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติแบบเดียวกันกับ ส่วนของยอดพบว่า สามารถจัดกลุ่มได้เป็น 3 กลุ่มเช่นเดียวกัน (ภาคผนวก ข) แต่จะพบว่าที่ความ

เข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความยาวยอดเฉลี่ยต่ำกว่าความเข้มข้นตั้งแต่ 500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความยาวยอดเฉลี่ยสูงกว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 0 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 4.3)

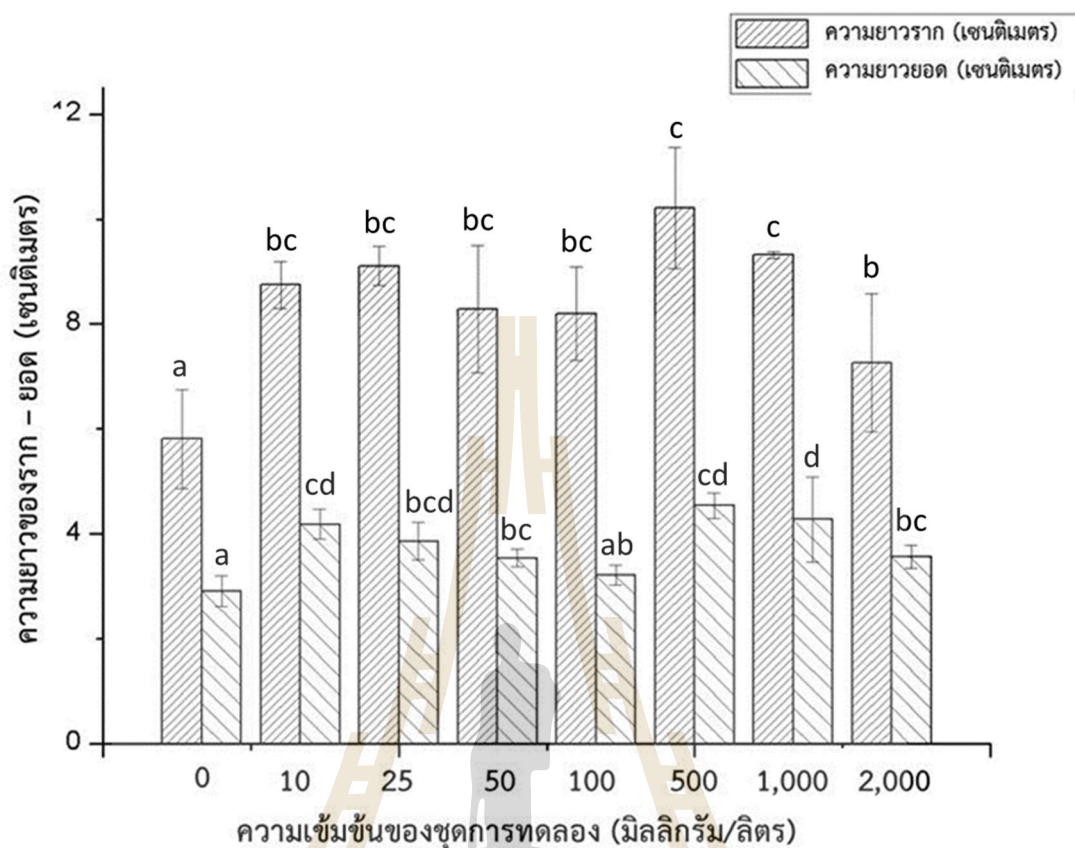


ภาพที่ 4.3 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 1



ภาพที่ 4.4 ความยาวรากและความยาวรากจากการทดลองครั้งที่ 1

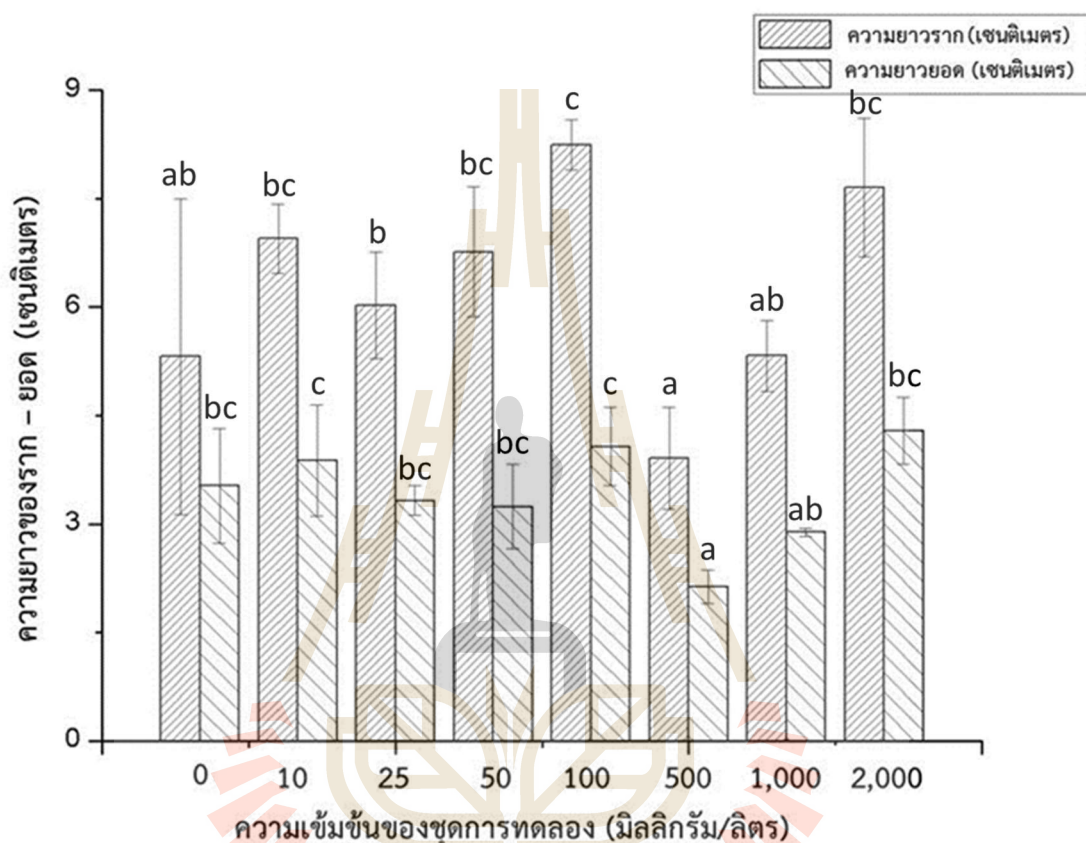
ในการทดลองครั้งที่ 2 พบว่าทั้งความยาวรากเฉลี่ยและความยาวยอดเฉลี่ยไม่สามารถบอกแนวโน้มที่ชัดเจนได้ เพราะหากดูจากภาพที่ 4.5 จะพบว่าค่าความยาวทั้ง 2 ค่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงในช่วง 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และลดลงอีกครั้งในช่วงความเข้มข้น 1,000 ถึง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งความยาวรากและความยาวยอดด้วยวิธีของดินแดน จะสามารถจัดกลุ่มความยาวรากเฉลี่ยได้เป็น 3 กลุ่ม (ภาคผนวก ข) ดังนี้ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 10 25 50 100 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้นตั้งแต่ 10 จนถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าการทดลองในชุดควบคุมให้ผลความยาวรากเฉลี่ยต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็มีความยาวรากเฉลี่ยต่ำกว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเช่นเดียวกัน สำหรับการทดสอบด้วยวิธีดินแดนในความยาวยอดพบว่าการจัดกลุ่มที่ซับซ้อนกว่าความยาวเฉลี่ยของรากกล่าวคือ สามารถจัดกลุ่มได้เป็น 4 กลุ่มโดยกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 0 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยความเข้มข้น 25 50 100 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยความเข้มข้น 10 25 50 500 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 4 ประกอบด้วย 25 10 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความยาวยอดเฉลี่ยน้อยที่สุดและน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ (ยกเว้นที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และชุดการทดลองความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความยาวยอดเฉลี่ยสูงที่สุดและสูงกว่าความยาวยอดเฉลี่ยของชุดการทดลองความเข้มข้น 0 50 100 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 4.5)



ภาพที่ 4.5 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 2

ภาพที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความยาวรากเฉลี่ย และความยาวยอดเฉลี่ยในการทดลองครั้งที่ 3 โดยจากกราฟจะเห็นแนวโน้มที่คล้ายกันระหว่างค่าความยาวทั้ง 2 ค่า กล่าวคือ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้น 0 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นลดลงในชุดการทดลองความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่อยเพิ่มขึ้นอีกครั้งในความเข้มข้น 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และความยาวเฉลี่ยทั้ง 2 ค่าลดลงอีกครั้งที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นที่ความเข้มข้น 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และในตารางภาคผนวก ค และ ข ซึ่งเป็นตารางแสดงการทดสอบความยาวเฉลี่ยของรากและยอดในการทดลองครั้งที่ 3 ด้วยวิธีการต้นแค่น จะพบว่าในความยาวเฉลี่ยของรากสามารถจัดกลุ่มที่สมาชิกในกลุ่มไม่มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติได้ 3 กลุ่ม และชุดการทดลองที่มีความยาวเฉลี่ยน้อยที่สุดคือที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความยาวรากเฉลี่ยอยู่ที่ 3.91 เซนติเมตร) ซึ่งจะมีความยาวอยู่ในกลุ่มที่ 1 กับชุดการทดลองความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีความยาวน้อยกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความยาวรากเฉลี่ยที่มากที่สุดคือชุดการทดลองความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความยาวรากเฉลี่ยประมาณ 8.25 เซนติเมตร) โดยจัดอยู่ในกลุ่มที่ 3 เหมือนกับความเข้มข้น 10 50 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบค่าความยาวเฉลี่ยของยอดด้วยวิธีเดียวกัน สามารถแบ่งความยาวเฉลี่ยของยอดออกเป็น 3 กลุ่มดังตารางภาคผนวก ข จากตารางพบว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความยาวยอดเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ 2.13

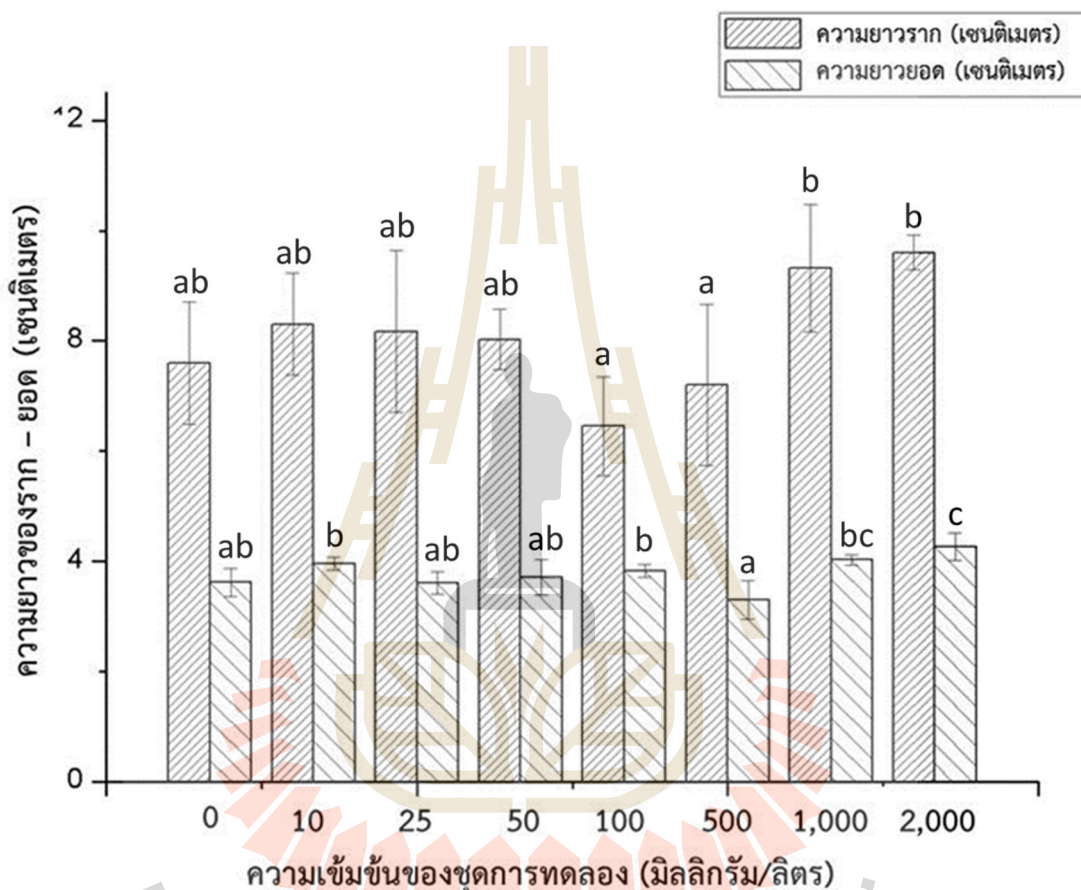
เซนติเมตรจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับชุดความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้อยกว่าความเข้มข้นอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และที่ชุดการทดลองความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีความยาวยอดเฉลี่ยสูงที่สุด (ความยาวเฉลี่ย 4.07 เซนติเมตร) และอยู่ในกลุ่มเดียวกับอีก 5 ความเข้มข้นคือ 0 10 25 50 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



ภาพที่ 4.6 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 3

ในการทดลองครั้งที่ 4 ค่าความยาวรากเฉลี่ย และความยาวยอดเฉลี่ยก็ยังคงพบแนวโน้มที่ไม่สม่ำเสมอ จากภาพที่ 4.7 พบว่าความยาวรากเฉลี่ยตั้งแต่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ จนถึงชุดการทดลองความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะมีความยาวเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับความยาวเฉลี่ยของยอดจะพบว่ามีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงกัน แต่ในชุดการทดลองความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความยาวเฉลี่ยน้อยที่สุด และเมื่อจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยความยาวทั้ง 2 ค่าด้วยวิธีทางสถิติด้วยวิธีการทางสถิติแบบต้นแค่น ตามตารางที่แสดงในภาคผนวก ง พบว่าความยาวรากเฉลี่ยสามารถจัดกลุ่มได้เพียง 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ความเข้มข้นตั้งแต่ 0 จนถึง 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 2 กลุ่มของชุดการทดลองความเข้มข้น 0 10 25 50 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งค่าความยาวรากเฉลี่ยที่น้อยที่สุดคือชุดการทดลองความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความยาว 6.45 เซนติเมตร) และความยาวรากเฉลี่ยสูงสุดคือชุดการทดลองความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความยาว 9.60 เซนติเมตร) ส่วนเมื่อทดสอบ

ด้วยวิธีต้นแค้นกับความยาวเฉลี่ยของยอดได้ผลตามตารางภาคผนวก จ สามารถจัดกลุ่มความยาวยอดเฉลี่ยได้ 3 กลุ่ม และความยาวยอดเฉลี่ยที่น้อยที่สุดอยู่ในความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร (ความยาว 3.30 เซนติเมตร) อยู่ในกลุ่มที่ 1 ร่วมกับชุดความเข้มข้น 0 25 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความยาวยอดเฉลี่ยที่สูงที่สุดคือที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จัดอยู่ในกลุ่มที่ 3 ร่วมกับความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร



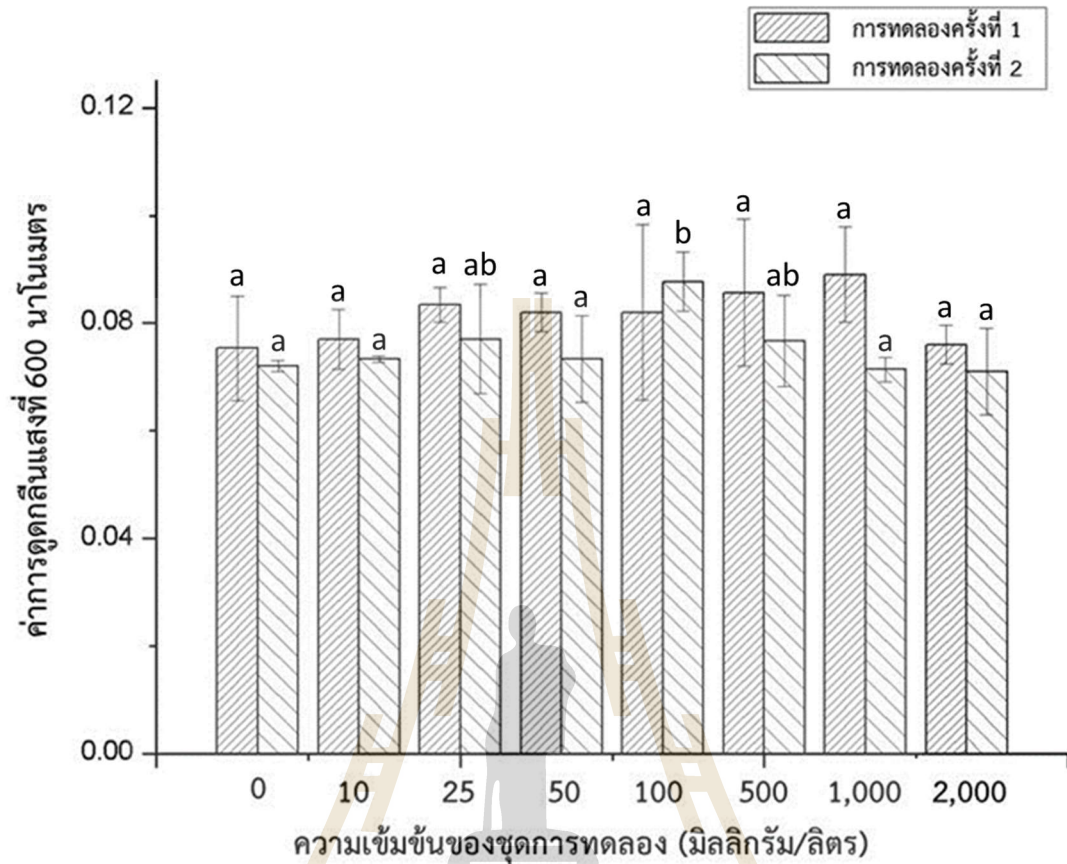
ภาพที่ 4.7 กราฟแสดงความยาวรากและความยาวยอดเฉลี่ยจากการทดลองครั้งที่ 4

จากการทดลองผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อความยาวเฉลี่ยของราก และความยาวเฉลี่ยของยอดเมื่อต้นข้าวอายุ 7 วัน ทั้งหมด 4 ครั้ง พบความไม่สม่ำเสมอของผลการทดลอง เพราะว่าในทุก ๆ ชั่วโมงไม่สามารถบอกแนวโน้มของผลกระทบต่อต้นข้าวได้ อีกทั้งในความเข้มข้นที่ต่างกันมาก ๆ ยังให้ผลค่าเฉลี่ยของความยาวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ตามการวิเคราะห์ด้วยวิธีต้นแค้น ตัวอย่างเช่นในการทดลองครั้งที่ 4 ความยาวรากเฉลี่ยในชุดควบคุมของการทดลองมีค่าความยาวรากไม่ต่างจากชุดการทดลองความเข้มข้น 10 25 50 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จึงอาจจะบอกได้ว่าอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ไม่มีผลกระทบในทั้งทางกระตุ้นและการยับยั้งความยาวของรากและยอดของต้นข้าว

4.1.1.2 การหาปริมาณเซลล์ที่ตายด้วยวิธี Cell death assay

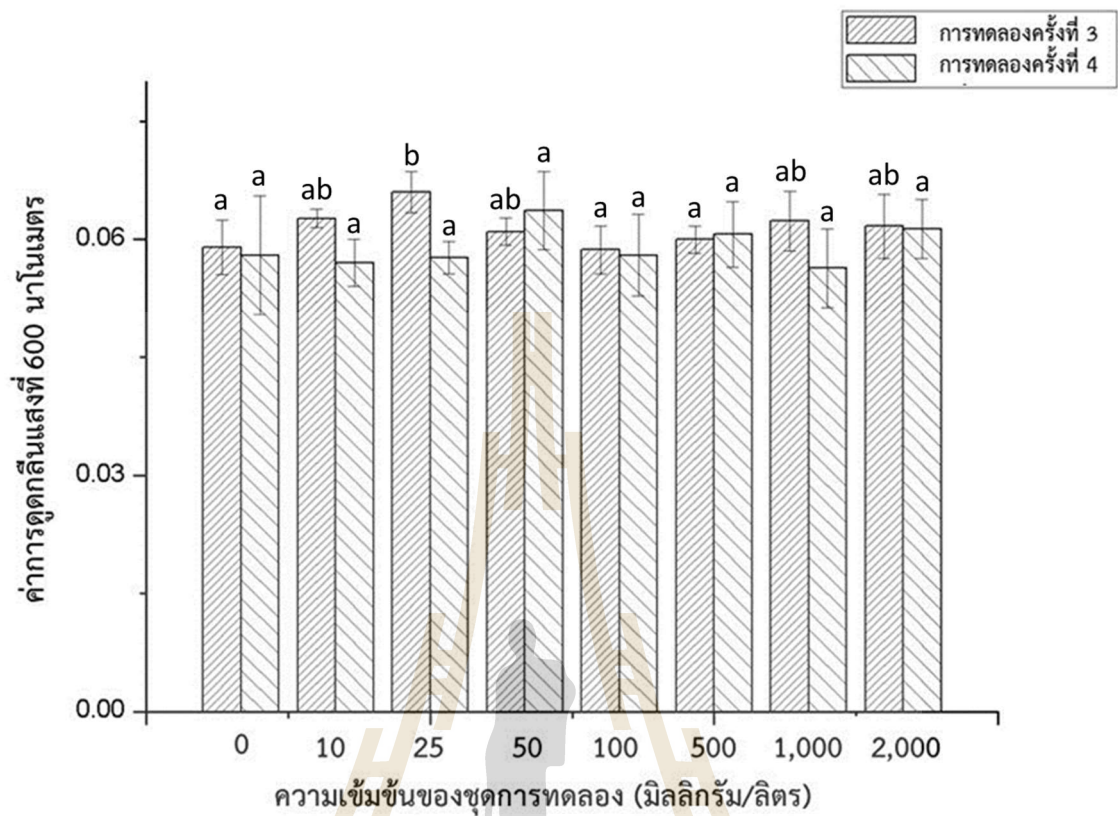
การหาปริมาณเซลล์ที่ตายด้วยการย้อมรากของข้าวด้วยสีย้อม Evans Blue ซึ่งเป็นสีที่ย้อมผ่านเข้าไปในเซลล์ที่มีชีวิตไม่ได้ และไม่เป็นพิษต่อเซลล์ จากนั้นชะล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วขับสีออกจากเนื้อเยื่อโดยแช่ใน N,N-dimethylformamide วัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเพื่อประเมินปริมาณสีที่ผ่านเข้าไปในเซลล์ที่ 600 nm ภาพที่ 4.8 และ 4.9 เป็นกราฟที่แสดงผลการทดลองครั้งที่ 1 รวมกับครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 รวมกับครั้งที่ 4 ตามลำดับ โดยปริมาณเซลล์ที่ตายจะแปรผันตามค่าการดูดกลืนแสง

ในการทดลองครั้งที่ 1 พบว่าปริมาณเซลล์ที่ตายมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น แต่ในชุดการทดลองความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณเซลล์ที่ตายลดลงแต่เมื่อจัดกลุ่มปริมาณเซลล์ที่ตายด้วยวิธีต้นแคณ ได้ผลตามตารางที่แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ แล้วพบว่าปริมาณเซลล์ที่ตายของทุกความเข้มข้นไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในการทดลองครั้งที่ 2 ไม่พบแนวโน้มที่ชัดเจน เพราะที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณเซลล์ที่ตายสูงที่สุดและเมื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติแล้วพบว่าสามารถจัดกลุ่มการทดลองได้เป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 0 10 25 50 500 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 25 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงว่าที่ระดับความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณเซลล์ที่ตายสูงที่สุดโดยมีค่ามากกว่าชุดการทดลองที่มีความเข้มข้น 0 10 50 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาคผนวก ช)

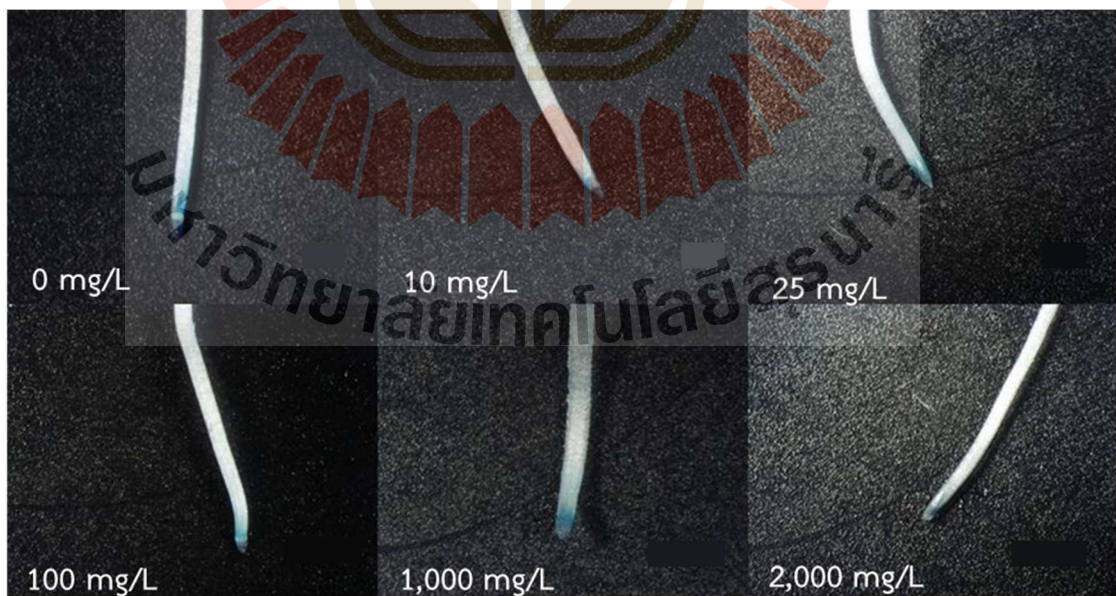


ภาพที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม Evans Blue ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2

ในการทดลองครั้งที่ 3 ก็จะมีพบแนวโน้มของความไม่สม่ำเสมอของปริมาณเซลล์ที่ตายและเมื่อจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยของค่าการดูดกลืนแสงด้วยวิธีต้นแคณ ตามตารางที่แสดงไว้ในภาคผนวก ข พบว่าสามารถจัดกลุ่มได้ 2 กลุ่ม ซึ่งชุดการทดลองที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณเซลล์ที่ตายสูงสุด (อยู่ในกลุ่มเดียวกับความเข้มข้น 10 50 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) แต่สูงกว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 0 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และในการทดลองครั้งที่ 4 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุก ๆ ชุดการทดลอง (ภาคผนวก ฉ)



ภาพที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม Evans Blue ในการทดลองครั้งที่ 3 และ 4



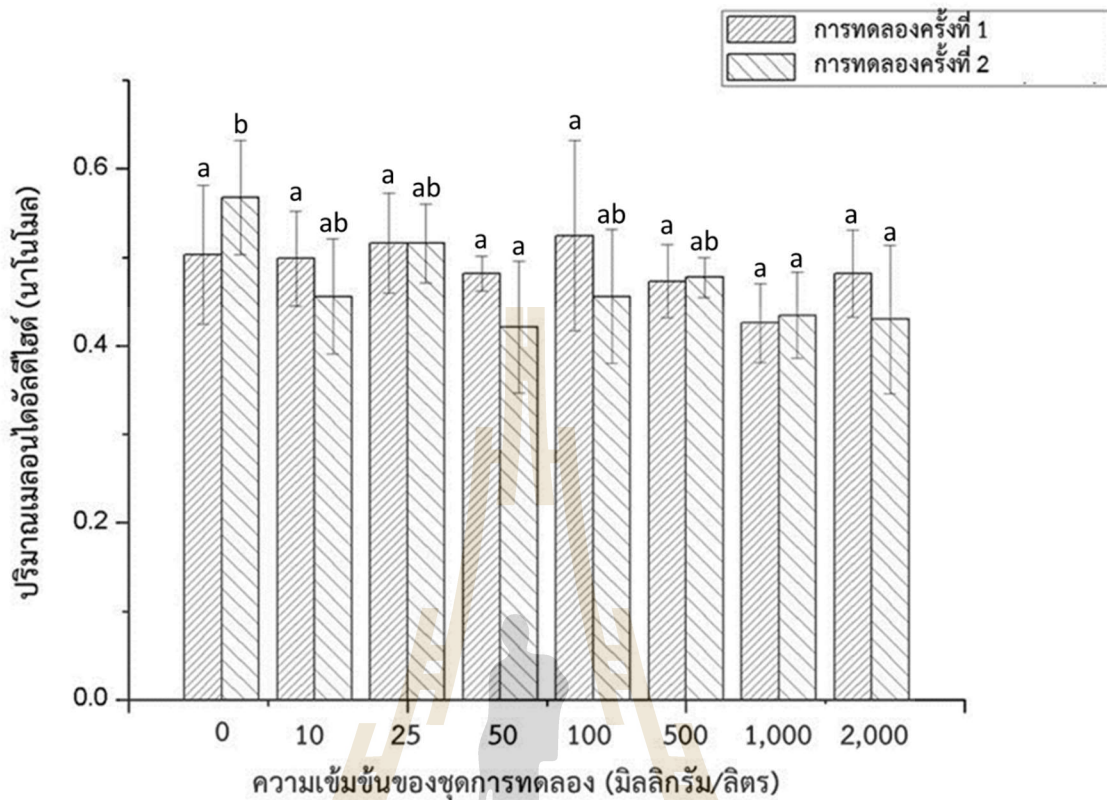
ภาพที่ 4.10 ตัวอย่างรากเมื่อถูกย้อมด้วยสีย้อม Evans blue

จากการทดลองทั้ง 4 ครั้งพบว่ามี 2 ครั้งในทุกชุดการทดลองที่มีปริมาณเซลล์ที่ตายไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และอีก 2 ครั้งที่มีแนวโน้มไม่ชัดเจนและชุดการทดลองที่ความเข้มข้นต่างกันมากให้ผลปริมาณเซลล์ที่ตายไม่ต่างกัน จึงอาจจะสามารถสรุปได้ในเบื้องต้นว่าอนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเพอร์ไรต์ไม่ได้มีผลกระทบต่อปริมาณเซลล์ที่ตายเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเทียบกับการทดลองชุดควบคุม

4.1.1.3 ปริมาณ Malondialdehyde

ภาพที่ 4.11 เป็นกราฟแสดงปริมาณของเมลอนไดอัลดีไฮด์ (malondialdehyde: MDA) ในหน่วยนาโนโมล (nmol) ตามความเข้มข้นของการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณ MDA มีแนวโน้มลดลงในช่วงความเข้มข้น 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และสูงขึ้นอีกครั้งในชุดการทดลองสุดท้ายที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ตารางที่แสดงไว้ในภาคผนวก ฎ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบปริมาณ MDA ด้วยวิธีต้นแคณ พบว่าทุกชุดการทดลองสามารถจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันหมายถึงในการทดลองครั้งที่ 1 ปริมาณ MDA ในทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ในการทดลองครั้งที่ 2 ตามภาพที่ 4.11 ปริมาณ MDA มีแนวโน้มจะลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น และปริมาณ MDA สูงที่สุดอยู่ที่การทดลองชุดควบคุม และจากวิธีการจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยของปริมาณ MDA แบบต้นแคณ (ภาคผนวก ฎ) พบว่าสามารถจัดกลุ่มได้เป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้นตั้งแต่ 10 จนถึง 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 0 10 25 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าที่ชุดควบคุมจะมีค่า MDA สูงกว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 50 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



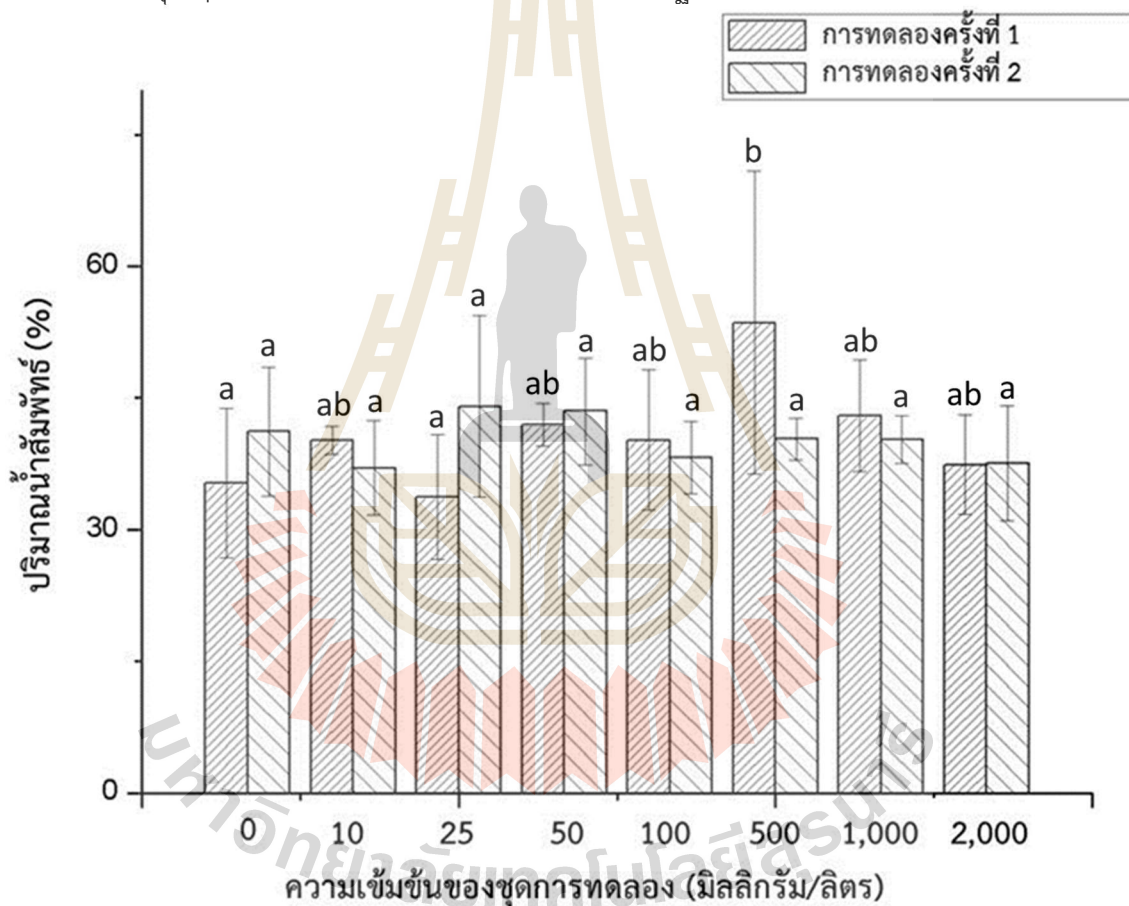
ภาพที่ 4.11 กราฟแสดงปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์ ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2

ในการทดลองทั้ง 2 ครั้งอาจจะสามารถสรุปได้ว่าปริมาณ MDA ไม่แตกต่างกันในทุกความเข้มข้น ถึงแม้ว่าในการทดลองครั้งที่ 2 ปริมาณ MDA ในชุดควบคุมสูงที่สุดแต่ก็ยังสามารถจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับชุดการทดลองความเข้มข้นอื่น ๆ ได้ ดังนั้นอนุมานาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์จึงไม่มีผลกระทบในการกระตุ้นหรือยับยั้งการสร้าง MDA ในต้นข้าวอายุ 7 วัน และเนื่องจากปริมาณ MDA สามารถสื่อถึงปริมาณของสารอนุมูลอิสระประเภทที่มีออกซิเจนในโมเลกุลหรือ reactive oxygen species (ROS) ในพืชได้เนื่องจาก MDA เป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง ROS กับสารประเภทไขมัน ดังนั้นสามารถสรุปได้อีกทางหนึ่งว่าอนุมานาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ไม่มีผลต่อการสร้าง ROS ในข้าวอายุ 7 วัน และหมายความว่าอนุมานาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ไม่มีผลในการยับยั้งหรือกระตุ้นให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) ในต้นอ่อนข้าวอายุ 7 วัน (ค่าเฉลี่ยปริมาณ MDA ในรากข้าวอายุ 7 วันจะแสดงในตารางที่ ในภาคผนวก ญ และ ฎ)

4.1.1.4 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (Relative water content)

ปริมาณน้ำสัมพัทธ์เป็นค่าที่ได้จากสูตร $\%RWC = (FW - DW) \times 100 / TW - DW$ โดย FW คือน้ำหนักสด DW คือน้ำหนักแห้ง และ TW คือน้ำหนักขณะที่เซลล์มีปริมาณน้ำอยู่สูงสุด (น้ำหนักทั้งหมดใช้หน่วยเป็นกรัม) แสดงว่าค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์เป็นค่าที่แสดงปริมาณภายในเซลล์ว่ามีค่าเป็นร้อยละเท่าไรเทียบกับความสามารถในการรองรับน้ำทั้งหมดของพืช

ภาพที่ 4.12 จะแสดงปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยแนวโน้มปริมาณน้ำสัมพัทธ์จากการทดลองทั้ง 2 ครั้งมีแนวโน้มไม่คงที่ตามความเข้มข้นที่สูงขึ้น และในการทดลองครั้งที่ 1 ที่ชุดการทดลองความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีปริมาณน้ำสัมพัทธ์สูงกว่าค่าอื่นๆอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อจัดกลุ่มด้วยวิธีทางสถิติแบบต้นแคณ พบว่าในการทดลองครั้งที่ 1 (ตามตารางที่แสดงในภาคผนวก ก) จะสามารถจัดกลุ่มปริมาณน้ำสัมพัทธ์ได้ 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยทุกชุดการทดลอง ยกเว้นชุดการทดลองความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 10 50 100 500 1,000 และ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และในการทดลองครั้งที่ 2 เพื่อทดสอบด้วยวิธีการทางสถิติวิธีเดียวกัน จะไม่พบความแตกต่างของค่าปริมาณน้ำสัมพัทธ์ในทุก ๆ ความเข้มข้น (ตารางที่แสดงในภาคผนวก ข)

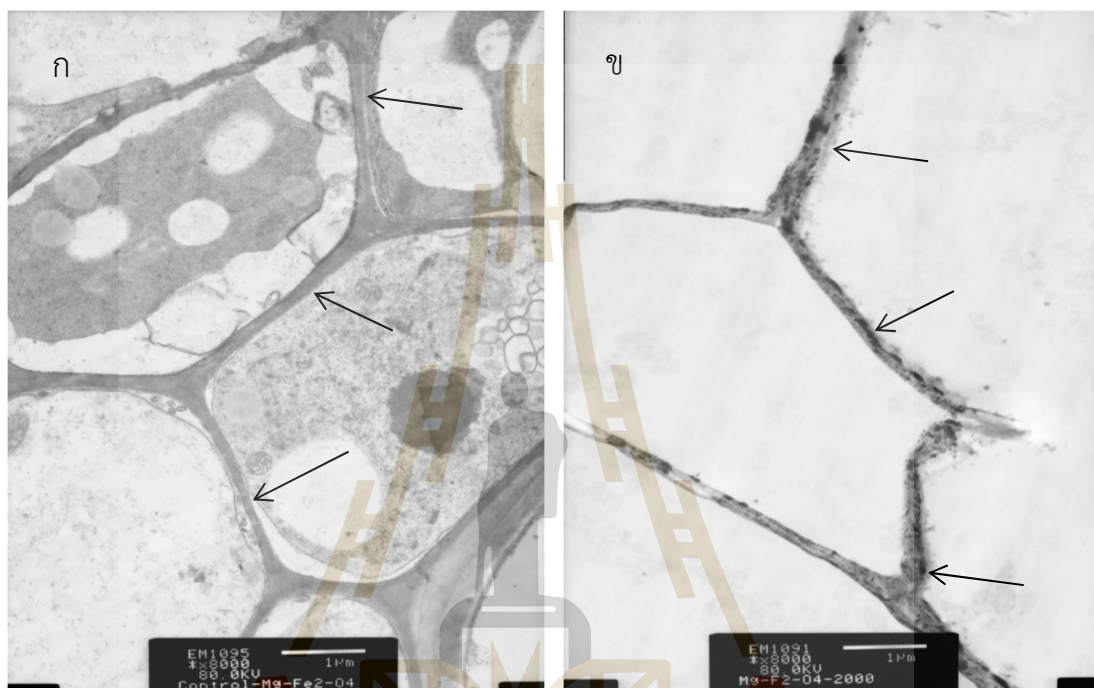


ภาพที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณน้ำสัมพัทธ์ ในการทดลองครั้งที่ 1 และ 2

จากการทดลองทั้ง 2 ครั้งแสดงว่าอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเพอร์ไรต์ไม่มีผลต่อปริมาณน้ำภายในเซลล์รากพืชในทุก ๆ ความเข้มข้น ถึงแม้ในการทดลองครั้งที่ 1 ที่ชุดการทดลองความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ตามกราฟ แต่เมื่อใช้วิธีการทางสถิติในการจัดกลุ่มก็ยังสามารถจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกับชุดการทดลองอื่นได้เช่นกัน

ภาพที่ 4.13ก และ 4.13ข เป็นการเปรียบเทียบเซลล์รากข้าวที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่านที่กำลังขยาย 8,000 เท่า ในชุดการทดลองความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร และ

2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และจะสามารถบ่งบอกได้ว่าอนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ จะเกาะกลุ่มกันอยู่บริเวณผนังเซลล์เท่านั้น (ตามหัวลูกศร) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลเกี่ยวกับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของพลาสมาโตนีมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 40 นาโนเมตร (Lewis et al., 1991) อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ขึ้นในงานวิจัยชิ้นนี้จึงไม่สามารถผ่านเข้าไปในเซลล์รากข้าวได้



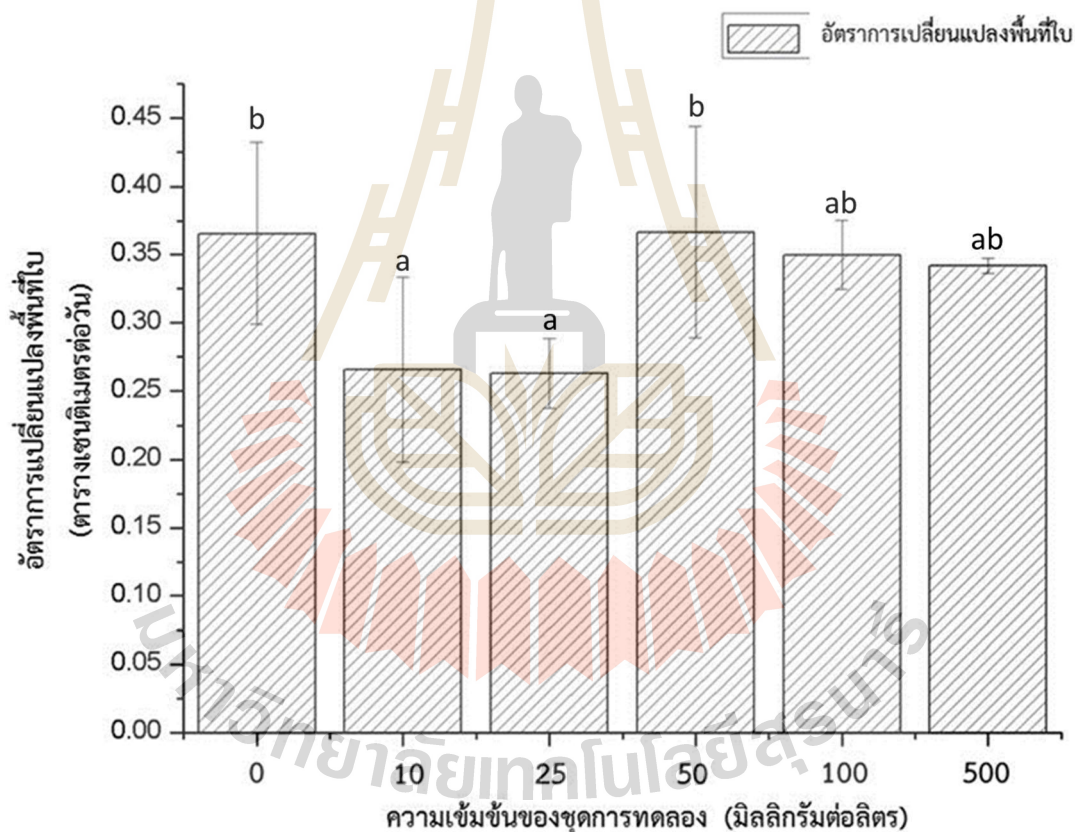
ภาพที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของรากข้าวที่ชุดการทดลองความเข้มข้น 0 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชุดควบคุม) กำลังขยาย 8,000 เท่า (ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของรากข้าวที่ชุดการทดลองความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (ชุดควบคุม) กำลังขยาย 8,000 เท่า (ข)

4.1.2 ผลของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวในระยะปลูกในดิน (อายุ 28 – 35 วัน)

4.1.2.1 อัตราการเติบโต

คำนวณจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบขนาดของใบคำนวณจากสมการของ Yoshida (1981) ซึ่งเป็นสมการสำหรับการคำนวณใบของพืชใบเลี้ยงเดี่ยวที่เป็นธัญพืช เช่น ข้าว หรือข้าวโพด โดยขนาดของใบ (Area) = ความยาวของใบ (Length) x ความกว้างของใบ (Width) x ค่าคงที่ (K มีค่าตั้งแต่ 0.67-0.87) โดยในระยะต้นกล้า (อายุ 0-30 วันใช้ค่าคงที่ 0.67) และในระยะที่อายุต้นข้าวมากกว่า 30 วันใช้ค่าคงที่ 0.75 และจากการคำนวณจะได้ค่าขนาดของใบในหน่วยตารางเซนติเมตร (cm²) ทำการวัดขนาดของใบในวันที่ 28 และ 35 ของการทดลอง (ระยะห่าง 7 วัน) และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดใบโดยหารด้วยระยะเวลา 7 วัน ได้เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบในหน่วยตารางเซนติเมตรต่อวัน (cm²/day) ได้ผลแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบดังกราฟในภาพที่ 4.14

และตารางที่ 4.18 โดยจะเปรียบเทียบทั้งหมด 6 ชุดการทดลอง (ตั้งแต่ความเข้มข้น 0 10 25 50 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) จะพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบในชุดการทดลองความเข้มข้น 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าน้อยกว่าในความเข้มข้นอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด (มีค่าการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบเท่ากับ 0.27 และ 0.26 cm²/day ตามลำดับ) และในความเข้มข้นอื่น ๆ มีค่าอัตราการเติบโตใกล้เคียงกัน ยืนยันโดยการทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการเติบโตด้วยวิธีแบบต้น แคน พบว่าสามารถจัดกลุ่มชุดการทดลองที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบเฉลี่ยไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ได้เป็น 2 กลุ่มโดยในความเข้มข้น 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร จะอยู่ในทั้ง 2 กลุ่ม แสดงว่าชุดการทดลองความเข้มข้น 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะน้อยกว่า ชุดการทดลองความเข้มข้น 0 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

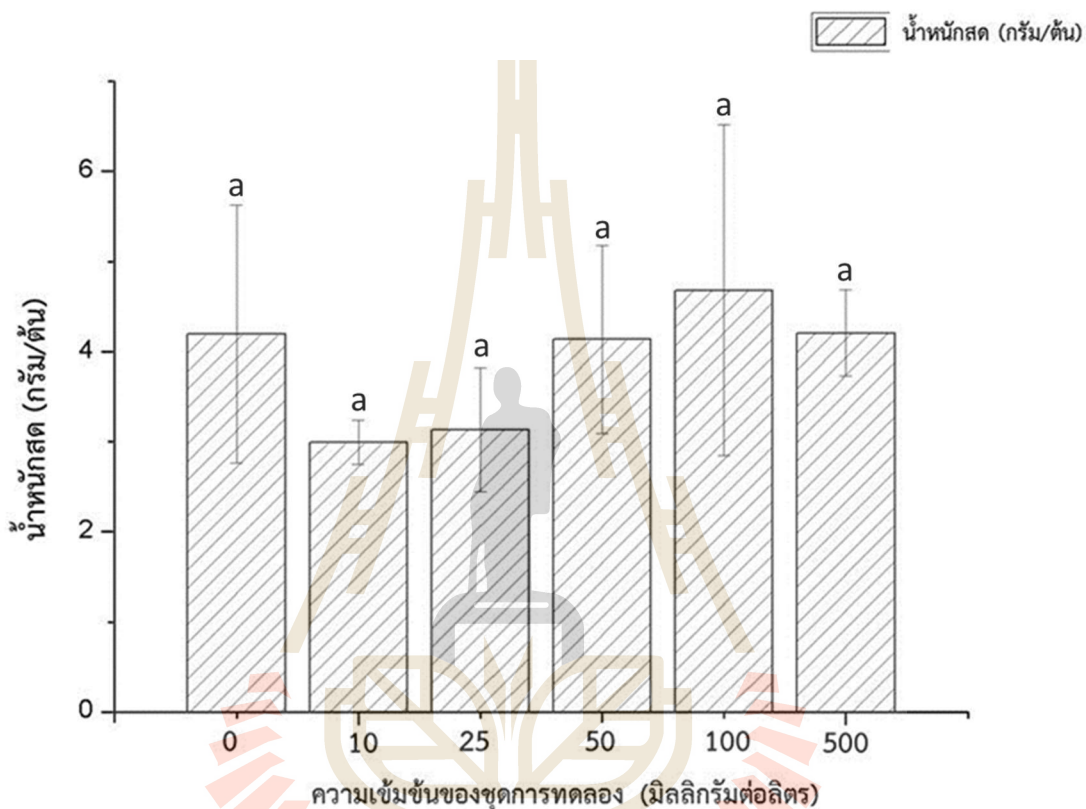


ภาพที่ 4.14 กราฟแสดงอัตราการเติบโตโดยวัดจากขนาดของใบตามความเข้มข้น

4.1.2.2 น้ำหนักสดของลำต้นข้าวเมื่ออายุ 35 วัน

แนวโน้มน้ำหนักสดของลำต้นข้าวเมื่ออายุ 35 วันแสดงดังภาพที่ 4.15 จะพบว่าเมื่อดูจากแนวโน้มในการทดลองทั้ง 6 ความเข้มข้นนั้น จะมีแนวโน้มคล้ายกับกราฟแสดงอัตราการเติบโตเฉลี่ย (ในภาพที่ 4.14) เพราะมีชุดการทดลอง 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีน้ำหนักสดน้อยกว่าชุด

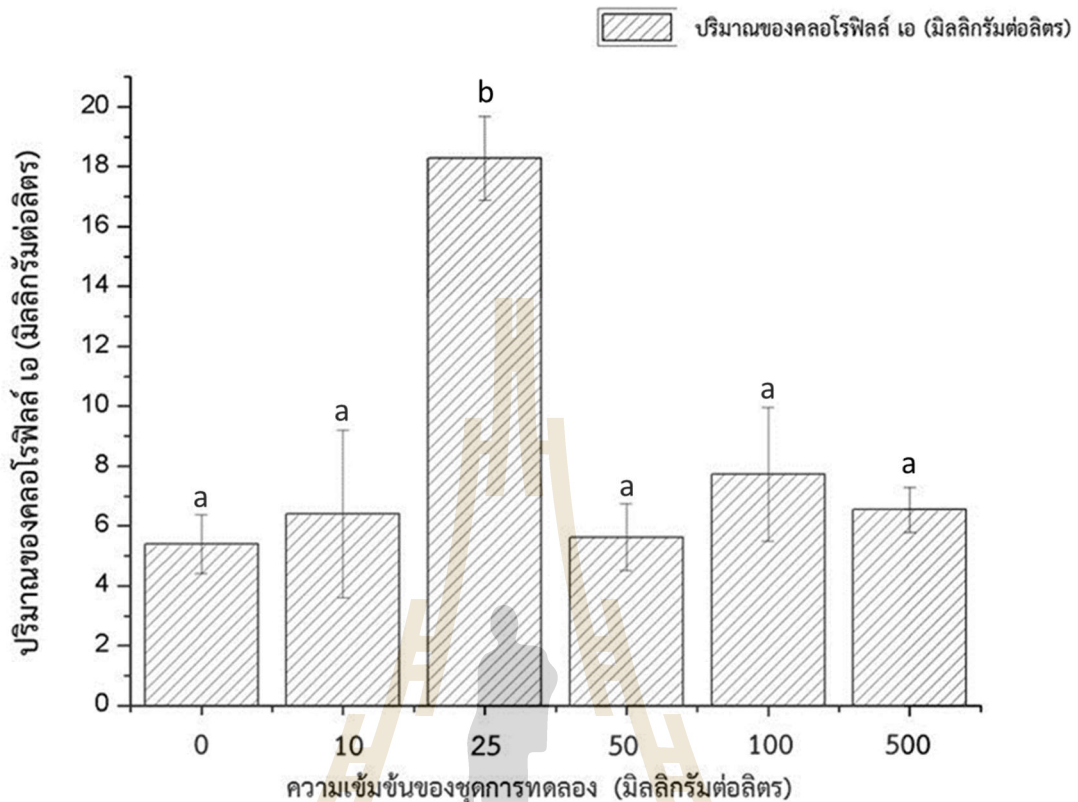
การทดลองอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด (น้ำหนักสดเฉลี่ยต่อต้นข้าว 1 ต้นเท่ากับ 2.99 และ 3.13 กรัม ตามลำดับ) และชุดการทดลองอื่น ๆ มีน้ำหนักสดเฉลี่ยใกล้เคียงกัน (น้ำหนักสดเฉลี่ยอยู่ที่ 4.13 กรัม จนถึง 4.68 กรัม) และเมื่อทดสอบเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดของต้นข้าวด้วยวิธีของดันแคน ได้ผล ดังตารางที่ 4.19 และพบว่าในการทดลองทุกความเข้มข้นมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดของต้นข้าวไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.15 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดของต้นข้าวเทียบตามความเข้มข้น

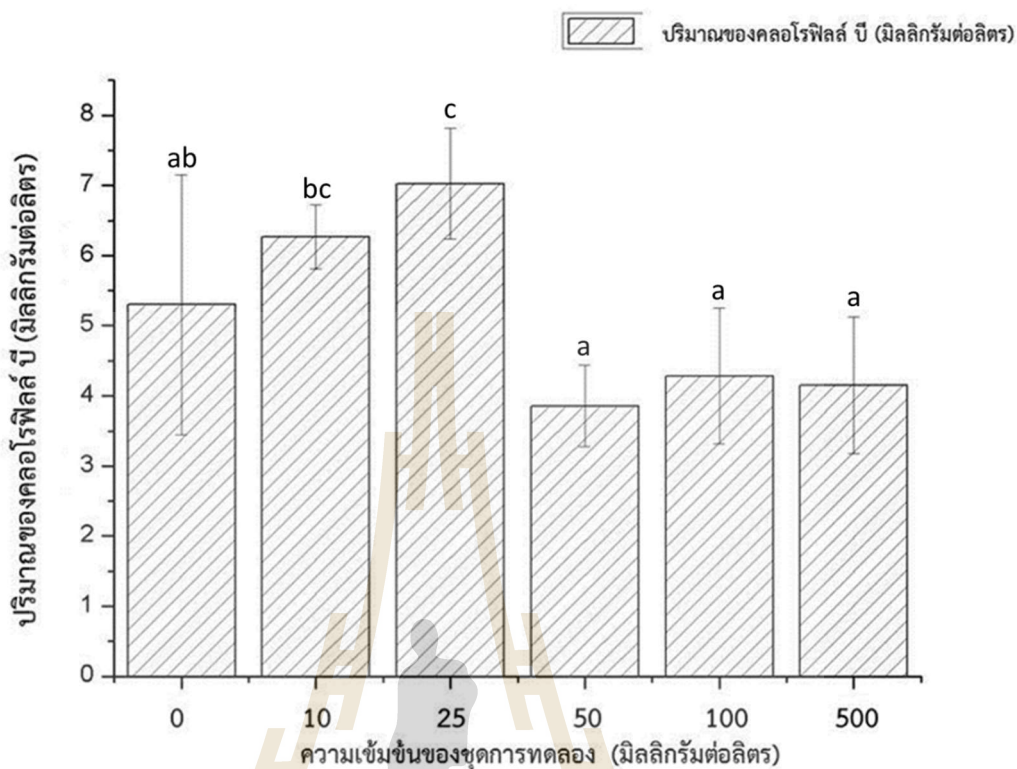
4.1.2.3 ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี

ปริมาณคลอโรฟิลล์เอ แสดงในกราฟในภาพที่ 4.16 พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ในชุดการทดลองส่วนมากมีค่าใกล้เคียงกันมาก ยกเว้นในชุดการทดลองความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ สูงกว่าชุดการทดลองอื่น ๆ ซึ่งตารางที่แสดงในภาคผนวก ณ ที่แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ด้วยวิธีแบบดันแคน ยืนยันผลตามกราฟคือชุดการทดลองความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีค่าปริมาณคลอโรฟิลล์เอ สูงกว่าในชุดการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4.16 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์เอ เทียบตามความเข้มข้น

สำหรับปริมาณคลอโรฟิลล์บี แสดงในกราฟในภาพที่ 4.17 พบแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของปริมาณคลอโรฟิลล์บี ในชุดควบคุมจนถึงชุดการทดลองความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และในชุดการทดลองที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นนี้มีปริมาณคลอโรฟิลล์บี ลดลงอย่างเห็นได้ชัด และจากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของปริมาณคลอโรฟิลล์บี ด้วยวิธีแบบต้นแคณ พบว่าสามารถจัดกลุ่มค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์บี ได้เป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 0 50 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 0 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และกลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยชุดการทดลองความเข้มข้น 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร นั้นหมายความว่าที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร มีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์บี สูงกว่าในชุดการทดลองความเข้มข้น 0 50 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี จะแสดงในตารางที่แสดงในภาคผนวก ฅ และ ด)



ภาพที่ 4.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์บี เทียบตามความเข้มข้น

จากการทดสอบผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวในระยะปลูกในดิน (อายุ 28 – 35 วัน) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักสดของต้นข้าวอายุ 35 วันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ย (วัดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงขนาดของใบ) ชุดการทดลองความเข้มข้น 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร เท่านั้นที่มีอัตราการเติบโตเฉลี่ยน้อยกว่าชุดควบคุม และในความเข้มข้นระดับ 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาผลการศึกษผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อการเจริญเติบโตของข้าวหอมมะลิ 105ก ร่วมกับผลการศึกษาที่มีรายงานมาก่อนหน้าเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อการงอกของข้าวขาวดอกมะลิ 105ก (กรวิษญ์, 2014) ทำให้สรุปได้ว่าอนุภาคนาโนชนิดนี้ไม่ส่งผลกระทบในเชิงบวกหรือลบต่อข้าวขาวดอกมะลิ 105ก ในระยะการงอกและระยะต้นกล้า 0 - 35 วัน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ใดซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของอนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ ผลที่ได้จากการศึกษานี้มีความสอดคล้องกับรายงานของ Lopez-Moreno และคณะ (2016) ซึ่งศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนแม่เหล็กของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ (CoFe_2O_4) ต่อการเจริญเติบโตของมะเขือเทศ (*Lycopersicon lycopersicum*) ความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ที่ทดสอบได้แก่ 0 62.5 125 250 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างชุดการทดลองและ

ชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในเรื่องของอัตราการงอกของเมล็ด ความยาวยอด และความยาวรากของต้นมะเขือเทศที่ปลูกในระบบไฮโดรโปนิกที่มีสารแขวนลอยอนุภาคนาโนในความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน เป็นที่น่าสนใจว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวราก และความยาวยอดของมะเขือเทศในงานวิจัยของ Lopez-Moreno และคณะ (2016) นี้ ไม่เป็นไปตามความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่เปลี่ยนไป เช่นเดียวกับในงานวิจัยที่นำเสนอในรายงานฉบับนี้ นอกจากนี้ Lopez-Moreno และคณะ (2016) ได้ศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนของโคบอลต์เฟอร์ไรต์ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ และพบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ของมะเขือเทศในชุดการทดลองและชุดควบคุมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีความคล้ายกับผลในงานวิจัยชิ้นนี้ เนื่องจากในการทดลองเกี่ยวกับปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ชุดการทดลองและชุดควบคุมให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (ยกเว้นที่ความเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอ สูงกว่าในชุดการทดลองอื่น ๆ) แต่สำหรับผลการทดลองปริมาณคลอโรฟิลล์บี พบว่าที่ความเข้มข้นน้อย (0 10 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร) มีแนวโน้มจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์บีมากกว่าชุดการทดลองความเข้มข้นสูง แต่ในชุดการทดลองส่วนมากก็ยังสามารถจัดอยู่ในกลุ่มที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดควบคุมได้

เนื่องจากอนุภาคนาโนมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ด้านต่าง ๆ จึงมีรายงานการศึกษาความเป็นพิษของอนุภาคนาโนต่อพืชและสัตว์เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ สำหรับการทดสอบพิษในพืชนั้น จะเป็นการทดสอบผลต่อการงอกของเมล็ด การเจริญเติบโต การดูดซึมธาตุอาหาร และการชักนำให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน ตารางที่ 4.22 แสดงตัวอย่างของรายงานผลกระทบของอนุภาคนาโนที่มีต่อพืช ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคนาโนแต่ละชนิดให้ผลต่อพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ถึงแม้จะมีรายงานเกี่ยวกับการทดสอบพิษของอนุภาคนาโนต่อพืชเพิ่มมากขึ้นแต่ยังไม่มีรายงานใดที่ให้ความชัดเจนเกี่ยวกับการเกิดพิษ Brunner และคณะ (2006) ได้สรุปเบื้องต้นเกี่ยวกับสาเหตุของความเป็นพิษของอนุภาคนาโนต่อพืชได้แก่ ความเป็นพิษที่เกิดจากองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาค เช่น ความสามารถของอนุภาคนาโนในการปล่อยไอออนที่เป็นพิษ และความเครียดที่อนุภาคชักนำให้เกิดแก่พืชหรือสิ่งเร้า และส่งผลให้เกิดความเครียดแก่พืชจากอนุภาค เช่น พื้นที่ผิว ขนาด หรือรูปร่างของอนุภาคและเนื่องจากอนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ที่ได้ทดสอบกับข้าวขาวดอกมะลิ 105ก ในงานวิจัยนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อข้าวในระยะที่ทดสอบ จึงเป็นผลให้สามารถสรุปได้เบื้องต้นว่า อนุภาคนาโนนี้ ไม่มีองค์ประกอบทางเคมีที่เป็นพิษแก่ข้าว และไม่ชักนำให้เกิดความเครียดแก่ข้าวในระยะที่ทดสอบ

อย่างไรก็ดี ขณะนี้ยังสรุปไม่ได้แน่ชัดว่าอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ไปมีผลเชิงบวกหรือลบต่อข้าวอย่างแท้จริง เพราะพืชในระยะการเจริญที่ต่างกัน อาจตอบสนองต่อเงื่อนไขทางสิ่งแวดล้อมที่เหมือนเดิมอย่างแตกต่างกันไปได้ เช่น ในงานวิจัยของ Abdul Qados และคณะ (2010) ทดสอบความเข้มข้นของเกลือต่อการเจริญเติบโตของถั่วปากอ้า (*Vicia faba*) ซึ่งทดสอบการเจริญเติบโตด้านความยาวรากใน 2 ระยะคือระยะ 10 วัน และระยะที่อัตราการอยู่รอดลดเหลือ 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่าที่ระยะ 10 วัน ความยาวรากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้น 60 มิลลิโมลาร์และลดลงจนน้อยที่สุดในชุดการทดลองความเข้มข้น 240 มิลลิโมลาร์ แต่ในระยะที่อัตราการอยู่รอดลดลง

เหลือ 60 เปอร์เซ็นต์จะไม่พบความแตกต่างระหว่างชุดทดลองกับชุดควบคุมในด้านความยาวราก รวมถึงต้นกล้าปากอ้าที่อายุ 10 วันจะมีพื้นที่ใบน้อยลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น แต่ในระยะที่ 2 พื้นที่ใบของชุดการทดลองจะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดควบคุม สำหรับตัวอย่างการตอบสนองต่ออนุภาคนาโนที่แตกต่างกันของพืชในระยะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน ได้แก่รายงานการศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (Ti₂O) ต่อข้าวพันธุ์ชัยนาท 1 (Samart et al., 2015) พบว่าอนุภาคนาโนทั้งสองชนิดนี้ ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตของข้าวในระยะกล้า 14 วัน ถึงระยะการออกดอก แต่ให้ผลส่งเสริมการเจริญเติบโตต่อข้าวในระยะออกดอกจนถึงระยะเก็บเกี่ยว โดยให้ผลเชิงบวกต่อการเพิ่มน้ำหนักแห้งแต่ไม่มีผลเชิงบวกในการเพิ่มผลผลิตของเมล็ดข้าว ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคนาโนชนิดใด ๆ ต่อพืช รวมถึงผลของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อข้าว ควรต้องทบทวนให้ชัดเจนถึงระยะการเจริญของพืช หรือทำการทดสอบกับพืชให้ครบทุกระยะ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง หากต้องการศึกษาในเชิงความเป็นพิษในสิ่งแวดล้อม

นอกเหนือจากการศึกษาผลของอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ ต่อพืชหลากหลายชนิด ในระยะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน โดยอนุภาคนาโนสามารถส่งผลได้หลากหลายรูปแบบแล้ว มีอีกหนึ่งปัจจัยที่อาจจะส่งผลให้เกิดผลที่ต่างกันได้คือ การดูดซึมและการสะสมของอนุภาคนาโนภายในพืช จากการรวบรวมข้อมูลโดย Rico และคณะ (2011) พบว่ามีหลายงานวิจัยที่กล่าวถึงการดูดซึมอนุภาคนาโนชนิดต่าง ๆ โดยกล่าวว่าการดูดซึมและสะสมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ขนาด ชนิด องค์ประกอบทางเคมี และเสถียรภาพของอนุภาคนาโน หรือแม้แต่พันธุ์พืชก็ตาม ในการทดลองนี้จากภาพที่ 4.13 พบว่าอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์จะเกาะอยู่ที่บริเวณผนังเซลล์เท่านั้น ซึ่งการที่เข้าสู่เซลล์ไม่ได้ อาจจะมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไป และสามารถบ่งบอกได้ว่ารากข้าวใช้วิถีอะโปพลาสต์ (apoplast pathway) ในการลำเลียงอนุภาคแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ งานวิจัยที่คล้ายคลึงกันของ Wang และคณะ (2011) ที่ทดสอบผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีไทต์ (Fe₃O₄ ขนาด 25 นาโนเมตร และมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก) ต่อฟักทอง (*Cucurbita pepo*) พบว่าฟักทองไม่สามารถดูดซึมอนุภาคนาโนชนิดนี้ได้ เพราะไม่พบอยู่ในส่วนใดของฟักทอง แต่งานวิจัยของ Zhu และคณะ (2008) ที่ทดสอบผลกระทบของอนุภาคชนิดเดียวกันต่อพืชชนิดเดียวกัน แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 นาโนเมตรในระบบไฮโดรโปนิค พบว่ารากของต้นฟักทองสามารถดูดซึมอนุภาคได้ รวมถึงสามารถลำเลียงไปสู่ส่วนของลำต้น และใบได้ แต่อนุภาคจะไม่ถูกดูดซึมเข้าไปในต้นฟักทอง หากปลูกลงดินจริง จากผลของงานวิจัยชิ้นนี้และงานวิจัยที่มีอยู่ก่อนหน้า จะสามารถบ่งชี้ได้ว่าคุณสมบัติของอนุภาคที่นำมาทดลอง พันธุ์พืช หรือแม้แต่ระบบที่ใช้ทดลอง จะมีผลทำให้การศึกษาผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อพืชใด ๆ ก็ตามได้ผลที่ต่างกันอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4.22 ตัวอย่างรายงานการทดสอบผลกระทบของอนุภาคนาโนต่อพืช

ชนิดของอนุภาค	ขนาด	ปริมาณ	พืช	ผลการทดสอบ	อ้างอิง
CeFe ₂ O ₄ NPs	17 ± 1 nm (crystallite size)	62.5 – 1,000 mg/l	มะเขือเทศ (<i>Lycopersicon lycopersicum</i>)	(*) อัตราการงอก ปริมาณคลอโรฟิลล์ ความยาวยอดและความยาวราก (+) การดูดซึม Fe และ Co เข้าไปในเนื้อเยื่อ	Lopez-Moreno และคณะ (2016)
Zn NPs	35 nm	2,000 mg/l	ข้าวไรย์ (<i>Lolium perenne</i>)	(-) อัตราการงอก, การเกิดราก	Lin และคณะ (2007)
ZnO NPs	20 ± 5		ข้าวโพด (<i>Zea mays</i>)	(-) อัตราการงอก	
			ผักกาดก้านขาว (<i>Brassica napus</i>)	(-) การเกิดราก	
			หัวไชเท้า (<i>Raphanus sativus</i>)	(-) การเกิดราก	
			ผักกาดหอม (<i>Lactuca sativa</i>)	(-) การเกิดราก	
			แตงกวา (<i>Cucumis sativus</i>)	(-) การเกิดราก	
Water soluble carbon nanotubes (wsCNT)	10 – 30 nm (outer diameter) 4 – 6 nm (inner diameter)	6 mg/l	ถั่วลูกไก่ (<i>Cicer arietinum</i>)	(+) ความยาวยอด ความยาวราก จำนวนกิ่ง และการดูดซึมน้ำ	Tripathi และคณะ (2011)

ชนิดของอนุภาค	ขนาด	ปริมาณ	พืช	ผลการทดสอบ	อ้างอิง
TiO ₂ NPs	27 nm	100 – 5,000 mg/l	ผักกาดก้านขาว (<i>Brassica campestris</i>) ผักกาดหอม (<i>Lactuca sativa</i>) ถั่วแดง (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	(*) อัตราการงอก งอก (*) อัตราการงอก (-) ความยาวของราก (ที่ความเข้มข้น 5,000 mg/l) (*) อัตราการงอก	Song Urham และคณะ (2013)

หมายเหตุ: (*) หมายถึง พารามิเตอร์ดังกล่าวให้ผลไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างชุดการทดลองกับชุดควบคุม

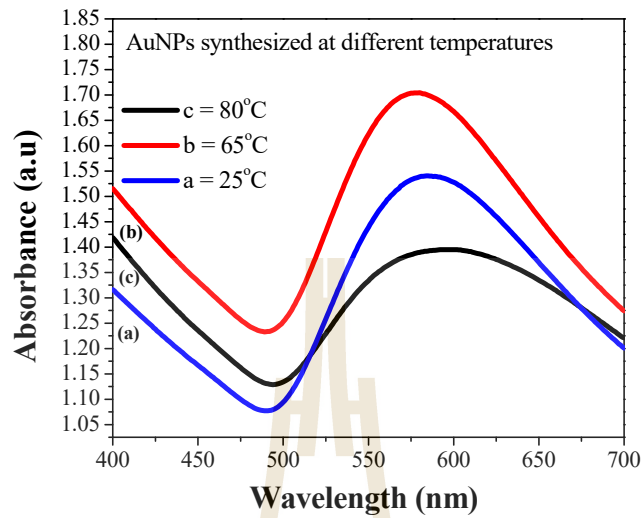
(+) หมายถึง อนุภาคนาโนมีผลทำให้พารามิเตอร์ดังกล่าวเกิดมากขึ้น

(-) หมายถึง อนุภาคนาโนมีผลทำให้พารามิเตอร์ดังกล่าวเกิดน้อยลง

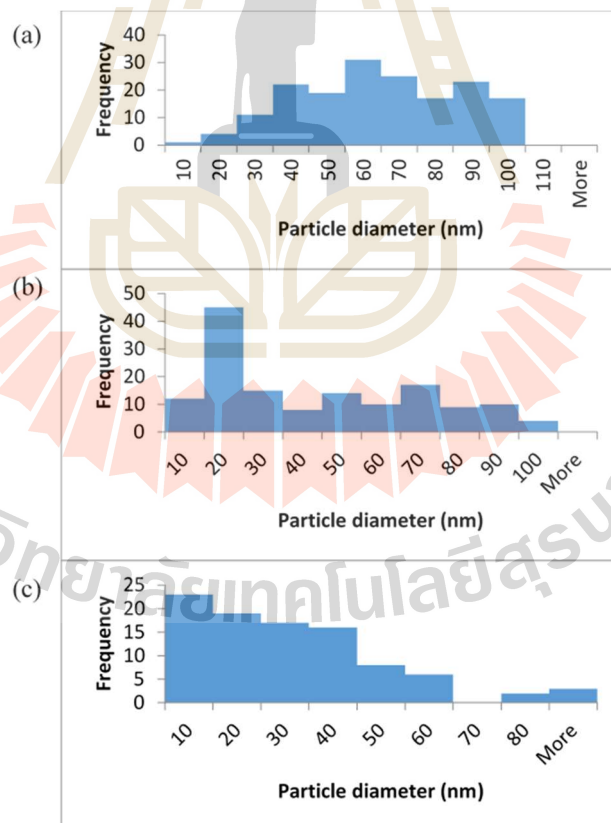
4.2 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนทอง

ศึกษาการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองโดยใช้สารสกัดจากใบย่านาง (*Tiliacora triandra*) เนื่องจากคณะผู้วิจัยได้สังเกตเห็นว่าการสังเคราะห์โดยใช้สารสกัดจากพืชเป็นวิธีการที่ลดการใช้สารเคมีและอาจทำให้อนุภาคที่ได้เป็นพิษน้อยลงเนื่องจากหมูฟังกักจับจากสารสกัดพืชที่ติดเข้ากับผิวของอนุภาคนาโนตามหลักการทั่วไปของการสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทอง

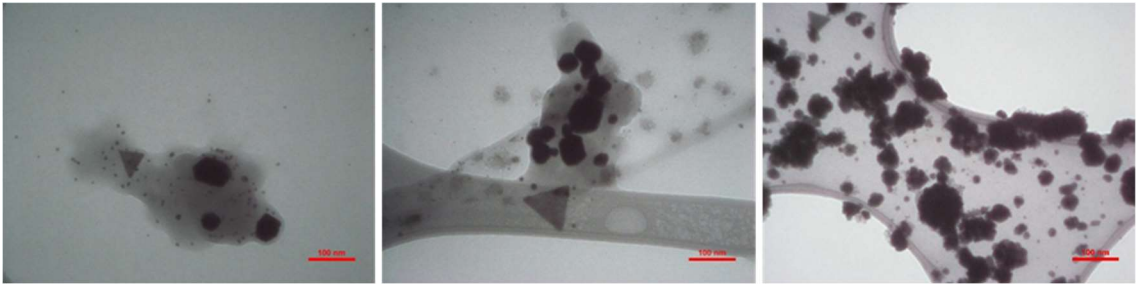
ในการทดสอบผลของอนุภาคนาโนของทองต่อข้าว พบว่าสามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนของทองโดยใช้สารสกัดจากใบย่านางได้ ทำการวิเคราะห์วัสดุที่สังเคราะห์ได้โดยใช้แบบแผนการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนและเทคนิคเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน ศึกษาลักษณะทางด้านสัณฐานวิทยาของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคที่ได้หลายรูปร่าง อาจเป็นหลายเหลี่ยม หรือทรงกลม อย่างไรก็ตาม พบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์ จะมีอนุภาคที่ทรงกลมเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 3 ระดับ ได้แก่ 25 °C, 65 °C และ 80 °C พบว่าอนุภาคมีขนาดเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ย 10, 20 และ 60 นาโนเมตร ตามลำดับ ภาพที่ 4.18 – 4.22 แสดงผลการวิเคราะห์อนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้



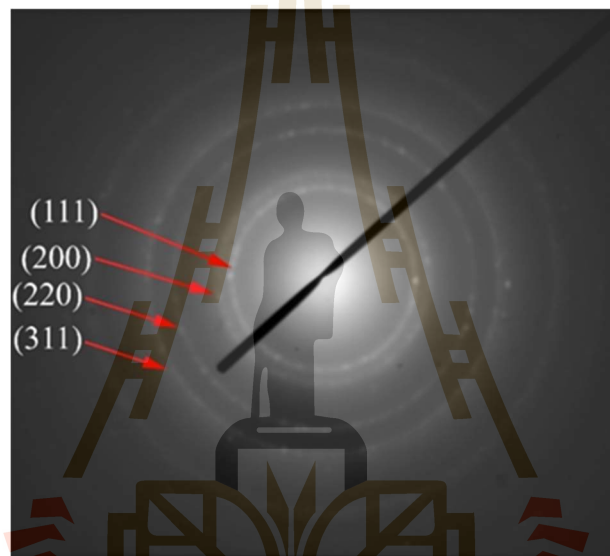
ภาพที่ 4.18 UV-vis spectra ของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิแตกต่างกัน



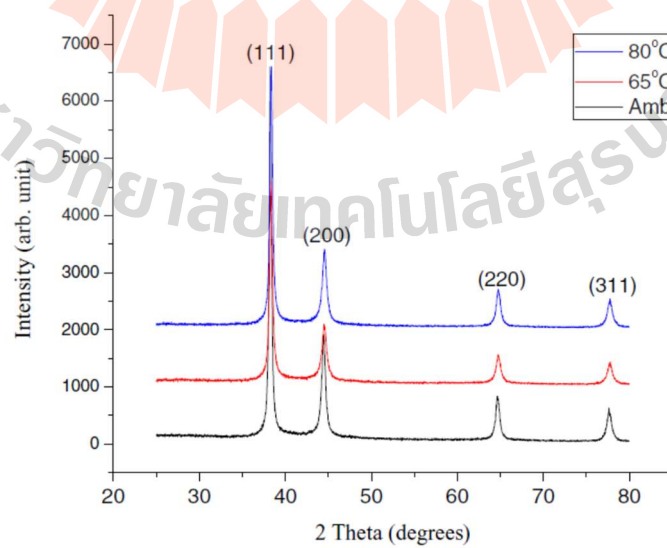
ภาพที่ 4.19 ฮิสโทแกรมแสดงขนาดของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (a), 65 องศาเซลเซียส (b) และ 25 องศาเซลเซียส (c)



ภาพที่ 4.20 ภาพ TEM ของอนุภาคนาโนของทองรูปแบบต่าง ๆ ที่สังเคราะห์ในสารสกัดใบย่านาง ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส (a) 65 องศาเซลเซียส (b) และ 80 องศาเซลเซียส (c)



ภาพที่ 4.21 แบบแผน SAED ของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้ในสารสกัดใบย่านาง



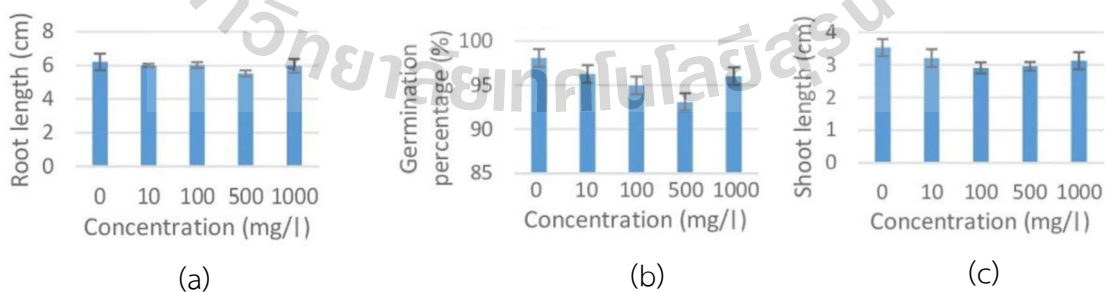
ภาพที่ 4.22 แบบแผน XRD ของอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.2.1 ผลของอนุภาคทองต่อข้าว

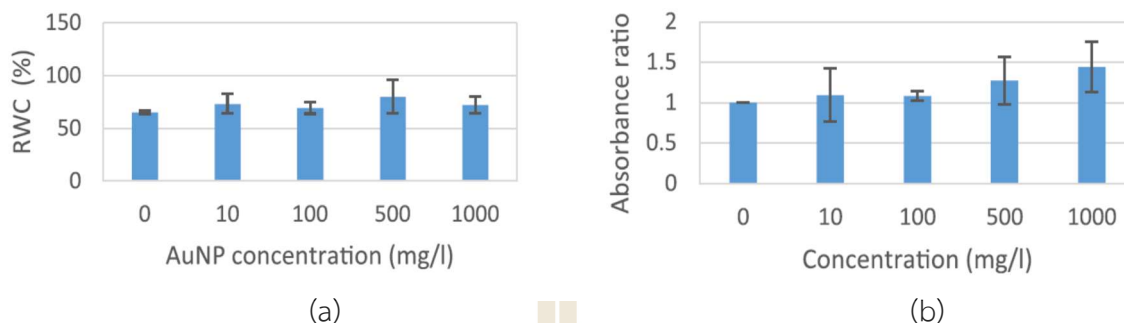
ทำการทดสอบผลกระทบของอนุภาคต่อข้าวในระยะงอก ที่ความเข้มข้น 0 (ชุดควบคุม) 10 100 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้อนุภาคนาโนที่สังเคราะห์ได้จากการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสแช่เมล็ดข้าวกับอนุภาคที่ความเข้มข้นที่ต้องการทดสอบเป็นเวลา 4 ชม. ที่อุณหภูมิห้อง แล้วย้ายเมล็ดไปวางบนกระดาษกรอง (Whatman filter paper No. 1) ที่ชุ่มด้วยสารแขวนลอยอนุภาคนาโนที่ความเข้มข้นที่ทดสอบ บ่มเป็นเวลา 7 วัน ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วเปรียบเทียบอัตราการงอก ความยาวของรากและยอดแรกเกิด น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง ปริมาณปริมาณน้ำสัมพัทธ์ การตายของเซลล์ ปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์ ไฮโดรเจนเพอร์ร็อกไซด์ และลิพิดเพอร์ร็อกซิเดชัน รวมถึงใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านตรวจสอบการผ่านของอนุภาคเข้าไปในเซลล์พืช ผลการทดสอบพบว่าอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สารสกัดใบย่านางแสดงความเป็นพิษต่อการงอกของข้าวเพียงเล็กน้อยเท่านั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับกลุ่มควบคุมเมล็ดสามารถงอกได้ในช่วง 93.09-98.38% รากและยอดสั้นกว่าชุดควบคุม แต่ไม่มีนัยสำคัญ ภาพที่ 4.23 – 4.24 แสดงผลกระทบของอนุภาคนาโนของทองต่อข้าวในด้านต่าง ๆ

ความเป็นกรดของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนของทองไม่สามารถยับยั้งการงอกได้อาจเนื่องจากเปลือกหุ้มเมล็ดมีความหนาและมีคุณสมบัติเลือกผ่าน (Lin and Xing, 2007) อนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้จากงานวิจัยนี้อาจมีความเป็นพิษต่อพืชลดลงเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์ที่มีสารสกัดจากพืชซึ่งส่งผลต่อลักษณะผิวของอนุภาคนาโน Trujillo-Reyes *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาเพื่อยืนยันว่า อนุภาคนาโนชนิดเดียวกันแต่มีผิวของอนุภาคต่างกันมีความเป็นพิษต่อพืชไม่เท่ากัน อนุภาคนาโนของ CeO_2 ที่เคลือบด้วยซิตริกแอซิดเพิ่มความยาวของรากหัวไชเท้าได้ 23%

ในขณะที่อนุภาคชนิดเดียวกันที่ไม่เคลือบลดความยาวของรากลง 26% ปริมาณน้ำสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นในทุกชุดทดลองเมื่อเทียบกับชุดควบคุม แต่ไม่มีนัยสำคัญ และไม่มีผลกระทบมากพอจนทำให้ความยาวของรากและยอดเพิ่มขึ้น พบว่าการตายของเซลล์เพิ่มมากขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างจากชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับกับตัวบ่งชี้ความเครียดของพืช ได้แก่ ปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ร็อกไซด์ ลิพิดเพอร์ร็อกซิเดชัน และปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์ที่ไม่พบความแตกต่างจากกลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ

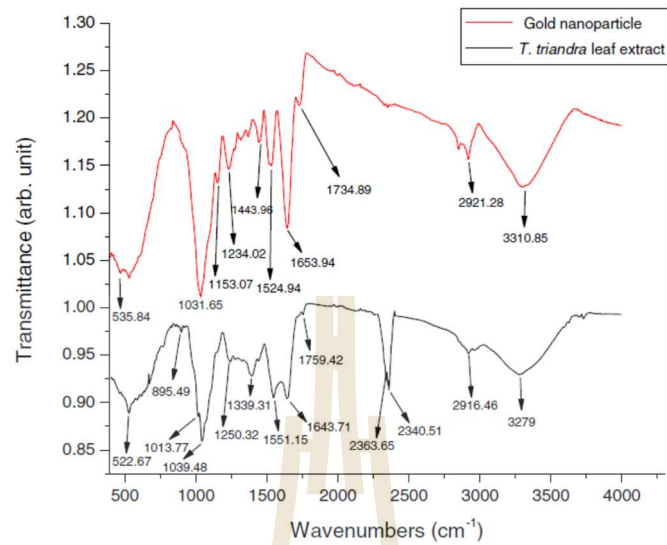


ภาพที่ 4.23 การตอบสนองของต้นอ่อนของข้าวต่ออนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ในสารสกัดใบย่านาง ได้แก่ ความยาวราก (a) ความยาวยอด (b) และอัตราการงอก (c)



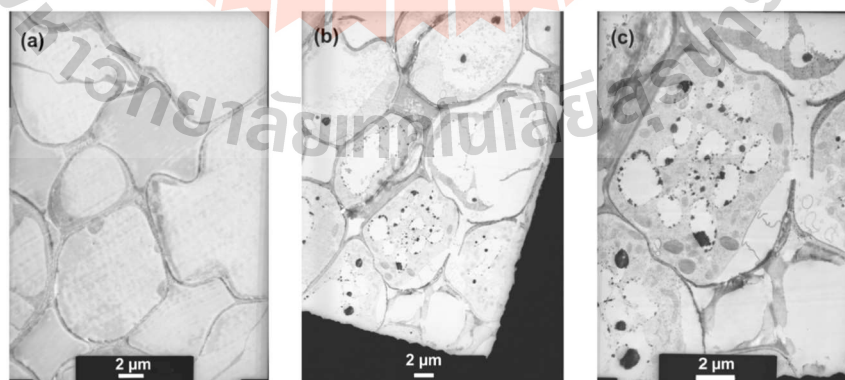
ภาพที่ 4.24 ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (a) และการตายของเซลล์ในรากโดยวัดจากการปล่อยสี Evans blue จากเซลล์ (b)

โดยทั่วไปไอออนของโลหะหนักที่ปล่อยออกจากอนุภาคนาโนของโลหะคือปัจจัยสำคัญที่ก่อความเป็นพิษต่อพืช (Cui *et al.*, 2014) อาจเป็นไปได้ว่าไอออนของทองที่ปล่อยออกมาไม่ทำให้เกิดผลเสียต่อพืชและทำให้เกิดการสร้างอนุมูลอิสระเพราะคุณสมบัติการเป็นตัวรีดิวซ์ของสารบางอย่างในสารสกัดใบย่านาง นอกจากนี้ ระดับความเครียดออกซิเดชันที่ไม่เพิ่มสูงขึ้นมากนักในข้าวที่ทำการทดลอง อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดใบย่านาง (Wiriya-chita and Phuriyakorn, 1981) เป็นไปได้ที่หมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ติดเข้ากับผิวของอนุภาคนาโนในกระบวนการสังเคราะห์ จากการวิเคราะห์ฟูเรียร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectroscopy: FTIR) พบว่าในสารสกัดและอนุภาคนาโนของทองมีหมู่ฟังก์ชัน O-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบในฟลาโวนอยด์ (flavonoid) และเทอร์พีน (terpene) นอกจากนี้ยังพบหมู่ฟังก์ชัน C-N ซึ่งบ่งชี้การมีอยู่ของอะลิฟาติกเอมีน (aliphatic amine) หรือฟีนอล (phenol) หมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จึงเป็นข้อมูลสนับสนุนว่าการที่อนุภาคนาโนของทองที่ได้ไม่เป็นพิษต่อพืช และการวัดตัวบ่งชี้ความเครียดออกซิเดชันได้ไม่สูงมาก อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระที่มาจากหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้ (ภาพที่ 4.25)



ภาพที่ 4.25 สเปกตรัม FTIR ของสารสกัดใบย่านางและอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้

สำหรับการศึกษาการนำอนุภาคนาโนของทองเข้าสู่รากของเมล็ดข้าวที่กำลังงอกนั้น ได้ใช้ตัวอย่างรากเมล็ดข้าวที่งอกในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนของทองความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแช่เมล็ดก่อน 4 ชม. ก่อนการเพาะบนกระดาษกรอง 7 วันในความเข้มข้นเดียวกัน ทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าอนุภาคนาโนเข้าไปอยู่ภายในเซลล์ และไม่พบอนุภาคนาโนอยู่ในพื้นที่ระหว่างเซลล์เลย (ภาพที่ 4.26) คาดว่าอนุภาคได้เคลื่อนเข้าเซลล์ผ่านทางรูบนผนังเซลล์ (Li *et al.*, 2016) ซึ่งมีขนาดอยู่ในช่วง 5 ถึง 20 นาโนเมตร Koelmel *et al.* (2013) เคยรายงานเกี่ยวกับต้นข้าวที่มีการนำอนุภาคนาโนเข้าไปภายในต้น และมีรายงานเกี่ยวกับมะเขือเทศที่รับอนุภาคนาโนของทองเข้าในเซลล์ว่ามีการแสดงออกของโปรตีนที่เซลล์ราก *LeIR1* และ *LeIR2* เพิ่มมากขึ้น (Dan *et al.*, 2015; Hall and Williams, 2003) จึงมีความเป็นไปได้เช่นกันว่าโปรตีนกลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องข้องในการรับอนุภาคนาโนของทองเข้าในเซลล์ข้าวผ่านทางราก

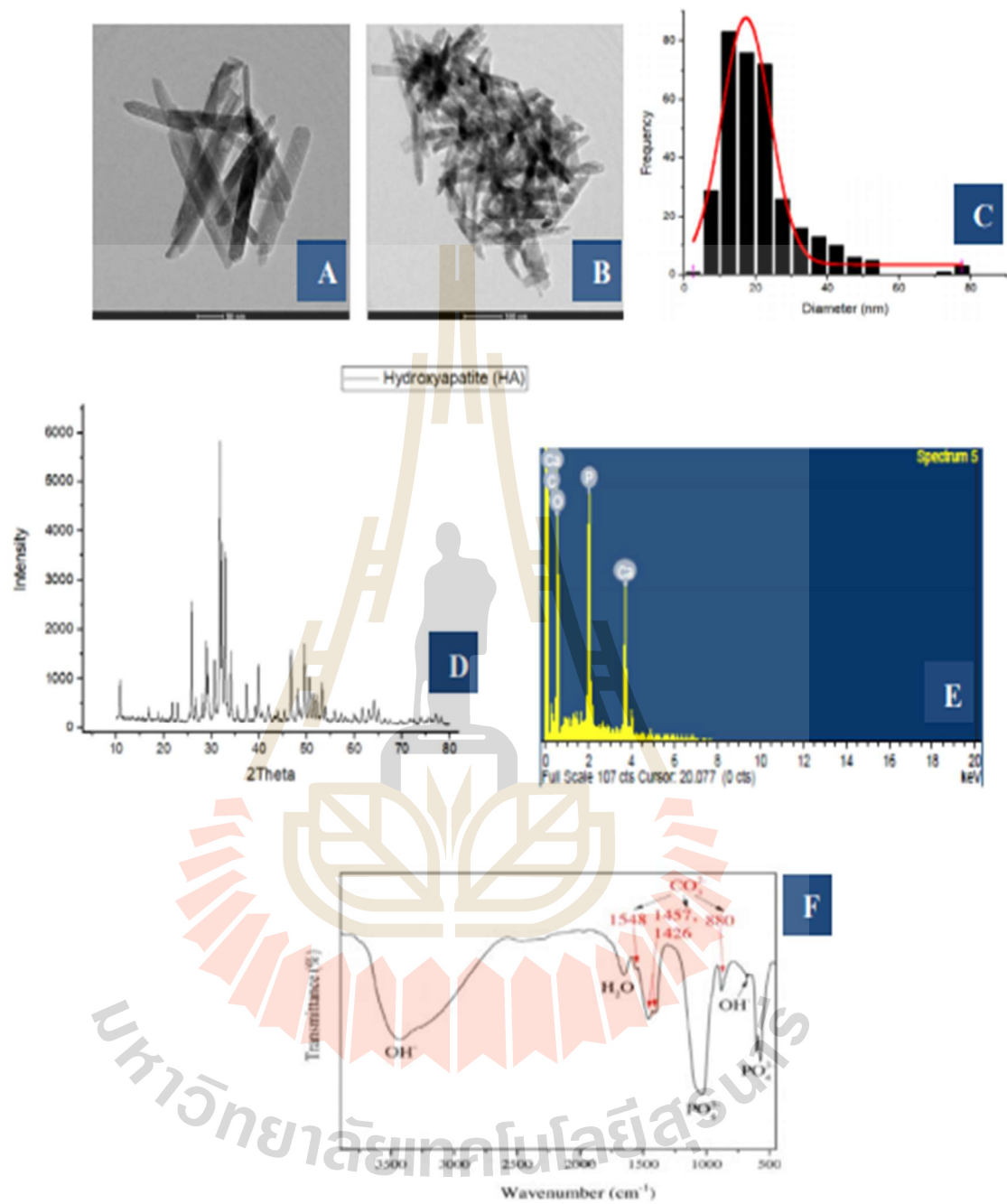


ภาพที่ 4.26 ภาพ TEM ของเซลล์รากกลุ่มควบคุมที่กำลังขยาย 2,500 เท่า (a) กลุ่มที่ทดสอบด้วยอนุภาคนาโนของทองที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (b) และกำลังขยาย 4,000 เท่า (c)

4.3 การสังเคราะห์อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์

ทำการศึกษาคุณลักษณะของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์เพื่อยืนยันประสิทธิภาพของการใช้สารสกัดจากว่านหางจระเข้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคโซลเจล โดยทำการเผาผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส จากนั้นศึกษาลักษณะของผงอนุภาคนาโนของไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยทำการตรวจสอบด้วยเครื่อง X-ray diffraction (XRD), เครื่องสแกนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและรังสีเอกซ์ (EDX) แบบกระจายพลังงาน, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FT-Raman

ภาพที่ 4.27 (A) และ (B) แสดงรูปภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของผงไฮดรอกซีอะพาไทต์ เพื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮดรอกซีอะพาไทต์ จากรูปแสดงให้เห็นว่าอนุภาคมีลักษณะรูปร่างเป็นแท่ง ขนาดอนุภาคและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ช่วง 8-60 นาโนเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.27 (C) ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของ Kingkreawnarong (2010) ที่ทำการสังเคราะห์ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสแล้วได้ขนาดอนุภาคอยู่ที่ 43 นาโนเมตร ส่วนภาพที่ 10D แสดงผลของรูปแบบ XRD สามารถยืนยันขนาดผลึกและโครงสร้างผลึกนาโนได้ โดยผลลัพธ์พบว่าไฮดรอกซีอะพาไทต์มีลักษณะเป็น hexagonal และมีค่าเฉลี่ยของขนาดผลึกตามสมการของ Scherrer อยู่ในช่วง 31-38 นาโนเมตร และค่าพารามิเตอร์แลตทิซ = $a=0.9416$ และ $c=0.6874$ ตามข้อมูลอ้างอิงมาตรฐานในไฟล์ JCSd ที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์สำหรับวิเคราะห์รูปแบบไฮดรอกซีอะพาไทต์ (84-1998) $[Ca_5(PO_4)_3(OH)]$ ผลลัพธ์ของพารามิเตอร์แลตทิซเหล่านี้สอดคล้องกับข้อมูลด้านผลึกศาสตร์ที่รายงานในเอกสารเกี่ยวกับโครงสร้างไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีรูปแบบ SAED คือ $a=0.9418$ นาโนเมตร และ $c=0.6884$ นาโนเมตร (Arsad et al., 2011) นอกจากนี้ผลของเรายังคล้ายกับงานวิจัยของ Kingkreawnarong (2010) ที่ได้ทำการศึกษานาโนแลตทิซและขนาดผลึกของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์พบว่ามีลักษณะเป็น hexagonal ที่มีค่า $a=0.95277$ นาโนเมตร $c=0.67392$ นาโนเมตร นอกจากนี้ผลของสเปกตรัม EDX ที่บันทึกปริมาณธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสได้นั้น ยังยืนยันว่าเป็นไฮดรอกซีอะพาไทต์ (แสดงไว้ในรูปที่ 10E) ซึ่งสเปกตรัมที่ได้มีอัตราส่วนของ Ca/P เป็น 1.68 คล้ายกับงานวิจัยของ Kingkreawnarong (2010) ที่ได้รายงานก่อนหน้านี้ว่าอัตราส่วนระหว่าง Ca/P คือ 1.67 ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎี นอกจากนี้อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ยังถูกนำไปตรวจสอบเพื่อระบุหมู่ฟังก์ชันที่ผูกติดกับอนุภาคโดยใช้เครื่อง FT-Raman spectroscopy ทำการศึกษาในช่วง 400-4000 ซม. แสดงไว้ในภาพที่ 4.27 (F) จะพบว่า peak จุดสูงสุด ซึ่งเป็นโหมดการสั่นสะเทือนของฟอสเฟต ($V_1(PO_4)$) ที่ $\sim 962\text{cm}^{-1}$ นอกจากนี้ยังพบ peak ของกลุ่มฟังก์ชันคาร์บอนิลและโหมดการสั่นสะเทือนของไฮดรอกซิลอีกด้วย จึงเป็นการยืนยันว่าอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์จาก *Aloe vera* นั้นได้มีถูกสนับสนุนจากกลไกของการลดทางชีวภาพ



ภาพที่ 4.27 (A และ B) รูปถ่ายของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ (C) การกระจายขนาดอนุภาค และเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (D) Peak การเลี้ยวเบนแสดงเป็น peak 2θ (E) สเปกตรัม EDX แสดงแคลเซียมและฟอสฟอรัส (F) โหมดการสั่นสะเทือนสูงสุดอยู่ระหว่าง $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$

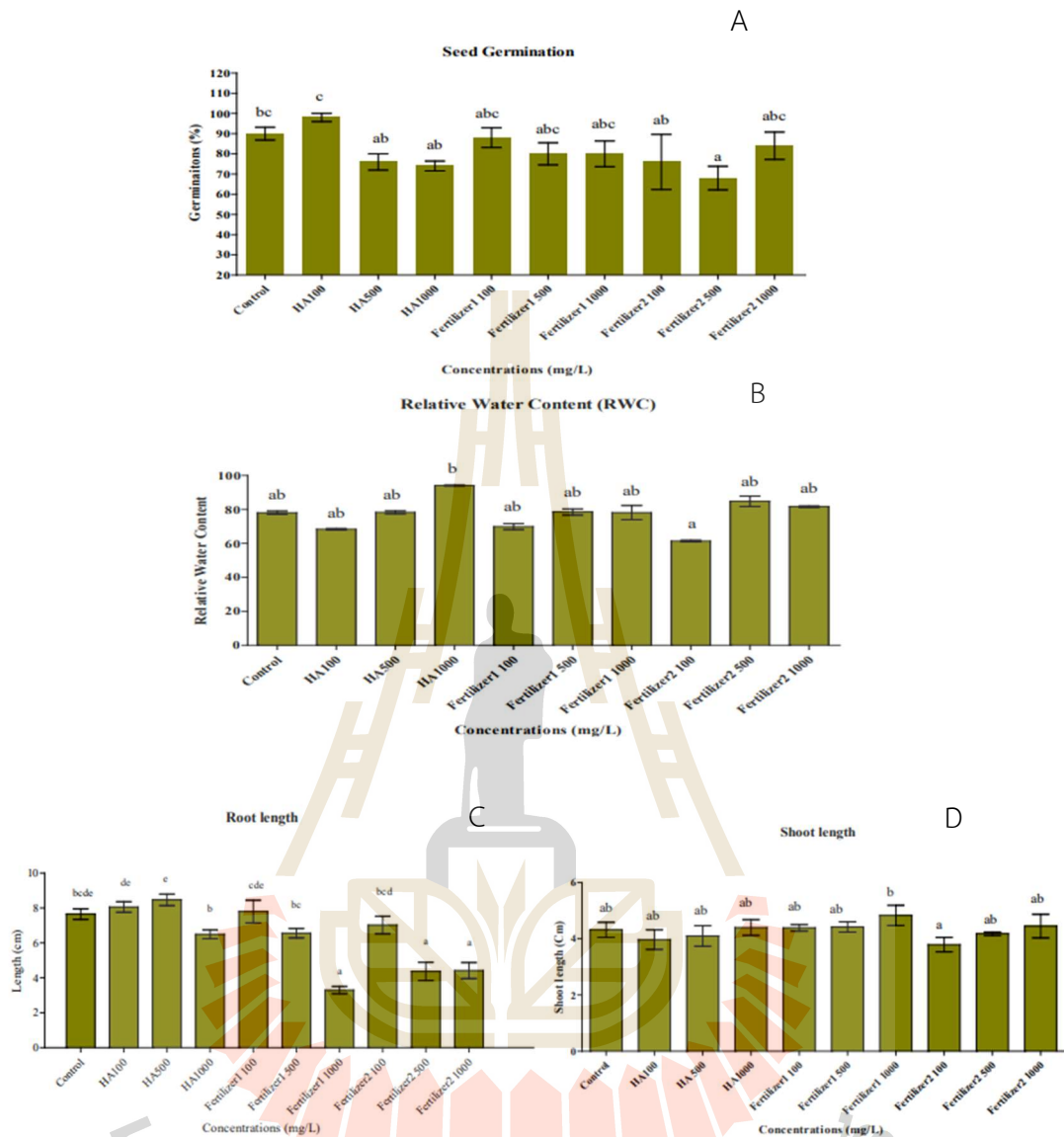
4.3.1 ผลของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อข้าวในระยะ 7 วัน

จากการศึกษาอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ผลต่อการงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าพบว่าที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถกระตุ้นการงอกได้สูงสุด 98 ± 2.00 % ในขณะที่พบเปอร์เซ็นต์การงอกต่ำสุดที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปุ๋ยสูตร 15-15-15 คือ 68 ± 5.83 % และเป็นที่น่าสังเกตว่าเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดข้าวมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์เพิ่มขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาคความยาวราก ที่พบว่าความเข้มข้นที่ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ของไฮดรอกซีอะพาไทต์จะผลยับยั้งการเจริญเติบโตของราก ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำ 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถกระตุ้นการเกิดรากได้ดีซึ่งแสดงไว้ในภาพที่ 4.28 (A) ความยาวรากของต้นกล้าแสดงดังภาพที่ 4.28 (C) แต่ที่เห็นศักยภาพของไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้อย่างชัดเจนคือผลการศึกษาไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อการเจริญเติบโตของยอด โดยวัดความยาวยอดพบว่าถึงแม้จะเพิ่มระดับความเข้มข้นของไฮดรอกซีอะพาไทต์สูงขึ้นไปถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรแต่ก็พบว่ายอดสามารถเจริญเติบโตได้โดยไม่ถูกยับยั้ง ดังแสดงในภาพที่ 4.28 (D)

จากผลการวิจัยการงอกพบว่าผลลัพธ์ที่ได้คล้ายกับงานวิจัยของ Bala (2020) ที่ได้รายงานว่านาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่มีลักษณะเป็นแท่งนั้น สามารถส่งเสริมการงอกของเมล็ด รวมถึงส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าซีกพีได้ โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทั้งอัตราการงอกและการเจริญเติบโตของพีชอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Hap-nanorod 1 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของพีช ได้มากกว่ากลุ่มชุดควบคุมถึงสองเท่า แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ Hap-Nanorod เป็น 1.5 มิลลิกรัมต่อลิตร กลับพบว่าอัตราการเจริญเติบโตลดลง ในขณะที่ผลลัพธ์งานวิจัยการเจริญเติบโตของรากล้นพบว่าคล้ายกับงานวิจัยของ Marchiol et al. (2019) ที่ศึกษาสารละลายอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยที่ทำให้สารละลายเสถียรด้วยคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) จากนั้นศึกษาคความยาวของรากมะเขือเทศ *Solanum lycopersicum* L ซึ่งจากการศึกษาพบว่าอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ ความเข้มข้น 200 ถึง 2000 มก./ลิตร สามารถกระตุ้นความยาวของรากได้ดี จากปรากฏการณ์ดังกล่าว Szameitat et al., (2021) อธิบายว่าการที่อนุภาคนาโนเข้าสู่เซลล์ได้นั้นสามารถเข้าสู่เซลล์ได้ด้วยกลไก 2 แบบคือแบบแพร่อย่างง่าย โดยการลำเลียงน้ำและแร่ธาตุผ่านเซลล์พีช แต่ละเซลล์ทางช่องพลาสโมเดสมิตา (วิธีนี้ไม่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์) จากนั้นเปลี่ยนวิธีการขนส่งโดยแทรกซึมเข้าสู่รากโดยผ่านทางวิถี apoplast ซึ่งจะลำเลียงน้ำและสารอาหารผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ intercellular space บริเวณ เอนโดเดอมิส แต่บริเวณนี้เมื่อน้ำและสารอาหารผ่านเข้ามาจะไม่สามารถผ่านแคสพาเรียน Casparian strip ได้ดังนั้นจึงต้องเปลี่ยนรูปแบบการขนส่งเป็นซิมพลาสต์หรือทรานส์เมมเบรน เนื่องจากแถบแคสพาเรียน จะไม่ให้น้ำผ่านได้ การลำเลียงน้ำพีชก่อนข้างซัพซันก่อนเข้าสู่ไซเลม (Xylem) แล้วเคลื่อนไปบริเวณ stele จากนั้นจึงลำเลียงไปยังใบ (Judy, 2012) อย่างไรก็ตามการเคลื่อนย้ายอนุภาคนาโนข้ามเยื่อหุ้มเซลล์นั้นจะเคลื่อนที่ผ่านรูพอร์บนเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นการบ่งชี้ว่าการดูดซึมของวัสดุนาโนนั้นมีความจำเพาะกับขนาดของอนุภาค (Ma et al., 2010, Rico et al., 2011) ไซเลมทำหน้าที่สำคัญที่สุดในการกระจาย และการเคลื่อนย้ายอนุภาคนาโน (Aslani et al., 2014) ดังนั้นจากผลลัพธ์ของเราจึงสามารถระบุได้ว่าที่อนุภาคที่ความเข้มข้นต่ำ มีศักยภาพในการลำเลียงได้ดี และเหมาะที่จะใช้เป็นสารกระตุ้นการงอกของเมล็ด และกระตุ้นการเกิดรากได้ดีกว่าความเข้มข้นที่สูง แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นความรู้ดังกล่าวยังจำเป็นต้องเรียนรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับด้านจลนพลศาสตร์ในการ

ปลดปล่อยธาตุอาหารด้วย อีกทั้งจำเป็นต้องรู้ถึงผลกระทบจากอนุภาคนาโนต่อพีชระยะการเจริญเติบโต และสิ่งแวดล้อมอย่างไร

ภาพที่ 4.29 (A) และ (C) แสดงการงอกและความยาวของรากลดลงที่ความเข้มข้นสูง 1000 มก. ซึ่งจะเห็นว่าผลดังกล่าวนี้มีความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ของปริมาณน้ำสัมพัทธ์ (RWC) ดังแสดงในรูป 4.29 (B) ปริมาณน้ำสัมพัทธ์ของต้นกล้าข้าว มีปริมาณน้ำในเซลล์สูงที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ 1000 มิลลิกรัมค่อนข้างสูงแตกต่างจากชุดการทดลองอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ นั่นคือ $88.73 \pm 2.41\%$ การสะสมน้ำในเซลล์ที่มากนั้นสามารถอธิบายได้จากหลักการการลำเลียงของน้ำ โดยปกติน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักย์น้ำสูงไปยังพื้นที่ที่มีพลังงานศักย์ต่ำ ความเข้มข้นของสารที่สูงจะมีค่าศักย์ของน้ำเป็นลบ (อ้างอิงน้ำบริสุทธิ์) ดังนั้นน้ำจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักย์สูงกว่า (น้ำบริสุทธิ์) ไปยังบริเวณที่มีค่าศักย์น้ำน้อยกว่า (สารละลาย) ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายเพิ่มเติมได้จาก Patakas et al. (2002) ที่อธิบายไว้ว่าความเข้มข้นที่สูง ภายในเซลล์พืชจะมีกลไกในการปรับออสโมติกโดยการลดศักย์ของน้ำ (เข้าใกล้ลบ ψ_w) ทำให้เซลล์เกิดการสะสมตัวละลายมากขึ้น (น้ำ) เป็นผลทำให้เซลล์ไม่ได้ขาดน้ำ หรือการขาดน้ำของเซลล์ลดลง ถึงแม้ว่าเซลล์จะสัมผัสความเข้มข้นที่สูงก็ตาม แต่อย่างไรก็ดี ยังไม่มีข้อมูลที่จะสนับสนุนเพียงพอสำหรับกลไกดังกล่าวในการอธิบายการกระตุ้นการงอกของเมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ แต่เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า น้ำ ฟอสฟอรัส และแคลเซียม นั้นล้วนจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ไอออนของธาตุเหล่านี้ มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการงอกของเมล็ด เมื่อน้ำและสารอาหารเหล่านี้ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ จะทำให้ฮอร์โมนที่เกี่ยวข้องกับการงอกอย่างกรดจิบเบอเรลลิน (GA) จะถูกละลายได้ดีขึ้นในตัวเอมบริโอ ซึ่งจะทำให้หน้าที่ในการสร้างเอนไซม์อะไมเลส และเอนไซม์นี้จะย่อยแป้งจากเมล็ดให้เป็นน้ำตาล และให้พลังงานแก่เซลล์ในเมล็ด จากนั้นจะส่งลำเลียง ไปยังเนื้อเยื่อของเมล็ดและบริเวณชั้นอะลูโรนิกไซโตพลาสซึม ส่งผลให้เกิดการงอกเกิดขึ้น (El-Maarouf-Bouteau, 2008)



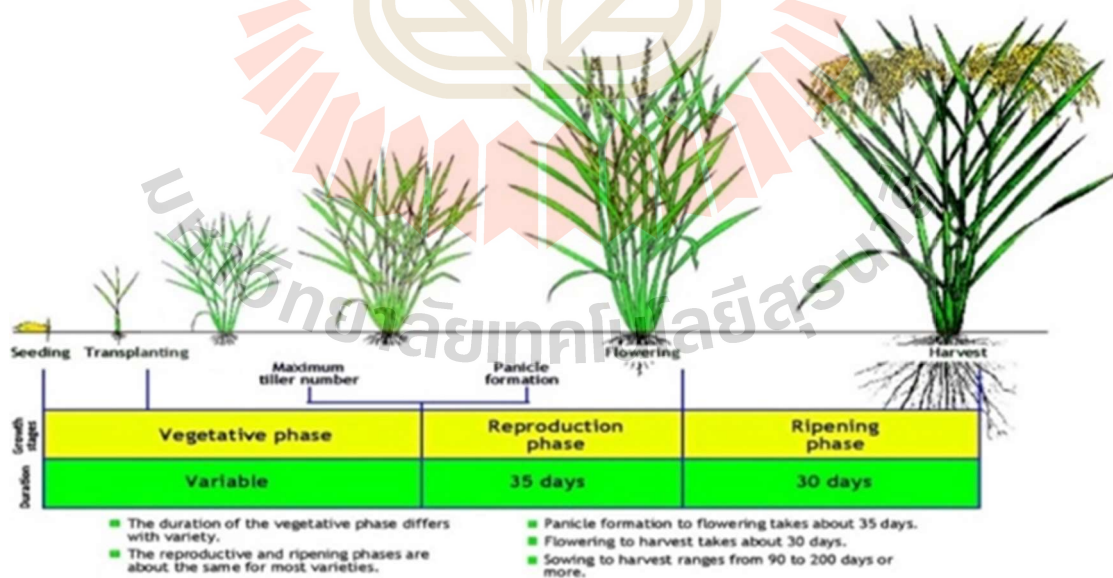
ภาพที่ 4.28 (A) การงอกเมล็ด (B) ปริมาณน้ำสัมพันธ์ (C) ความยาวของราก (D) ความยาวของยอด หลังจากสัมผัสกับอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์ (18-46-0 และ 15-15-15) ในสารละลายใน 7 วัน (n = 5)

เมื่อพิจารณาผลการศึกษผลกระทบของอนุภาคนาโนทองต่อเจริญเติบโตของต้นกล้าในระยะ 7 วัน ร่วมกับผลการศึกษามีก่อนหน้าเกี่ยวกับผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อของข้าวหอมมะลิ 105ก ทำให้สรุปได้ว่าทุกความเข้มข้นของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์และอนุภาคนาโนทองทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่มีผลกระทบต่อทุกพารามิเตอร์รวมถึงผลของคลอโรฟิลล์ ซึ่งผลทั้งหมดก็ไม่ได้ส่งผลกระทบในเชิงบวกหรือลบต่อข้าว ในขณะที่อาจจะมีผลเล็กน้อยกับอนุภาคนาโนทองที่มีพิษต่อการงอกของข้าวเพียงเล็กน้อย แต่ทั้งนี้ก็ไม่แสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับ

กลุ่มควบคุม ซึ่งอนุภาคนาโนทองสามารถกระตุ้นการงอกได้ในช่วง 93.09-98.38% รากและยอดสั้นกว่าชุดควบคุม แต่ก็ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์นั้นพบว่าสามารถกระตุ้นการงอกของข้าวได้ถึง 98 ± 2.00 % ที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และยังกระตุ้นความยาวของรากได้สูงสุดถึง 8.08 - 8.47 เซนติเมตรที่ความเข้มข้น 100 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อความเครียดของต้นกล้าพบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นส่งผลให้ต้นข้าวมีความเครียดเพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกันผลการตายของเซลล์กลับไม่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของอนุภาค ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมและปุ๋ยเชิงพาณิชย์ จากผลการศึกษาครั้งนี้จึงสรุปได้ว่าต้นข้าวสามารถทนต่อสภาวะความเครียดที่เกิดจากอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ได้ จากผลต่อการงอกและการทบทวนของวัสดุทั้ง 3 ประเภทแล้ว นักวิจัยจึงตัดสินใจที่จะเลือกอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ไปศึกษาในระยะต่อไป

4.4 ผลของอนุภาคไฮดรอกซีอะพาไทต์ต่อข้าวในระยะการเจริญเติบโต 130 วัน

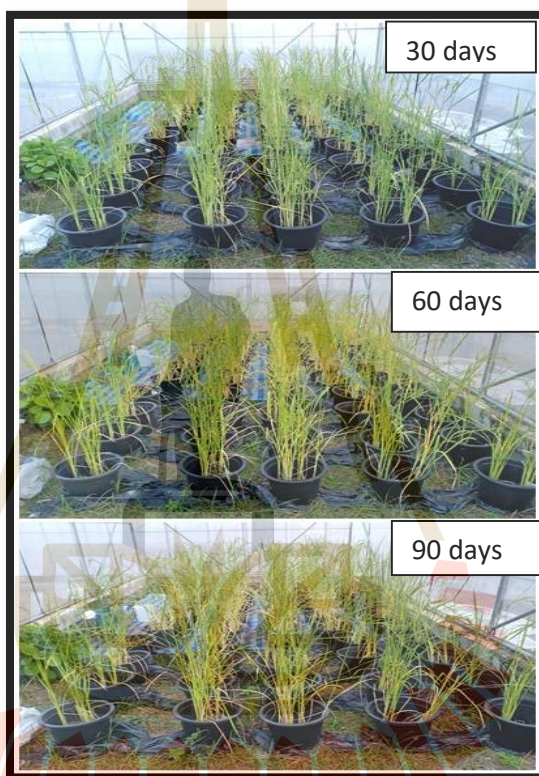
ฟอสฟอรัสเป็นหนึ่งในองค์ประกอบที่จำเป็นสำหรับธาตุอาหารพืช เนื่องจากฟอสฟอรัสช่วยกระตุ้นการพัฒนาของต้นกล้า เพิ่มความสามารถในการดูดซับสารอาหารอื่นๆ จากดิน ฟอสฟอรัสเกี่ยวข้องกับกระบวนการพลังงานสังเคราะห์แสง (Badawi et al., 2017) นอกจากนี้ ฟอสฟอรัสยังเกี่ยวข้องกับการช่วยให้พืชเจริญเติบโต เช่น การสร้างดอก การผสมเกสร การเพาะเมล็ด และการทำให้ลำต้นแข็งแรง การงอก การพัฒนาของราก การสังเคราะห์โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตต่างๆ (Marschner et al., 1995; Hawkesford et al., 2012). การเจริญเติบโตของต้นข้าวแบ่งออกเป็น 3 ระยะ เช่น ระยะพืชซึ่งเริ่มจากการงอกจนถึงการเก็บเกี่ยว (ภาพที่ 4.29)



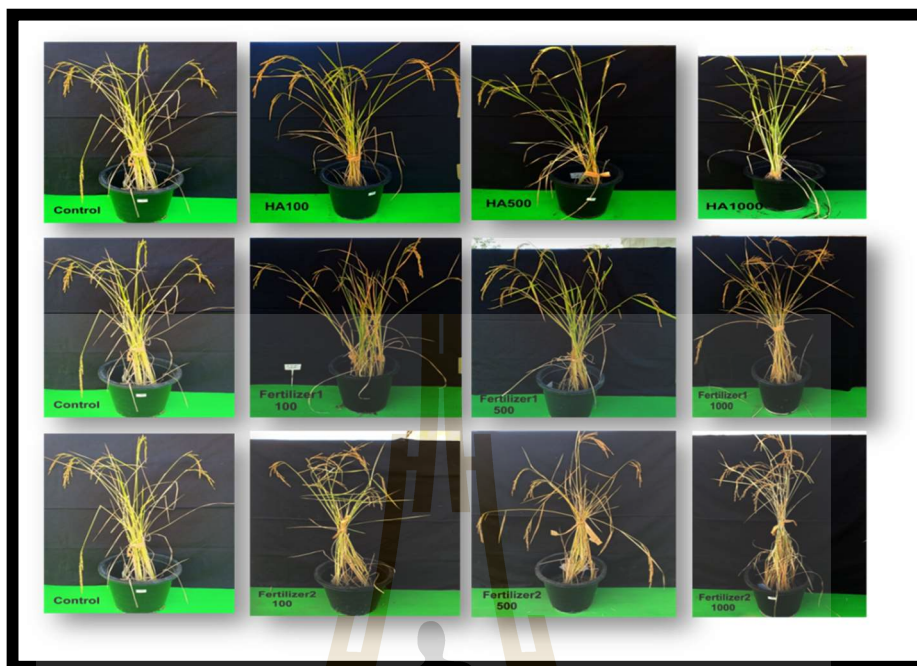
ภาพที่ 4.29 ระยะและระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าว

(<https://www.flickr.com/photos/ricephotos/13596607373>)

ศึกษาการตอบสนองของข้าวต่ออนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยทำการติดตามผลของความสูงของต้นข้าว ความกว้างของใบข้าว จำนวนเมล็ดต่อรวง และน้ำหนัก 1000 เมล็ด ในการศึกษานี้ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์กับปุ๋ยเชิงพาณิชย์ที่มีสูตรดังต่อไปนี้ สูตร 18-46-0 และ 15-15-15 ที่ความเข้มข้นแตกต่างกันคือ 100, 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการเพาะปลูกในกระถาง (แหล่งที่มาของดินที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากมหาวิทยาลัยสุรนารี ประกอบด้วยฟอสฟอรัส 250,000 ppm และโพแทสเซียม 1400 ppm) พารามิเตอร์ทั้งหมดทำการบันทึกหลังเพาะปลูกข้าวใน 130 วันดังแสดงในรูปที่ 4.30-4.31



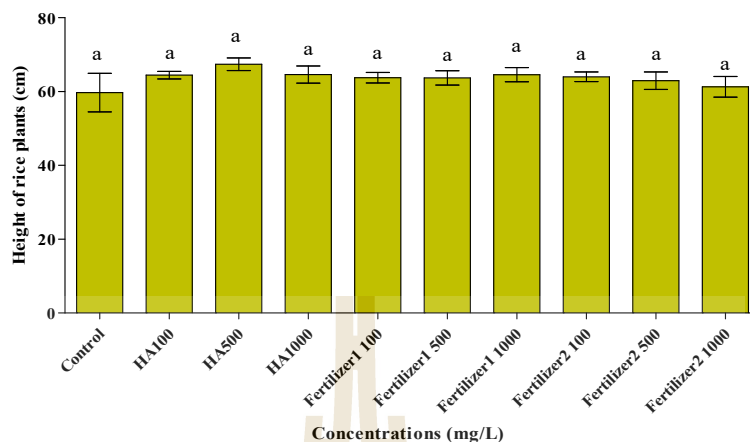
ภาพที่ 4.30 สรีรวิทยาของข้าวหลังเพาะปลูกได้ 30, 60 และ 90 วัน



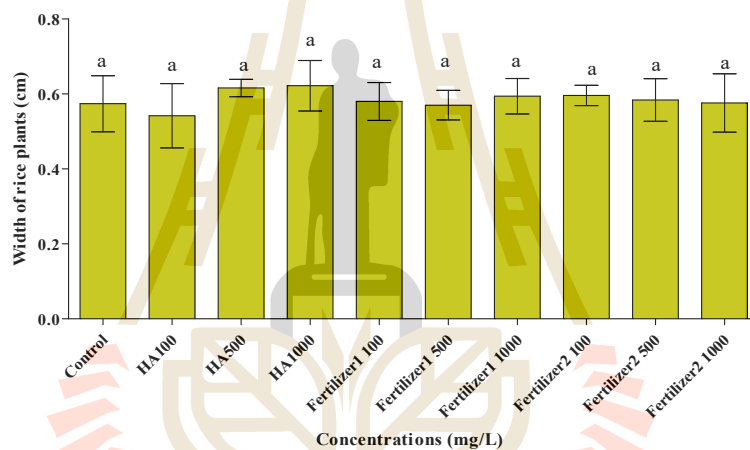
ภาพที่ 4.31 สรีรวิทยาของต้นข้าวหลังเก็บเกี่ยว 130 วัน

4.4.1 การวัดความสูง และความกว้างของใบ

จากการติดตามเมล็ดข้าวที่เพาะปลูกในอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์ ทั้งสองสูตร (18-46-0 และ 15-15-15) ที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน 0, 100, 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อ ลิตรนั้นพบว่าความสูงของต้นข้าว และความกว้างของใบที่ได้ทำการบันทึกผลหลังจากเพาะปลูกไปแล้ว 35 วัน ทุกการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) (ภาพที่ 4.32 – 4.33) สรุปได้ว่าอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ไม่ได้มีผลกระทบในเชิงลบต่อการขยายลำต้น และใบ ซึ่งงานวิจัย ของ Ye และคณะ (2019) ได้ทำการศึกษาฟอสฟอรัสต่อความสูงและความกว้างของใบจริง และพบว่า ฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อความสูงและความกว้างของต้นจริง เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อ สังเคราะห์แสงของพืช ถ้าขาดธาตุฟอสฟอรัสจะทำให้พืชลดการขยายตัวของใบ นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยัง เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืช และการพัฒนาราก รวมถึงถ้าขาดฟอสฟอรัสจะทำให้พืชมีการ สังเคราะห์แสงลดลง (Hammond and White, 2011)



ภาพที่ 4.32 ความสูงของต้นข้าวหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์

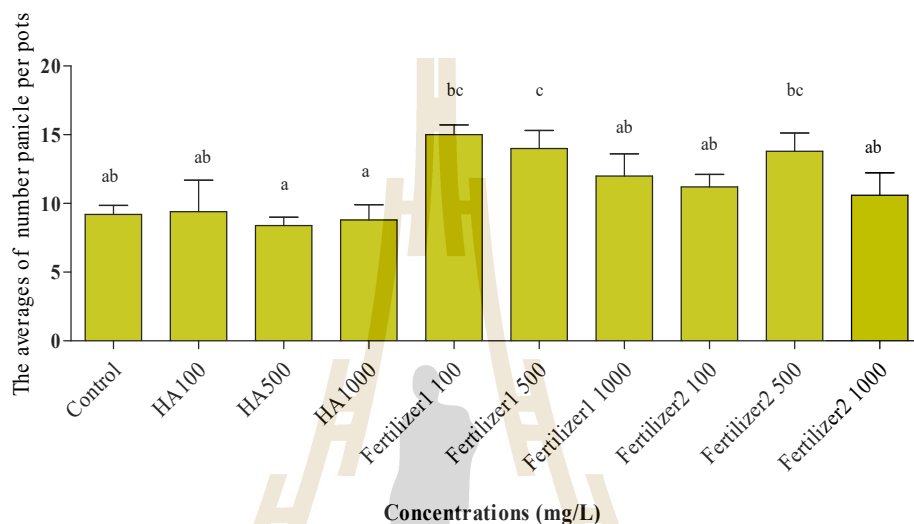


ภาพที่ 4.33 ความกว้างของใบข้าวหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์

4.4.2 จำนวนรวงต่อกระถาง

จากการติดตามจำนวนรวงต่อกระถาง ผลการศึกษาพบว่าจำนวนรวงมีตั้งแต่ 8.4 ± 0.6 ถึง 15.0 ± 0.7 ดังแสดงในภาพที่ 4.34 และพบว่าที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรของปุ๋ยเชิงพาณิชย์ สูตร 18-46-0 มีจำนวนรวงต่อกระถางสูงสุดในขณะที่ผลของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรให้ผลจำนวนรวงต่อกระถางต่ำที่สุด จากผลดังกล่าวสรุปได้ว่ามีความเป็นไปได้ว่าอนุภาคนาโนของไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตรมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดี ทำให้เกิดการตกตะกอน ส่งผลทำให้การละลายของฟอสเฟตไม่เพียงพอต่อการดูดซึมของต้นข้าวในช่วงเริ่มต้นของการเจริญเติบโต จึงส่งผลให้จำนวนขอลดลง จากปรากฏการณ์นี้คล้ายกับงานวิจัยของ Chang (2012) และคณะ ซึ่งได้ทำการศึกษาผลของอนุภาคนาโน CuO ที่ความเข้มข้นต่างๆ เพื่อศึกษาความสามารถของรากในการดูดซึมอนุภาคเหล่านี้ จากผลการทดลองสามารถอธิบายได้

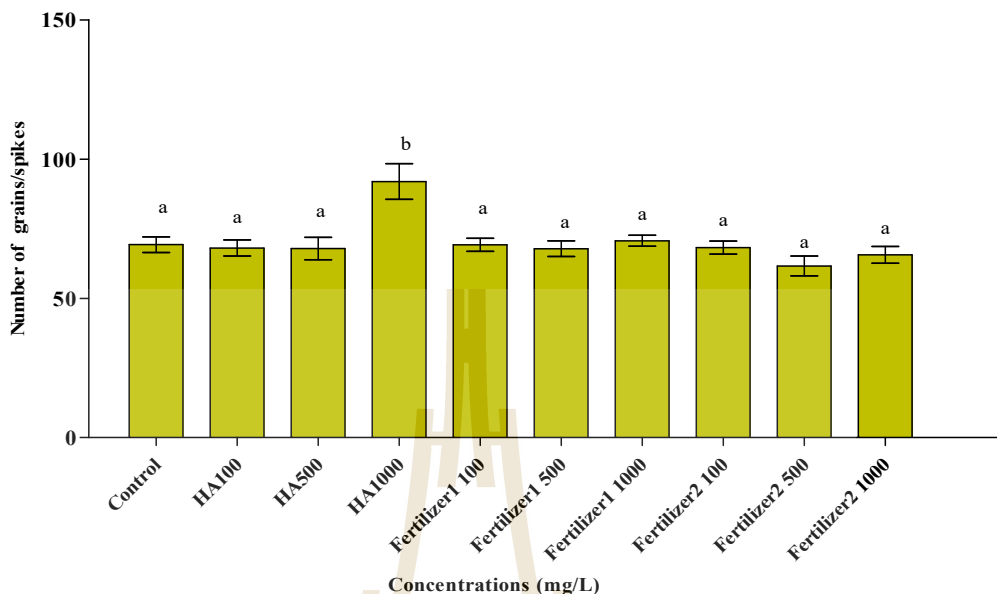
ว่าอนุภาค CuO ที่ความเข้มข้น 600 มิลลิกรัมต่อลิตร รากไม่สามารถดูดซึมได้ดี อาจเนื่องจากถูกยับยั้งการดูดซึมหรือเกิดจากการอุดตันของช่องเปิดบริเวณรากอย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาการสังเคราะห์ด้วยแสงและการเจริญเติบโตอย่างละเอียดเกี่ยวกับการตอบสนองต่อปริมาณฟอสฟอรัสในข้าว (Chang et al., 2012)



ภาพที่ 4.34 จำนวนรวงต่อกระถางหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์

4.4.3 จำนวนเมล็ดต่อรวง

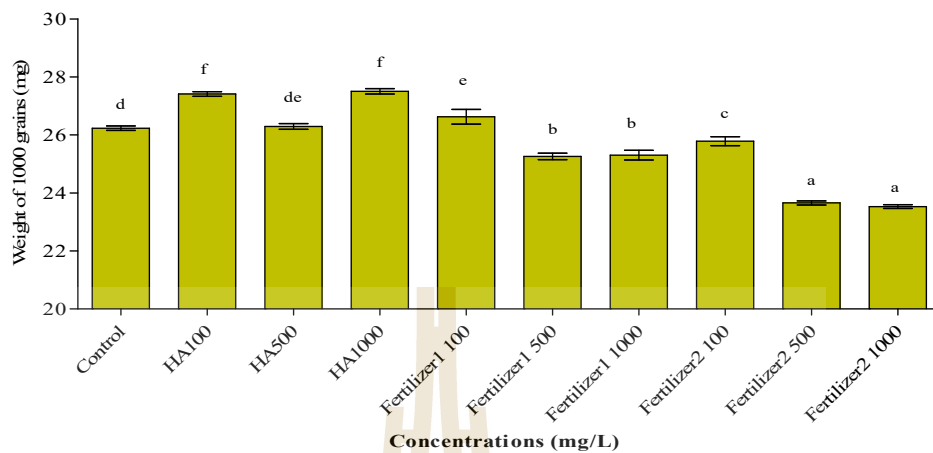
จากการติดตามจำนวนเมล็ดต่อรวง ผลการศึกษาพบว่าจำนวนเมล็ดต่อรวง มีตั้งแต่ 61.64 ± 3.59 ถึง 91.94 ± 6.42 ดังแสดงในภาพที่ 4.35 และพบว่าที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีจำนวนเมล็ดต่อรวงสูงสุดซึ่งแตกต่างจากการทดลองอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ผลทดสอบของปุ๋ยเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 สูตร (18-46-0 และ 15-15-15) รวมถึงชุดควบคุม มีจำนวนรวงต่อกระถางไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Liu และ Lal ที่เคยรายงานว่าอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์สามารถเพิ่มผลผลิตของถั่วเหลืองได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับปุ๋ยฟอสเฟตเชิงพาณิชย์ (Liu and Lal, 2014) โดยทั่วไปแล้วจำนวนเมล็ดต่อรวงนั้นสามารถพิจารณาได้จากหลายปัจจัยเช่น ความหลากหลายและความหนาแน่นของเมล็ด ซึ่งจากการศึกษาข้าวของสายพันธุ์แคลิฟอร์เนียส่วนใหญ่สามารถผลิตเมล็ดได้ประมาณ 70 ถึง 100 เมล็ดต่อรวง (Espino et al., 2014)



ภาพที่ 4.35 จำนวนเมล็ดต่อรวงหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์

4.4.4 น้ำหนักเมล็ด 1000 เมล็ด

จากการติดตามน้ำหนักเมล็ด 1000 เมล็ดหลังเก็บเกี่ยวที่ 130 วัน พบว่าที่ความเข้มข้น 100 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรของอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ มีน้ำหนักเมล็ดที่มากที่สุด แสดงดังภาพที่ 4.36 โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 27.50 ± 0.09 กรัม และ 27.41 ± 0.07 กรัมตามลำดับ ในขณะที่น้ำหนักของเมล็ดข้าวน้อยที่สุดคือผลของการทดสอบด้วยปุ๋ยเชิงพาณิชย์สูตร 15-15-15 ที่ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าน้ำหนักคือ 23.53 ± 0.06 กรัม โดยมาตรฐานน้ำหนักข้าว 1,000 เมล็ดตามรายงานของ IRRI คือ 25 กรัม นอกจากนี้ Gharib (2011) และคณะยังได้ศึกษาผลของความเข้มข้นที่แตกต่างกันของไนโตรเจนที่ 50, 100, 150 และ 200 กิโลกรัมต่อเฮกตาร์ โดยได้มีการให้ทางใบร่วมกับแอสโคเปียน เพื่อกระตุ้นผลผลิตเมล็ดข้าวของข้าวลูกผสม พบว่าน้ำหนัก 1,000 เมล็ดอยู่ในช่วง 22- 23 กรัม จากการศึกษานี้เผยให้เห็นการตอบสนองของการออกดอกเร็ว จึงอาจเป็นผลทำให้น้ำหนักของเมล็ดลดลง Gharib et al., 2011) นอกจากนี้ยังมีรายงานของ Lawre และคณะได้ทำการศึกษาอิทธิพลของอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ต่อการเจริญเติบโตและติดตามผลผลิตของเมล็ดในหัวหอม จากการศึกษพบว่าอนุภาคนาโนสามารถเพิ่มจำนวนดอกและเมล็ดต่อ umbel ได้ ซึ่งอาจเกิดจากน้ำหนักเมล็ดที่สูงขึ้นต่อ umbel และน้ำหนักเมล็ด 1,000 เมล็ด (Lawre et al., 2014)



ภาพที่ 4.36 น้ำหนักเมล็ด 1000 เมล็ดหลังเพาะปลูกร่วมกับอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์และปุ๋ยเชิงพาณิชย์

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์อนุภาคนาโน 3 ชนิดได้แก่อนุภาคนาโนแมกนีเซียมเพอร์ไรต์ ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล อนุภาคนาโนทองโดยใช้สารสกัดจากพืชคือใบย่านาง และอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์โดยใช้สารสกัดว่านหางจระเข้ สารสกัดจากพืชเหล่านี้จะช่วยในกระบวนการสังเคราะห์และรักษาเสถียรภาพของอนุภาคนาโน เมื่อทำการสังเคราะห์อนุภาคนาโนเสร็จเรียบร้อยแล้วนั้นก็นำไปตรวจสอบคุณสมบัติของอนุภาคด้วยวิธีการต่างๆ XRD, TEM และ FTIR หรือ FT-Raman เพื่อยืนยันโครงสร้างของอนุภาคนาโน ขนาดของอนุภาค และระบุหมู่ฟังก์ชันที่ติดกับอนุภาคนาโน จากนั้นศึกษาผลกระทบของอนุภาคเหล่านี้ต่อข้าว เมื่อพิจารณาผลการศึกษารวมของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเพอร์ไรต์ต่อการเจริญเติบโตของข้าวขาวดอกดกมะลิ 105g สรุปได้ว่าอนุภาคนาโนชนิดนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อข้าวขาวดอกดกมะลิ 105g ในระยะการงอกและระยะต้นกล้า 0 - 35 วัน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ใดที่มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไปของอนุภาคนาโนของแมกนีเซียมเพอร์ไรต์ สำหรับอนุภาคนาโนทองผลการทดสอบพบว่าอนุภาคนาโนของทองที่สังเคราะห์ได้โดยใช้สารสกัดใบย่านางแสดงความเป็นพิษต่อการงอกของข้าวเพียงเล็กน้อยเท่านั้นไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เป็นไปได้ที่หมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระซึ่งได้ติดเข้ากับผิวของอนุภาคนาโนในกระบวนการสังเคราะห์ ให้คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระและลดความเป็นพิษต่อพืชทั้งที่โดยปกติแล้วไอออนของโลหะหนักที่ปล่อยออกจากอนุภาคนาโนของโลหะคือปัจจัยสำคัญที่ก่อความเป็นพิษต่อพืช เนื่องจากอนุภาคนาโนของโลหะมีศักยภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ที่ค่อนข้างมาก จึงมีโอกาสปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า อนุภาคนาโนของโลหะอาจมีความเป็นพิษลดลงหากใช้วิธีการสังเคราะห์ที่เหมาะสม

ผลของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเพอร์ไรต์มีทิศทางไปในทางเดียวกันกับผลของอนุภาคนาโนทอง ขณะที่เมื่อทดสอบอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่สังเคราะห์โดยใช้สารสกัดว่านหางจระเข้พบว่าสามารถกระตุ้นการงอกได้ถึง 98 % และกระตุ้นความยาวของรากได้ดีที่ความเข้มข้นต่ำ จึงได้ทำติดตามการตอบสนองของต้นข้าวต่ออนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ โดยทำการศึกษาความสูงของต้นข้าว ความกว้างของใบ จำนวนรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง และน้ำหนัก 1000 เมล็ด ผลการสังเกตพบว่ามีพารามิเตอร์ความสูงของต้นข้าว ความกว้างของใบไม่ได้รับผลกระทบในเชิงบวกหรือเชิงลบ ผลการวิจัยโดยรวมยืนยันว่าอนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์ให้ผลที่ดี ส่งเสริมคุณภาพของผลผลิตโดยติดตามจากผลจำนวนรวง จำนวนเมล็ดต่อรวง และน้ำหนัก 1000 เมล็ดให้ผลที่แตกต่างจากชุดควบคุมและปุ๋ยเชิงพาณิชย์ทั้ง 2 สูตร จากผลการวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไฮดรอกซีอะพาไทต์จากสารสกัดว่านหางจระเข้ขึ้นนั้น ไม่เป็นพิษต่อต้นข้าว และช่วยส่งเสริมการงอก ความยาวของราก และคุณภาพของผลผลิตได้เป็นอย่างดี รวมถึงมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นปุ๋ยนาโนฟอสฟอรัสในทางการเกษตรได้

เอกสารอ้างอิงของโครงการวิจัย

- Abdul Qados, A. M. S. (2011). Effect of salt stress on plant growth and metabolism of bean plant *Vicia faba* (L.). **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**. 10(1): 7-15.
- Alimohammadi, M. , Xu Y. , Wang, D. , Biris, A. S. and Khodakovskaya, M. V. 2011. Physiological responses induced in tomato plants by a two-component nanostructural system composed of carbon nanotubes conjugated with quantum dots and its *in vivo* multimodal detection. **Nanotechnology**. 22: 295101 (8pp).
- Amiri, S., & Shokrollahi, H. (2013). The role of cobalt ferrite magnetic nanoparticles in medical science. **Materials Science and Engineering: C**, 33(1), 1-8.
- Arsad, M.S., Lee, P.M., and Hung, L.K. (2011). Synthesis and characterization of hydroxyapatite nanoparticles and β -TCP particles. **In: the 2nd International Conference on Biotechnology and Food Science, IPCBEE**. pp. 184-188.
- Arivalagan, K., Ravichandran, S., Rangasamy, K. and Karthikeyan, E. (2011). Nanomaterials and its potential application. **International Journal of ChemTech Research**. 3(2): 534 – 538.
- Aslani, F., Bagheri, S., Muhd Julkapli, N., Juraimi, A. S., Hashemi, F. S. G., and Baghdadi, A. (2014). Effects of engineered nanomaterials on plants growth: An Overview. **The Scientific World Journal**. 2014: 641759.
- Badawi, M., Seadh, S., Naeem, E., and El-Iraqi, A. (2017). Effect of phosphorus fertilizer levels on productivity and grains quality of some rice cultivars. **Journal of Plant Production**. 8(3): 411-415.
- Baldi, G., Bonacchi, D., Franchini, M. C., Gentili, D., Lorenzi, G., Ricci, A., & Ravagli, C. (2007). Synthesis and coating of cobalt ferrite nanoparticles: a first step toward the obtainment of new magnetic nanocarriers. **Langmuir**, 23(7), 4026-4028.
- Bala, N., Dey, A., Das, S., Basu, R., and Nandy, P. (2020). Effect of hydroxyapatite nanorod on chickpea (*Cicer arietinum* L.) plant growth and its possible use as nano-fertilizer. **Iranian Journal of Plant Physiology**. 1061-1069.
- Barrs, H. D., & Weatherley, P. E. (1992). A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian journal of biological sciences**, 15(3), 413-428.

- Brunner, T. J., Wick, P., Manser, P., Spohn, P., Grass, R. N., Limbach, L. K., Bruinink, A., and Stark, W. J. (2006). In vitro cytotoxicity of oxide nanoparticles: comparison to asbestos, silica, and the effect of particle solubility. **Environmental science & technology**. 40(14): 4374-4381.
- Burrell, R. E., Heggors, J. P., Davis, G. J. and Wright, J. B. 1999. Efficacy of silver-coated dressings as bacterial barriers in a rodent burn sepsis model, **Wounds** 11: 64-71.
- Chang, Y.-N., Zhang, M., Xia, L., Zhang, J., and Xing, G. (2012). The toxic effects and mechanisms of CuO and ZnO nanoparticles. **Materials**. 5(12): 2850-2871.
- Chen, H., & Yada, R. (2011). Nanotechnologies in agriculture: new tools for sustainable development. **Trends in Food Science & Technology**, 22(11), 585-594.
- Conley, D. J., Pearl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F. and Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C. and Likens, G. E. 2009. Ecology controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus. **Science**. 323: 1014-1015.
- Cui, D., Zhang, P., Ma, Y., He, X., Li, Y., Zhang, J., Zhao, Y. and Zhang, Z. (2014). Effect of cerium oxide nanoparticles on asparagus lettuce cultured in an agar medium. **Environmental Science: Nano** .1: 459-465.
- Dan, Y., Zhang, W., Xue, R., Ma, X., Stephan, C. and Shi, H. (2015). Characterization of gold nanoparticle uptake by tomato plants using enzymatic extraction using followed by single- particle inductively coupled plasma- mass spectrometry analysis. **Environmental Science and Technology** .49(5): 3007-3014.
- Dasgupta, N., Ranjan, S., Mundekkad, D., Ramalingam, C., Shanker, R., & Kumar, A. (2015). Nanotechnology in agro-food: from field to plate. **Food Research International**, 69, 381-400.
- Deng, H., Chen, H., and Li, H. (2007). Synthesis of crystal MFe₂O₄ (M = Mg, Cu, Ni) microspheres. **Materials Chemistry and Physics**. 101(2-3): 509-513.
- Dubey, S. P., Lahtinen, M., & Sillanpää, M. (2010). Tansy fruit mediated greener synthesis of silver and gold nanoparticles. **Process Biochemistry**, 45(7), 1065-1071.
- Duncan, T. V. (2011). Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors. **Journal of colloid and interface science**, 363(1), 1-24.
- Elaissari, A. (Ed.). (2008). Colloidal nanoparticles in biotechnology. John Wiley & Sons.
- El-Maarouf-Bouteau, H., and Bailly, C. (2008). Oxidative signaling in seed germination and dormancy. **Plant Signaling and Behavior**. 3(3): 175-182.

- Espino, L.; Greer, C. A., et al. (2014). Survey of rice storage facilities identifies research and education needs. **California Agriculture**. 68: 38-46.
- Gharib, H., Metwally, T., Naeem, S., and Gewaily, E. (2011). Influence of some stimulating compounds and nitrogen fertilizer levels on growth and yield of hybrid rice. **Zagazig Journal of Agricultural Research**. 38: 1-21.
- Goodarz Naseri, M., Ara, M.H. M., Saion, E. B., and Shaari, A. H. (2014). Superparamagnetic magnesium ferrite nanoparticles fabricated by a simple, thermal-treatment method. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. 350(0): 141-147.
- Hall, J. L. and Williams, L. E. (2003). Transition metal transporters in plants. **Journal of Experimental Botany**. 54(393): 2601–2613.
- Hammond, J. P., and White, P. J. (2011). Sugar signaling in root responses to low phosphorus availability. **Plant Physiology**. 156(3): 1033-1040.
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., and White, P. (2012). Functions of macronutrients. In: **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Elsevier, pp. 135-189
- Hong, F., Yang, F., Liu, C., Gao, Q., Wan, Z., Gu, F., Wu, C., Ma, Z., Zhou, J. and Yang P. 2005a. Influence of nano-TiO₂ on the chloroplast aging of spinach under light. **Biological Trace Element Research**. 10: 249-260.
- Hong, F., Zhou, J., Liu, C., Yang, F., Wu, C., Zheng, L. and Yang, P. 2005b. Effects of nano-TiO₂ on phytochemical reaction on chloroplasts of spinach. **Biological Trace Element Research**. 105: 269-279.
- Judy, J.D., Unrine, J.M., Rao, W., Wirick, S., and Bertasch, P.M. (2012). Bioavailability of gold nanomaterials to plant. Importance of particle size and surface coating. **Environmental science technology**. 46: 8467-847
- Kanagesan, S., Hashim, M., AB Aziz, S., Ismail, I., Tamilselvan, S., Alitheen, N. B., ... & Purna Chandra Rao, B. (2016). Evaluation of antioxidant and cytotoxicity activities of copper ferrite (CuFe₂O₄) and zinc ferrite (ZnFe₂O₄) nanoparticles synthesized by sol-gel self-combustion method. **Applied Sciences**, 6(9), 184.
- Kharissova, O.V., Dias, R.H.V., Kharisov, B.I., Perez, B.O., Victor, M. and Perez, J. (2013). The greener synthesis of nanoparticles. **Trends in Biotechnology**. 31(4): 240 - 248.

- Khodakovskaya, M. Dervishi, E. Mahmood, M. Xu, Y. Li, Z., Wanatabe, F. and Biris, A.S. 2009. Carbon nanotubes are able to penetrate plant seed coat and dramatically affect seed germination and plant growth. **ACS Nano**. 3(10): 3221–3227.
- Khodakovskaya, M.V., de Silva, K., Biris, A.S., Dervishi, E. and Villagarcia, H. 2012. Carbon nanotubes induce growth enhancement of tobacco cells. **ACS Nano**. 6(3): 2128-2135.
- Klinkaewnarong, J., Swatsitang, E., Masingboon, C., Seraphin, S., and Maensiri, S. (2010). Synthesis and characterization of nanocrystalline HAp powders prepared by using Aloe vera plant extracted solution. **Current applied physics**. 10(2): 521-525.
- Koelmel, J., Leland, T., Wang, H., Amarasiriwardena, D. and Xing, B. (2013). Investigation of gold nanoparticles uptake and their tissue level distribution in rice plants by laser ablation- inductively coupled- mass spectrometry. **Environmental Pollution**. 174: 222-228.
- Kregling, W.F., Semmler-Rehnke, M. and Chaudhry, Q. (2010). A complimentary definition of nanomaterial. **Nanotoday**. 5(3): 165 - 168.
- Kumar, K.P., Paul, W. and Sharma, C.P. (2011). Green synthesis of gold nanoparticles with Zingiber officinale extract: Characterization and blood compatability. **Process Biochemistry**. 46: 2007 – 2013.
- Lawre, S., and Raskar, S. (2014). Influence of zinc oxide nanoparticles on growth, flowering and seed productivity in onion. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**. 3: 874-881.
- LeGeros, R. Z., & LeGeros, J. P. (1993). Dense hydroxyapatite. In **An introduction to bioceramics** (pp. 139-180).
- Lewis G., T. J. C., Patricia S. Connelly,* and Mary S. Tilney. (1991). The structure of plasmodesmata as revealed by plasmolysis, detergent extraction, and protease digestion. **The Journal of Cell Biology**. 112(4): 739-747.
- Li, H., Ye, X., Guo, X., Geng, Z. and Wang, G. (2016). Effects of surface ligands on the uptake and transport of gold nanoparticles in rice and tomato. **Journal of Hazardous Materials**. 314: 188-196.
- Lin, D. and Xing, B. (2007). Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. **Environmental Pollution**. 150(2): 243-250.
- Liu, R., & Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (Glycine max). **Scientific reports**, 4(1), 1-6.

- Lopez-Moreno, M. L., et al. (2016). "Effect of cobalt ferrite (CoFe₂O₄) nanoparticles on the growth and development of *Lycopersicon lycopersicum* (tomato plants)." **Science of the Total Environment**. 550: 45-52.
- Ma, X., Geiser-Lee, J., Deng, Y., & Kolmakov, A. (2010). Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. **Science of the total environment**, 408(16), 3053-3061.
- Marchiol, L., Filippi, A., Adamiano, A., Degli Esposti, L., Iafisco, M., Mattiello, A., Petrusa, E., and Braidot, E. (2019). Influence of Hydroxyapatite Nanoparticles on Germination and Plant Metabolism of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.): **Preliminary Evidence. Agronomy**. 9(4).
- Marschner, H. (1995). Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**. Inc., San Diego.
- Maensiri, S., Laokul, P., Klingaewnarones, J., Phokha, S., Promarak, V., and Seraphin, S. (2008). Indium oxide (In₂O₃) nanoparticles using *Aloe vera* plant extract: Synthesis and optical properties. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**. 10(3): 161-165.
- Mongillo, J. F. (2007). Nanotechnology 101. ABC-CLIO.
- Moore, M. G., & Kearsley, G. (2011). Distance education: A systems view of online learning. Cengage Learning.
- Noruzi, M., Zare, D., Khoshnevisan, K., & Davoodi, D. (2011). Rapid green synthesis of gold nanoparticles using *Rosa hybrida* petal extract at room temperature. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 79(5), 1461-1465.
- Patakas, A., Nikolaou, N., Zioziou, E., Radoglou, K., and Noitsakis, B. (2002). The role of organic solute and ion accumulation in osmotic adjustment in drought-stressed grapevines. **Plant Science**. 163(2): 361-367.
- Percival, S.L., Bowler, P.G. and Dolman, J. 2007. Antimicrobial activity of silver-containing dressings on wound microorganisms using an in vitro biofilm model. **International Wound Journal**. 4:186-191.
- Pradeep, A., Priyadharsini, P., and Chandrasekaran, G. (2008). Sol-gel route of synthesis of nanoparticles of MgFe₂O₄ and XRD, FTIR and VSM study. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. 320(21): 2774-2779.
- Premanathan, M., Karthikeyan, K., Jeyasubramanian, K., & Manivannan, G. (2011). Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation. **Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine**, 7(2), 184-192.

- Rico, C. M., Majumdar, S., Duarte-Gardea, M., Peralta-Videa, J. R., and Gardea-Torresdey, J. L. (2011). Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. **Journal of agricultural and food chemistry**. 59(8): 3485-3498.
- Romih, T., Drašler, B., Jemec, A., Drobne, D., Novak, S., Golobič, M., ... & Kogej, K. (2015). Bioavailability of cobalt and iron from citric-acid-adsorbed CoFe₂O₄ nanoparticles in the terrestrial isopod *Porcellio scaber*. **Science of the Total Environment**, 508, 76-84.
- Sanpui, P., Chattopadhyay, A., & Ghosh, S. S. (2011). Induction of apoptosis in cancer cells at low silver nanoparticle concentrations using chitosan nanocarrier. **ACS applied materials & interfaces**, 3(2), 218-228.
- Song, U., Shin, M., Lee, G., Roh, J., Kim, Y., and Lee, E. J. (2013). Functional analysis of TiO₂ nanoparticle toxicity in three plant species. **Biological trace element research**. 155(1):93-103.
- Samart, S., Phakamas, N., & Chutipajit, S. (2015). Effect of nanoparticles on the relationship between crop growth rate and yield of Chainat 1 rice (*Oryza sativa* L.). In **2nd International Symposium on Agricultural Technology** (pp. 197-200).
- Sujitha, M. V., & Kannan, S. (2013). Green synthesis of gold nanoparticles using Citrus fruits (*Citrus limon*, *Citrus reticulata* and *Citrus sinensis*) aqueous extract and its characterization. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, 102, 15-23.
- Szameitat, A. E., Sharma, A., Minutello, F., Pinna, A., Er-Rafik, M., Hansen, T. H., Persson, D. P., Andersen, B., and Husted, S. (2021). Unravelling the interactions between nano-hydroxyapatite and the roots of phosphorus deficient barley plants. **Environmental Science: Nano**. 8(2): 444-459
- Tsi, N. N. (2016). Gold nanoparticle effect on rice germination and roots (Doctoral dissertation, School of Environmental Biology Institute of Science Suranaree University of Technology).
- Tripathi, S., Sonkar, S.K. and Sarkar, S. 2011. Growth stimulation of gram (*Cicer arietinum*) plant by water soluble carbon nanotubes. **Nanoscale**. 3: 1176-1181.
- Trujillo-Reyes, J., Vilchis-Nestor, A. R., Majumdar, S., Peralta-Videa, J. R. and Gardea-Torresdey, J. L. (2013). Citric acid modifies surface properties of commercial CeO₂ nanoparticles reducing their toxicity and cerium uptake in radish (*Raphanus sativus*) seedlings. **Journal of Hazardous Materials**. 263(Part 2): 677-684.

- Villagarcia, H., Dervishi, E., de Silva, K., Biris, A.S. and Khodakovskaya, M.V. 2012. Surface chemistry of carbon nanotubes impacts the growth and expression of water channel protein in tomato plants. **Small** 8(15): 2328-2334.
- Wang, H., Kou, X., Pei, Z., Xiao, J. Q., Shan, X., and Xing, B. (2011). Physiological effects of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles on perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and pumpkin (*Cucurbita mixta*) plants. **Nanotoxicology**. 5(1): 30-42.
- Wellmer, F. W., Becker-Platen, J. D. 2002. Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review. **International Journal of Earth Science**. 91: 723-745.
- Wijnhoven, S.W.P., Peijnenburg, W.J.G.M., Herberts, C.A., Hagens, W.I., Oomen, A.G., Heugens, E.H.W., Roszek, B., Bisschops, J., Gosens, I., van de Meent, D., Dekkers, S., de Jong, W.H., van Zijverden, M., Sips, A.J.A.M. and Geertsma, R.E. 2009. Nanosilver – a review of available data and knowledge gaps in human and environmental risk assessment, **Nanotoxicology**. 3(2): 109-138.
- Wiriyachitra, P. and Phuriyakorn, B. (1981). Alkaloids of *Tiliacora triandra*. **Australian Journal of Chemistry** 34: 2001-2004.
- Xu, M., Li, D., Li, J., Qin, D., Hosen, Y., Shen, H., Cong R. and He, X. 2013. Polyolefin-coated urea decreases ammonia volatilization in a double rice system of Southern China. **Agronomy Journal**. 105: 277-284.
- Ye, T., Li, Y., Zhang, J., Hou, W., Zhou, W., Lu, J., Xing, Y., and Li, X. (2019). Nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization affects the flowering time of rice (*Oryza sativa* L.). **Global Ecology and Conservation**. 20: e00753.
- Yeo, S. Y., Lee, H. J., & Jeong, S. H. (2003). Preparation of nanocomposite fibers for permanent antibacterial effect. **Journal of Materials science**, 38(10), 2143-2147.
- Yoshida, S. (1981). Fundamentals of rice crop science. Int. Rice Res. Inst..
- Zanardo, D. I. L., Lima, R. B., Ferrarese, M. D. L. L., Bubna, G. A., & Ferrarese-Filho, O. (2009). Soybean root growth inhibition and lignification induced by p-coumaric acid. **Environmental and Experimental Botany**, 66(1), 25-30.
- Zhang, J. G., Zhong, L. F., Zhang, M., & Xia, Y. X. (1992). Protection effects of procaine on oxidative stress and toxicities of renal cortical slices from rats caused by cisplatin in vitro. **Archives of toxicology**, 66(5), 354-358.
- Zhang, L., Hong, F., Lu, S. and Liu, C. 2005. Effect of nano-TiO₂ on strength of naturally aged seeds and growth of spinach. **Biological Trace Element Research**. 105: 83-91.

Zhu, H., Han, J., Xiao, J. Q., and Jin, Y. (2008). Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. **Journal of environmental monitoring** : JEM. 10(6): 713-717.

กรวิชัย โอภาสเสถียร, (2014). ผลกระทบของอนุภาคนาโนแมกนีเซียมเฟอร์ไรต์ต่อการงอกของ เมล็ดหอมมะลิ 105ก. สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

IRRI Photos. “Growth stages of the rice plant”. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <https://www.flickr.com/photos/ricephotos/13596607373>



ประวัติคณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการวิจัย

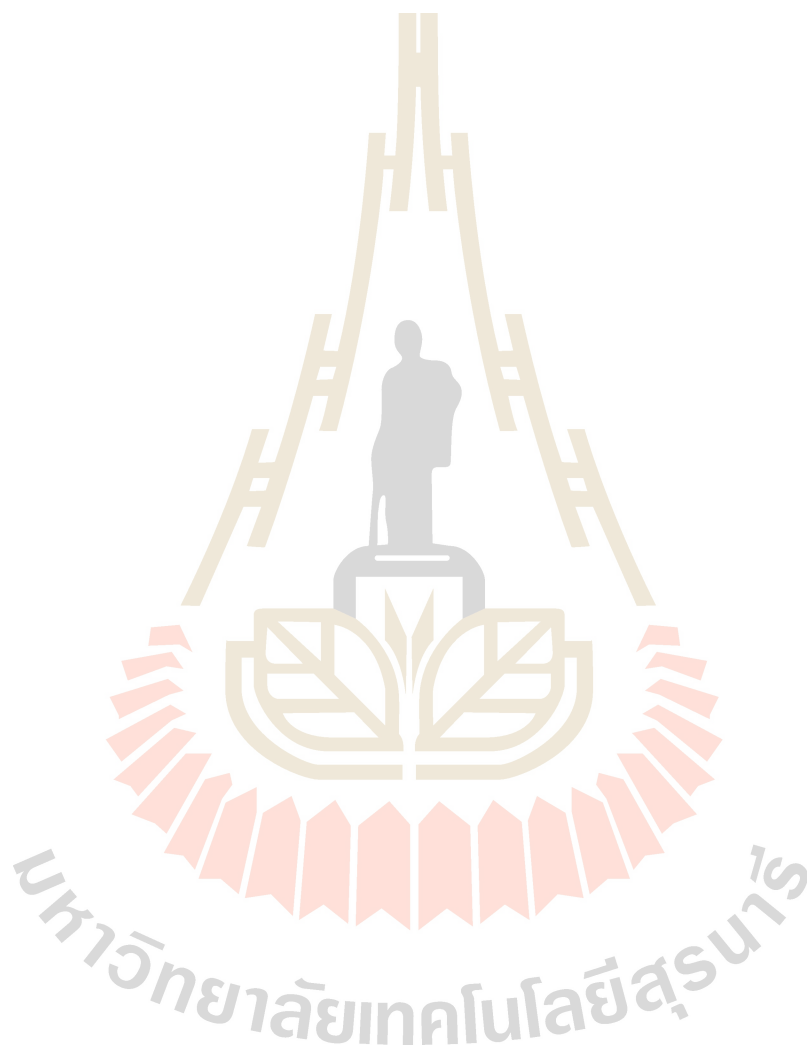
1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางดวงกมล แม้นศิริ
ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Mrs. Duangkamol Maensiri
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3 2299 00098 26 1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)
สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถ. มหาวิทยาลัย ต. ในเมือง อ. เมือง จ. นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ 044 224615 โทรสาร 044 224633
email: duangkamol@sut.ac.th
5. ประวัติการศึกษา
2538 วท.บ. (ชีววิทยา), มหาวิทยาลัยขอนแก่น
2001 Ph.D. (Molecular Biology), University of Manchester
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ: gene identification and characterization, molecular cloning
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
 - 7.1 ผู้อำนวยการแผนงานวิจัย: ชื่อแผนงานวิจัย
 - 7.2 หัวหน้าโครงการวิจัย:
 - 7.2.1 ผลของสภาวะเพาะเลี้ยงต่อการสังเคราะห์ exopolysaccharide ของไซยาโนแบคทีเรียบางชนิด (ทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น)
 - 7.2.2 การใช้ข้อมูลทางชีวโมเลกุลในการระบุตำแหน่งของพืชสกุล *Caulopkaempferia* (Zingiberaceae) (ทุนสนับสนุนจากศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น)
 - 7.2.3 การใช้เทคนิค PCR-RFLP ของดีเอ็นเอบริเวณ ITS ในการระบุพืชสกุล *Alpinia* (Zingiberaceae) (ทุนสนับสนุนจากศูนย์วิจัยอนุกรมวิธานประยุกต์ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น)
 - 7.2.4 ดีเอ็นเอบนผลึกเพชรนาโน (ทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยขอนแก่น)
 - 7.2.5 การประเมินดีเอ็นเอบริเวณ *matK*, *trnH-psbA* intergenic spacer, *rpoB* และ *rpoC* ในการใช้เป็น DNA barcode สำหรับการระบุชนิดพืช
 - 7.2.6 ความหลากหลายทางพันธุกรรมของข้าวพื้ในเมือง ทุนอุดหนุนทั่วไป มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ผลงานวิจัย

- Pokpongsatien, P. and Thong-a-ram, D. 2005. The elimination of contaminating bacteria in *Spirulina platensis* by antibiotic treatment. In: The Second National Conference on Algae and Plankton, 23-25 March 2005, Chiangmai. p D-03. (In Thai)
- Seeprasert, T., Theerakulpisut, P., Chantaranothai, P. and Thong-a-ram, D. 2004. Pollen morphology and RAPD analysis of some closely related taxa of *Polygonum*. In: The 30th Congress on Science and Technology of Thailand. Bangkok, Thailand. B0129.
- Theerakulpisut, P., Chantaranothai, P., Thong-a-ram, D., Khampila, J., Triboun, P. and Mahakham, W. 2004. Interspecific relationship in *Zingiber* (Zingiberaceae) from northeast Thailand based on nuclear ribosomal DNA ITS sequences. In: The 30th Congress on Science and Technology of Thailand. Bangkok, Thailand. B0150.
- Theerakulpisut, P., Chantaranothai, P., Thong-a-ram, D., Khampila, J., Triboun, P. and Mahakham, W. 2005. Genetic variation of the genus *Zingiber* (Zingiberaceae) in Thailand detected by RAPD markers. In: The 31st Congress on Science and Technology of Thailand. Nakhonratchasima, Thailand. B0042.
- Theerakulpisut, P., Chantaranothai, P., Triboun, P., Thong-a-ram, D., Khampila, J. and Mahakham, W. 2006. Classification of the genus *Zingiber* (Zingiberaceae) based on ribosomal DNA sequences and RAPD markers. 4th International Symposium on the Family Zingiberaceae, 3rd – 6th July 2006, Singapore Botanic Garden, Singapore.
- Kanawapee, N., Theerakulpisut, P., Bunnag, S., Maensiri, D. and P. Chantaranothai. 2006. DNA fingerprint and molecular diversity of four species of *Phyllanthus* assessed through RAPD analysis. In: The The 31st Congress on Science and Technology of Thailand. Bangkok, Thailand. B4_B0087.
- Theerakulpisut, P., Kanawapee, N., Maensiri, D., Bunnag, S. and Chantaranothai, P. 2006. Development of sequence characterized amplified region (SCAR) markers for identification of *Phyllanthus amarus*, *P. debilis* and *P. urinaria* (Phyllanthaceae). In: The 1st Sino-Thai conference on traditional medicine and natural health products proceeding. 13-19 November 2006. Nanning, Guangxi, People Republic of China. pp. 118-122.
- Thong-a-ram, D., Namdee, K. and Mahakham, W. 2005. Classification of the genus *Caulokaempferia* K. Larsen (Zingiberaceae) based on the molecular phylogenetic analysis. KKU Research Journal 10(1): 5-12. (In Thai)
- Kultonlaksami, T. Maensiri, D. and Saensook, S. 2007. Variation of the internal transcribed spacer of ribosomal DNA among some *Alpinia* Roxb. (Zingiberaceae) species and

- its application for species identification. In: The 9th symposium on graduate research, 19th January 2007, Khon Kaen University, Thailand. BMP-6. (In Thai)
- Topon, O., Maensiri, D., Monthatong, M. and Amornkitbumrung, V. 2007. Diamond-like carbon film chip for biological molecule detection. In: German-Thai symposium on nanoscience and nanotechnology 27-28 September 2007, The Tide Resort, Chonburi. pp 183- 187. German- Thai Symposium on Nanoscience and Nanotechnology.
- Theerakulpisut, P., Kanawapee, N., Maensiri D., Bunnag, S. and Chantaranothai, P. 2008. Development of species- specific SCAR markers for identification of three medicinal species of *Phyllanthus*. *Journal of Systematics and Evolution* 46(4): 614-621.
- Chongka, M., Maensiri, D. and Saensook, S. 2009. *matK* and *trnH-psbA* intergenic spacer to be used as DNA barcodes: preliminary evaluation by the assessment of intraspecific sequence variation in *Alpinia galanga* (L.) Wild. *KKU Science Journal* 37(2): 173-182. (In Thai)
- Phannorit, S., Maensiri, D. and Montatong, M. 2009. Screening of EST-SSRs to develop genetic markers related to salt tolerance of rice. *KKU Research Journal (Graduate Studies)* 9(2): 22-29. (In Thai)
- Aiumsumang, S. and Maensiri, D. 2011. Exogenously applied ascorbic acid to increase salt stress tolerance in rice. In: The 12th Symposium on Graduate Research, 28th January 2011, Khon Kaen University. BM06.
- Petcha, N., Maensiri, D. and Saensouk, S. 2011. Assessment of the *rpoB* and *rpoC1* plastid DNA regions for their suitability as DNA barcodes for identification of plants in the genus *Alpinia* Roxb. (Zingiberaceae). In: The 12th Symposium on Graduate Research, 28th January 2011, Khon Kaen University. BM07.
- Theerakulpisut, P., Triboun, P., Mahakham, W., Maensiri, D., Khampila, J. and chantaranothai, P. 2012. Phylogeny of the genus *Zingiber* (Zingiberaceae) based on nuclear ITS sequence data. *Kew Bulletin* 67: 389-395.
- Jantasee, A., Thumanu, K., Muangsan, N., Leraanaksiri, W. and Maensiri, D. 2014. Fourier transform infrared spectroscopy for antioxidant capacity determination in colored glutinous rice. *Food Analytical Methods* 7: 389-399.
- Nji, T., Maensiri, S. and Maensiri, D. 2017. The effect of green synthesized gold nanoparticles on rice germination and roots. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* 8: 035008.

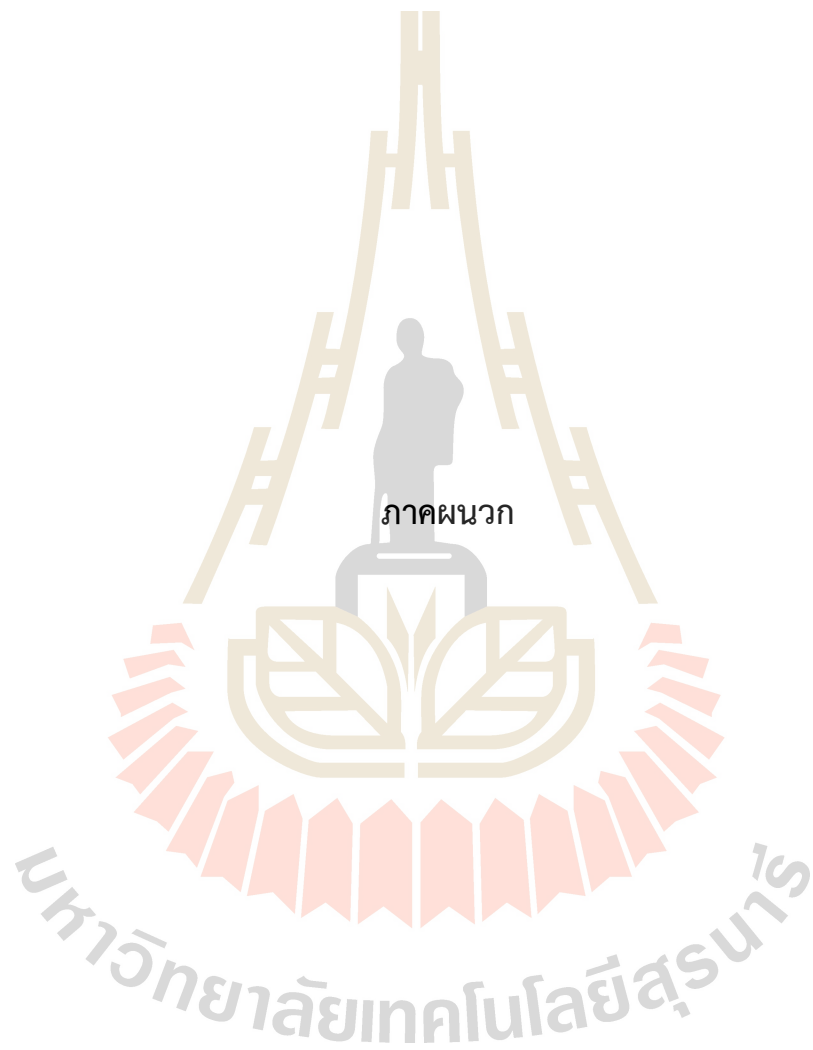
Pimchan, T., Maensiri, D. and Eumkeb, G. 2017. Synergy and mechanism of action of α -mangostin and ceftazidime against ceftazidime-resistant *Acinetobacter baumannii*. Letters in Applied Microbiology 65(4): 285-291.



ผลงานตีพิมพ์ที่เกิดจากงานวิจัย

Nji, T., Maensiri, S. and Maensiri, D. 2017. The effect of green synthesized gold nanoparticles on rice germination and roots. **Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology** 8: 035008.





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 1

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
50	3	4.83		
10	3	6.04	6.04	
100	3	6.45	6.45	
25	3	6.48	6.48	
0	3	6.52	6.52	
500	3		7.71	7.71
1,000	3		7.84	7.84
2,000	3			8.61
Sig.		.103	.085	.350

ภาคผนวก ข
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของดันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 1

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	2.84		
25	3	3.05	3.05	
50	3	3.06	3.06	
100	3	3.13	3.13	
10	3	3.14	3.14	
1,000	3	3.60	3.60	3.60
500	3		3.70	3.70
2,000	3			4.10
Sig.		.065	.107	.178

ภาคผนวก ข
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 2

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
0	3	5.98		
2,000	3		7.83	
100	3		8.50	8.50
10	3		8.74	8.74
50	3		8.93	8.93
25	3		9.11	9.11
1,000	3			9.64
500	3			10.21
Sig.		1.000	.139	.055

ภาคผนวก ค
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 2

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05			
		1	2	3	4
0	3	3.00			
100	3	3.32	3.32		
50	3		3.79	3.79	
2,000	3		3.82	3.82	
25	3		3.86	3.86	3.86
10	3			4.18	4.18
1,000	3			4.45	4.45
500	3				4.54
Sig.		.303	.123	.069	.056

ภาคผนวก ค
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของต้นแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 3

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
500	3	3.91		
0	3	5.32	5.32	
1,000	3	5.33	5.33	
25	3		6.03	
50	3		6.77	6.77
10	3		6.95	6.95
2,000	3		6.96	6.96
100	3			8.25
Sig.		.119	.091	.114

ภาคผนวก ข
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 3

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
500	3	2.13		
1,000	3	2.89	2.89	
50	3		3.24	3.24
25	3		3.33	3.33
0	3		3.53	3.53
2,000	3		3.70	3.70
10	3			3.88
100	3			4.07
Sig.		.081	.088	.084

ภาคผนวก ง
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของรากโดยวิธีของต้นแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 4

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
100	3	6.45	
500	3	7.20	
0	3	7.59	7.59
50	3	8.02	8.02
25	3	8.17	8.17
10	3	8.30	8.30
1,000	3		9.32
2,000	3		9.60
Sig.		.073	.053

ภาคผนวก จ
 การเปรียบเทียบความยาวเฉลี่ยของยอดโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 4

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
500	3	3.30		
25	3	3.60	3.60	
0	3	3.61	3.61	
50	3	3.71	3.71	
100	3		3.83	
10	3		3.95	
1,000	3		4.02	4.02
2,000	3			4.39
Sig.		.065	.063	.071

ภาคผนวก ฉ
 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสี
 ย้อม Evans Blue โดยวิธีของตันแคน (Duncan's multiple range test)
 ในการทดลองครั้งที่ 1

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05
		1
0	3	.075
2,000	3	.076
10	3	.077
50	3	.082
100	3	.082
25	3	.083
500	3	.086
1,000	3	.089
Sig.		.133

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข
 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม
 Evans Blue โดยวิธีของตันแคน (Duncan's multiple range test)
 ในการทดลองครั้งที่ 2

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
2,000	3	.071	
1,000	3	.071	
0	3	.072	
10	3	.073	
50	3	.073	
500	3	.077	.077
25	3	.077	.077
100	3		.088
Sig.		.331	.067

ภาคผนวก ซ
 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม
 Evans Blue โดยวิธีของตันแคน (Duncan's multiple range test)
 ในการทดลองครั้งที่ 3

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
100	3	.059	
0	3	.059	
500	3	.060	
50	3	.061	.061
2,000	3	.062	.062
1,000	3	.062	.062
10	3	.063	.063
25	3		.066
Sig.		.151	.071

ภาคผนวก ฅ
 การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตรของสีย้อม
 Evans Blue โดยวิธีของตันแคน (Duncan's multiple range test)
 ในการทดลองครั้งที่ 4

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05
		1
1,000	3	.056
10	3	.057
25	3	.058
0	3	.058
100	3	.058
500	3	.061
2,000	3	.061
50	3	.064
Sig.		.133

ภาคผนวก ญ
 การเปรียบเทียบปริมาณเมลอนไดอัลดีไฮด์โดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 1

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05
		1
1,000	3	.43
500	3	.47
2,000	3	.48
50	3	.48
10	3	.50
0	3	.50
25	3	.52
100	3	.52
Sig.		.102

ภาคผนวก ก
 การเปรียบเทียบปริมาณเมลอนได้อัลดีไฮด์โดยวิธีของดันแคน
 (Duncan's multiple range test) ในการทดลองครั้งที่ 2

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
50	3	.42	
2,000	3	.43	
1,000	3	.43	
10	3	.46	.46
100	3	.46	.46
500	3	.48	.48
25	3	.52	.52
0	3		.57
Sig.		.121	.065

ภาคผนวก ก
 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำสัมผัสโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) จากการทดลองครั้งที่ 1

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
25	3	33.73	
0	3	35.33	
2,000	3	37.41	37.41
10	3	40.18	40.18
100	3	40.24	40.24
50	3	41.95	41.95
1,000	3	42.96	42.96
500	3		53.60
Sig.		.249	.050

ภาคผนวก ฐ
 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำสัมผัสโดยวิธีของตันแคน
 (Duncan's multiple range test) จากการทดลองครั้งที่ 2

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05
		1
10	3	37.03
2,000	3	37.54
100	3	38.22
1,000	3	40.27
500	3	40.35
0	3	41.17
50	3	43.51
25	3	44.06
Sig.		.231

ภาคผนวก ข
 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอัตราการเจริญเติบโตด้วยวิธีแบบต้นแคณ
 (Duncan's multiple range test)

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
25	4	.26	
10	4	.27	
500	3	.34	.34
100	4	.35	.35
0	4		.37
50	4		.37
Sig.		.055	.579

ภาคผนวก ฅ
 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยน้ำหนักสดด้วยวิธีแบบต้นแคณ
 (Duncan's multiple range test)

Concentration (mg/l)	N	Subset for alpha = 0.05
		1
10	4	2.99
25	4	3.13
50	4	4.13
0	4	4.19
500	3	4.21
100	4	4.68
Sig.		.083

ภาคผนวก ฅ
 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์เอ ด้วยวิธีแบบต้นแค้น
 (Duncan's multiple range test)

Concentration	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
0	4	5.39	
50	4	5.62	
10	4	6.39	
500	3	6.53	
100	4	7.73	
25	4		18.28
Sig.		.115	1.000

ภาคผนวก ญ
 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยปริมาณคลอโรฟิลล์พี ด้วยวิธีแบบต้นแคณ
 (Duncan's multiple range test)

Concentration	N	Subset for alpha = 0.05		
		1	2	3
50	4	3.85		
500	3	4.15		
100	4	4.28		
0	4	5.30	5.30	
10	4		6.27	6.27
25	4			7.03
Sig.		.096	.217	.336

