ผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณการใช้ต่อคุณภาพดิน การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว

นายวิณากร ที่รัก

ดุษฎีนิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (การจัดการการผลิตพืชและการพัฒนา)

สาขาวิชาเกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

พ.ศ. 2566

Effects of particle size and dose of titanium dioxide nanoparticles on soil quality, growth and rice yield

Mr. WINAKORN THEERAK

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy (Crop Production Management and Development)

School of Agriculture and Cooperatives

Sukhothai Thammathirat Open University

2023

หัวข้อดุษฎีนิพนธ์ ผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณการใช้ต่อคุณภาพดิน การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว

ชื่อและนามสกุล นายวิณากร ที่รัก

แขนงวิชา / วิชาเอก การจัดการการผลิตพืชและการพัฒนา

สาขาวิชา เกษตรศาสตร์และสหกรณ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

อาจารย์ที่ปรึกษา 1. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริชาติ ดิษฐกิจ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำรงเจต พัฒมุข

3. รองศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์

ดุษฎีนิพนธ์นี้ได้รับความเห็นชอบให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรระดับปริญญาเอก เมื่อวันที่ 26 ตุลาคม พ.ศ. 2566

คณะกรรมการสอบดุษฎีนิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ทวีชัย)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริชาติ ดิษฐกิจ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำรงเจต พัฒมุข)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์)

..... กรรมการ

(ดร.ลัดดาวัลย์ กรรณนุช)

..... ประธานกรรมการบัณฑิตศึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.นราธิป ศรีราม)

ชื่อดุษฎีนิพนธ์ ผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณการใช้ต่อคุณภาพดิน การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว
ผู้วิจัย นายวิณากร ที่รัก รหัสนักศึกษา 4629000045
ปริญญา: ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (การจัดการการผลิตพืชและการพัฒนา)
อาจารย์ที่ปรึกษา (1) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริชาติ ดิษฐกิจ (2) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำรงเจต พัฒมุข (3) รองศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์ ปีการศึกษา 2566

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา 1) ขนาดและลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบสารแขวนลอยในการนำมาใช้ประโยชน์กับพืช 2) ผลของขนาดและปริมาณของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารแขวนลอยต่อคุณภาพของดิน และ 3) ผลของขนาดและปริมาณของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารแขวนลอยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว และการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในดินและข้าว

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยการศึกษาขนาดและลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปสารแขวนลอยด้วยการวิเคราะห์ขนาดด้วยเครื่อง SEM TEM และ DLS และวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD และวางการทดลองแบบ 3 x 6 แฟคทอเรียล โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ที่มีสองปัจจัย คือ ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 3 ระดับ ได้แก่ ช่วงขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอย 6 ระดับ ได้แก่ 0 (ควบคุม), 10, 50, 100, 250 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 5 กระถาง ในระยะการเจริญเติบโตตั้งแต่ระยะต้นกล้าจนกระทั่งให้ผลผลิต โดยเก็บข้อมูลของข้าว ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนใบ สีใบ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้น และการสะสมไททาเนียมและข้อมูลดินก่อนและหลังปลูก ได้แก่ วิเคราะห์คุณสมบัติดิน และการสะสมไททาเนียมในดิน วิเคราะห์ข้อมูลโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางและทางเดียวที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปร

ผลการทดลองพบว่า 1) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กและขนาดกลางมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นส่วนมาก และมีบางส่วนที่เป็นลักษณะกลม ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่มีลักษณะกลมเป็นส่วนมาก อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีการเกาะตัวและส่งผลให้ขนาดเชิงพลวัตมีค่ามากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ 2) ปริมาณธาตุอาหารในดินก่อนปลูกข้าวมากกว่าหลังปลูกข้าว และคุณสมบัติทางเคมีในดินลดลง แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนการสะสมไททาเนียมในดินมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) โดยมีปริมาณการสะสมไททาเนียมมากขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้น 3) ขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียม ซึ่งอนุภาคขนาด 400-600 นาโนเมตรที่ใช้ในปริมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ความสูงต้น จำนวนใบ สีใบ น้ำหนักสดต้น น้ำหนักแห้งต้นของข้าวมากที่สุด มีการสะสมไททาเนียมในต้นข้าวน้อยที่สุด และไม่พบการสะสมไททาเนียมในผลผลิตข้าว และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าว พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก

คำสำคัญ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ผลผลิตข้าว ข้าวปทุมธานี 1 ข้าวขาวดอกมะลิ105

Dissertation title: “Effects of particle size and dose of titanium dioxide nanoparticles on soil quality, growth and rice yield”

Researcher: “Mr. WINAKON THEERAK”; ID: “4629000045”;

Degree: Doctor of Philosophy (Crop Production Management and Development);

Thesis advisors: (1) Asst. Prof. Dr.Parichat Dittakit;(2) Asst. Prof. Dr.Thamrongjet Puttamuk (3) Assoc. Prof. Dr.Pitak Chauwong ; Academic year: 2023

Abstract

The objectives of this research were to study 1) the size and characteristics of titanium dioxide (TiO_2) nanoparticles (NPs) in suspension for use with plants, 2) the effects of sizes and concentrations of TiO_2 NPs in suspensions on soil quality, and 3) the effects of sizes and concentrations of TiO_2 NPs in suspensions on the growth and yield of rice and the accumulation of TiO_2 NPs in soil and rice.

This research was experimental research. The study of size and characteristics of titanium dioxide nanoparticles in suspension were studied by size analysis with SEM, TEM, and DLS and crystal structure analysis with XRD. The 3 x 6 factorial experiment used a completely randomized design. There are two factors: the sizes of titanium dioxide nanoparticles in three levels, namely the size ranges 20-30, 80-120, and 400-600 nm, and the concentrations of titanium dioxide nanoparticles in the suspension in six levels, namely 0 (control), 10, 50, 100, 250, and 1000 milligrams per liter. Each treatment was repeated three times, each with 5 pots. In the growth period from the seedling stage until the harvesting stage, data on rice, including plant height, number of leaves, leaf color, plant fresh weight, plant dry weight, and titanium accumulation were collected. Data of soil before and after planting, including analysis of soil properties and titanium accumulation in soil were also collected. Data analysis was performed by a two-way analysis of variance on size and dosage of titanium dioxide nanoparticles and by a one-way analysis of variance at 95% confidence level. The Pearson correlation coefficient was analyzed between variables.

The results showed that 1) most small and medium TiO_2 NPs had rectilinear shapes, while a few were circular. Large TiO_2 NPs were mostly circular. Smaller TiO_2 NPs agglomerated, resulting in greater hydrodynamic sizes than large TiO_2 NPs. 2) After rice growth, soil nutrients and chemical properties decreased but the difference was not statistically significant ($p>0.05$). There was significant difference in Ti accumulation in soil ($p<0.01$), and the Ti content increased as the concentration increased. 3) It was found that the size and quantity of titanium dioxide nanoparticles had significantly impact ($p<0.01$) on the accumulation of titanium in rice. TiO_2 NPs suspensions with a particles size of 400-600 nanometers and a concentration of 1000 milligrams per liter promoted the greatest growth in rice and caused the least amount of titanium accumulation in rice plants. Ti accumulation didn’t found in harvested rice grain products. Pearson correlation coefficients between Ti accumulation in rice seeds, roots, stems, and leaves, plant height, leaf color, fresh weight, dry weight, and survival rates were positive.

Keywords : Titanium dioxide nanoparticles, rice yield, Pathum Thani 1 rice, Jasmin 105 ri

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ลุล่วงไปเป็นอย่างดี ด้วยความกรุณาจากศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ทวีชัย และอาจารย์ ดร.ลัดดาวัลย์ กรรณนุช ผู้ทรงคุณวุฒิ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริชาติ ดิษฐกิจ อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธำรงเจต พัฒมุข และรองศาสตราจารย์ ดร.พิทักษ์ เชื้อวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาดุษฎีนิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและติดตามการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้อย่างใกล้ชิดมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพรรณ พิมลรัตน์ อาจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีการผลิตพืช คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อโรงเรือนสำหรับการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงค์ จันจุฬา ศูนย์นวัตกรรมเกษตรสร้างสรรค์ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อเครื่องมือวิทยาศาสตร์สำหรับการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.ศรัณย์ อธิการยานันท์ นักวิจัย ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อห้องปฏิบัติทางวิทยาศาสตร์เฉพาะด้านร่วมด้วยเครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย และขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วนิดา สำราญรัมย์ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ที่ให้คำแนะนำและเอื้อเฟื้อเครื่องมือวิทยาศาสตร์สำหรับการทำวิจัยครั้งนี้ และทุกๆ ท่านยังให้คำแนะนำในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ ให้ข้อคิดเห็นต่างๆ และเป็นกำลังใจในการทำดุษฎีนิพนธ์เล่มนี้

วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สำเร็จสมบูรณ์ลงได้ หากขาดการช่วยเหลือจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ เศกพร ตันศรีประภาศิริ ผู้อำนวยการสำนักส่งเสริมการเรียนรู้และบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่สำนักฯ ที่ให้การสนับสนุนส่งเสริม และให้กำลังใจในการดำเนินงาน และผู้บริหาร คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ รวมทั้งนักศึกษาหลักสูตรเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร และนักศึกษาคณะอื่นๆ ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้คำแนะนำและให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูล

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา พี่ชาย พี่สาว ญาติพี่น้องทุกคน และเพื่อนๆ ในวงการเกษตร ที่คอยให้กำลังใจให้ความช่วยเหลือในการวิจัย ความดีหรือประโยชน์ที่จะได้รับจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ บิดา มารดา อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ทรงคุณวุฒิ และผู้ให้การความช่วยเหลือทุกๆ ท่าน

นายวิณากร ที่รัก

ตุลาคม 2566

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์การวิจัย 3

กรอบแนวคิดการวิจัย 4

สมมติฐานการวิจัย 5

ขอบเขตการวิจัย 5

นิยามศัพท์เฉพาะ 6

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 7

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 8

ความสำคัญของข้าว และการปลูกข้าวในประเทศไทย 8

การแบ่งพันธุ์ข้าวตามการตอบสนองต่อช่วงแสง 9

ข้าวปทุมธานี 1 11

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 12

ความหมายของนาโนเทคโนโลยีและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ 13

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 19

การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการผลิตพืชและกลไกการทำงาน 24

การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าว 26

การดูดซับ เคลื่อนที่ และการสะสม อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์
ในพืชทั่วไปและในข้าว 30

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 33

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง 33

วิธีการศึกษาทดลอง 33

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล 40
ตอนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 40
ตอนที่ 2 การศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียม ในระยะต้นกล้าของข้าว 52
ตอนที่ 3 การศึกษาผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าว ในระยะการเจริญเติบโตและการเก็บเกี่ยวผลผลิต 96
บทที่ 5 สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 187
สรุปการวิจัย และอภิปรายผล 187
สรุปภาพรวมในการดำเนินการวิจัย 208
ข้อเสนอแนะ 209
บรรณานุกรม 210
ภาคผนวก 227
ประวัติผู้วิจัย 255

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ตารางแจกแจงร้อยละปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในแต่ละช่วงขนาด 45

ตารางที่ 4.2 ค่าขนาดเฉลี่ยโดยปริมาตร ค่าขนาดเฉลี่ยโดยจำนวน และค่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาด 48

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งมุมวัด (2-theta, องศา) ของกราฟการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มรังสีสูงสุด 6 อันดับแรกของอนุภาคนาโนไททาเนียมเปรียบเทียบกับตำแหน่งมุมมาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและดัชนีของมิลเลอร์ (Miller's indices) ของตำแหน่งมุม 51

ตารางที่ 4.4 อัตราการงอกของเมล็ดข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมง 53

ตารางที่ 4.5 ความสูงต้นของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 วัน 61

ตารางที่ 4.6 จำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 7 และ 9 วัน 65

ตารางที่ 4.7 สีใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 7 และ 9 วัน 68

ตารางที่ 4.8 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 71

ตารางที่ 4.9 อัตราการรอดตายข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 9 วัน 74

ตารางที่ 4.10 การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 76

ตารางที่ 4.11 การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 79

ตารางที่ 4.12 การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 81

ตารางที่ 4.13 การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 84

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.14 การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 87
ตารางที่ 4.15 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 90
ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลอง ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน 97
ตารางที่ 4.17 ความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน 100
ตารางที่ 4.18 สีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน 104
ตารางที่ 4.19 จำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน 107
ตารางที่ 4.20 ความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน 111
ตารางที่ 4.21 สีใบข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน 114
ตารางที่ 4.22 จำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน 117
ตารางที่ 4.23 วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและ เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 119
ตารางที่ 4.24 วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและ เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 122
ตารางที่ 4.25 น้ำหนักต้นสดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ หลังการเก็บเกี่ยว 124
ตารางที่ 4.26 น้ำหนักต้นแห้งไม่รวมรากของข้าวจากการแช่เมล็ดและ เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์หลังการเก็บเกี่ยว 126

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.27 จำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 129
ตารางที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 131
ตารางที่ 4.29 น้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 133
ตารางที่ 4.30 น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 136
ตารางที่ 4.31 ความยาวเมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 139
ตารางที่ 4.32 ความกว้างเมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 141
ตารางที่ 4.33 สีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*) การแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 143
ตารางที่ 4.34 สีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*) การแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 145
ตารางที่ 4.35 สีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*) การแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 147
ตารางที่ 4.36 ปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 149
ตารางที่ 4.37 ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 151
ตารางที่ 4.38 ปริมาณไขมันในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 153
ตารางที่ 4.39 ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 155

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.40 ปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 157
ตารางที่ 4.41 ปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 159
ตารางที่ 4.42 ปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 161
ตารางที่ 4.43 คุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน 162
ตารางที่ 4.44 การสะสมของธาตุสารหนู ปรอท แคดเมียม และไททาเนียมในดินก่อนและหลังการทดลองที่แช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน 165
ตารางที่ 4.45 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 30 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 168
ตารางที่ 4.46 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 90 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 171
ตารางที่ 4.47 การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 173
ตารางที่ 4.48 การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 176
ตารางที่ 4.49 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 178
ตารางที่ 4.50 การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน 181

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย 4
ภาพที่ 4.1 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยใช้กำลังขยาย 42
ภาพที่ 4.2 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยใช้กำลังขยาย 43
ภาพที่ 4.3 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้กำลังขยาย 44
ภาพที่ 4.4 กราฟ (ก, แกนตั้งด้านซ้าย) การกระจายของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคในแต่ละขนาด และ (ข, แกนตั้งด้านขวา) การกระจายสะสมของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดที่ระบุไว้ในแกนนอนของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในน้ำ 47
ภาพที่ 4.5 กราฟ (ก, แกนตั้งด้านซ้าย) การกระจายของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคในแต่ละขนาด และ (ข, แกนตั้งด้านขวา) การกระจายสะสมของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดที่ระบุไว้ในแกนนอนของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางในน้ำ 47
ภาพที่ 4.6 กราฟ (ก, แกนตั้งด้านซ้าย) การกระจายของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคในแต่ละขนาด และ (ข, แกนตั้งด้านขวา) การกระจายสะสมของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดที่ระบุไว้ในแกนนอนของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในน้ำ 48
ภาพที่ 4.7 กราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมวัด (2-theta) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดเล็กเปรียบเทียบกับตำแหน่งของจุดสูงสุดของความเข้มของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส 50
ภาพที่ 4.8 กราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมวัด (2-theta) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดกลาง เปรียบเทียบกับตำแหน่งของจุดสูงสุดของความเข้มของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส 50
ภาพที่ 4.9 กราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมวัด (2-theta) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดใหญ่เปรียบเทียบกับตำแหน่งของจุดสูงสุดของความเข้มของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส 51

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวปทุมธานี 1 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (A) 20-30 นาโนเมตร (B) 80-120 นาโนเมตร และ (C) 400-600 นาโนเมตร 93

ภาพที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (A) 20-30 นาโนเมตร (B) 80-120 นาโนเมตร และ (C) 400-600 นาโนเมตร 95

ภาพที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ใบ ราก และต้น ความสูง ค่าสีใบ จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และร้อยละเมล็ดสมบูรณ์ของข้าวปทุมธานี 1 ที่อายุ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (บน) 20-30 นาโนเมตร (กลาง) 80-120 นาโนเมตร และ (ใหญ่) 400-600 นาโนเมตร 185

ภาพที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ใบ ราก และต้น ความสูง ค่าสีใบ จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และร้อยละเมล็ดสมบูรณ์ของหอมมะลิ กข 105 ที่อายุ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (บน) 20-30 นาโนเมตร (กลาง) 80-120 นาโนเมตร และ (ใหญ่) 400-600 นาโนเมตร 186

บทที่ 1
บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทยและยังเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลกซึ่งมีผู้บริโภคมากกว่าสามพันล้านคน (Muthayya et al., 2014) ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตและส่งออกข้าวเป็นลำดับต้นๆ ของโลก เพราะประเทศไทยมีการพัฒนาวิธีการปลูกข้าวมาหลายพันปีพร้อมทั้งมีปัจจัยทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสม (Geographical Indications: GI) ในการผลิตข้าวอย่างไรก็ตามจากสภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง ความต้องการของผู้บริโภคที่สูงและเจาะจงมากขึ้น และมีการพัฒนาการผลิตของประเทศคู่แข่ง การผลิตข้าวในประเทศไทยจึงต้องพัฒนาให้ตอบรับกับความเปลี่ยนแปลง การศึกษาเทคนิควิธีการปลูกข้าวให้ได้ผลผลิตมากโดยใช้ต้นทุนน้อยลงจึงมีความสำคัญในการพัฒนารูปแบบการผลิตและศักยภาพของเกษตรกร เพื่อให้ประเทศไทยคงความเป็นผู้นำในฐานะผู้ผลิตข้าวที่สำคัญของโลกต่อไปอย่างยั่งยืน ในปัจจุบันการใช้ปุ๋ยเคมีเป็นวิธีการที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร แต่การใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณมากและไม่ถูกวิธีจะส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเกิดการสะสมในดินทำให้ดินเป็นกรดและเกิดการปนเปื้อนในแหล่งน้ำ นอกจากนี้การใช้ปุ๋ยเคมีส่งผลให้เกิดต้นทุนการผลิตสูง เกษตรกรจึงเริ่มหาแนวทางลดต้นทุนการผลิตโดยการใช้ปุ๋ยอินทรีย์ และน้ำหมักชีวภาพในกระบวนการผลิตที่มีต้นทุนต่ำกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี และนักวิจัยทางการเกษตรพยายามพัฒนาสารบางชนิดในรูปอนุภาคนาโนเพื่อเสริมประสิทธิภาพและใช้ทดแทนปุ๋ยเคมี การใช้อนุภาคนาโนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสนใจในการผลิตพืช (Fatima, Hashim, and Anees, 2021; Pestovsky and Martínez-Antonio, 2017; Raliya et al., 2018) โดยมีข้อดีคือสามารถใช้ในการเร่งการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิตของพืชหลากหลายชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีทั่วไป ประสิทธิภาพที่สูงของอนุภาคนาโนช่วยลดการตกค้างของสารเคมีในดินและน้ำ นอกจากนี้ อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติเฉพาะเจาะจงที่ได้ถูกออกแบบให้เป็นผลดีต่อพืชและไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่น เนื่องจากเทคโนโลยีการใช้อนุภาคนาโนทางการเกษตรเป็นศาสตร์ใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจมากขึ้น จึงควรมีการศึกษาเพื่อให้เกษตรกรในประเทศมีองค์ความรู้การใช้อนุภาคนาโนเพื่อเพิ่มผลผลิตและลดต้นทุนการผลิตให้สามารถแข่งขันกับประเทศอื่นได้

จุดเด่นของอนุภาคนาโนคือมีคุณสมบัติทางกายภาพ ทางเคมี และทางชีวภาพที่โดดเด่น กล่าวคืออนุภาคนาโนสามารถทำปฏิกิริยาต่างๆ ได้อย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าจะใช้ในปริมาณน้อย และมีคุณสมบัติที่แตกต่างกับสารที่ไม่ได้อยู่ในลักษณะอนุภาคนาโน อนุภาคนาโนที่มีธาตุอาหารหลัก รอง

หรือเสริมยังสามารถเคลื่อนย้ายผ่านเซลล์พืชได้อย่างดี ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้ คุณสมบัติเหล่านี้ของอนุภาคนาโนยังสามารถควบคุมได้ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ต่างๆ ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมี รูปร่าง และโครงสร้างของอนุภาคนาโนให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้ ในปัจจุบันมีการใช้อนุภาคนาโนหลากหลายประเภทในการเกษตร (Singh, Handa, and Manchanda 2021) อนุภาคนาโนหลายชนิดที่มีสารอินทรีย์และอนินทรีย์เป็นองค์ประกอบ สามารถทำหน้าที่เป็นปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพสูงหรือที่เรียกว่าปุ๋ยนาโน (Nano-fertilizer) โดยอนุภาคนาโนอนินทรีย์สามารถให้ธาตุอาหารแก่พืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ด้วยขนาดเล็กของอนุภาค พืชสามารถดูดซึมธาตุอาหารจากอนุภาคนาโนได้ดีกว่าธาตุอาหารจากปุ๋ยเคมีทั่วไป ในขณะที่อนุภาคนาโนอินทรีย์สามารถใช้ในการนำส่งฮอร์โมนพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน (Tarafdar, 2014) อนุภาคนาโนสามารถช่วยกำจัดปุ๋ยเคมีและโลหะที่ตกค้างในดินได้ (Ji et al., 2017) เพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและกระบวนการอื่นๆ ในระดับเซลล์พืช (Raliya et al., 2015) และสามารถกำจัดเชื้อโรคในพืชได้ (Wani and Shah 2012) แม้ว่าการใช้อนุภาคนาโนได้รับความสนใจมากขึ้น การศึกษาพัฒนาอนุภาคนาโนเพื่อการเกษตรอย่างเฉพาะเจาะจงยังมีอยู่ไม่มากนัก ส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยศึกษาการใช้อนุภาคนาโนทางวัสดุศาสตร์ที่พบว่าการควบคุมลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคนาโน ส่งผลต่อคุณสมบัติของอนุภาคนาโนและประสิทธิภาพการนำไปใช้ (Roduner, 2006) ดังนั้น การศึกษาผลของลักษณะทางกายภาพของอนุภาคนาโนต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว จึงเป็นสิ่งสำคัญในการนำอนุภาคนาโนไปใช้ในทางการเกษตรให้มีประสิทธิภาพโดยเฉพาะการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทางการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของพืชที่สำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศ

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นอนุภาคนาโนที่มีลักษณะเด่นในการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalyst) และเป็นวัสดุที่ไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ นิยมใช้ในส่วนผสมของอาหาร (Lim, Bae and Fong, 2018) ในปัจจุบันมีการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการเพาะปลูกพืชหลากหลายชนิด (Rodríguez-González, Terashima, and Fujishima, 2019) สำหรับการเพาะปลูกข้าวนั้น การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเด่นด้านเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงมีผลดีหลายประการ อาทิช่วยเร่งการเจริญเติบโตของต้นข้าว (Rizwan et al. 2019; Chutipaijit and Sutjaritvorakul, 2020) ช่วยเร่งการงอกของเมล็ดและการเติบโตของต้นกล้าข้าว (Andersen et al., 2016) และช่วยลดการสะสมของโลหะหนักในต้นข้าวและเมล็ดข้าว (Cai et al., 2017) อย่างไรก็ตามยังมีการค้นพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากเกินไปอาจเกิดความเป็นพิษได้เช่นกัน การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มากเกินไปจะลดการทำงานของเอนไซม์ดีไฮโดรจีเนส (dehydrogenase) ของจุลินทรีย์ในดินซึ่งส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตข้าว (Waani et al., 2021) งานวิจัยส่วนมากจึงศึกษาผลของปริมาณและรูปแบบการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการปลูกข้าว แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบถึงผลของขนาดอนุภาคและปริมาณของการใช้อนุภาคนาโน

ไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการปลูกข้าว ดังนั้น ด้วยเหตุที่ขนาดของอนุภาคนาโนส่งผลต่อคุณสมบัติเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ด้วยแสง งานวิจัยจึงศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณการใช้ต่อการเจริญเติบโตผลผลิตและคุณภาพผลผลิตข้าว เพื่อเพิ่มเติมองค์ความรู้และวิธีการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ให้เกิดประโยชน์ทางการเกษตรต่อไป

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

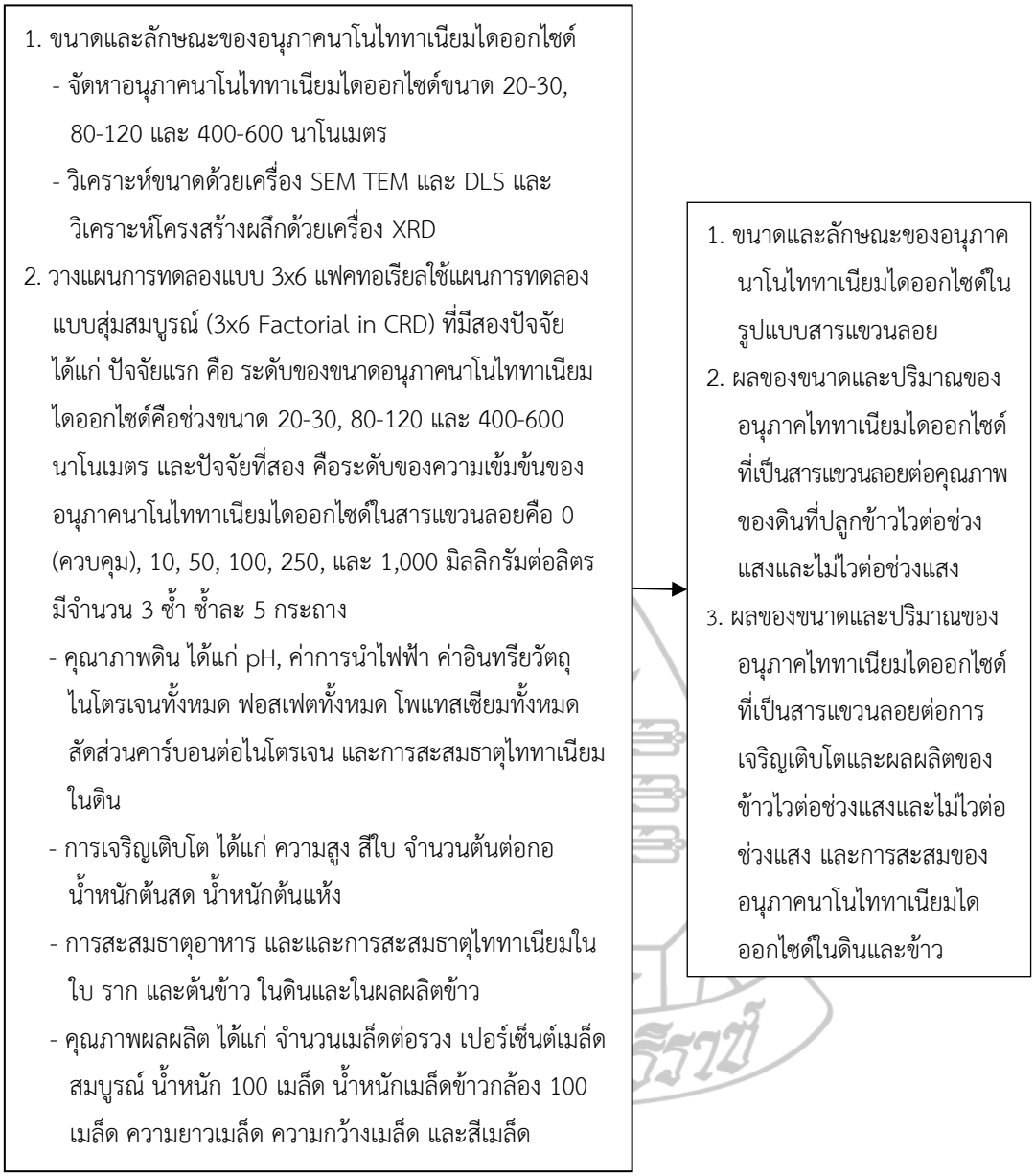
2.1 เพื่อศึกษาขนาดและลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบสารแขวนลอยในการนำมาใช้ประโยชน์กับพืช

2.2 เพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารแขวนลอยต่อคุณภาพของดินที่ปลูกข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสง

2.3 เพื่อศึกษาผลของขนาดและปริมาณของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่เป็นสารแขวนลอยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสง และการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในดินและข้าว

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

3. กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

4. สมมติฐานการวิจัย

สมมุติฐานของการวิจัยคือการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในขนาดและปริมาณที่เหมาะสมในการปลูกข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสงส่งผลต่อคุณภาพดิน การเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสง

5. ขอบเขตของการวิจัย

5.1 ขอบเขตด้านพื้นที่ งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาทดลองปลูกข้าวไวต่อช่วงแสง (ข้าวขาวดอกมะลิ 105) และไม่ไวต่อช่วงแสง (ข้าวปทุมธานี 1) ในกระถาง บริเวณพื้นที่อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

5.2 ขอบเขตด้านเนื้อหา ในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสง อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์อยู่รูปแบบของสารแขวนลอยในน้ำ ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ศึกษาเป็นขนาดที่นิยมใช้ในงานวิจัยต่างๆ ซึ่งคือช่วงขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ควบคุมได้ด้วยความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยซึ่งมีค่า 0 (ควบคุม), 10, 50, 100, 250 และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร การนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการปลูกข้าวจะอยู่ในรูปแบบการเทสารแขวนลอยลงในดิน ข้าวที่จะศึกษาคือข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในกระถางไม่เจาะรูขนาด 8 นิ้ว ในแปลงเปิด การวิจัยแบ่งเป็น 2 ขั้น ตอนโดยขั้นตอนแรก คือ การเตรียมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของอนุภาคและสารแขวนลอย ขั้นตอนที่สองคือการทดลองการนำสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในรูปแบบการเทลงดิน แล้ววิเคราะห์ผลของการใช้ต่อผลผลิต คุณภาพผลผลิต และการสะสมไททาเนียมในข้าว และขั้นตอนที่สองศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบการใส่ในดินว่ามีผลต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในช่วงเวลา 30, 90 และ 120 วัน โดย

ช่วงที่ 1 ระยะแตกกอ ที่ 30 วันหลังการปลูก ศึกษาการเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ และการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ช่วงที่ 2 ระยะตั้งท้อง ที่ 90 วันหลังการปลูก ศึกษา การเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ วันที่ออกรวง 50% และการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ช่วงที่ 3 ระยะก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต ที่ 120 วันหลังการปลูก ศึกษา 1) การเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ น้ำหนักต้นสด น้ำหนักต้นแห้ง (รวมรากและ

ไม่รวมราก) 2) การสะสมธาตุอาหารทั่วไป และและการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวในราก ต้น ใบ และดิน 3) วันที่เก็บเกี่ยวได้ 50% 4) คุณภาพผลผลิต ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ น้ำหนัก 100 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง 100 เมล็ดความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด สีเมล็ด (L* a* b*) ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว และ 5) การศึกษาคุณภาพเมล็ด (ข้าวกล้อง) ได้แก่ ความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด คุณค่าทางโภชนาการเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณแป้ง โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า แคลเซียม โพแทสเซียม และการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวกล้อง

5.3 ขอบเขตด้านเวลา เก็บรวบรวมข้อมูล และดำเนินการทดลอง ตั้งแต่เดือนมีนาคม 2565 ถึง เดือน เมษายน 2566

6. นิยามศัพท์เฉพาะ

6.1 อนุภาคนาโน (Nanoparticles) คือ อนุภาคที่มีขนาดในระดับนาโนเมตร

6.2 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide nanoparticles) คือ สารประกอบออกไซด์ของโลหะไททาเนียมที่ถูกทำให้มีขนาดเล็กเท่ากับ “เศษหนึ่งส่วนพันล้านส่วนของหนึ่งเมตร” การสังเคราะห์แบบการตกตะกอน และแบบโซลเจล (Sol-gel) ได้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบโครงสร้างผลึกอนาเทส (Anatase)

6.3 ขนาดอนุภาค คือ ขนาดของแต่ละอนุภาคของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยกำหนดขนาดด้วยเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลของทรงกลม

6.4 เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic light scattering) คือ เทคนิคการวัดขนาดของอนุภาคในของเหลวโดยวัดความเข้มแสงที่กระเจิงจากสารแขวนลอย

6.5 L*a*b คือ การนิยามสีที่ใช้ในการวัดค่าสี โดยนิยามนี้ได้ถูกรับรองโดย International Commission on Illumination โดยวัดค่าสี L* แทนค่าความสว่างสีขาวไปจนถึงสีดำ a* แทนค่าสีเขียวไปจนถึงสีแดง และ b* แทนค่าสีน้ำเงินไปจนถึงสีเหลือง โดยใช้วัดสีของเมล็ดข้าวเปลือกและเมล็ดข้าวกล้องในการศึกษานี้

6.6 คุณสมบัติดิน คือ ลักษณะของดินทางเคมี ได้แก่ pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าอินทรียวัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสเฟตทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน

6.7 การเจริญเติบโต คือ การเจริญเติบโตของต้นข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสงตั้งแต่ย้ายกล้าปลูกในกระถางจนกระทั่งเก็บเกี่ยว ในด้านความสูง สีใบ จำนวนต้นต่อกอ น้ำหนักต้นสด น้ำหนักแห้งต้น

6.8 คุณภาพผลผลิต คือ คุณภาพและปริมาณข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสงในระยะเก็บเกี่ยว ได้แก่จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ น้ำหนัก 100 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง 100 เมล็ดความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด สีเมล็ด (L* a* b*) ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว

6.9 การศึกษาคุณภาพเมล็ด คือ คุณภาพเมล็ดข้าวกล้องของข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสงหลังการเก็บเกี่ยวและอยู่ในสภาพแห้ง ได้แก่ ความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด คุณค่าทางโภชนาการเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณแป้ง โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า แคลเซียม โพแทสเซียม และการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวกล้อง

7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

7.1 ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดอนุภาคและปริมาณที่เหมาะสมต่อการปลูกข้าวปทุมธานี 1 และข้าวดอกมะลิ 105 เพื่อการเจริญเติบโต ผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของข้าวที่สูงขึ้น

7.2 เกษตรกรหรือผู้ที่สนใจสามารถนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการปลูกข้าวและพืชอื่นๆ ได้

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการใช้ไฟล์ template ไฟล์นี้เพื่อใช้ในการเขียนวิทยานิพนธ์ โดยแบ่งเนื้อหาเป็นส่วนย่อยเพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ มีขั้นตอนในการใช้งาน โดยผู้ใช้งานสามารถทำการแก้ไขเอกสารชุดนี้เป็นวิทยานิพนธ์ได้เลย เนื่องจากได้ทำการตั้งค่ารูปแบบกระดาษ และตัวอักษรให้พร้อมใช้งานแล้วเพียงแค่เลือกให้ถูกต้องตามรูปแบบ โดยมีขั้นตอนในการใช้งานและเตรียมการดังต่อไปนี้

บทที่ 2
วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณการใช้ต่อคุณภาพดิน การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว มีวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ การศึกษาความสำคัญของข้าวและการปลูกข้าวในประเทศไทย การแบ่งพันธุ์ข้าวตามการตอบสนองต่อช่วงแสง ข้าวปทุมธานี 1 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ความหมายของนาโนเทคโนโลยีและการใช้ประโยชน์ด้านต่างๆ ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการเกษตรและการผลิตข้าว ดังนี้

1. ความสำคัญของข้าว และการปลูกข้าวในประเทศไทย

ข้าวเป็นอาหารหลักของคนไทยและยังเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของอีกกว่า 17 ประเทศในเอเชียแปซิฟิก ประเทศในทวีปอเมริกาเหนือและอเมริกาใต้ 9 ประเทศ และประเทศในทวีปแอฟริกาอีก 8 ประเทศ (Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2004) ในทั่วโลกมีผู้บริโภคมากกว่าสามพันล้านคน ซึ่งเป็นการบริโภคที่มากกว่าข้าวสาลีและข้าวโพด (Muthayya et al., 2014) ประเทศไทยเป็นประเทศที่ผลิตและส่งออกข้าวเป็นลำดับต้นของโลก เพราะประเทศไทยมีปัจจัยทางภูมิศาสตร์ที่เหมาะสม (GI) ในการผลิตข้าวและมีการพัฒนาวิธีการปลูกข้าวมาหลายพันปี โดยได้ค้นพบหลักฐานของวัฒนธรรมการรับประทานและปลูกข้าวในประเทศไทย จากภาชนะที่มีรอยประทับของเมล็ดข้าวและแกลบข้าวในแหล่งโบราณคดีโนนนกทาจังหวัดขอนแก่น โดยพบว่ามีอายุอย่างน้อย 4,000 ปี (Khush, 1997) จากประชากรของโลกที่เพิ่มขึ้นจึงมีความต้องการการบริโภคข้าวที่เพิ่มสูงขึ้น การพัฒนากระบวนการและเทคนิคการผลิตข้าวจึงมีความสำคัญเพื่อที่จะสามารถตอบสนองอุปสงค์ที่มากขึ้น นอกจากนี้การพัฒนาพันธุ์ข้าวเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตข้าวพันธุ์ข้าวที่พัฒนาให้มีผลผลิตและคุณภาพผลผลิตที่สูง และเป็นข้าวที่ตรงกับความต้องการของผู้ผลิตและผู้บริโภค โดยมีความต้านทานต่อโรคแมลงและมีความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในแต่ละพื้นที่ท้องถิ่นซึ่งช่วยลดต้นทุนการผลิตข้าวได้เป็นอย่างดี โดยในปีพ.ศ. 2558 นั้น กองวิจัยและพัฒนาข้าว กรมการข้าว ได้ดำเนินงานพัฒนาพันธุ์ข้าวทั้งหมด 138 พันธุ์และได้นำพันธุ์ข้าวเหล่านี้ไปให้เกษตรกรไทยปลูกตามพื้นที่ที่เหมาะสม โดยที่พันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกในประเทศไทย ได้แก่ ข้าวหอมมะลิพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 และ กข15 ซึ่งเป็นข้าวไวต่อช่วงแสง ซึ่งปลูกได้ผลดีในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของ

ประเทศไทย ส่วนข้าวที่นิยมปลูกซึ่งมีความใกล้เคียงกับข้าวขาวดอกมะลิ 105 คือ ข้าวปทุมธานี 1 ที่นิยมปลูกในเขตพื้นที่ชลประทาน โดยเฉพาะภาคกลางเป็นข้าวไม่ไวต่อช่วงแสงปลูกได้ตลอดทั้งปี ข้าวปทุมธานี 1 จึงเป็นข้าวอีกชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญในการปลูกเพื่อบริโภคในประเทศและส่งออก (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559ก)

2. การแบ่งพันธุ์ข้าวตามการตอบสนองต่อช่วงแสง

การเลือกพันธุ์ข้าว ผู้ผลิตข้าวต้องเลือกให้เหมาะสมตามภูมิศาสตร์ของตน ในการเลือกต้องคำนึงถึงช่วงแสง เนื่องจากระยะความยาวของกลางวันมีอิทธิพลต่อการออกดอกของต้นข้าว ดังนั้น การแบ่งพันธุ์ข้าวจึงใช้ระยะความยาวของกลางวันเป็นหลัก หรือการตอบสนองต่อช่วงแสงแตกต่างกัน การแบ่งพันธุ์ข้าวจึงนิยมแบ่งตามการตอบสนองต่อช่วงแสง แบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ พันธุ์ข้าวไวต่อช่วงแสง และพันธุ์ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง

2.1 พันธุ์ข้าวไวต่อช่วงแสง (Photo-sensitive Varieties)

ข้าวกลุ่มนี้ออกดอกเฉพาะในเดือนที่มีความยาวของกลางวันสั้น หรือกลางวันมีความยาว 12 ชั่วโมง และกลางคืนมีความยาว 12 ชั่วโมง ฉะนั้น กลางวันที่มีความยาวน้อยกว่า 12 ชั่วโมง ก็ถือว่าเป็นวันสั้นและกลางวันที่มีความยาวมากกว่า 12 ชั่วโมง ก็ถือว่าเป็นวันยาว และพบว่าข้าวที่ไวต่อช่วงแสงเริ่มสร้างช่อดอกและออกดอกเดือนที่ความยาวกลางวันประมาณ 11 ชั่วโมง 40 นาที หรือสั้นกว่านี้ ดังนั้น ข้าวที่ออกดอกเดือนที่มีความยาวของกลางวัน 11 ชั่วโมง 40-50 นาที จึงเป็นข้าวที่มีความไวน้อยต่อช่วงแสง (Less sensitive photoperiod) และพันธุ์ที่ออกดอกเฉพาะในเดือนที่มีความยาวของกลางวันประมาณ 11 ชั่วโมง 10-20 นาที ก็ได้ชื่อว่าเป็นพันธุ์ที่มีความไวมากต่อช่วงแสง (Strongly sensitive photoperiod) ดังนั้น นักวิทยาศาสตร์ จึงเรียกข้าวชนิดนี้ว่า พืชวันสั้น (Short-day plant) พันธุ์ข้าวในประเทศไทยที่เป็นพันธุ์พื้นเมือง ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ที่มีความไวต่อช่วงแสง โดยเฉพาะข้าวที่ปลูกเป็นข้าวนาเมืองหรือข้าวขึ้นน้ำ การปลูกข้าวพวกที่ไวต่อช่วงแสงต้องปลูกในฤดูนาปี (โดยอาศัยน้ำฝน บางครั้งจึงเรียกว่า ข้าวนาน้ำฝน) เพราะในฤดูนาปรังกลางวันมีความยาวมากกว่า 12 ชั่วโมง เดือนที่มีกลางวันสั้นที่สุด ได้แก่ เดือนธันวาคม และเดือนที่มีกลางวันยาวที่ได้สุด ได้แก่ เดือนมิถุนายน ความยาวของกลางวันเริ่มสั้นจนมากพอที่ทำให้ข้าวกลุ่มไวต่อช่วงแสงออกดอก นั้นคือ วันในเดือนกันยายน ตุลาคม พฤศจิกายน และธันวาคม ข้าวที่มีความไวน้อยต่อแสงออกดอกในเดือนกันยายน ตุลาคม ซึ่งเรียกว่า ข้าวเบาหรือข้าวดอ ข้าวที่ออกดอกในเดือนพฤศจิกายน เรียกว่าข้าวกลาง และข้าวที่ออกดอกในเดือนธันวาคม มกราคม เรียกว่าข้าวหนัก ด้วยเหตุนี้ ข้าวกลุ่มที่ไวต่อช่วงแสงจะออกดอกในเดือนดังกล่าวนี้เท่านั้น ไม่ว่าปลูกในเดือนอะไรก็ตามจึงมีระยะการเจริญเติบโตมากพอสมควร

เนื่องจากข้าวกลุ่มไวต่อช่วงแสงจะออกดอก เฉพาะในเดือนที่มีความยาวของกลางวันที่ต้องการเท่านั้น ข้าวกลุ่มไวต่อช่วงแสงจึงมีประโยชน์สำหรับชาวนาในบางท้องที่ เช่นในจังหวัดต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีฝนตกไม่สม่ำเสมอ ซึ่งหมายความว่าบางปีฝนก็มาเร็วและบางปีฝนก็มาล่า แต่การสิ้นสุดของฤดูฝนนั้นค่อนข้างแน่นอน ปกติในภาคตะวันออกเฉียงเหนือหมดฤดูฝนในต้นเดือนพฤศจิกายน เพราะฉะนั้นการปลูกข้าวด้วยพันธุ์ที่ไวต่อช่วงแสง และเป็นข้าวเบาหรือข้าวกลาง ถึงแม้จะปลูกล่ากว่าปกติ ก็จะออกดอกให้เก็บเกี่ยวได้ แต่ผลิตผลอาจลดลง นี่คือข้อดีของข้าวที่มีความไวต่อช่วงแสง (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม 3, 2527) ข้าวที่ไวต่อช่วงแสง ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ข้าวหอมมะลิแดง ข้าวสังข์หยดพัทลุง ข้าว กข15 ข้าวเจ้าหอมพิษณุโลก 1 ข้าวหอมดง ข้าวพญาลืมแกง ข้าวเหลืองปะทิว ข้าวกล่ำน้อย และ กข45 เป็นต้น

2.2 พันธุ์ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง (Nonphoto-sensitive Varieties)

การออกดอกของข้าวกลุ่มนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวของกลางวัน เมื่อต้นข้าวมีระยะเวลาการเจริญเติบโตครบตามกำหนด ต้นข้าวก็ออกดอกทันทีไม่ว่าเดือนนั้นมีกลางวันสั้นหรือยาว เช่น พันธุ์ข้าว กข1 เป็นพันธุ์ที่ไม่ไวต่อช่วงแสง เมื่อมีอายุเจริญเติบโตนับจากวันตกกล้าครบ 90-100 วัน ต้นข้าวก็จะออกดอก ฉะนั้น พันธุ์ข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง จึงใช้ปลูกได้ผลดีทั้งในฤดูนาปรังและนาปี อย่างไรก็ตาม พวกไม่ไวต่อช่วงแสงมักจะให้ผลิตผลสูงเมื่อปลูกในฤดูนาปรัง (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม 3, 2527) ข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสง ได้แก่ ข้าวปทุมธานี 1 ข้าวหอมรังสิต ข้าวเจ้าหอมคลองหลวง 1 ข้าวเจ้าหอมสุพรรณบุรี ข้าว กข33 ข้าวไรซ์เบอร์รี ข้าว กข43 และข้าวสุรินทร์1 เป็นต้น

ปกติระยะการเจริญเติบโตของต้นข้าวทั้งไวและไม่ไวต่อช่วงแสง แบ่งออกเป็น 2 ระยะ ดังนี้ ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้น (Basic vegetative growth phase) เป็นระยะเวลานับตั้งแต่วันตกกล้าจนถึงวันที่แตกกอและต้นสูงเต็มที่ ในระยะนี้ ต้นข้าวมีการเจริญเติบโตทางความสูงและแตกเป็นหน่อใหม่จำนวนมาก และระยะการสร้างช่อดอก (Panicle initiation phase) เป็นระยะเวลาที่ต้นข้าวเริ่มสร้างช่อดอกจนถึงรวงข้าวเริ่มโผล่ออกมาให้เห็น ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 วัน สำหรับพันธุ์ข้าวที่ไวต่อช่วงแสง อาจเรียกระยะนี้ว่า ระยะที่มีความไวต่อช่วงแสง (Photoperiod sensitive phase) ดังนั้น ข้าวที่ไวต่อช่วงแสงเมื่อได้ครบระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นแล้ว ต้นข้าวจะไม่สร้างช่อดอกจนกว่าต้นข้าวจะได้รับแสงช่วงที่ต้องการ ส่วนข้าวที่ไม่ไวต่อช่วงแสงจะเริ่มสร้างช่อดอกทันที หลังจากที่ต้นข้าวได้ครบระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นแล้ว ดังนั้น การปลูกในระยะเวลาที่ไม่เหมาะสมจึงทำให้พันธุ์ที่ไวต่อช่วงแสงมีเวลามากหรือ น้อยเกินไป สำหรับการเจริญเติบโตทางลำต้นโดยเฉพาะการใช้พันธุ์ที่ไวต่อช่วงแสงปลูกล่ากว่าปกติทำให้ต้นข้าวมีระยะเวลาน้อยไป ทำให้ได้ผลิตผลต่ำ (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม 3, 2527)

3. ข้าวปทุมธานี 1

ข้าวปทุมธานี 1 เป็นหนึ่งในข้าวเจ้าหอมพื้นนุ่มพันธุ์ไม่ไวต่อช่วงแสงที่ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี กรมการข้าวได้พัฒนาพันธุ์ขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2533 โดยเกิดจากการผสมระหว่างข้าวสายพันธุ์ BKNA6-18-3-2 กับข้าวสายพันธุ์ PTT85061-86-3-2-1 และ ได้รับรองสายพันธุ์จากคณะกรรมการวิจัยและพัฒนากรมวิชาการเกษตรในปี พ.ศ. 2543 ลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวปทุมธานี 1 ได้แก่ เป็นข้าวที่มีความสูงประมาณ 104-133 เซนติเมตร ไม่ไวต่อช่วงแสง มีอายุเก็บเกี่ยวประมาณ 104-126 วัน และมีทรงกอตั้ง เมล็ดของข้าวปทุมธานี 1 มีระยะพักตัวประมาณ 3-4 สัปดาห์ ข้าวมีปริมาณแอมิโลส 15-19 เปอร์เซ็นต์ คุณภาพของข้าวปทุมธานี 1 มีความนุ่มเหนียวและมีกลิ่นหอมอ่อน ข้าวปทุมธานี 1 ให้ผลผลิตประมาณ 650-774 กิโลกรัมต่อไร่ จุดเด่นของข้าวปทุมธานี 1 คือ ข้าวที่มีผลผลิตสูง มีคุณภาพเมล็ดที่คล้ายกับพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีความต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล และเพลี้ยกระโดดหลังขาว และมีความต้านทานโรคไหม้ และโรคขอบใบแห้ง แต่ข้าวปทุมธานี 1 นั้นยังมีข้อควรระวังคือเป็นข้าวที่อ่อนแอต่อเพลี้ยจักจั่นสีเขียว โรคใบหงิก และโรคใบสีส้ม ข้าวปทุมธานี 1 มีความเหมาะสมต่อการปลูกในเขตชลประทานภาคกลาง (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559b) ด้วยคุณภาพที่สูง และความเหมาะสมของพื้นที่ ข้าวปทุมธานี 1 จึงเป็นที่นิยมสูงสุดในการปลูกข้าวทั้งในรูปแบบนาปี และนาปรังในจังหวัดปทุมธานี และจังหวัดเขตภาคกลาง (ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี, 2562)

นอกจากพันธุ์ข้าวปทุมธานี 1 กระบวนการวิธีการปลูกข้าวเป็นอีกหนึ่งปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการผลิตข้าว การปลูกข้าวเริ่มต้นจากการเลือกพื้นที่ปลูกที่เหมาะสม พื้นที่ควรมีความอุดมสมบูรณ์ของดิน และมีแหล่งน้ำสำหรับการเพาะปลูกที่เพียงพอ เมล็ดข้าวที่จะใช้เพาะปลูกควรเก็บรักษาให้ไม่มีโรคและวัชพืช และถ้าหากจำเป็นสามารถนำมาแช่ในสารละลายฆ่าเชื้อแล้วล้างด้วยน้ำก่อนนำไปปลูก ในขั้นตอนการเตรียมดินเพื่อการสร้างสภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของข้าวและช่วยควบคุมศัตรูพืช ขั้นตอนการเตรียมดินขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน และปัจจัยแวดล้อมอื่นๆ ซึ่งอาจใช้การไถดะ ไถแปร คราด หรือการทำเทือก เป็นต้น โดยในพื้นที่ภาคกลางเขตชลประทานนิยมการไถย่ำเทือก การลงต้นกล้าข้าวปทุมธานี 1 สามารถใช้การปักดำเมื่อต้นกล้ามีอายุประมาณ 20-30 วัน และควรมีการควบคุมระดับน้ำเพื่อลดจำนวนวัชพืช ระยะห่างระหว่างต้นกล้าขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน และปริมาณของปุ๋ยที่จะใส่ อาทิ ในการปลูกแบบอินทรีย์มักนิยมให้มีระยะห่างระหว่างต้นและแถวประมาณ 20 เซนติเมตร และ มีจำนวนต้นกล้า 3-5 ต้นต่อกอ ถ้าปลูกแบบประณีตนิยมใช้เพียง 1 ต้น แต่เหมาะกับการวิจัยมากกว่าการปลูกของเกษตรกร ในกรณีที่ปลูกข้าวในช่วงที่ไม่ตรงกับเวลาที่เหมาะสมของพันธุ์หรือมีปัญหาขาดแคลนแรงงาน อาจใช้วิธีการปลูกอื่น เช่น การหว่านข้าวแห้ง หรือหว่านน้ำตม เมื่อข้าวปทุมธานี 1 เริ่มเจริญเติบโตควรมีเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดินเพื่อทดแทนธาตุอาหารที่ต้นข้าว

ใช้ในการเจริญเติบโต โดยใช้ปุ๋ยประเภทต่างๆ เช่น การใช้ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และอนุภาคนาโนก็สามารถใช้เพื่อเพิ่มแร่ธาตุที่จำเป็นต่อข้าวได้ การจัดการน้ำยังเป็นประเด็นสำคัญไม่น้อยกว่าการดูแลดิน ในระยะปักดำถึงระยะแตกกอควรรักษาระดับน้ำให้อยู่ที่ประมาณ 5 เซนติเมตร และหลังจากนั้นควรคงระดับไว้ปริมาณ 5-15 เซนติเมตร ก่อนระยะเก็บเกี่ยว 7-10 วัน ควรระบายน้ำออกเพื่อให้ข้าวสุกพร้อมกัน และเพื่อให้สามารถเก็บเกี่ยวได้สะดวก ระหว่างการปลูกควรมีการป้องกันและกำจัดศัตรูพืชด้วยวิธีกล เช่น การใช้แสงไฟล่อแมลง วิธีเคมี เช่น การพ่นสารสกัดจากพืชที่มีฤทธิ์กำจัดแมลง หรือสารชีวภัณฑ์อื่นๆ เป็นต้น การเก็บเกี่ยวควรปฏิบัติหลังข้าวออกดอกประมาณ 28-30 วัน โดยสามารถสังเกตได้ในระยะพลับพลึงของข้าวปทุมธานี 1 ซึ่งเมล็ดในรวงที่ข้าวสุกแก่เปลี่ยนเป็นสีฟาง เมื่อเก็บเกี่ยวแล้วควรนวดและตากข้าวเพื่อลดความชื้นเพื่อให้เก็บข้าวได้นานและเพื่อคงคุณภาพของข้าวไว้ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

4. ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวเจ้าหอมพื้นนุ่มพันธุ์ไวต่อช่วงแสง ปรับปรุงพันธุ์ในปี พ.ศ. 2493-2494 และคัดพันธุ์บริสุทธิ์ (Pure line selection) ในช่วงนี้เช่นกัน แล้วคณะกรรมการการพิจารณาพันธุ์ให้ใช้ขยายพันธุ์เป็นพันธุ์รับรอง เมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2502 ชื่อข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีลักษณะประจำพันธุ์ คือ ต้นข้าวสูง 140 เซนติเมตร ลำต้นสีเขียวจาง ใบสีเขียวยาวค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว ข้าวเปลือกสีฟาง อายุเก็บเกี่ยวประมาณปลายเดือนพฤศจิกายน เมล็ดข้าวเปลือก ยาว x กว้าง x หนา เท่ากับ 10.6 x 2.5 x 1.9 มิลลิเมตร เมล็ดข้าวกล้อง ยาว x กว้าง x หนา เท่ากับ 7.5 x 2.1 x 1.8 มิลลิเมตร ปริมาณแอมิโลส 12-17 เปอร์เซ็นต์ ผลผลิตประมาณ 363 กิโลกรัมต่อไร่ ลักษณะเด่น คือ ทนแล้งได้ดีพอสมควร ทนต่อสภาพดินเปรี้ยว และดินเค็ม เหมาะสำหรับปลูกในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือตอนบน ข้าวชนิดนี้ไม่ต้านทานต่อโรคใบสีส้ม โรคขอบใบแห้ง โรคไหม้ โรคใบหยิก และไม่ต้านทานต่อศัตรูพืชกลุ่มเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียว และหนอนกอ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559) ควรปลูกในนาน้ำฝน นาชลประทาน ในการปลูกข้าวขาวดอกมะลิ 105 การปลูกในเขตชลประทาน หรือนาน้ำฝนที่ไม่มีปัญหาเรื่องน้ำ ควรทำนาดำ หรือนาหว่านน้ำตมแผนใหม่ โดยนาดำเริ่มตกกล้าต้นเดือนกรกฎาคม ปักดำต้นเดือนสิงหาคม ข้าวจะออกดอกประมาณ 20 ตุลาคม และเก็บเกี่ยวได้ประมาณปลายเดือนพฤศจิกายน ถึงต้นเดือนธันวาคม ส่วนนาหว่านน้ำตมแผนใหม่ หว่านประมาณกลางเดือนกรกฎาคม ถึงปลายเดือนกรกฎาคม และเก็บเกี่ยวในช่วงปลายเดือนพฤศจิกายน และในพื้นที่ฝนตกน้อยหรือฝนล่า ควรทำนาหว่าน หรือนาหยอด ช่วงต้นเดือนกรกฎาคม ถึงปลายเดือนกรกฎาคม และเก็บเกี่ยวได้ในช่วงปลายเดือน

พฤศจิกายน โดยที่นาดำและนาหว่านน้ำตมแผนใหม่ ใช้เมล็ดพันธุ์ข้าว 7-12 กิโลกรัมต่อไร่ นาหว่านข้าวแห้ง ใช้เมล็ดพันธุ์ข้าว 10-20 กิโลกรัมต่อไร่ และนาหยอด ใช้เมล็ดพันธุ์ข้าว 8-10 กิโลกรัมต่อไร่ การใส่ปุ๋ย กรณีปุ๋ยเคมี นิยมใส่ 2 ครั้ง ได้แก่ ครั้งที่ 1 ใส่ก่อนปลูกไม่เกิน 1 วัน หรือหลังจากปลูกไม่เกิน 7-10 วัน หรือหลังจากงอก 20-25 วัน โดยใส่ปุ๋ยสูตร 16-20-0 หรือ 20-20-0 หรือ 28-22-0 หรือ 16-16-8 ในอัตรา 20-25 กิโลกรัมต่อไร่ และครั้งที่ 2 ใส่ก่อนข้าวออกดอกประมาณ 30 วัน (ประมาณ 20 กันยายนของทุกปี) โดยใส่ปุ๋ยสูตร 21-0-0 อัตรา 10-20 กิโลกรัมต่อไร่ หรือปุ๋ยสูตร 46-0-0 อัตรา 5-10 กิโลกรัมต่อไร่ หากใช้ปุ๋ยอินทรีย์ใช้ในรูปแบบไถกลบตอซังข้าวหลังเก็บเกี่ยว การไถพรวนแล้วหว่านเมล็ดพืชปุ๋ยสดด้วยโสนอัฟริกันถ้าเป็นสภาพนาลุ่ม ใช้ปอเทืองถ้าเป็นสภาพนาดอน ในอัตรา 5-7 กิโลกรัมต่อไร่ ไถกลบโสนอัฟริกันเมื่ออายุ 55 วัน และปอเทืองในระยะออกดอกและติดฝักอ่อน แล้วปล่อยให้ย่อยสลายในสภาพดินมีความชื้นสูง 1-2 สัปดาห์ หากความชื้นต่ำ 3-4 สัปดาห์ ก่อนการปลูกข้าว หรือการเข้าน้ำ หากใช้ปุ๋ยคอก หรือปุ๋ยหมักใช้ในอัตรา 500-1,000 กิโลกรัมต่อไร่ พร้อมไถกลบก่อนการปักดำ 15-20 วัน (กาญจนา, 2558)

การปลูกข้าวทั้งกลุ่มไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสง เป้าหมายสูงสุดคือการให้ได้ผลผลิตมากที่สุด เกษตรกรและนักวิชาการเกษตรด้านข้าว จึงหาวิธีการต่างๆ เพื่อให้บรรลุเป้าหมาย ในการผลิตนักวิชาการจึงทำการศึกษาวิจัยทั้งด้านรูปแบบการผลิตที่เหมาะสมจำเพาะต่อพื้นที่ปลูก การจัดการน้ำภาคการเกษตร ระบบเกษตรน้ำน้อย เกษตรแม่นยำ และการจัดการดินและปุ๋ยเพื่อให้เหมาะสม ซึ่งปุ๋ยเป็นปัจจัยสำคัญ เพราะว่าปุ๋ยคือธาตุอาหารที่พืชใช้เพื่อการเจริญเติมโต นักวิจัยและนักวิชาการเกษตร จึงทดลองการใช้ปุ๋ยเพื่อการผลิตพืช ไม่ว่าจะเป็นปุ๋ยเคมี เคมีอินทรีย์ และปุ๋ยอินทรีย์ ทั้งวิธีการใช้ปุ๋ยแบบสั่งตัด การให้ตามความต้องการของพืช และนักวิจัยยังสังเคราะห์ธาตุอาหาร สารเสริมประสิทธิภาพการผลิต และปัจจัยการผลิตให้อยู่ในรูปอนุภาคนาโน เพื่อให้ดูดซึมเข้าระบบราก ต้นและใบง่ายขึ้น

5. ความหมายของนาโนเทคโนโลยีและการใช้ประโยชน์ด้านต่าง ๆ

5.1 ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

เมื่อปี พ.ศ.2502 (ค.ศ. 1959) ดร.ริชาร์ด ไฟน์แมน (Richard Feynman) เป็นคนแรกที่ได้กล่าวไว้ในการประชุม There’s plenty of room at the bottom เกี่ยวกับความเป็นไปได้ของนาโนเทคโนโลยี ต่อมาเมื่อ ปี พ.ศ. 2517 (ค.ศ. 1974) คำว่า นาโนเทคโนโลยี ได้ถูกบัญญัติขึ้นเป็นครั้งแรกโดย ศาสตราจารย์โนริโอะ ทานิกูชิ (Norio Taniguchi) ชาวญี่ปุ่น คำจำกัดความ นาโนสเกล (Nanoscale) หรือขนาดนาโน หมายถึง ขนาดในช่วง 1 นาโนเมตร (Nanometer: nm) ถึง 100 นาโนเมตร

(nm) โดยประมาณ ณยา วงษ์พูน และคณะ (2557) กล่าวว่า ประเภทของนาโนเทคโนโลยี อธิบายได้ดังนี้

5.1.1 วัตถุนาโน (Nano-object) หมายถึง วัตถุที่มี มิติภายนอก 1 มิติ หรือ 2 มิติ หรือ 3 มิติ อยู่ในระดับ นาโนสเกล หรือหมายถึง วัตถุที่มีมิติอย่างน้อยหนึ่งมิติอยู่ในระดับนาโนสเกล

5.1.2 วัสดุนาโน (Nanomaterial) หมายถึง วัสดุที่มีมิติภายนอกอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือวัสดุที่มีโครงสร้างภายในหรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล

5.1.3 อนุภาคนาโน (Nanoparticle) หมายถึง วัตถุนาโนที่มีมิติภายนอกทั้งสามมิติอยู่ในระดับนาโนสเกล หากอัตราส่วนด้านยาวต่อด้านสั้นของวัตถุมีค่ามากกว่า 3 ให้เรียกว่า เส้นใยนาโน หรือ แผ่นนาโน แทน อนุภาคนาโน

5.1.4 วัสดุนาโนจากการผลิต (Manufactured nanomaterial) หมายถึง วัสดุนาโนที่ผลิตขึ้นโดยให้มีคุณสมบัติหรือองค์ประกอบที่จำเพาะ สำหรับใช้ในวัตถุประสงค์ทางการค้า

5.1.5 วัสดุโครงสร้างนาโน (Nanostructure nanomaterial) หมายถึง วัสดุที่มีโครงสร้างภายในอยู่ในระดับนาโนสเกล หรือมีโครงสร้างพื้นผิวอยู่ในระดับนาโนสเกล

5.1.6 นาโนศาสตร์ (Nanoscience) หมายถึง วิทยาศาสตร์แขนงหนึ่งที่ศึกษาเกี่ยวกับอะตอม โมเลกุล และวัตถุในระดับนาโนเมตรเพื่อทำให้มีคุณสมบัติพิเศษขึ้น

5.1.7 นาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) หมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ ในการสังเคราะห์ จัดการ และควบคุมสารและวัสดุในระดับนาโนสเกล เพื่อใช้ประโยชน์จากคุณสมบัติหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับวัสดุหรือโครงสร้างระดับนาโน โดยคุณสมบัติหรือปรากฏการณ์ดังกล่าวของวัสดุหรือโครงสร้างระดับนาโนแตกต่างจากที่พบในวัสดุขนาดใหญ่

ตัวอย่างสารในระดับนาโน เพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจนขึ้น จึงมีการเปรียบเทียบขนาดของสิ่งต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ณยา วงษ์พูน และคณะ (2557) อธิบายดังนี้

กลุ่มนาโนแมททีเรียลในธรรมชาติ จากนิยาม คำว่า Nanoscale หมายถึง ต้องมีมิติอย่างน้อยหนึ่งมิติ น้อยกว่า 100 นาโนเมตร นั้นพบว่ามีสารหลายชนิดใน ธรรมชาติที่มีคุณสมบัติตรงตามนิยามนี้ เช่น ดีเอนเอ (Deoxyribonucleic acid: DNA) อาร์เอนเอ (Ribonucleic acid: RNA) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 นาโนเมตร และเอนไซม์เอทีพีซินเทส (ATP synthase) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 นาโนเมตร ตามลำดับ หรืออินฟลูเอนซาไวรัส ซึ่งโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 80-100 นาโนเมตร ส่วนฮีโมโกลบินในเซลล์ เม็ดเลือดแดง มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5.5 นาโนเมตร นอกจากนั้น ไฟบริน (Fibrin) ซึ่งเป็นองค์ประกอบใน กระดูก มีความกว้างประมาณ 1.5 นาโนเมตร หรือบริเวณ ปลายนิ้วของตุ๊กแก มีลักษณะเป็น Nanostructure จำนวนมาก เรียกว่า สปาทูลา (Spatula) ทำให้เท้าตุ๊กแก มีคุณสมบัติเป็นระบบยึดเกาะ (Gecko adhesive system) และเท้าไม่เปื้อนหรือเปียกน้ำเมื่อเดินในบริเวณต่างๆ

กลุ่มวัสดุนาโนสังเคราะห์องค์การเพื่อความร่วมมือทางเศรษฐกิจและการพัฒนา (Organization for Economic Co-operation and Development: OECD) ได้แจกแจงรายชื่อวัสดุนาโน ที่ถูกผลิตขึ้น ดังนี้ ฟลูเลอลีน (Fullerenes, C60) ซิงเกิลวอลล์คาร์บอน นาโนทิวป์ (Single-walled carbon nanotubes: SWCNTs) มัลติวอลล์คาร์บอนนาโนทิวป์ (Multi-walled carbon nanotubes: MWCNTs) อนุภาคนาโนเหล็ก (Iron nanoparticles) ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide: TiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium oxide: Al_2O_3) ซีเรียมออกไซด์ (Cerium oxide: CeO_2) ซิงค์ออกไซด์ (Zinc oxide: ZnO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon dioxide: SiO_2) เดนไดร์เมอร์ (Dendrimer) นาโนเคลย์ (Nanoclays) อนุภาคนาโนทองคำ (Gold nanoparticles) เซอร์โคเนียมไดออกไซด์ (Zirconium dioxide: ZrO_2) ไลโพโซม (Liposome) เอ็กโซโซม (Exosome) กรดโพลีแลคติคโคไกลโคลิก (poly (lactic-co-glycolic acid): PLGA) และโพลีเอทิลลีนไกลคอล (Polyethylene glycol: PEG) เป็นต้น

จึงสรุปได้ว่า นาโนเทคโนโลยี หมายถึงเทคโนโลยีการผลิต ออกแบบ ควบคุม และใช้วัสดุ โครงสร้าง และอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยอาศัยคุณสมบัติที่มีเฉพาะในวัสดุเหล่านี้หรือคุณสมบัติที่ดีกว่าวัตถุธรรมดา เพื่อมาประยุกต์ใช้ให้เป็นประโยชน์

5.2 การใช้ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยี

เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน (2563) กล่าวว่า ปัจจุบันนี้มีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในอุตสาหกรรม ทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากมายมหาศาล ไม่เพียงแต่ด้านการพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุ ยังรวมถึงการอนุรักษ์พลังงานงาน เช่น ใช้เป็นฉนวนกันความร้อน ความเย็น กักเก็บพลังงาน เพิ่มการสะท้อนแสง เป็นต้น ในประเทศสหรัฐอเมริกาพลังงาน 41 เปอร์เซ็นต์ พลังงานถูกใช้ในอาคาร ที่อยู่อาศัย สำนักงาน โดยพลังงานส่วนใหญ่สูญเสียไปกับความร้อน แสงสว่างและเครื่องปรับอากาศ เมื่อมีการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ก็จะสามารถลดปัญหาการใช้พลังงานได้อย่างมาก ตัวอย่างการประยุกต์ใช้อนุภาคนาโนในด้านต่างๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้านการแพทย์ ส่วนผสมในสินค้า ผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องสำอาง ทางด้านการทหาร ตัวเร่งปฏิกิริยา และด้านการบิน อวกาศและอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น และการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ด้านต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง (Construction) ด้านการแพทย์ (Medical System) เป็นส่วนผสมในสินค้า (Customer goods) อาหาร (Foods) เครื่องสำอาง (Cosmetics) การใช้ด้านการทหาร (Military) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ (Catalyst) ใช้ในการบินอวกาศ และอุตสาหกรรมยานยนต์ (Aerospace and vehicle manufacturers) ปัจจุบันอนุภาคนาโนถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Carbon nanotube: CNT) ไอรอนออกไซด์ (FeO) คอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) ซิลเวอร์ออกไซด์ (AgO) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) และ ควอนตัมดอท (Quantum dot) เป็นต้น (เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน, 2563)

นอกจากนี้อนุภาคนาโน หรือนาโนเทคโนโลยียังมีการนำมาให้ในภาคการเกษตรกรรม (Agriculture) ซึ่งการใช้ภาคการเกษตรกรรม อธิบายได้ดังนี้

5.3 การใช้ประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยีด้านเกษตรกรรม

ประชากรมนุษย์ในโลกที่เพิ่มขึ้น การทำเกษตรกรรมจึงจำเป็นต้องปรับตัวให้เข้ากับความต้องการอาหารที่มากขึ้น การทำเกษตรกรรมทั่วโลกกำลังประสบกับปัจจัยหลายๆ ด้าน ที่เป็นอุปสรรคต่อการผลิต ซึ่งภาวะโลกร้อนที่เกิดขึ้นทำให้มีความแปรปรวนของสภาพอากาศ ส่งผลให้ได้ผลผลิตลดลงจากการทำเกษตรกรรม และทำให้เกิดการแข่งขันการใช้พื้นที่ทางการเกษตรกรรมที่สูงขึ้น นอกจากนี้เกษตรกรทั่วโลกลดลงในหลายปีที่ผ่านมา และยังมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่อง (Godfray et al., 2010) ซึ่งเป็นอีกปัจจัยเสี่ยงที่อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารของโลก จากอุปสรรคเหล่านี้การนำเทคโนโลยีไปใช้ในการเกษตรกรรม เป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นในการเกษตรกรรม นาโนเทคโนโลยีเป็นเทคโนโลยีที่ใช้การควบคุมขนาดของวัสดุให้เล็ก เพื่อให้ได้คุณลักษณะที่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบวัสดุที่ไม่มีการควบคุมขนาด (Jr and Owens, 2003) ซึ่งสามารถลดการใช้วัสดุหรือเพิ่มประสิทธิภาพในการนำวัสดุเหล่านี้ไปใช้ ดังนั้น การนำนาโนเทคโนโลยีมาประยุกต์ในการทำเกษตรกรรมในหลายๆ ประเทศ (DeRosa et al., 2010) เช่นเดียวกันกับการนำเทคโนโลยีไปใช้ในศาสตร์อื่นๆ อาทิ การแพทย์ (Emerich and Thanos, 2003) อิเล็กทรอนิกส์ (Choi and Mody, 2009) และเครื่องสำอาง (Raj et al., 2012) เกษตรกร และหน่วยงานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องทั่วโลก และในประเทศไทยควรศึกษาพัฒนาการนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการเกษตรกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต และคุณภาพการผลิตในมิติต่างๆ

การนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้ในการทำเกษตรกรรมโดยทั่วไป มักอยู่ในรูปแบบอนุภาคนาโน (Nanoparticles) ซึ่งนำมาใช้เป็นปุ๋ยหรือที่เรียกกันว่าปุ๋ยนาโน (Nanofertilizer) เมื่อเปรียบเทียบการปุ๋ยประเภทอื่นที่นิยมใช้ ปุ๋ยนาโนมีข้อดีอยู่หลายประการ คืออนุภาคนาโนสามารถนำมาใช้ในการเกษตรได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ปริมาณที่น้อย เพราะขนาดที่เล็กของอนุภาคนาโนส่งผลให้พืชสามารถดูดซึมอนุภานาโนผ่านทางรากได้ดีกว่าปุ๋ยทั่วไป (Fatima, Hashim, and Anees, 2021; Zahra et al., 2015) นอกจากนี้ขนาดที่เล็กของอนุภาคนาโนส่งผลต่อกระบวนเมตาบอลิซึมของพืชได้ดีกว่าปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ทั่วไป (Zahra et al., 2017; Cai et al., 2017; Mahmoodzadeh, Aghili, and Nabavi, 2013) เนื่องจากที่ปุ๋ยนาโนสามารถถูกดูดซึมได้ดี และสามารถใช้ในปริมาณที่น้อย ปุ๋ยนาโนจึงมีการตกค้างในดินหรือในรูปแบบอื่นที่น้อยกว่าปุ๋ยอื่นทั่วไป ดังนั้น การใช้ปุ๋ยนาโนจึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีทั่วไป

นอกจากนี้ คุณสมบัติของปุ๋ยนาโนสามารถควบคุมและปรับแต่งได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างและทางเคมี เพื่อให้เข้ากับความต้องการของพืชแต่ละชนิด สภาวะการปลูกและความต้องการของเกษตรกร โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์อนุภาคนาโนที่สามารถควบคุมคุณลักษณะ

ทางเคมีและทางกายภาพได้อย่างแม่นยำ ได้แก่ การสังเคราะห์แบบใหญ่ไปเล็ก (Top-down) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนวัตถุขนาดใหญ่ให้มีขนาดที่เล็กลงในระดับนาโน และการสังเคราะห์แบบเล็กไปใหญ่ (Bottom-up) ซึ่งเป็นการจัดและเรียบเรียงอะตอมหรือโมเลกุลให้รวมกันเป็นวัสดุนาโน และเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการผลิตปุ๋ยนาโนให้มีคุณลักษณะที่ต้องการ (Nandini and Geetha 2021; Yoon et al., 2020) ดังนั้น การใช้ปุ๋ยนาโนสามารถเป็นส่วนหนึ่งของการเกษตรแม่นยำ (Precision agriculture) ซึ่งเป็นวิถีอนาคตของการทำเกษตรกรรม แม้ว่าในปัจจุบันราคาของปุ๋ยนาโนสูงกว่าราคาของปุ๋ยทั่วไป ปุ๋ยนาโนยังได้รับความนิยมจากเกษตรกรทั่วโลกมากขึ้น เพราะประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของปุ๋ยนาโนเมื่อเทียบกับปริมาณที่ใช้ และประสิทธิภาพการทำงานที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต รวมทั้งการแก้ปัญหาเฉพาะจุดได้รวดเร็วกว่า

จุดเด่นของอนุภาคนาโนมีการนำมาใช้ในการทำเกษตรกรรมในวัตถุประสงค์ที่หลากหลาย แต่วัตถุประสงค์หลักของการใช้อนุภาคนาโน ได้แก่ เพื่อเร่งและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช กำจัดแมลงและจุลชีพ และการกำจัดสารตกค้างที่เป็นพิษต่อพืชและมนุษย์นอกจากนี้การนำอนุภาคนาโนมาใช้ในวัตถุประสงค์อื่น เช่น การใช้เร่งการผสมเกษร ชะลอการเน่าของผลิตผล และการเพิ่มความทนเค็มของพืช (Raliya et al., 2018; Pestovsky and Martínez-Antonio, 2017)

การใช้อนุภาคนาโนเพื่อเร่งและส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช อนุภาคนาโนทำหน้าที่ในรูปแบบธาตุอาหารที่มีประสิทธิภาพสูงและสามารถใช้งานได้นานขึ้น มีการใช้อนุภาคนาโนเพื่อให้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมซึ่งจัดว่าเป็นธาตุอาหารหลัก จากงานวิจัยของประเทศศรีลังกา Kottegoda et al. (2017) พบว่าอนุภาคนาโนที่ทำมาจากยูเรีย และ สาร Hydroxyapatite ($Ca_5(PO_4)_3OH$) สามารถทำให้ใช้แร่ธาตุไนโตรเจนปริมาณน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยยูเรียทั่วไป งานวิจัยจากประเทศสหรัฐอเมริกาของ Liu and Lal. (2014) พบว่า อนุภาคนาโนขนาดประมาณ 16 นาโนเมตรที่ทำมาจาก hydroxyapatite และ เซลลูโลสสามารถเร่งการเจริญเติบโต และเพิ่มผลผลิตของถั่วเหลืองได้มากขึ้นร้อยละ 33 และ 18 ตามลำดับเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสทั่วไป งานวิจัยจากประเทศอิหร่านของ Sadati Valojai et al. (2021) พบว่า การใช้อนุภาคนาโนที่มีสารโพแทสเซียมคีเลตเป็นองค์ประกอบสามารถเพิ่มผลผลิตของข้าวได้มากขึ้นร้อยละ 12 ถึง 22 ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของข้าว อนุภาคนาโนสามารถใช้เพื่อให้ธาตุอาหารรองได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยจากประเทศบังกลาเทศของ Tarafder et al. (2020) พบว่า ปุ๋ยอนุภาคนาโนที่มีแคลเซียมไอออนเป็นองค์ประกอบสามารถลดการใช้ปุ๋ยได้ 100 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับปุ๋ยผสมทั่วไปโดยไม่ส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต งานวิจัยของ J. Tarafdar et al. (2014) พบว่า อนุภาคนาโนแมกนีเซียมออกไซด์ที่สังเคราะห์จากเห็ดราสามารถให้แร่แมกนีเซียมแก่ต้นสะตอได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโต และปริมาณการสะสมคลอโรฟิลด์ งานวิจัยจากอินเดียของ Krishi et al. (2018) พบว่า

การปลูกต้นถั่วลิสงโดยการใช้อนุภาคนาโนกำมะถันสามารถลดการใช้ปุ๋ยกำมะถันได้ร้อยละ 25 และเพิ่มการดูดซึมของธาตุกำมะถันของพืชเมื่อเปรียบเทียบการการใช้ปุ๋ยเคมีทั่วไป

อนุภาคนาโนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ธาตุอาหารเสริมที่จำเป็นต่อพืชได้เช่นกัน จากการศึกษาอนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์เพื่อให้แร่ธาตุสังกะสีแก่ต้นถั่วลิสงของ Prasad et al. (2012) พบว่า การใช้อนุภาคนาโนสังกะสีออกไซด์ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 26 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยเคมีสังกะสีคีเลต และลดปริมาณการใช้ปุ๋ยได้ 15 เท่า การศึกษาของ Saharan et al. (2016) พบว่า อนุภาคนาโนที่ทำมาจากทองแดงและไคโตซานในการปลูกข้าวโพดช่วยเร่งการเจริญเติบโตของต้นกล้าและเพิ่มความยาวของรากของต้นกล้า เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ปุ๋ยที่ได้จากการผสมคอปเปอร์ซัลเฟตกับไคโตซานโดยทั่วไป นอกจากนี้อนุภาคนาโนยังสามารถช่วยเร่งการเจริญเติบโตและเพิ่มผลผลิต แม้ว่าอนุภาคนาโนจะไม่มีธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง หรือธาตุอาหารเสริมเป็นองค์ประกอบ ตัวอย่างของอนุภาคนาโนเหล่านี้ คือ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ซีเรียมออกไซด์ (CeO) และอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) จากงานวิจัยในประเทศไทยของ Chutipaijit and Sutjaritvorakul (2020) พบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มน้ำหนักของผลผลิต ปริมาณสารหอม (2-AP) และปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระในข้าว จากการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนซีเรียมออกไซด์ร่วมกับอนุภาคนาโนอินเดียมออกไซด์ในการปลูกเธลเครส (Arabidopsis thaliana) พบว่า อนุภาคทั้งสองเพิ่มน้ำหนักต้นข้าว ปริมาณคลอโรฟิลล์ และปริมาณแอนโทไซยานินของต้นข้าวได้

ด้านโรคและแมลงที่เป็นศัตรูพืชสำคัญในการทำเกษตรกรรม เกษตรกรต้องให้ความสนใจในการกำจัด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายกับการผลิตและผลผลิต อนุภาคนาโนสามารถกำจัดโรคและแมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นและในปริมาณที่น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารเคมีทั่วไป (Pestovsky and Martínez-Antonio, 2017; Adisa et al., 2019) ส่งผลให้เกิดการลดต้นทุนและลดการสะสมสารพิษในระบบนิเวศน์ งานวิจัยชิ้นในประเทศอินเดียของ Gopal, Kumar, and Goswami (2012) พบว่า อนุภาคนาโนกำมะถันมีประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อราและตัวไรมากกว่าผงกำมะถันทั่วไปในท้องตลาด การศึกษาของ Saharan et al. (2016) พบว่า อนุภาคนาโนทองแดงและไคโตซานในปริมาณ 0.1% สามารถช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของเส้นใยและสปอร์ของเชื้อรา *Fusarium oxysporum* (ราโรคเหี่ยว) การศึกษาของ Marimuthu et al. (2013) พบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดประมาณ 10 นาโนเมตร ที่สังเคราะห์จากดอกรัก (*Calotropis gigantea*) สามารถใช้กำจัดดักแด้ของเห็บโค (*Boophilus microplus*) และเห็บ *Haemaphysalis bispinosa* ตัวโตเต็มไวได้ นอกจากนี้การศึกษาของ Scott-Fordsmand, Fraceto, and Amorim (2022) กล่าวว่าอนุภาคนาโนมีความเจาะจงหรือความเป็นเป็นพิษต่อศัตรูพืชเท่านั้น และไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตอื่นๆ ซึ่งอนุภาคนาโนประเภทนี้มีองค์ประกอบย่อยสามส่วน คือ ส่วนที่เป็นตัวล่อศัตรูพืชที่จำเพาะเจาะจง

(Lure: Semio-chemical) ส่วนสำหรับกักเก็บสารฆ่าศัตรูพืช (Box: Nanocarrier) ซึ่งจะปล่อยสารฆ่าออกมาเมื่อศัตรูพืชสัมผัสกับตัวล่อ และส่วนที่เป็นสารฆ่าศัตรูพืช (Kill: Pesticide)

นอกจากนี้ อนุภาคนาโนสามารถนำมาใช้เพื่อบำบัดการปนเปื้อนสารเคมีที่ใช้กำจัดศัตรูพืชและโลหะหนักในวัสดุปลูก และลดการสะสมของสารพิษในพืช (Tungittiplakorn et al., 2004; Zhao et al., 2016) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นอนุภาคนาโนที่นิยมใช้เนื่องจากมีคุณสมบัติทางการเร่งปฏิกิริยายาด้วยแสงที่เด่น เมื่อให้อนุภาคนาโนไททาเนียมกับต้นกล้าข้าวที่เพาะในดินที่มีสารแคดเมียมปนเปื้อน พบว่า มีการสะสมของแคดเมียมในต้นข้าวน้อยลง(Ji et al., 2017) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปรับแต่งด้วยประจุบวกของธาตุเรเนียม (Re^{3+}) สามารถนำมาใช้เพื่อย่อยสลายสารคาร์โบฟูแรน (Carbofuran) ที่ใช้ในยาฆ่าแมลงที่ตกค้างในดิน และใบของต้นมะเขือเทศ (Zeng et al., 2010) นอกจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ อนุภาคนาโนประเภทอื่นสามารถนำมาใช้ในการบำบัดสารพิษได้ เช่น อนุภาคนาโนโพลียูรีเทน (Polyurethane) สามารถใช้ในการบำบัดดินที่ปนเปื้อนสารฟีแนนทรีน (Phenanthrene) ซึ่งตกค้างจากการใช้สารเคมีกำจัดแมลง (Tungittiplakorn et al., 2004) การศึกษาของ R. K. et al. (2012) พบว่า อนุภาคนาโนเหล็กสามารถใช้ในการบำบัดดินที่มีสารมาลาไทออน (Malathion) ที่เป็นส่วนผสมของยาฆ่าแมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อนุภาคนาโนที่ใช้ในการทำเกษตรกรรมดังกล่าว เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนมีแนวโน้มเป็นที่สนใจในด้านเกษตรกรรมมากขึ้น เพราะอนุภาคนาโนมีคุณสมบัติเด่นและหลายด้าน และมีประสิทธิภาพสูงแม้ใช้ในปริมาณน้อย ดังนั้นในประเทศไทยจึงควรมีการศึกษาและวิจัยการใช้อนุภาคนาโนในการทำเกษตรกรรมให้มากขึ้น เพื่อประโยชน์ของเกษตรกรต่อไป

6. อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

6.1 สารไททาเนียมไดออกไซด์และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ไททาเทียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide) เป็นสารประกอบในกลุ่มอนินทรีย์ (Inorganic compound) ประกอบด้วยธาตุไททาเนียมที่อยู่ในกลุ่มโลหะทรานซิชันหมู่ที่ 4 และธาตุออกซิเจนที่อยู่ในกลุ่มอโลหะในหมู่ที่ 16 สูตรทางเคมีของไททาเนียมไดออกไซด์ คือ TiO_2 ซึ่งมีมวลโมเลกุล 79.866 กรัมต่อโมล ไททาเนียมไดออกไซด์มีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดอยู่ที่ 1,843 และ 2,972 องศาเซลเซียสตามลำดับ สารไททาเนียมไดออกไซด์มีอยู่ในธรรมชาติโดยทั่วไป (Haider, Jameel, and Al-Hussaini ,2019) ซึ่งอยู่ในลักษณะผงสีขาวที่ไม่มีกลิ่น และมีโครงสร้างทางผลึกในรูปแบบรูไทล์ (Rutile) อนาเทส (Anatase) โบรคไคท์ (Brookite) หรือไม่มีลักษณะโครงสร้างทางผลึกที่ชัดเจน (Amorphous) นอกจากนี้ ไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ขึ้นอาจมีโครงสร้างผลึกอื่นๆ ก็ได้ (Linsebigler, Lu,

and Yates, 1995) แต่ไม่นิยมใช้ไททาเนียมไดออกไซด์เป็นของแข็งที่ไม่ละลายในน้ำและมีความคงทนทางเคมี สารไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรคืออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ สารไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งในรูปแบบผงทั่วไปและรูปแบบอนุภาคนาโนต่างเป็นวัตถุดิบสำคัญในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย อาทิ อุตสาหกรรมการผลิตสี (Diebold, 2014) เครื่องสำอาง (Salvador et al., 2000) กระดาษ (Montazer and Pakdel, 2011) อิเล็กทรอนิคส์ (Bai and Zhou, 2014) การเกษตร (Rodríguez-González, Terashima, and Fujishima, 2019) และอาหาร (Skocaj et al., 2011) ส่งผลให้มีการผลิตไททาเนียมไดออกไซด์มากกว่า 8 ล้านตันทั่วโลกในปี พ.ศ. 2564 (U.S. Geological Survey, 2021) ดังนั้น ไททาเนียมไดออกไซด์จัดว่าเป็นสารที่มีความสำคัญอีกชนิดหนึ่งของโลก

สารไททาเนียมไดออกไซด์ทั่วไปยังไม่ได้รับความนิยมใช้ในทางการเกษตรมากนัก เพราะในดินมักมีธาตุไททาเนียมไดออกไซด์สะสมอยู่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภูมิภาคเขตร้อนชื้น การเติมผงไททาเนียมไดออกไซด์แบบทั่วไปมักส่งผลดีต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของพืชเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และการใส่ผงไททาเนียมไดออกไซด์แบบทั่วไปในปริมาณมากเกินไปจะเกิดความเป็นพิษขึ้นในพืชได้ ในทางกลับกันอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมในหลายภาคส่วน และได้มีการนำไปใช้ในการพัฒนาผลผลิตของพืชหลายชนิด เช่น แครรอท เชอรี่ ถั่วแขก ข้าวโพด และแตงกวา เป็นต้น โดยการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่เหมาะสมส่งผลให้เมล็ดงอกได้ดีขึ้น พืชสามารถดูดธาตุอาหารอื่นได้ดีขึ้น และพืชสามารถเกิดกระบวนการเผาผลาญได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อผลผลิตและคุณภาพผลผลิตของพืช (Rodríguez-González, Terashima, and Fujishima, 2019; Lyu et al., 2017)

6.2 คุณสมบัติและการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

สาเหตุที่มีการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์อย่างแพร่หลาย คือ คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาจากแสง (Photo catalyst) ที่โดดเด่นของไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเลต (Wold, 1993) ซึ่งคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาจากแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ถูกค้นพบครั้งแรกโดยนักวิทยาศาสตร์จากประเทศญี่ปุ่นที่พบว่า เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ที่เคลือบไว้บนขั้วไฟฟ้า สามารถแยกน้ำออกเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนได้ เมื่อได้รับแสงอัลตราไวโอเลตโดยที่ไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้า (Fujishima and Honda., 1972) จากการศึกษาการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ของ Fujishima and Honda (1972); Linsebigler, Lu, and Yates (1995); Chen and Mao (2007); Wold (1993) และ Salvador et al. (2000) สามารถสรุปขั้นตอนของปฏิกิริยาได้ดังนี้ เมื่อไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับโฟตอน (Photon) หรืออนุภาคของแสงที่มีพลังงานมากกว่าความกว้างของช่องว่างแถบพลังงาน (Electronic band gap) ระหว่างแถบเวเลนซ์ (Valence band) และแถบนำ (Conduction band) ไททาเนียมไดออกไซด์ดูดรับแสงและก่อให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนเคลื่อนจากแถบเวเลนซ์ไปยังแถบนำ

จากที่ไททาเนียมไดออกไซด์มีความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานเฉลี่ย 3.20 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งตรงกับความยาวคลื่นแสง 380 นาโนเมตร คือ ช่วงแสงอัลตราไวโอเลต การกระตุ้นอิเล็กตรอนนี้จึงเกิดขึ้นเมื่อแสงมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 380 นาโนเมตร เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปยังแถบนำบนพื้นผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ อิเล็กตรอนนี้จะสามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical) กับสารที่อยู่บนพื้นผิวที่ของไททาเนียมไดออกไซด์ เช่น น้ำ และสารอินทรีย์อื่นๆ ปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้ามักจะก่อให้เกิดอนุมูลอิสระออกซิเจน (Reactive oxygen species) ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์อันหลากหลายอาทิ การบำบัดน้ำ(American Public Health Association et al., 1989; Chaplin, Jing, and Nayak, 2016) การเร่งการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ (Rahman et al. 2016; Akila, Muthukumarasamy, and Velauthapillai, 2019) และการแยกน้ำด้วยแสง (Li et al., 2015)

คุณสมบัติทางการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีต่างๆ ของอนุภาคนาโน (Chen and Mao, 2007; Bai and Zhou, 2014; Haider, Jameel, and Al-Hussaini, 2019) เช่น ขนาดและพื้นที่ผิวของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ ความเข้มข้น อุณหภูมิ และความชอบน้ำของพื้นผิว (Hydrophilicity) ปัจจัยเหล่านี้ ขนาดของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่อยู่ในระดับนาโนเมตรถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญมาก เพราะขนาดระดับนาโนเมตรของอนุภาคส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่ถูกกักขังไว้ (Quantum confinement effects) ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแถบพลังงานของอนุภาค (Mills and Le Hunte, 1997; Alivisatos, 1996) และส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง กล่าวคืออนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กในระดับนาโนสามารถดูดซับแสงได้ดีกว่าไททาเทียมไดออกไซด์ทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์มีขนาดเล็กกว่า 10 นาโนเมตร (Braginsky and Shklover, 1999; Anpo et al., 1987) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานมากกว่าไททาเนียมไดออกไซด์ทั่วไป ซึ่งทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงมีศักยภาพการเกิดออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation-reduction potential หรือ Redox potential) ที่สูงขึ้น และส่งผลให้อิเล็กตรอนเหล่านี้ทำปฏิกิริยาทางเคมีได้เร็วและหลายหลายยิ่งขึ้น (Henglein, 1989; Bahnemann, Hilgendorff, and Memming, 1997) นอกจากนี้การใช้อนุภาคขนาดนาโนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของไททาเนียมไดออกไซด์ซึ่งทำให้เพิ่มอัตราการทำปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นและสารที่รับอิเล็กตรอน (Chen and Mao, 2007) ส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระออกซิเจนรวดเร็วขึ้น และทำให้อนุภาคขนาดนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงสูงขึ้น

ฉะนั้นการลดขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ให้เล็กลงมากขึ้น อาจส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพทางการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงในบางกรณีได้ จากงานวิจัยของ C.-C. Wang, Zhang, and Ying (1997) ในการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการกำจัดสารคลอโรฟอร์ม

ด้วยแสง พบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 11 นาโนเมตร มีประสิทธิภาพการกำจัดคลอโรฟอร์มที่สูงกว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 21 นาโนเมตร แต่เมื่อลดขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ให้น้อยลงไปอีกเป็น 6 นาโนเมตร กลับส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดคลอโรฟอร์มลดลง ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมที่สุดจึงขึ้นอยู่กับการนำไปใช้และสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ดังนั้น การศึกษาขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้

ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อคุณสมบัติทางการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง การควบคุมขนาดของนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงเป็นสิ่งสำคัญ การสังเคราะห์แบบโซลเจล (Sol-gel) เป็นกระบวนการสังเคราะห์ที่สามารถควบคุมขนาดและรูปพรรณสัณฐานของอนุภาค ได้และยังเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน จึงเป็นกระบวนการที่ได้ความนิยมในงานวิจัยต่างๆ (Malekshahi Byranvand et al., 2013; Khan, Javed, and Islam, 2018) กระบวนการสังเคราะห์แบบโซลเจลเป็นกระบวนการที่ใช้หลักการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) ในสารละลาย (Gupta and Tripathi 2012) ในกระบวนการสังเคราะห์โซลเจลเริ่มต้นด้วยการเตรียมสารละลายสารจำพวกไททาเนียมอัลคอกไซด์ (Titanium alkoxide, $Ti(OR_4)$) ในแอลกอฮอล์ ตัวอย่างของสารไททาเนียมอัลคอกไซด์ที่นิยมใช้ คือ ไททาเนียมไอโซเพอรอคไซด์ (Titanium isopropoxide) (Sundrarajan and Gowri, 2011; Fujishima, Rao, and Tryk, 2000) ไททาเนียมบิวทอคไซด์ (Titanium butoxide) (H. Yang et al. 2006; H. Wang et al., 2015) และไททาเนียมเตตระคลอไรด์ (Titanium tetrachloride) (Namin, Hashemipour, and Ranjbar 2008) สารเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) กับน้ำอาจมีกรด เบส หรือเกลือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดสารไททาเนียมไฮดรอกไซด์ (Titanium hydroxide, $Ti(OH)_4$) ในขั้นต่อไป สารไททาเนียมไฮดรอกไซด์เกิดการควบแน่น (Condensation) ซึ่งได้ไททาเนียมไดออกไซด์ในลักษณะที่เป็นอนุภาคขนาดเล็ก (Sol) และมีขนาดใหญ่ขึ้นถ้าปฏิกิริยาดำเนินการต่อ ในบางกรณีเมื่อตัวทำละลายระเหยหมด สามารถเกิดสารไททาเนียมไดออกไซด์ในลักษณะของแข็งที่เป็นเนื้อเดียว (Gel)

ขนาดของอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์จากการสังเคราะห์แบบโซลเจลสามารถควบคุมได้จากหลายปัจจัย (Sharma, Karn, and Pandiyan, 2014) เช่น ปริมาณและประเภทสารตั้งต้น ความเป็นกรดและด่าง การใช้สารเร่งปฏิกิริยาและอุณหภูมิซึ่งสามารถได้อนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ประมาณ 10 นาโนเมตร ถึง 25 ไมโครเมตร (Macwan, Dave, and Chaturvedi, 2011; Gupta and Tripathi, 2012; Khan, Javed, and Islam, 2018) ตัวอย่าง เช่น ในการวิจัยของ H. Yang et al. (2006) พบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเฉลี่ยประมาณ 20 นาโนเมตร ถูกสังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการโซลเจลที่ใช้สารละลายไททาเนียมบิวทอคไซด์ความเข้มข้น 50% โดยปริมาตรเป็นสารตั้งต้น แล้วเติมน้ำและกรดลงไปให้ค่า pH เท่ากับ 3 เพื่อเร่งปฏิกิริยาการควบแน่นในระยะเวลา 2 ชั่วโมง

จากนั้นนำสารที่ได้ไปเผาในเตาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และการวิจัยของ Vijayalakshmi and Rajendran (2012) สามารถสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเฉลี่ยประมาณ 9 นาโนเมตร จากการเตรียมสารตั้งต้นซึ่งเป็นสารไททาเนียมไอโซเพอรอคไซด์ในเอทานอล เมื่อเติมน้ำและกรดไนตริก เพื่อให้ได้สารแขวนลอยอนุภาค และเมื่อให้ความร้อนที่ 450 องศาเซลเซียส จะได้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ตามต้องการ

6.3 ความปลอดภัยและข้อควรระวังของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ความปลอดภัยในการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์กับมนุษย์ เช่น ทางอาหารและทางการเกษตรกรรมเป็นประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณา ไททาเนียมไดออกไซด์จัดเป็นสารที่เสถียรและได้รับการพิจารณาจากประเทศสหรัฐอเมริกาและประเทศอื่นๆ ว่าเป็นสารที่ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ (U.S Food and Drug Administration 2021) ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของสารเติมแต่งในอาหารทั่วโลกตั้งแต่ พ.ศ. 2497 จนถึงปัจจุบัน (Boutillier, Fourmentin, and Laperche, 2021; Geiss et al., 2020; Weir et al., 2012)โดยนิยมใช้เพื่อให้สีขาวในอาหาร องค์การอาหารและยาของประเทศสหรัฐได้บังคับไว้ที่ความเข้มข้นไททาเนียมไดออกไซด์ในอาหารไม่ควรเกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก

จากที่มีการใช้อนุภาคนาโนในอาหารที่มากขึ้น ประเทศฝรั่งเศสและสหภาพยุโรปจึงมีการทบทวนความปลอดภัยในการใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในการปรุงแต่งอาหารหลายครั้ง (EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS), 2016; Younes et al., 2021; Winkler et al., 2018; Jovanovi, 2015) ในสหภาพยุโรปสารไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ในการปรุงแต่งอาหารอยู่ในรูปแบบผงที่มีชื่อว่า E171 (Boutillier, Fourmentin, and Laperche, 2021) ในปี พ.ศ. 2555 องค์การอาหารและยาของสหภาพยุโรปได้กำหนดห้ามใช้ผง E171 เกินร้อยละ 1 ของน้ำหนักอาหาร ในปี พ.ศ. 2562 องค์การอาหารและยาของสหภาพยุโรปได้ยืนยันข้อกำหนดนี้แต่ได้แนะนำให้มีการศึกษาความปลอดภัยของการใช้สารไททาเนียมไดออกไซด์ในอาหาร (EFSA (European Food Safety Authority) 2019) และ ในปี พ.ศ. 2564 สหภาพยุโรปได้กำหนดยกเลิกการใช้ E171 ในการปรุงแต่งอาหารเนื่องจากมีการวิจัยที่ชี้ว่ายังไม่มีหลักฐานที่ยืนยันว่าสารไททาเนียมไดดอกไซด์ปลอดภัยต่อทารกในครรภ์ (Younes et al., 2021) อย่างไรก็ตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรปยังเป็นข้อถกเถียงกันอย่างมาก เพราะยังไม่มีงานวิจัยที่บ่งชี้อย่างแน่ชัดว่าไททาเนียมไดออกไซด์เป็นพิษต่อมนุษย์ (Boutillier, Fourmentin, and Laperche, 2021) และประเทศอื่นๆ ที่ไม่ได้เป็นสมาชิกสหภาพยุโรปยังคงใช้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในการเติมแต่งอาหารเช่นเดิมรวมทั้งประเทศไทย

7. การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการผลิตพืชและกลไกการทำงาน

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีคุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปแบบพลังงานประจุไฟฟ้าหรือพลังงานเคมี จึงมีการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มาใช้เพื่อสร้างการสังเคราะห์ด้วยแสงเทียม และเร่งการสังเคราะห์แสงในพืช ในการวิจัยต่างๆ ศึกษาการใช้คุณสมบัติของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อการทำเกษตรกรรม เกี่ยวกับการเร่งการงอกของเมล็ด การเจริญเติบโตของพืช การกำจัดศัตรูพืช การย่อยสลายย่าฆ่าแมลง และการทำความสะอาดน้ำ (Y. Wang et al., 2016) การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะอยู่ในรูปแบบผง (Boonyanitipong et al., 2011) หรือสารแขวนลอย (Ji et al. 2017) โดยให้ผ่านทางดิน (Zahra et al. 2017) หรือทางใบ (Lian et al., 2020) ในการวิจัยต่างๆ มีการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกพืชหลายชนิด เช่น ข้าว (Rizwan et al., 2019) ข้าวสาลี (Larue et al., 2012) ปวยเล้ง (Linglan et al., 2008) ถั่วเขียว (Raliya, Biswas, and Tarafdar, 2015) และแตงโม (W.-N. Wang, Tarafdar, and Biswas, 2013) ผลการวิจัยพบว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถเพิ่มน้ำหนักของพืชและปริมาณผลผลิต เพิ่มปริมาณคลอโรฟิลล์เร่งการสังเคราะห์แสง คุณค่าทางโภชนาการของผลผลิต และช่วยการงอกของเมล็ด ทั้งนี้ผลดีของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับปัจจัยที่หลากหลาย เช่น ปริมาณการใช้และขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างเป็นระบบ และยังไม่มีข้อสรุปที่แน่นอนว่ากระบวนการที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ก่อให้เกิดผลดีเหล่านี้มีขั้นตอนอย่างไร มีเพียงแต่ที่เป็นข้อสันนิษฐานว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เร่งการเจริญเติบโตของพืชได้ด้วยการเร่งกระบวนการเมแทบอลิซึมของไนโตรเจนในพืช (F. Yang et al., 2006) และเร่งการผลิตของเอ็นไซม์ Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase (RuBISCO) ที่ช่วยในการสังเคราะห์แสง (Linglan et al., 2008) อย่างไรก็ตามการวิจัยเกี่ยวกับการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการทำเกษตรกรรมต่างเห็นพ้องกันว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มการเจริญเติบโตของพืชด้วยการเพิ่มการสังเคราะห์แสง และการดูดแสงในพืช (Y. Wang et al., 2016; F. Yang et al., 2006)

แม้ว่ายังไม่มีข้อสรุปถึงกลไกที่แท้จริงของการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในพืช งานวิจัยหลายชิ้นได้ระบุถึงทฤษฎีที่สามารถอธิบายการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในพืชได้ กล่าวคือ เมื่อมีการให้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ผ่านทางรากพืช อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ อนุภาคนาโนต้องผ่านผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ของรากพืช จากนั้นอนุภาคนาโนต้องผ่านหลายเนื้อเยื่อในพืชด้วยกระบวนการซิมพลาส (Symplast) หรือกระบวนการอะโพพลาส (Apoplast) จนถึงโครงสร้างชั้นสตีล (Stele) จากนั้นอนุภาคนาโนจะเคลื่อนตัวเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) ซึ่งส่งผลให้

อนุภาคนาโนกระจายตัวไปสู่ส่วนต่างๆ ของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มักเกิดขึ้นในเซลล์ใบของพืช ในการเคลื่อนตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวนั้น การเคลื่อนตัวผ่านเนื้อเยื่อต่างๆ ของพืชของอนุภาคนาโนขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโน เพราะแต่ละส่วนของเนื้อเยื่อพืชมีการกั้น (Barrier) ที่ใช้ในการควบคุมการไหลของสารต่างๆ ในพืชที่แตกต่างกัน กล่าวคืออนุภาคนาโนที่มีขนาดใหญ่กว่าช่วงขนาดจำกัด (Size exclusion limit) ของแต่ละส่วนของพืชจะไม่สามารถถูกลำเลียงเข้าสู่ส่วนนั้นของพืชได้ ในการลำเลียงแบบอะโพพลาส การเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะถูกควบคุมด้วยผนังเซลล์ซึ่งมีช่วงขนาดจำกัดอยู่ที่ 5-20 นาโนเมตร ในขณะที่การลำเลียงผ่านเอ็นโดเดอร์มิส (Endodermis) จะถูกควบคุมด้วยแคสพาเรียนสตริป (Casparian strip) ซึ่งมีช่วงขนาดจำกัดอยู่ที่ประมาณ 1 นาโนเมตร นอกจากนี้เมื่ออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถผ่านผนังเซลล์ได้นั้น อนุภาคนาโนยังสามารถผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ด้วยกระบวนการเอ็นโดไซโตซิส (Endocytosis) ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่ใช้คลาทรินเป็นตัวช่วย (Clathrin-mediated pathway) และไม่ใช้ จากนั้นอนุภาคนาโนสามารถถูกลำเลียงด้วยกระบวนการซิมพลาส ซึ่งถูกควบคุมด้วยพลาสโมเดสมาตา (Plasmodesmata) โดยมีช่วงขนาดจำกัดอยู่ที่ 3-50 นาโนเมตร การเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เกิดขึ้นในทั้งกระบวนการซิมพลาสและอะโพพลาส แต่ยังไม่สามารถสรุปได้ว่ากระบวนการไหนมีความสำคัญมากกว่า ในการใช้สารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์กับเมล็ดพืช อนุภาคนาโนสามารถถูกลำเลียงผ่านช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อพาเรงคิมา (Parenchyma intercellular space) และผ่านช่องลำเลียงน้ำอควาพอริน (Aquaporins) สำหรับการให้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ผ่านทางใบ การลำเลียงอนุภาคนาโนเกิดขึ้นในสองกระบวนการหลักคือการผ่านคิวติเคิลและผ่านทางปากใบ อย่างไรก็ตามนั้น แม้ว่าการลำเลียงอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ถูกจำกัดด้วยช่วงขนาดจำกัดของส่วนต่างๆ ของพืช ยังคงมีการค้นพบการลำเลียงและการนำเข้าของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่าช่วงขนาดจำกัดดังกล่าว ซึ่งอาจเกิดจากที่ขนาดจำกัดของพืชสามารถเปลี่ยนแปลงและขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น แร่ธาตุ ความเครียดในพืช และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยเช่นกัน (Tripathi et al., 2016; Wang et al., 2016)

เมื่ออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้ถูกลำเลียงเข้าสู่เซลล์ในใบพืช จะเกิดกลไกต่างๆ ในการทำงานซึ่งสามารถส่งผลดีและผลเสียต่อพืชได้ ในปัจจุบันมีทฤษฎีหลากหลายที่ระบุถึงกลไกการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เหล่านี้ แต่ทฤษฎีที่ได้รับความน่าเชื่อถือมีดังนี้ 1) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งเสริมการดูดซึมของธาตุอาหารอื่นๆ เช่น ธาตุเหล็กและแมกนีเซียม 2) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทำปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) กับธาตุเหล็ก โดยเป็นปฏิกิริยาระหว่างไททาเนียมไอออน (Ti^{4+} และ Ti^{3+}) และเหล็กไอออน (Fe^{3+} และ Fe^{2+}) ซึ่งส่งผลให้เหล็กไอออนที่พืชใช้มีความไวในปฏิกิริยาทางเคมีที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์แสงมากขึ้น และ 3) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่พืชใช้ในการสังเคราะห์แสง กลไกที่ 1) และ 2) ถูกจัด

ว่าเป็นกลไกการส่งเสริมระหว่างธาตุต่างๆในพืชที่มักเกิดขึ้นเมื่อธาตุที่เกี่ยวข้องมีลักษณะทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน เช่น โซเดียม (Na) กับโพแทสเซียม (K) เซเลเนียม (Se) กับกำมะถัน (S) และซิลิกอน (Si) กับโบรอน (B) ในทฤษฎีที่ 1) ปรากฏหลักฐานว่าธาตุไททาเนียมที่พืชได้รับจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เหนี่ยวนำให้เกิดการเร่งการแสดงออกของยีนส์ที่เกี่ยวกับการดูดซับธาตุเหล็กในรากพืช นอกจากนี้พืชยังมีโปรตีนที่สามารถจับกับธาตุไททาเนียมหรือธาตุเหล็ก เพราะไททาเนียมไอออน Ti^{4+} และเหล็กไอออน Fe^{3+} มีรัศมีไอออนิก (Ionic radius) ที่ใกล้เคียงกัน จึงมีรูปแบบการจับตัวกับโปรตีนที่เหมือนกัน ธาตุไททาเนียมจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จึงสามารถทดแทนธาตุเหล็กที่ใช้ในการทำงานของโปรตีนนี้ได้ หนึ่งในโปรตีนที่ไททาเนียมไอออนสามารถจับตัวได้เช่นเดียวกับเหล็กไอออน คือโปรตีนที่ให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ที่พืชใช้ในระบบแสงที่ 2 (Photosystem II) ในการสังเคราะห์แสงที่ใช้แสง (Light-dependent reaction) นอกจากนี้ไททาเนียมไอออนยังช่วงส่งเสริมภาวะสมดุล (Homeostasis) ของธาตุเหล็กที่มีความสำคัญต่อการผลิตโปรตีนต่างๆ ซึ่งโปรตีนเหล่านี้มีความสำคัญต่อการผลิตสารที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์แสง เช่น คลอโรฟิลล์ การส่งเสริมภาวะสมดุลโดยไททาเนียมเกิดจากที่ธาตุไททาเนียมสามารเร่งการแสดงออกของยีนส์ที่ควบคุมการผลิตสารเหล่านี้ การเร่งการแสดงออกของยีนส์โดยไททาเนียมยังส่งผลดีต่อการผลิตเอนไซม์ต่างๆ ตามทฤษฎีที่ 3) เช่น เอนไซม์คาตาเลส (Catalase) เพอรอสิเดส (Peroxidase) เอทีพีเอส (ATPase) ซึ่งผลดีต่อการสังเคราะห์แสงเช่น ช่วยทำให้คลอโรพลาสคงประสิทธิภาพการทำงานเมื่อได้รับแสง และสามารถทำปฏิกิริยาควบคู่ไปกับสาร ATP ได้ดีขึ้นในเมมเบรนไทลาคอยด์ (Thylakoid membrane) จากกระบวนการเหล่านี้ ส่งผลให้การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เกิดผลดีต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืช (Lyu et al., 2017; Šebesta et al., 2021)

8. การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าว

การศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าว เช่น การศึกษาอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการงอกของเมล็ดข้าวหลายๆ เรื่อง พบว่า การเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวได้ข้อสรุปที่แตกต่างกัน แม้ว่าการวิจัยส่วนมากพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลหรือส่งผลเสียต่อการงอก และการเจริญเติบโตของต้นกล้า (Rodríguez-González, Terashima, and Fujishima, 2019) การวิจัยบางเรื่องได้ค้นพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถส่งผลดีต่อตัวแปรเหล่านี้ได้ (Debnath et al., 2020) ความแตกต่างของข้อสรุปที่ได้จากการวิจัยเกิดขึ้นจากตัวแปรที่แตกต่างกัน เช่น โครงสร้างผลึก ขนาด และ การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ วิธีการให้อนุภาคกับต้นข้าว และปัจจัยอื่นๆ ในการผลิตข้าว จากการวิจัยของ

Boonyanitipong et al., (2011) ศึกษาในประเทศไทย พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดช่วง 10-50 นาโนเมตร มีลักษณะเกาะกลุ่มกันและไม่ได้ระบุโครงสร้างผลึก นักวิจัยได้แช่เมล็ดข้าวลงในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำที่มีความเข้มข้น 100 500 และ 1000 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ระยะเวลา 1, 2 และ 3 วัน จึงนำเมล็ดข้าวไปเพาะลงในดิน ผลจากการศึกษาพบว่า การแช่เมล็ดข้าวลงในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำไม่ส่งผลต่อการงอกของเมล็ด ความยาวของราก และจำนวนราก การวิจัยของ DaCosta and Sharma (2015) ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (ไม่ระบุโครงสร้างผลึก)ขนาด 15±2 นาโนเมตร ในรูปแบบของสารแขวนลอยในสารละลายธาตุอาหารของโฮกแลนด์ (Hoagland's solution) ความเข้มข้นของอนุภาค 2.5, 10, 50, 100 และ 1000 ppm จึงทำการเพาะเมล็ดข้าวในสารแขวนลอยรูปแบบไฮโดรโพนิค จากการวิจัยพบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารละลายธาตุอาหารมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเป็น 23±2 นาโนเมตร ซึ่งเกิดจากการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค จากการทดลอง พบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อการงอกของเมล็ด ความยาวของราก และความสูงของต้นกล้า เว้นแต่ในกรณีที่สารแขวนลอยมีความเข้มข้น 1000 ppm ซึ่งจะส่งผลเสียต่อความยาวของรากและความสูงของต้นกล้าในทางตรงกันข้ามนั้น การวิจัยในประเทศอินเดียของ Debnath et al. (2020) ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และ มีขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร ในรูปแบบสารแขวนลอยในน้ำที่มีความเข้มข้น 10, 20, 50, 80 และ 100 ppm โดยการแช่แมล็ดข้าวในสารแขวนลอยเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และนำเมล็ดไปเพาะในจานเพาะเชื้อ ผลการทดลอง พบว่า การแช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยทุกความเข้มข้นสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอกของเมล็ดได้ โดยเฉพาะที่ความเข้มข้น 20 ppm การงอกเพิ่มขึ้นร้อยละ 98 จากที่ไม่แช่สารนี้ การแช่เมล็ดในทุกความเข้มข้นทำให้ต่อความยาวรากและความสูงของต้นกล้าเพิ่มขึ้นมากกว่าการไม่แช่สารนี้ ดังนั้นจากการวิจัยเหล่านี้จึงยังมีความคลุมเครือในประสิทธิภาพของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการเร่งการงอกของเมล็ดข้าว และการเจริญเติบโตของต้นกล้า

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้รับความนิยมในการใช้เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าว การเพิ่มผลผลิต (Rodríguez-González, Terashima, and Fujishima, 2019; Raliya, Biswas, and Tarafdar, 2015; Waani et al., 2021) เพราะอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยเร่งกระบวนการเมทาบอลิซึมของข้าว อาทิ การสังเคราะห์แสง ทว่าในบางงานวิจัย (Boonyanitipong et al., 2011; Cox et al., 2016a) พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวได้ จากการศึกษาของ Chutipaijit and Sutjaritvorakul (2020) โดยการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อข้าวในอาหารเหลวที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ระหว่าง 0-600 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อน้ำหนักและขนาดของเนื้อเยื่อ ปริมาณของสารฟีนอล สารฟลาวินอย และสารต่อต้านอนุมูลอิสระใน

เนื้อเยื่อข้าว โดยจะส่งผลดีที่สุดเมื่อความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีค่า 400 มิลลิกรัมต่อลิตร อย่างไรก็ตามคณะวิจัยไม่ได้ระบุถึงขนาดและโครงสร้างทางผลึกของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ การวิจัยของ B. Wu, Zhu, and Le (2017) ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าวในระบบไฮโดรพอนิกส์โดยผสมอนุภาคในน้ำที่ใช้ในการปลูกต้นข้าว อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ขนาด 20 นาโนเมตร แต่เมื่อผสมลงในน้ำ พบว่า อนุภาคเกาะกลุ่มกันในลักษณะก้อนขนาด 293 นาโนเมตร น้ำที่ใช้เลี้ยงต้นข้าวมีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 0, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลทดลองพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลทำให้เจริญเติบโตน้อยกว่าไม่ใช้สาร แต่ส่งผลทำให้โภชนาการในข้าวเพิ่มบางชนิดเพิ่มขึ้น อาทิ สาร Glucose-6-phosphate กรดอะมิโน Isoleucine กรดไขมัน Octadecanoic วิตามินซี อี และบีห้า

นอกจากนี้ยังมีการวิจัยของ Zahra et al. (2017) โดยการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ใช้ปลูกข้าวในดินที่ขาดแคลนธาตุฟอสฟอรัส อนุภาคที่ใช้มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยซึ่งใส่ลงในดินในปริมาณ 0, 25, 50, 150, 250, 500 และ 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักดิน จากการทดลองพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ช่วยเพิ่มความสูงต้นข้าว ความยาวของราก น้ำหนักแห้งต่อกอ น้ำหนักแห้งของราก และน้ำหนักทั้งหมดของข้าว และในกรณีที่ใช้อนุภาคในปริมาณ 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า มีปริมาณกรดอะมิโนที่สูงขึ้นในข้าว การวิจัยของ Zhang et al. (2020) ที่ทดสอบการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าวกับวัสดุเพอร์ไลท์ ศึกษาอนุภาคที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและมีขนาด 5-10 นาโนเมตร รากของต้นข้าวที่ปลูกบนเพอร์ไลท์จะถูกนำไปแช่ในสารละลายฮอกแลนด์ที่มีความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 0.1, 1, 10 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลองพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์น้ำหนักทั้งหมดของต้นข้าวเพิ่มขึ้นอย่างน้อยร้อยละ 30 และยังสังเกตได้ว่าการใช้อนุภาคนาโนช่วยส่งเสริมกระบวนการเมทาบอลิซึมที่เกี่ยวกับการสังเคราะห์น้ำตาลและแป้ง จากงานวิจัยเหล่านี้ จึงเห็นได้ว่าประสิทธิภาพของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จึงขึ้นอยู่กับรายละเอียดของการนำมาใช้ และยังไม่มีข้อสรุปที่เด่นชัดแน่นอนว่าคุณลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และรายละเอียดวิธีการนำมาใช้แบบใดที่ส่งผลดีที่สุดต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นหนึ่งทางเลือกนิยมที่ใช้ในการกำจัดศัตรูพืชและลดการสะสมสารพิษในการปลูกข้าว เพราะจากคุณสมบัติทางการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของไททาเนียมไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดอนุมูลอิสระออกซิเจน ซึ่งทำปฏิกิริยากับเซลล์ของศัตรูพืชและโมเลกุลของสารพิษได้ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส และมีขนาด 10-100 นาโนเมตร สามารถนำมาใช้ในรูปแบบสารแขวนลอยในน้ำที่มีความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อกำจัดเชื้อรา

Bipolaris sorokiniana ที่ก่อให้เกิดโรครากเน่าได้ (Satti et al., 2021) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ยังสามารถใช้เพื่อชะลอการกินใบของหนอนกระทู้ (*Spodoptera frugiperda*) และเพื่อกำจัดดักแด้ของหนอนนี้เมื่อนำอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์มาผสมกับน้ำในความเข้มข้น 25-100 มิลลิกรัมต่อลิตร และฉีดพ่นลงบนใบ (Kumaravel et al., 2021) ในด้านการลดการสะสมสารพิษอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 55±42 นาโนเมตร ที่ความเข้มข้น 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถลดความเป็นพิษของแคดเมียมที่ส่งผลต่อความยาวราก น้ำหนักรวม และความสูงของข้าวที่ปลูกในระบบไฮโดรพอนิกส์ พร้อมยังลดความเป็นพิษของแคดเมียมที่ส่งผลเสียต่อระดับฮอร์โมนในพืช (Ji et al., 2017) อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างทางผลึกแบบรูไทล์หรืออนาเทส และมีขนาดประมาณ 25 นาโนเมตรสามารถลดการสะสมของตะกั่วในข้าวที่ปลูกในดินเมื่อเติมลงในดินในปริมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและสามารถลดการสะสมได้ดีกว่าผงไททาเนียมไดออกไซด์ทั่วไป (Cai et al., 2017)

แม้ว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อการปลูกพืชหลายประการ แต่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากเกินไปสามารถเป็นพิษต่อพืชได้ (Šebesta et al., 2021; Boonyanitipong et al., 2011; Waani et al., 2021; Rafique et al., 2018; Mahmoodzadeh, Aghili, and Nabavi, 2013; Cox et al., 2016b) การวิจัยศึกษากับข้าวสาลีของ Rafique et al. (2018) พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กกว่า 20 นาโนเมตร ในรูปแบบของการเทสารแขวนลอยลงในดินในปริมาณ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืชลดลงประมาณร้อยละ 11 การวิจัยของ Mahmoodzadeh, Aghili, and Nabavi (2013) พบว่า การพ่นสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20 นาโนเมตรในปริมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรกับต้นข้าวสาลีส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ในการวิจัยของ Waani et al. (2021) โดยการปลูกข้าว พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 26.5 นาโนเมตร ในรูปแบบการใส่ผงอนุภาคลงในดินในปริมาณ 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่งผลให้น้ำหนักแห้งของต้นข้าวลดลงประมาณร้อยละ 23 และการผลิตไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 200 นอกจากนี้การวิจัยของ Boonyanitipong et al. (2011) ยังได้สังเกตว่าการแช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ขนาด 20-40 นาโนเมตร ที่มีความเข้มข้น 100-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในระยะเวลา 2 วัน ทำให้ความยาวของรากของต้นกล้าลดลง

9. การดูดซับ เคลื่อนที่ และการสะสม อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในพืชทั่วไปและในข้าว

การดูดซับ เคลื่อนที่ และการสะสมในพืชของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นประเด็นสำคัญที่ควรพิจารณา เพื่อศึกษาผลของอนุภาคที่มีต่อส่วนประกอบและการทำงานของพืช แม้ว่าอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ถือว่าเป็นพิษต่อมนุษย์ การสะสมของอนุภาคยังคงความสำคัญเพื่อป้องกันไม่ให้มีปริมาณของไททาเนียมไดออกไซด์ในผลผลิตที่เกินต่อข้อกำหนด การดูดซับอนุภาคนาโนเข้าสู่พืช และการเคลื่อนที่ของอนุภาคในพืชขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโน กล่าวคือในแต่ละส่วนประกอบของพืชจะมีขนาดจำกัด (Size exclusion limit) ถ้าอนุภาคนาโนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดจำกัด อนุภาคจะไม่สามารถถูกดูดซับเข้าสู่ส่วนประกอบได้ (Krug and Wick, 2011; Dietz and Herth, 2011) ขนาดจำกัดขึ้นอยู่กับประเภทของส่วนประกอบของพืชและพันธุ์ของพืช (Ma et al., 2010) โดยทั่วไป ขนาดจำกัดของผนังเซลล์ คือ 4-20 นาโนเมตร ขนาดจำกัดของช่องว่างระหว่างผนังเซลล์ คือ ตั้งแต่ 40 นาโนเมตรลงไป ขนาดจำกัดของปากใบและร่องเลนทิเซล(lenticel) คือ 100 นาโนเมตรขึ้นไป ขนาดจำกัดของพลาสโมเดสมาตา (Plasmodesmata) คือ 2-50 นาโมเมตร และขนาดจำกัดของชั้นคูติเคิล (Cuticle) บนผิวใบคือ 0.3-2 นาโนเมตร (P. Wang et al., 2016) นอกจากนี้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์อาจเข้าสู่พืชผ่านทางแผลได้เช่นกัน ในการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการเกษตรกรรม อนุภาคมักจะถูกดูดซับเข้าสู่พืชผ่านสองช่องทางหลัก คือ ทางรากและทางใบ (Rodríguez-González, Terashima, and Fujishima, 2019; Tripathi et al., 2017) ดังนั้นจากขนาดจำกัดของแต่ละส่วนประกอบของพืช อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่พืชสามารถนำเข้าไปใช้ควรมีขนาดเล็กกว่า 50 นาโนเมตร

การสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวส่วนมากจะเกิดขึ้นในส่วนของรากข้าวและมีการสะสมในต้นข้าวน้อยกว่า จากการศึกษาของ Deng et al. (2017) กล่าวว่าการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ขนาด 19-37 นาโนเมตร ที่ผสมในสารละลายโฮกแลนด์ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ใช้ในการปลูกข้าวในระบบไฮโดรพอนิกส์ พบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สะสมในส่วนเซลล์รากของข้าวในปริมาณ 2 มิลลิกรัมต่อกรัมของเนื้อเยื่อของรากและสะสมในส่วนต้นของข้าวในปริมาณ 15 ไมโครกรัมต่อกรัม ของเนื้อเยื่อของลำต้น นอกจากนี้การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนไม่พบอนุภาคาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในเซลล์ใบของข้าว จากการวิจัยของ Cai et al. (2017) และ DaCosta and Sharma (2015) ที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าว ผลการทดลองในทำนองเดียวกัน จึงเป็นที่สันนิษฐานว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์อาจไม่มีการสะสมในเมล็ดข้าวที่ใช้บริโภค การวิจัยของ Zahra et al. (2017)

ได้ยืนยันข้อสันนิษฐานนี้โดยได้ศึกษาโดยการใส่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20 นาโนเมตร ลงในดินที่ใช้ปลูกข้าวในความปริมาณ 750 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เทคนิค Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) เทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) และเทคนิค Inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES) พบว่า ไม่มีอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สะสมในเมล็ดข้าว

การสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในดินเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่มีความสำคัญ แม้ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะมีความปลอดภัยต่อการใช้ในการผลิตข้าว เพราะไม่พบการสะสมในผลผลิต การตกค้างของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในดินอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ได้ การสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในดินเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมลงในดิน แต่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกดูดซับในพืชจะไม่เคลื่อนที่ออกจากพืชกลับเข้าสู่ดินได้ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีความคงทนทางเคมีและทางกายภาพ จึงไม่เกิดการย่อยสลายเมื่ออยู่ในดิน อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในดินสามารถเคลื่อนที่ไปกับน้ำ และสารถูกดูดซับเข้าสู่สิ่งมีชีวิตอื่นๆ เช่น จุลินทรีย์ สาหร่าย พืช และสัตว์ การตกค้างของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงอาจส่งผลต่อระบบนิเวศน์ได้ การบำบัดน้ำเพื่อกำจัดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ดำเนินการด้วยการเร่งการจับเป็นก้อนและการตกตะกอนของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ เพื่อที่จะสามารถคัดกรองอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ออกจากน้ำได้ (Zingmao et al., 2010)

ส่วนใหญ่ของงานวิจัยที่กล่าวมามักเป็นการศึกษาผลของปริมาณของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการปลูกข้าว กล่าวคือเป็นการวิจัยที่ใช้ปริมาณหรือความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรต้น แต่มีการวิจัยที่ใช้ขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรต้นในจำนวนน้อย ส่งผลให้เกิดความไม่ชัดเจนว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใดส่งผลดีที่สุดต่อข้าวอาทิในการวิจัยของ Deng et al. (2017) ได้เปรียบเทียบการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สองขนาด ได้แก่ 29 และ 65-230 นาโนเมตร พบว่า อนุภาคขนาดเล็กเกิดการสะสมมากกว่าในรากและลำต้นของข้าว ในทางตรงกันข้ามมีการศึกษาของ Larue et al. (2012) ผลของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการใช้ปลูกข้าวสาลีซึ่งได้ข้อสรุปว่าขนาดจำกัดของชั้น Parenchyma ของรากข้าวสาลี คือ 140 นาโมเมตรและ ขนาดจำกัดของชั้น Stele คือ 36 นาโนเมตร และอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 36 นาโนเมตรเท่านั้นที่ส่งผลต่อความยาวของราก

ดังนั้น สังเกตว่าการวิจัยเกี่ยวกับการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในขนาดและปริมาณต่างๆ ในการปลูกข้าวยังไม่ได้ข้อสรุปที่เป็นไปในทิศทางเดียวกันและยังขาดองค์ความรู้ที่สมบูรณ์และชัดเจน เพื่อนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในการปลูกข้าวการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์

เพื่อการศึกษาถึงผลของขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการปลูกข้าวอย่างเป็นระบบ เพื่อให้ได้เกิดความชัดเจนและได้แนวทางการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการปลูกข้าวเพื่อสามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้จริง

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ข้าวไม่ไวต่อช่วงแสง ได้แก่ ข้าวปทุมธานี 1 และ ข้าวไวต่อช่วงแสง ได้แก่ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในกระถางขนาดขนาด 8 นิ้ว

2. วิธีการศึกษาทดลอง

การศึกษาผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และปริมาณการใช้ต่อการเจริญเติบโตผลผลิต และคุณภาพผลผลิตข้าวปทุมธานี 1 และ ข้าวขาวดอกมะลิ 105 มีรูปแบบและวิธีการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อใช้ในการปลูกข้าวและการวิเคราะห์ทดสอบคุณสมบัติของอนุภาค

จัดหาอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 3 แบบซึ่งมีช่วงขนาดเฉลี่ย 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรด้วยการสั่งซื้อและการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ Sol-gel ซึ่งอ้างอิงจากงานวิจัยของ Guo et al., 2016 โดยมีขั้นตอนได้แก่การผสมสารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium chloride) ในน้ำ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ในปริมาณ 6 มิลลิลิตรเข้ากับเอทานอล 100 มิลลิลิตร แล้วจึงเติมสารเตตระบิวทิลออร์โทไททาเนต (Tetrabutyl orthotitanate) ปริมาณ 6 มิลลิลิตรที่ละหยด จากนั้นนำอนุภาคที่ได้มาเผาที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง

นำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์แต่ละขนาดมาเตรียมให้อยู่ในรูปแบบสารแขวนลอยในน้ำ โดยการผสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงไปในน้ำบริสุทธิ์ให้มีความเข้มข้น 5 ระดับ คือ 10, 50, 100, 250, และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและใช้เครื่อง Ultra-sonicator probe ที่ความเร็ว 1,000 รอบต่อนาที ในการทำให้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์กระจายตัวในสารแขวนลอย

ขนาดและรูปพรรณสัณฐานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ จะวัดและวิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) และแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope) ขนาดเชิงอุทกพลศาสตร์ (Hydrodynamic size) และการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบสารแขวนลอยจะวัดและวิเคราะห์ได้ด้วย

เครื่องมือเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic light scattering) นอกจากนี้จะวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคด้วยเครื่องวัดการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer: XRD)

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในระยะต้นกล้า

2.1.1 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้มีการวางการทดลองแบบแฟคทอเรียลใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ที่มีสองปัจจัย คือ ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 3 ระดับ และความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 6 ระดับ (3x6 factorial in CRD) ดังนี้

ปัจจัยแรก คือ ระดับของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์คือช่วงขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตร

ปัจจัยที่สอง คือระดับของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยคือ 0 (ควบคุม), 10, 50, 100, 250, และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

มีจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 5 Petri platesๆ ละ 25 เมล็ด และมีขั้นตอนการทดลองในแต่ทรีทเมนต์ คือ การเพาะเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 และข้าว กข 105

***2.1.2* ระยะก่อนการทดลอง**

การเตรียมสารแขวนลองอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

นำผงอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ใส่ลงในน้ำ Deionized ให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ แล้วนำเครื่อง Ultra-sonicator probe มาใช้กับสารแขวนลอยในอัตราปั่น 1000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์กระจายตัวได้ดีในน้ำ

***2.1.3* ระหว่างการทดลอง**

การเตรียมและการเพาะเมล็ดข้าว

นำเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวสุรินทร์ คัดเลือกเมล็ดที่สมบูรณ์ จากนั้นนำข้าวเปลือกจำนวน 15 เมล็ดแช่ในสารแขวนลองอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ Andersen et al., (2016) และแช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะบนแผ่นกรอง Whatman เบอร์ 1 ขนาด 10 เซนติเมตร 2 แผ่นใน Petri plates ขนาด 10 เซนติเมตร ตามวิธีการของ Debnath et al., (2020)

2.1.4 ข้อมูลที่ศึกษา

ดำเนินการศึกษาข้อมูลต้นกล้าข้าวทั้ง 2 ชนิด ได้แก่

- ก่อนการปลูกศึกษาอัตราการงอกหลังการแช่ 48 ชั่วโมง
- วันที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 ของการปลูกศึกษาความสูงต้น
- วันที่ 7 และ 9 ของการปลูกศึกษาจำนวนใบ และสีใบ (SPAD index)

- วันที่ 9 ของการปลูกศึกษาน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง (รวมราก)

- วันที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 ของการปลูกศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในราก ต้น และใบข้าว

***2.1.5* การวิเคราะห์ข้อมูล**

วิเคราะห์ข้อมูลจากสูตรที่ใช้ในการทดลองโดยคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA) ในตัวแปรขนาดและปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์หาความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) ของข้อมูลโดยใช้วิธีการ Least Significant Difference (LSD) และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา

ตอนที่ 3 การศึกษาผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวในระยะการเจริญเติบโตและการเก็บเกี่ยวผลผลิต

แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 การทดลอง คือ การแช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพียงครั้งเดียวก่อนปลูก และการแช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ก่อนปลูกและการเติมที่ 30 วันหลังปลูก การทดลองอธิบายดังนี้

3.3.1 การศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวที่แช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพียงครั้งเดียวก่อนปลูก

1) แผนการทดลอง

การวิจัยนี้มีการวางการทดลองแบบแฟคทอเรียลใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ที่มีสองปัจจัย คือ ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 3 ระดับ และความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 6 ระดับ (3x6 factorial in CRD) ดังนี้

ปัจจัยแรก คือ ระดับของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์คือช่วงขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตร

ปัจจัยที่สอง คือระดับของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยคือ 0 (ควบคุม), 10, 50, 100, 250, และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองมีจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 3 กระถาง และมีขั้นตอนการทดลองในแต่ทรีทเมนต์ คือการปลูกข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในกระถางสีดำไม่เจาะรูขนาด 8 นิ้ว

2) ระยะก่อนการทดลอง

การเตรียมดินในการศึกษา ใช้ดินนาในพื้นที่ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ตีบ่น และวิเคราะห์หาคุณสมบัติและธาตุอาหารในดิน ได้แก่ pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าอินทรียวัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสเฟตทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน

การเตรียมเมล็ดข้าว นำเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวสุรินทร์ คัดเลือกเมล็ดที่สมบูรณ์ จากนั้นนำข้าวเปลือกจำนวน 15 เมล็ดแช่ในสารแขวนลองอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ Andersen et al., (2016) และแช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะบนแผ่นกรอง Whatman เบอร์ 1 ขนาด 10 เซนติเมตร 2 แผ่นใน Petri plates ขนาด 10 เซนติเมตร ตามวิธีการของ Debnath et al., (2020)

การย้ายต้นกล้าลงปลูก นำเมล็ดที่แช่ไว้ 48 ชั่วโมง หยอดลงในดิน ทำในลักษณะเดียวกันกับการหว่านข้าวนาน้ำตม

3) ระยะระหว่างการทดลอง

ข้อมูลที่จะศึกษาแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 ระยะแตกกอ ที่ 30 วันหลังการปลูก ศึกษาการเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ และการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ช่วงที่ 2 ระยะตั้งท้อง ที่ 90 วันหลังการปลูก ศึกษา การเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ วันที่ออกรวง 50% และการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ช่วงที่ 3 ระยะก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต ที่ 120 วันหลังการปลูก ศึกษา

1. การเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ น้ำหนักต้นสด และน้ำหนักต้นแห้ง (รวมรากและไม่รวมราก)

2. การสะสมธาตุอาหารทั่วไป และและการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวในราก ต้น ใบและดิน

3. วันที่เก็บเกี่ยวได้ 50%

4. คุณภาพผลผลิต ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ น้ำหนัก 100 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง 100 เมล็ดความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด สีเมล็ด (L* a* b*) ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว

5. การศึกษาคุณภาพเมล็ด (ข้าวกล้อง) ได้แก่ ความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด คุณค่าทางโภชนาการเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณแป้ง โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า แคลเซียม โปรแตสเซียม และการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวกล้อง

หมายเหตุ วิเคราะห์การสะสมของธาตุไททาเนียมจะวิเคราะห์ด้วยการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านและเครื่อง Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

4) การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลจากสูตรที่ใช้ในการทดลองโดยคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA) ในตัวแปรขนาดและปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์หาความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) ของข้อมูลโดยใช้วิธีการ Least Significant Difference (LSD) และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา

3.3.2 การศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวที่แช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ก่อนปลูกและการเติมที่ 25 วันหลังปลูก

1) แผนการทดลอง

การวิจัยนี้มีการวางการทดลองแบบแฟคทอเรียลใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ที่มีสองปัจจัย คือ ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 3 ระดับ และความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 6 ระดับ (3x6 factorial in CRD) ดังนี้

ปัจจัยแรก คือ ระดับของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์คือ ช่วงขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตร

ปัจจัยที่สอง คือระดับของความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยคือ 0 (ควบคุม), 10, 50, 100, 250, และ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

การทดลองมีจำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 3 กระถาง และมีขั้นตอนการทดลองในแต่ทรีทเมนต์คือการปลูกข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในกระถางสีดำไม่เจาะรูขนาด 8 นิ้ว แล้วเติมสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงไปในดิน 1 ครั้งในปริมาณ 1 ลิตร

2) ระยะก่อนการทดลอง

การเตรียมดินในการศึกษา

ใช้ดินนาในพื้นที่ตำบลคลองห้า อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี ตีบ่นและวิเคราะห์หาคุณสมบัติ ธาตุอาหาร และสารตกค้างในดิน ได้แก่ pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าอินทรียวัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสเฟตทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน สารหนู ปรอท แคดเมียม และการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน

การเตรียมเมล็ดข้าว นำเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 จากศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี และข้าวขาวดอกมะลิ 105 จากศูนย์เมล็ดพันธุ์ข้าวสุรินทร์ คัดเลือกเมล็ดที่สมบูรณ์ จากนั้นนำข้าวเปลือกจำนวน 15 เมล็ดแช่ในสารแขวนลองอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 10 มิลลิลิตร ตามวิธีการของ Andersen et al., (2016) และแช่ทิ้งไว้ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเพาะบนแผ่นกรอง Whatman เบอร์ 1 ขนาด 10 เซนติเมตร 2 แผ่นใน Petri plates ขนาด 10 เซนติเมตร ตามวิธีการของ Debnath et al., (2020)

การย้ายต้นกล้าลงปลูก นำเมล็ดที่แช่ไว้ 48 ชั่วโมง หยอดลงในดิน ทำในลักษณะเดียวกันกับการหว่านข้าวนาน้ำตม

3) ระยะระหว่างการทดลอง

เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอยลงในดินที่ใช้ปลูก 1 กิโลกรัมต่ออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์แบบแขวนลอย 20 มิลลิลิตร โดยที่ในกระถางปลูกมีน้ำสูงกว่าระดับดิน 5 เซนติเมตร ที่ข้าวอายุ 25 วัน ตามวิธีการของ Zahra et al., (2017)

ข้อมูลที่จะศึกษาแบ่งเป็น 3 ช่วง ดังนี้

ช่วงที่ 1 ระยะแตกกอ ที่ 30 วันหลังการปลูก ศึกษาการเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ และการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ช่วงที่ 2 ระยะตั้งท้อง ที่ 90 วันหลังการปลูก ศึกษา การเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ วันที่ออกรวง 50% และการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ช่วงที่ 3 ระยะก่อนเก็บเกี่ยวผลผลิต ที่ 120 วันหลังการปลูก ศึกษา

1. การเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง สีใบ (SPAD index) จำนวนต้นต่อกอ น้ำหนักต้นสด น้ำหนักต้นแห้ง (รวมรากและไม่รวมราก)
2. การสะสมธาตุอาหารทั่วไป และและการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวในราก ต้น ใบและดิน
3. วันที่เก็บเกี่ยวได้ 50%
4. คุณภาพผลผลิต ได้แก่ จำนวนเมล็ดต่อรวง เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ น้ำหนัก 100 เมล็ด น้ำหนักเมล็ดข้าวกล้อง 100 เมล็ดความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด สีเมล็ด (L* a* b*) ข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว
5. การศึกษาคุณภาพเมล็ด (ข้าวกล้อง) ได้แก่ ความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด คุณค่าทางโภชนาการเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณแป้ง โปรตีน ไขมัน ความชื้น เถ้า แคลเซียม โพแทสเซียม และการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวกล้อง

6. หลังการทดลองวิเคราะห์หาคุณสมบัติ ธาตุอาหาร และสารตกค้างในดิน ได้แก่ pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าอินทรียวัตถุ ไนโตรเจนทั้งหมด ฟอสเฟตทั้งหมด โพแทสเซียมทั้งหมด สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน สารหนู ปรอท แคดเมียม และการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน

หมายเหตุ วิเคราะห์การสะสมของธาตุไททาเนียมจะวิเคราะห์ด้วยการใช้เครื่อง Inductively Couple Plasma Mass Spectrometer (ICP-MS)

4) การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ข้อมูลจากสูตรที่ใช้ในการทดลองโดยคำนวณหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล นำข้อมูลที่ได้วิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA) ในตัวแปรขนาดและปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ วิเคราะห์หาความแปรปรวนทางเดียว (One way ANOVA) ของข้อมูลโดยใช้วิธีการ Least Significant Difference (LSD) และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ศึกษา

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตอนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1.1 การวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning electron microscopy)

แผนการทดลองเพื่อศึกษาการใช้นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้วางไว้ ขนาดของอนุภาคที่ต้องการศึกษามีช่วงขนาดที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 20-30 (ขนาดเล็ก), 80-120 (ขนาดกลาง) และ 400-600 (ขนาดใหญ่) นาโนเมตร ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างที่ต่างกัน สำหรับอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่า 200 นาโนเมตร ไม่อาจใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อวิเคราะห์ขนาดได้เนื่องจากข้อจำกัดในกำลังขยาย จึงจำเป็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ที่มีกำลังขยายที่สูงกว่าในการวิเคราะห์ ดังนั้นจึงใช้กล้อง TEM สำหรับการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กและกลาง สำหรับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่นั้น จะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพราะมีกำลังขยายที่เพียงพอ และสามารถศึกษาอนุภาคได้ในจำนวนมาก ทั้งนี้การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านเพื่อศึกษาขนาดและรูปร่างอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่อาจไม่มีความเหมาะสม กล่าวคือขนาดที่ใหญ่ของอนุภาคอาจส่งผลให้อนุภาคมีความทึบต่อลำแสงอิเล็กตรอน ทำให้ไม่สามารถบ่งบอกขอบเขตของอนุภาคแต่ละอนุภาคได้

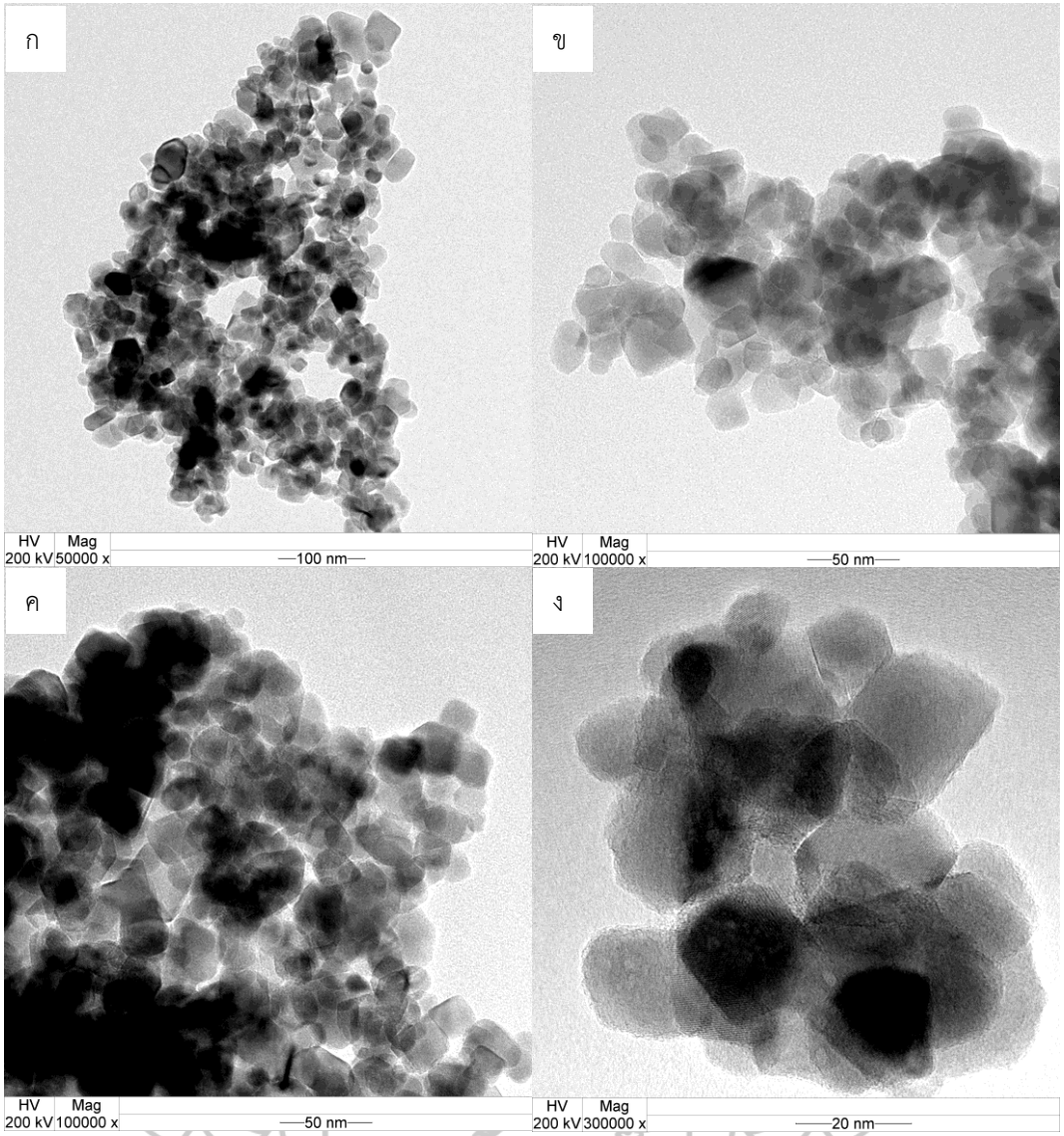
ภาพถ่ายของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กและขนาดกลางที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านแสดงอยู่ในภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 ตามลำดับ จากรูปทั้งสองพบว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กและขนาดกลางมีลักษณะเป็นเหลี่ยมเป็นส่วนมาก และมีบางส่วนที่เป็นลักษณะกลม อนุภาคเหล่านี้ก่อขึ้นเป็นชิ้นๆ อย่างชัดเจน จึงสามารถวัดขนาดของอนุภาคเหล่านี้ด้วยการเปรียบเทียบกับความยาวของแท่งสเกล (ด้านล่างของภาพ) ได้ ผลการวัดขนาดและร้อยละปริมาณของอนุภาคในแต่ละช่วงขนาดอนุภาคแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีขนาดเฉลี่ย 23.0 ± 6.5 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในแผนขั้นตอนการทดลอง (20-30 นาโนเมตร) จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีการกระจายของขนาดที่กว้าง การกระจายของขนาดที่กว้างเป็นคุณลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ทั่วไป

เพราะการสังเคราะห์อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ให้มีการกระจายของขนาดที่แคบลงจะมีต้นทุนที่สูงมากซึ่งไม่เหมาะสมต่อการใช้งานในระดับทั่วไป ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องหาอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กที่มีการกระจายของขนาดที่แคบลงในการทดลองนี้ และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กที่วิเคราะห์นี้มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ทดลองต่อ

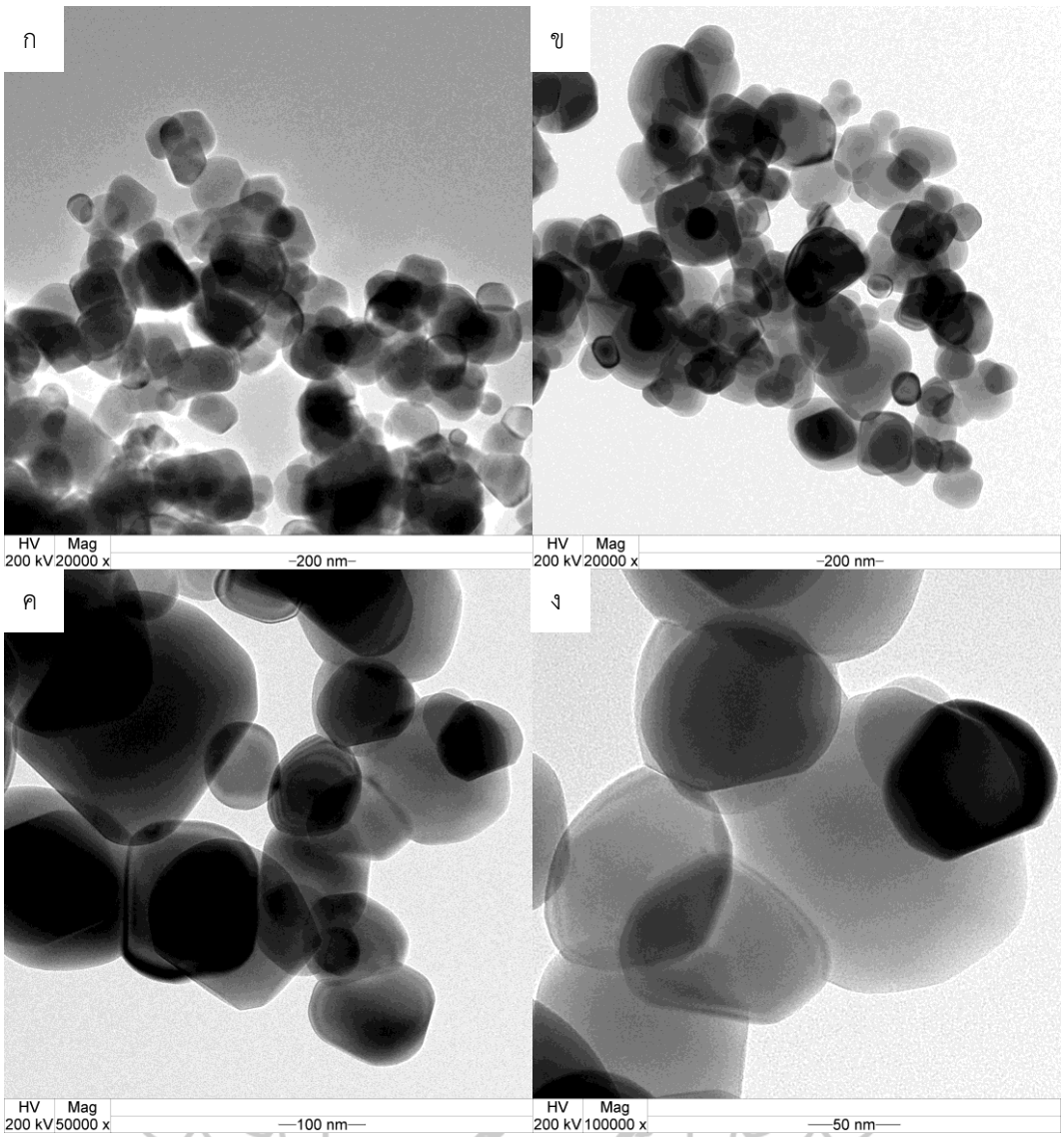
ในทำนองเดียวกัน จากตารางที่ 4.1 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางมีขนาดเฉลี่ย 103.5 ± 35.6 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในแผนขั้นตอนการทดลอง (80-120 นาโนเมตร) จากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาคที่มีค่ามาก จึงมีการกระจายของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางที่กว้าง ซึ่งยังเป็นคุณลักษณะของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั่วไป นอกจากนี้ค่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคทั้งสองขนาดยังคงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางที่วิเคราะห์จึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาทดลองตามแผนการวิจัย

ภาพถ่ายของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงอยู่ในภาพที่ 4.3 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่มีลักษณะคล้ายกลมเป็นส่วนมาก ซึ่งเป็นลักษณะของอนุภาคที่มักเกิดขึ้นในการสังเคราะห์แบบโซลเจล จากที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีการก่อขึ้นแยกเป็นชิ้นๆ อย่างชัดเจน จึงสามารถวัดขนาดได้ตามที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าขนาดเฉลี่ยของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่คือ 485.7 ± 63.3 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดไว้ในแผนขั้นตอนการทดลอง (400-600 นาโนเมตร) การกระจายของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ยังมีลักษณะกว้างเช่นเดียวกับอนุภาคขนาดเล็กและขนาดกลาง อย่างไรก็ตามนั้นนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ยังมีขนาดแตกต่างกับอนุภาคขนาดอื่นๆอย่างมีนัยสำคัญ จึงมีความเหมาะสมต่อการใช้ดำเนินการวิจัยต่อได้

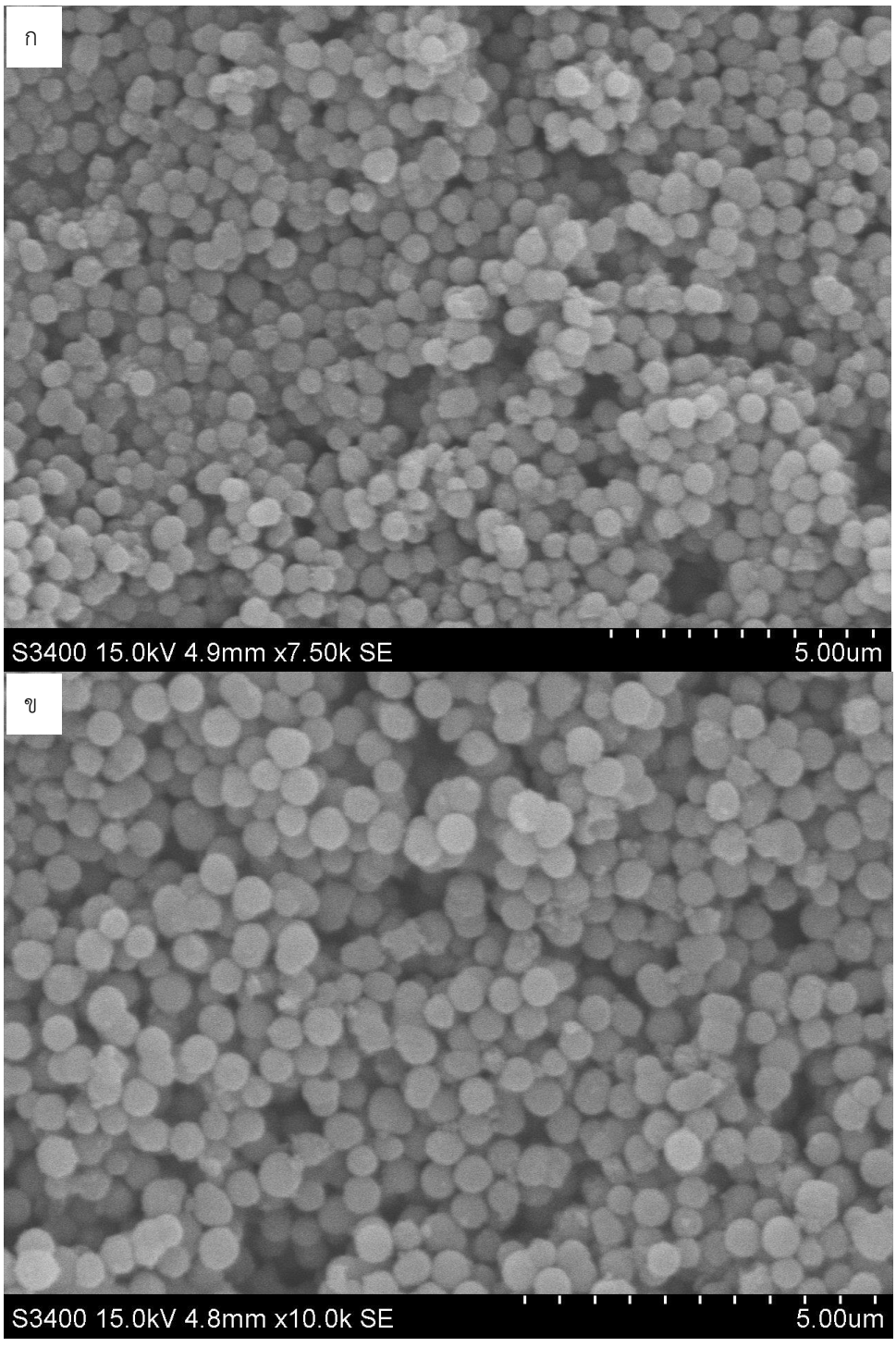
มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช



ภาพที่ 4.1 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยใช้กำลังขยาย (ก) 50,000 เท่า (ข, ค) 100,000 เท่า และ (ง) 300,000 เท่า ภาพเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีขนาดเฉลี่ย 23.0 ± 6.5 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.2 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) โดยใช้กำลังขยาย (ก, ข) 20,000 เท่า (ค) 50,000 เท่า และ (ง) 100,000 เท่า ภาพเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางมีขนาดเฉลี่ย 103.5 ± 35.6 นาโนเมตร



ภาพที่ 4.3 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยใช้กำลังขยาย (ก) 7,500 เท่า และ (ข) 10,000 เท่า ภาพเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่มีขนาดเฉลี่ย 485.7 ± 63.3 นาโนเมตร

ตารางที่ 4.1 ตารางแจกแจงร้อยละปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในแต่ละช่วงขนาด

อนุภาคขนาดเล็ก		อนุภาคขนาดกลาง		อนุภาคขนาดใหญ่	
ช่วงขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	ปริมาณอนุภาค (ร้อยละ)	ช่วงขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	ปริมาณอนุภาค (ร้อยละ)	ช่วงขนาดอนุภาค (นาโนเมตร)	ปริมาณอนุภาค (ร้อยละ)
น้อยกว่า 10	0.1	น้อยกว่า 65	0.1	น้อยกว่า 300	0.2
10 – 15	13.5	65 – 75	18.2	300 – 340	4.8
15 – 20	13.7	75 – 90	27.3	340 – 380	1.1
20 – 25	40.9	90 – 115	31.8	380 – 420	3.9
25 – 30	13.6	115 – 140	9.6	420 – 460	25.3
30 – 35	9.1	140 – 165	4.0	460 – 500	24.6
35 – 40	9.0	165 – 190	4.5	500 – 540	20.1
มากกว่า 40	0.1	190 – 215	4.3	540 – 580	14.8
		215 – 240	0.1	580 – 620	4.9
		มากกว่า 240	0.1	มากกว่า 620	0.3

1.2 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต (Dynamic light scattering, DLS)

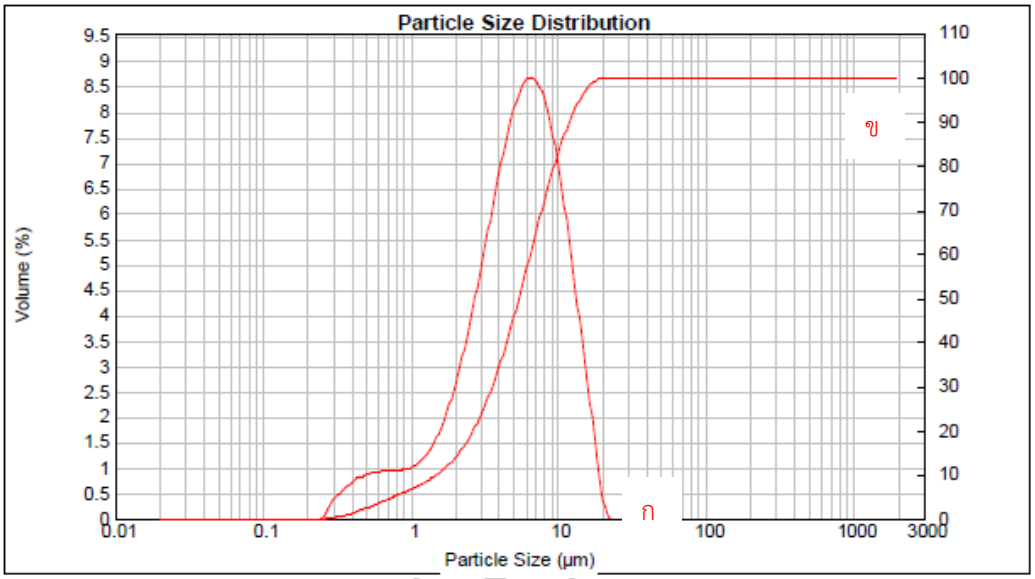
เทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัติ (DLS) เป็นการศึกษาการกระจายของขนาดอนุภาคนาโนทาทาเนียมไดออกไซด์เมื่ออยู่ในน้ำบริสุทธิ์ อนุภาคนาโนหลายชนิดมักเกิดการจับตัวกันเป็นก้อนเมื่ออยู่ในของเหลว ซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานศักย์ของพื้นผิวของอนุภาค โดยทั่วไปแล้วนั้นอนุภาคที่มีขนาดเล็กมักจับตัวกันเป็นก้อนมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เนื่องจากอนุภาคขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวต่อมวลที่มากกว่าทำให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคที่สูงกว่า นอกจากนี้อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ทั่วไปมักเกิดการจับตัวกันเช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลให้ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่วิเคราะห์จากเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัติมีค่าที่แตกต่างกับขนาดของอนุภาคที่วัดจากเทคนิคอื่นๆ เช่น การวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

กราฟการกระจายของขนาดอนุภาค (Particle size distribution) และกราฟการกระจายของอนุภาคสะสม (Cumulative particle size distribution) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ถูกแสดงอยู่ในภาพที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

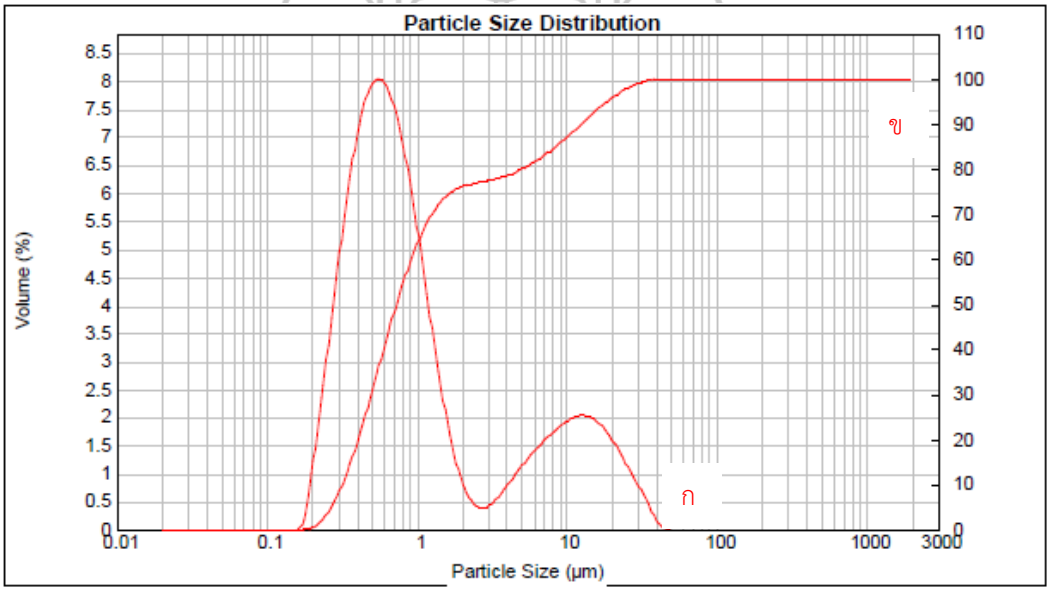
กราฟการกระจายของขนาดอนุภาคเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดมีลักษณะการกระจายแบบที่มีสองฐานนิยม (Bimodal distribution) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวของขนาดที่กว้าง ซึ่งเป็นไปตามแนวทางที่ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่ได้ระบุไว้

จากกราฟการกระจายของขนาดอนุภาค สามารถคำนวณขนาดเฉลี่ย (Mean) ขนาดมัธยฐาน (Median) และค่าการกระจายตัวของขนาด (Coefficient of variation) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดได้ ค่าเหล่านี้ถูกแสดงอยู่ในตารางที่ 4.2 ข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นว่าขนาดเฉลี่ยและขนาดมัธยฐานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กที่อยู่ในน้ำมีค่าสูงที่สุด ตามมาด้วยอนุภาคขนาดกลาง และขนาดใหญ่ตามลำดับ ลำดับของขนาดอนุภาคที่อยู่ในน้ำนี้มีลำดับที่ตรงข้ามกันกับขนาดของอนุภาคที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีการจับเป็นกลุ่มก้อนที่มากที่สุดเมื่ออยู่ในน้ำ ซึ่งส่งผลให้ขนาดของอนุภาคที่วัดด้วยเครื่อง DLS มีค่ามากที่สุดและเมื่อขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีการจับตัวเป็นก้อนลดลง ทำให้ขนาดของกลุ่มก้อนอนุภาคนี้ลดลงตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าการกระจายตัวของขนาดนั้น พบว่าค่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีค่าต่ำสุด ซึ่งเกิดขึ้นจากที่กลุ่มก้อนที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน ในส่วนของค่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่มีค่าน้อยกว่าค่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคขนาดกลางนั้น เกิดจากที่อนุภาคขนาดกลางมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดที่สูงกว่า ทำให้เมื่ออนุภาคขนาดกลางจับตัวกันในน้ำนั้น ทำให้กลุ่มก้อนของอนุภาคนี้มีขนาดที่แตกต่างกัน

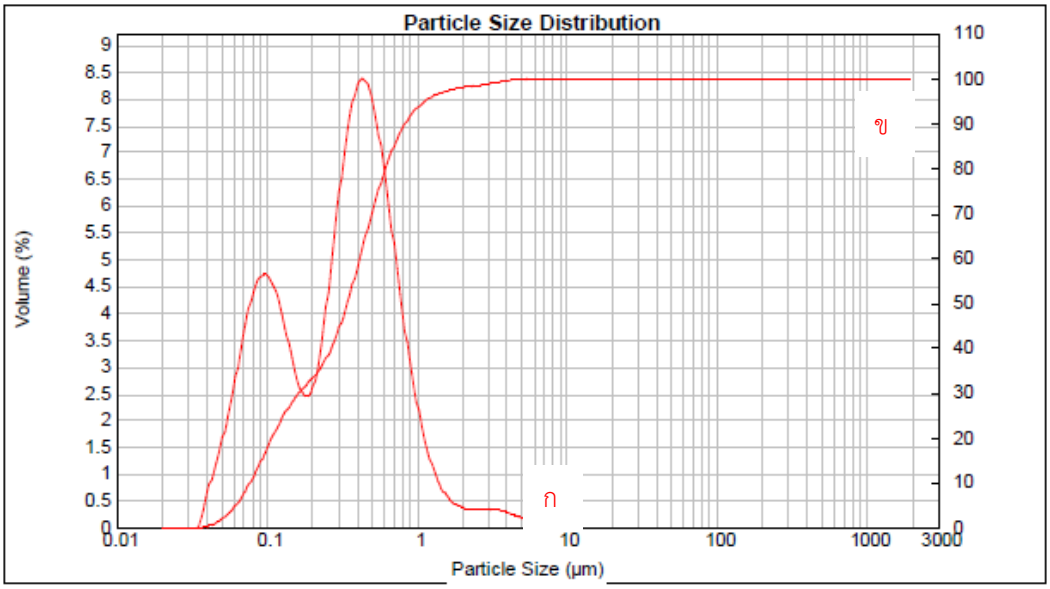
ข้อมูลขนาดที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัติ (Dynamic light scattering, DLS) มีค่าแตกต่างจากข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งค่าใดค่าหนึ่งหรือทั้งสองค่าอาจส่งผลต่อกระบวนการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เมื่อนำไปใช้กับพืช ดังนั้นการศึกษาผลของขนาดต่อการปลูกข้าวจึงควรพิจารณาปัจจัยทั้งสองนี้



ภาพที่ 4.4 กราฟ (ก, แกนตั้งด้านซ้าย) การกระจายของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคในแต่ละขนาด และ (ข, แกนตั้งด้านขวา) การกระจายสะสมของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดที่ระบุไว้ในแกนนอน ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในน้ำ



ภาพที่ 4.5 กราฟ (ก, แกนตั้งด้านซ้าย) การกระจายของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคในแต่ละขนาด และ (ข, แกนตั้งด้านขวา) การกระจายสะสมของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดที่ระบุไว้ในแกนนอน ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางในน้ำ



ภาพที่ 4.6 กราฟ (ก, แกนตั้งด้านซ้าย) การกระจายของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคในแต่ละขนาด และ (ข, แกนตั้งด้านขวา) การกระจายสะสมของขนาดโดยปริมาตร แสดงถึงสัดส่วนอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าหรือเท่ากับขนาดที่ระบุไว้ในแกนนอน ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในน้ำ

ตารางที่ 4.2 ค่าขนาดเฉลี่ยโดยปริมาตร ค่าขนาดเฉลี่ยโดยจำนวน และค่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาด

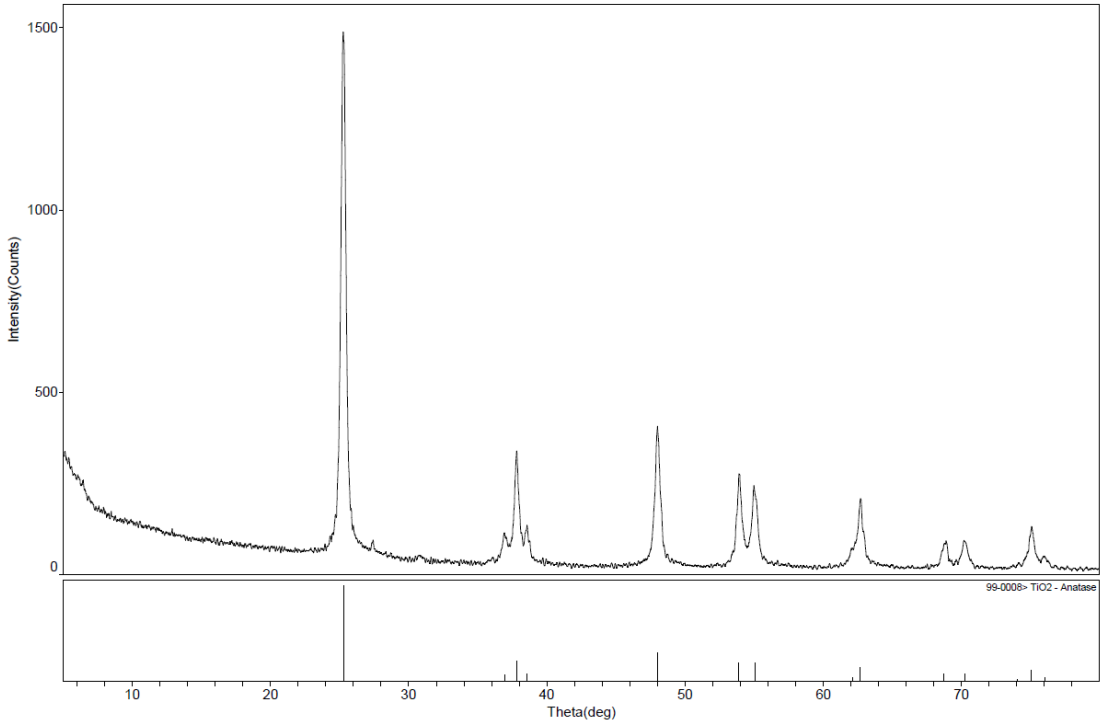
ชนิดขนาดของอนุภาค	**ค่าขนาดเฉลี่ย (ไมโครเมตร)**	**ค่าขนาดมัธยฐาน (ไมโครเมตร)**	**ค่าการกระจายตัวของขนาดของอนุภาค (%)**
เล็ก	6.19	5.45	65.0
กลาง	3.54	0.74	183.3
ใหญ่	0.45	0.35	120.0

1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการวัดการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometry)

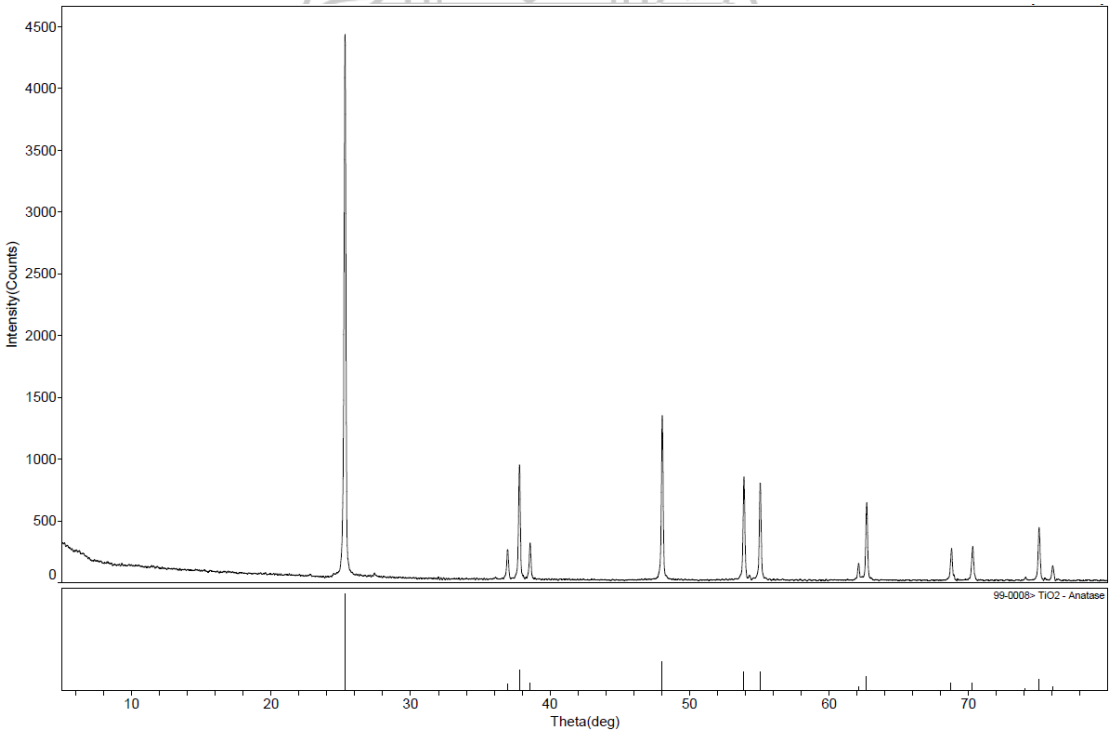
ลักษณะโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง ไททาเนียมไดออกไซด์ที่ต้องการใช้ในงานวิจัยนี้ควรมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสซึ่งมีประสิทธิภาพการเร่งปฏิกิริยาทางแสงได้ดีกว่า โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถวิเคราะห์ได้ด้วยการวัดการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) ซึ่งระบุความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เบี่ยงเบนออกมาในมุมต่างๆ โครงสร้างผลึกแต่ละประเภทจะส่งผลให้เกิดตำแหน่งมุมที่มีค่าความเข้มของรังสีมีค่าสูงสุด (Peak) ที่เป็นลักษณะจำเพาะต่อประเภทของโครงสร้างผลึก ดังนั้นถ้าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส ตำแหน่งมุมที่มีค่าความเข้มของรังสีมีค่าสูงสุดจากการวิเคราะห์ด้วย XRD จะต้องมีตำแหน่งที่ตรงกันกับค่ามาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส

ภาพที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 แสดงถึงค่าความเข้มของรังสีเอ็กซ์ในแต่ละตำแหน่งของมุมเบี่ยงเบนของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก กลาง และใหญ่ ตามลำดับ ในแต่ละกราฟมีการเปรียบเทียบตำแหน่งจุดสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส ซึ่งพบว่า ตำแหน่งมุมของอนุภาคทั้งสามตรงกับตำแหน่งมุมของค่ามาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าตำแหน่งมุมที่มีความเข้มสูงสุดหกอันดับแรกตามในตารางที่ 4.3 นั้น พบว่าค่าตำแหน่งมุมของอนุภาคทั้งสามขนาดมีค่าใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส

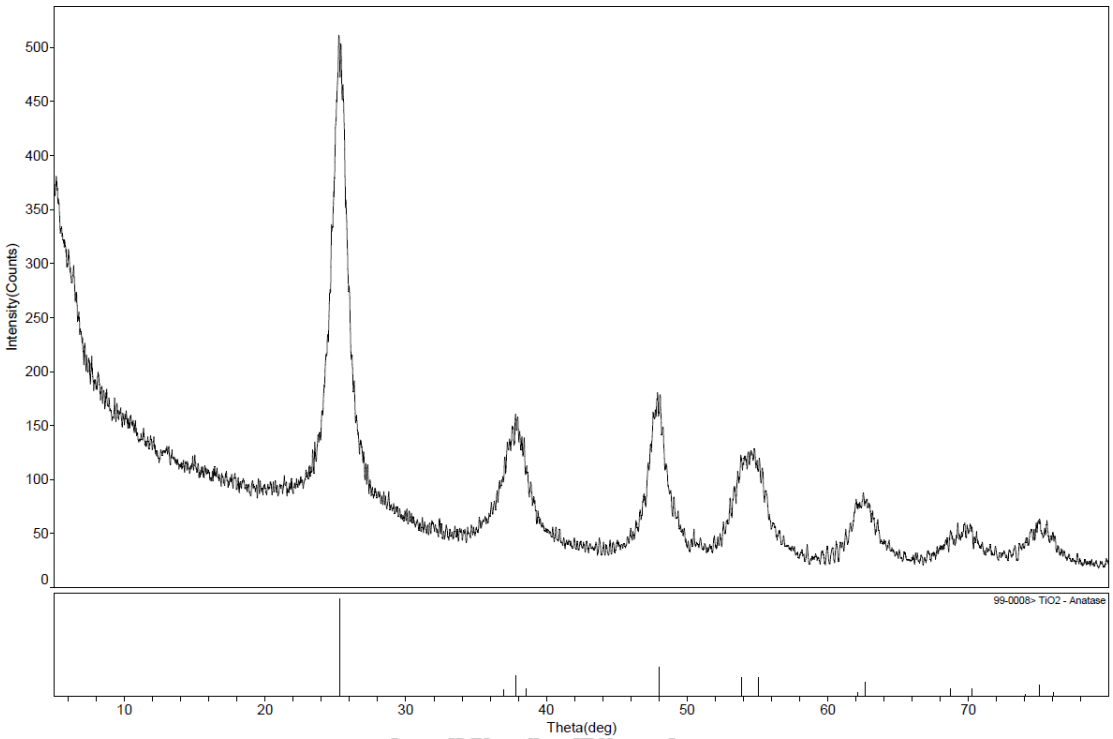
นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าความกว้างของจุดสูงสุดในแต่ละมุมนั้นมีความแตกต่างกัน กล่าวคืออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางมีความกว้างของจุดสูงสุดที่น้อยที่สุดตามมาด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ ตามลำดับ ตามสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer equation) ที่ระบุไว้ว่าความกว้างของจุดสูงสุดที่มีค่ามากเกิดจากที่อนุภาคมีขนาดของโครงสร้างผลึกที่เล็ก ดังนั้นอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางจึงมีขนาดของผลึกแบบอนาเทสที่ใหญ่ที่สุด ตามมาด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ตามลำดับ



ภาพที่ 4.7 กราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมวัด (2-theta) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดเล็ก เปรียบเทียบกับตำแหน่งของจุดสูงสุดของความเข้มของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส



ภาพที่ 4.8 กราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมวัด (2-theta) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดกลาง เปรียบเทียบกับตำแหน่งของจุดสูงสุดของความเข้มของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส



ภาพที่ 4.9 กราฟความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมวัด (2-theta) ของอนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดใหญ่เปรียบเทียบกับตำแหน่งของจุดสูงสุดของความเข้มของไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส

ตารางที่ 4.3 ตำแหน่งมุมวัด (2-theta, องศา) ของกราฟการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มรังสีสูงสุด 6 อันดับแรกของอนุภาคนาโนไททาเนียมเปรียบเทียบกับตำแหน่งมุมมาตรฐานของไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทสและดัชนีของมิลเลอร์ (Miller's indices) ของตำแหน่งมุม

อนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดเล็ก	**อนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดกลาง**	**อนุภาคนาโนไททาเนียมขนาดใหญ่**	**ไททาเนียมไดออกไซด์อนาเทส**	**ดัชนีของมิลเลอร์ (h, k, l)**
25.27	25.31	25.39	25.23	1, 0, 1
37.83	37.81	37.95	37.72	0, 0, 4
48.01	48.05	48.09	47.89	2, 0, 0
53.91	53.91	53.85	53.77	1, 0, 5
55.01	55.07	54.77	54.89	2, 1, 1
62.71	62.71	62.77	62.51	2, 0, 4

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในระยะต้นกล้าของข้าว

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในระยะต้นกล้าของข้าว 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวไวต่อแสงทำการศึกษากับข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวไม่ไวต่อแสงทำการศึกษากับข้าวปทุมธานี 1 โดยทดลองกับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ขนาดต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองอธิบายได้ดังนี้

2.1 การศึกษาอัตราการงอกของเมล็ดข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมง

2.1.1 ข้าวปทุมธานี 1 พบว่า ในการศึกษาอัตราการงอกของข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันในแต่ละขนาดไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.4

2.1.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ในการศึกษาอัตราการงอกของข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่ออัตราการ

งอกของเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันในแต่ละขนาดไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.4

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในอัตราการงอกของเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.4 อัตราการงอกของเมล็ดข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมง

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**อัตราการงอกของเมล็ดข้าว (%) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	99.20	99.84	99.90
10	99.58	99.50	99.89
50	99.54	99.77	99.79
100	99.83	99.63	99.47
250	99.79	99.52	99.78
1,000	99.90	99.84	99.58
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.11	0.06	0.07
%C.V.[3/]	0.26	0.15	0.17
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	99.80	99.85	99.76
10	99.67	99.71	99.96
50	99.52	99.68	99.92
100	99.60	99.61	99.66
250	99.68	99.88	99.72
1,000	99.93	99.92	99.96
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.06	0.05	0.06
%C.V.	0.15	0.13	0.14

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อัตราการงอกของเมล็ดข้าว (%) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns (non significance) คือ แถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยและ

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

2.2 การศึกษาความสูงต้นของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.2.1 ข้าวปทุมธานี 1

วันที่ 1 พบว่า ในการศึกษาความสูงต้นกล้าที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 1 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การใช้ความเข้มข้นที่แตกต่างกันในแต่ละขนาดไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 3 ความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 3 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดกลางส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนใน

ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 50, 100 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 80-120 นาโนเมตร พบว่า ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100, 1,000 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 250 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000, 250, 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 5 ความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 5 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร และ 80-120 นาโนเมตร ความสูงต้นกล้าข้าวอัตราการงอกของข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10,

50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 250, 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

วันที่ 7 ความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 7 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร และ80-120 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000, 250 และ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุดตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 9 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาค

นาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า เมื่อพิจารณาความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

ความสูงต้นข้าวมีค่ามากขึ้นเมื่อต้นข้าวมีอายุมากขึ้น ในการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและปริมาณ

2.2.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

วันที่ 1 พบว่า จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 1 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 3 ความสูงต้นกล้าข้าวอัตราการงอกของข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 3 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร และ 80-120 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100, 10 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความสูงต้นกล้าข้าวไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 5 ความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 5 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000, 50 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 80-120 นาโนเมตร พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นทุกความเข้มข้น ต้นกล้าข้าวสูงกว่าไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นทุกความเข้มข้น ต้นกล้าข้าวสูงกว่าไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 7 ความสูงต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 7 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 80-120 นาโนเมตร พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000, 250, 100 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000, 50 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

วันที่ 9 ความสูงต้นกล้าข้าวใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงต้นของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร และ 80-120 นาโนเมตร ข้าวหอมมะลิ กข 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

และที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร พบว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 1,000 และ 250 มิลลิกรัมต่อลิตร ต้นกล้าข้าวสูงที่สุด ตามลำดับ รองลงมา คือ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้น 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.5

ความสูงต้นข้าวมีค่ามากขึ้นเมื่อต้นข้าวมีอายุมากขึ้น ในการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและปริมาณ

2.2.3 เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในสูงต้นของข้าวระยะต้นกล้าเฉพาะในวันที่ 3 และ 5

ตารางที่ 4.5 ความสูงต้นของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 1, 3, 5, 7 และ 9 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร/ต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน														
	20-30 นาโนเมตร					80-120 นาโนเมตร					400-600 นาโนเมตร				
วันที่เก็บข้อมูล	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9
ข้าวปทุมธานี 1															
ไม่เติม	0.28	1.77c[6/]	3.97	4.73c	5.30d	0.28	1.77c	3.97	4.73c	5.30e	0.28	1.77c	3.97c	4.73d	5.30e
10	0.32	2.27ab	4.43	5.90b	6.64c	0.32	2.10ab	4.10	5.97b	7.15d	0.32	2.07bc	4.27bc	6.07c	7.30d
50	0.32	2.93a	4.80	6.47ab	7.28c	0.33	2.83a	4.67	6.53ab	7.70cd	0.33	2.90a	5.43a	6.20bc	7.36cd
100	0.32	2.60a	4.70	6.80a	8.04b	0.32	2.90a	5.27	7.03a	8.20bc	0.33	2.50ab	4.77[abc]	7.10[abc]	8.25bc
250	0.35	2.53a	4.70	6.97a	8.19b	0.34	2.53ab	4.83	7.17a	9.19ab	0.31	2.53ab	5.30ab	7.37ab	9.09ab
1,000	0.34	2.40ab	5.00	7.20a	9.06a	0.34	2.87a	5.10	7.34a	9.94a	0.35	2.53ab	5.50a	7.63a	10.27a
p-value	ns[1/]	**	ns	**	**	ns	**	ns	**	**	ns	**	*	**	**
SEM[4/]	0.01	0.16	0.15	0.37	0.54	0.01	0.19	0.21	0.40	0.67	0.01	0.16	0.26	0.44	0.70
%C.V. [5/]	7.09	16.12	7.83	14.34	17.88	6.64	18.80	11.31	15.21	20.59	6.88	16.85	13.27	16.52	21.51

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร/ต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**														
	20-30 นาโนเมตร					**80-120 นาโนเมตร**					**400-600 นาโนเมตร**				
วันที่เก็บข้อมูล	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)	ขนาดอนุภาค (1)					ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)					(1)x(2)				
p-value	ns	**	*[2/]	**[3/]	**	ns	**	*	**	**	ns	**	*	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	20-30 นาโนเมตร					80-120 นาโนเมตร					400-600 นาโนเมตร				
ไม่เติม	0.22	1.33c	3.40b	4.27c	4.80e	0.22	1.33	3.40b	4.27c	4.80e	0.22	1.33	3.40b	4.27c	4.80d
10	0.23	1.60bc	4.10ab	5.20bc	5.90d	0.23	1.73	4.67a	5.26b	5.96d	0.24	1.50	4.30a	5.50bc	6.56c
50	0.23	2.23a	4.60a	6.03ab	6.57cd	0.23	1.60	4.50a	6.36a	6.85c	0.24	1.83	4.47a	6.28[abc]	7.19bc
100	0.24	2.07ab	4.07ab	6.15ab	7.01c	0.22	1.40	4.37a	6.50a	7.64b	0.24	1.53	4.86a	6.12[abc]	7.87b
250	0.24	1.53bc	4.27a	6.36a	7.83b	0.23	1.37	4.43a	6.58a	7.90ab	0.24	1.73	4.53a	6.80ab	8.78a
1,000	0.24	1.83[abc]	4.60a	6.43a	8.72a	0.24	1.50	4.70a	6.95a	8.28a	0.24	2.13	4.87a	7.27a	9.13a
p-value	ns	**	*	**	**	ns	ns	**	**	**	ns	ns	*	**	**
SEM	0.00	0.14	0.18	0.35	0.57	0.00	0.06	0.20	0.42	0.54	0.00	0.12	0.22	0.43	0.65
%C.V.	4.00	19.32	10.65	14.74	20.41	3.80	10.37	11.06	16.98	19.14	3.73	16.98	12.30	17.52	21.48

ตารางที่ 4.5 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสูงของต้นข้าว (เซนติเมตร/ต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน														
	20-30 นาโนเมตร					80-120 นาโนเมตร					400-600 นาโนเมตร				
วันที่เก็บข้อมูล	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)	ขนาดอนุภาค (1)					ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)					(1)x(2)				
p-value	ns	*	**	**	**	ns	*	**	**	**	ns	*	**	**	**

หมายเหตุ [1/]ns (non significance) คือ แถวเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$), [2/]* หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$), [3/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือ

ผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [4/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยและ, [5/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [6/]a-e ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.3 การศึกษาจำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 5 ของการทดลองมีใบแต่ยังไม่สมบูรณ์ชัดเจน ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษานับจำนวนใบในวันที่ 7 ของการแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจากการศึกษาอธิบายได้ดังนี้

2.3.1 ข้าวปทุมธานี 1

วันที่ 7 พบว่า จำนวนใบของต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนใบของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 7 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดเล็กส่งผลดีน้อยที่สุด

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นทุกความเข้มข้นจำนวนใบต้นกล้าข้าวมากกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.6 ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันดังอธิบายในตารางที่ 4.6

วันที่ 9 พบว่า จำนวนใบของต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันดังอธิบายในตารางที่ 4.6

2.3.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

วันที่ 7 พบว่า จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนใบของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนใบของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 7 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดกลางส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลดีมากขึ้น แต่ผลของความเข้มข้นต่อจำนวนใบมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อจำนวนใบมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.6 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า จำนวนใบของต้นกล้าข้าวที่ใช้

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตรพบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความเข้มข้นทุกความเข้มข้นจำนวนใบต้นกล้าข้าวมากกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ความสูงต้นกล้าข้าวน้อยที่สุด โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.6

วันที่ 9 พบว่า จำนวนใบของต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่มีความแตกต่างกันดังอธิบายในตารางที่ 4.6

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในจำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าเฉพาะในวันที่ 7

ตารางที่ 4.6 จำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 7 และ 9 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**จำนวนใบข้าว (ต่อต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**					
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**		**80-120 นาโนเมตร**		**400-600 นาโนเมตร**	
วันที่เก็บข้อมูล	7	9	7	9	7	9
ข้าวปทุมธานี 1						
ไม่เติม	1b[4/]	2	1	2	1	2
10	1.67a	2	2	2	2	2
50	2a	2	2	2	2	2
100	2a	2	2	2	2	2
250	2a	2	2	2	2	2
1,000	2a	2	2	2	2	2
p-value	**[1/]	-	-	-	-	-
SEM[2/]	0.16	-	0.17	-	0.17	-
%C.V. [3/]	22.71	-	22.27	-	22.27	-

ตารางที่ 4.6 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนใบข้าว (ต่อต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน					
	20-30 นาโนเมตร		80-120 นาโนเมตร		400-600 นาโนเมตร	
วันที่เก็บข้อมูล	7	9	7	9	7	9
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)						
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)		ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)		(1)x(2)	
p-value	**	-	-	-	-	-
ข้าวขาวดอกมะลิ 105						
ไม่เติม	1b	2	1b	2	1b	2
10	1.52a	2	1.74a	2	1.67a	2
50	2a	2	2a	2	2a	2
100	2a	2	2a	2	2a	2
250	2a	2	2a	2	2a	2
1,000	2a	2	2a	2	2a	2
p-value	**	-	**	-	**	-
SEM	0.17	-	0.16	-	0.16	-
%C.V.	23.70	-	22.38	-	22.67	-
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)						
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)		ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)		(1)x(2)	
p-value	**	-	**	-	**	-

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),
[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,
[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [4/]
a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.4 การศึกษาสีใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 5 ของการทดลองมีใบแต่ยังไม่สมบูรณ์ชัดเจน ผู้วิจัยจึงเริ่มศึกษาวัดสีใบในวันที่ 7 ของการแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งจากการศึกษาอธิบายได้ดังนี้

2.4.1 ข้าวปทุมธานี 1

วันที่ 7 และ วันที่ 9 พบว่า จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 7 และ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อสีใบมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อสีใบมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.7

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า สีใบของต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ สีใบของข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มใบมากกว่าที่ใช้ 250, 100, 50, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่เติมตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.7

2.4.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

วันที่ 7 และ วันที่ 9 พบว่า จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 7 และ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อสีใบมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อสีใบมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.7

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า สีใบของต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ สีใบของข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มใบมากกว่าที่ใช้ 250, 100, 50, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่เติมตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.7

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในจำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้า

ตารางที่ 4.7 สีใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ 7 และ 9 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**สีใบข้าว (SPAD index) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**					
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**		**80-120 นาโนเมตร**		**400-600 นาโนเมตร**	
วันที่เก็บข้อมูล	7	9	7	9	7	9
ข้าวปทุมธานี 1						
ไม่เติม	5.42d[4/]	4.54d	5.42d	4.54d	5.42c	4.54c
10	11.28c	12.31c	14.19c	15.04c	16.60b	17.68b
50	16.17b	16.30bc	15.98c	16.33c	18.90b	20.60b
100	17.00ab	17.83ab	21.61b	22.52b	25.98a	27.72a
250	18.41ab	19.48ab	22.49b	23.89b	27.52a	28.89a
1,000	21.25a	22.40a	27.07a	28.74a	28.22a	29.90a
p-value	**[1/]	**	**	**	**	**
SEM[2/]	2.32	2.58	3.12	3.47	3.58	3.94
%C.V. [3/]	38.11	40.85	42.95	45.95	42.87	44.83

ตารางที่ 4.7 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีใบข้าว (SPAD index) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน					
	20-30 นาโนเมตร		80-120 นาโนเมตร		400-600 นาโนเมตร	
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)						
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)		ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)		(1)x(2)	
p-value	**	**	**	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105						
ไม่เติม	1.58d	2.15e	1.58d	2.15d	1.58d	2.15e
10	3.65c	5.52d	3.86c	7.96c	4.71c	8.82d
50	4.32bc	6.80cd	4.27c	10.14c	4.73c	10.40d
100	4.45bc	7.84bc	5.22b	13.15b	7.38b	13.73c
250	4.86b	9.48b	5.62b	15.41ab	8.97a	17.37b
1,000	6.64a	11.70a	7.03a	16.74a	10.26a	21.80a
p-value	**	**	**	**	**	**
SEM	0.67	1.35	0.76	2.20	1.31	2.81
%C.V.	38.81	45.49	40.21	49.34	51.02	55.59
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)						
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)		ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)		(1)x(2)	
p-value	**	**	**	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [4/] a-e ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.5 การศึกษาน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

2.5.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อน้ำหนักสดและแห้งมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อน้ำหนักสดและแห้งมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.8

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วัน ต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่ามากกว่าที่ใช้ 250, 100, 50, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่เติมตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.8

2.5.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่อน้ำหนักสดและแห้งมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อน้ำหนักสดและแห้งมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.8

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วัน ต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่ามากกว่าที่ใช้ 250, 100,

50, 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่เติมตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.8

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้า

ตารางที่ 4.8 น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ขนาดอนุภาค**					
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**		**80-120 นาโนเมตร**		**400-600 นาโนเมตร**	
น้ำหนักต้นข้าว (มิลลิกรัม/ต้น)	สด	แห้ง	สด	แห้ง	สด	แห้ง
ข้าวปทุมธานี 1						
ไม่เติม	9.06c[4/]	0.88c	9.06d	0.88d	9.06c	0.88d
10	11.26b	1.16c	12.08c	1.26c	12.30b	1.24c
50	11.63b	1.21bc	12.63bc	1.34bc	12.78b	1.36bc
100	12.52ab	1.52ab	13.08bc	1.49ab	13.36b	1.45bc
250	12.66ab	1.57a	14.00ab	1.53ab	15.30a	1.54ab
1,000	13.52a	1.68a	15.37a	1.69a	16.63a	1.76a
p-value	**[1/]	**	**	**	**	**
SEM[2/]	0.63	0.12	0.87	0.11	1.07	0.12
%C.V. [3/]	13.17	22.72	16.73	20.56	17.78	21.71

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)

สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)		ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)		(1)x(2)	
p-value	**	**	**	**	**	**

ตารางที่ 4.8 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ขนาดอนุภาค					
	20-30 นาโนเมตร		80-120 นาโนเมตร		400-600 นาโนเมตร	
น้ำหนักต้นข้าว (มิลลิกรัม/ต้น)	สด	แห้ง	สด	แห้ง	สด	แห้ง
ข้าวขาวดอกมะลิ 105						
ไม่เติม	7.37d	0.69d	7.37e	0.69b	7.37c	0.69b
10	8.93c	0.86cd	9.01d	0.91ab	9.34b	0.99b
50	9.74bc	0.94bc	10.44c	1.08ab	12.66a	1.34a
100	10.45b	1.04abc	11.59bc	1.38a	13.04a	1.36a
250	10.67b	1.06ab	12.59ab	1.36a	13.51a	1.40a
1,000	12.45a	1.22a	13.63a	1.40a	13.81a	1.59a
p-value	**	**	**	**	**	**
SEM	0.70	0.07	0.95	0.12	1.08	0.13
%C.V.	17.27	18.86	21.54	25.98	22.67	26.62
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)						
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)		ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)		(1)x(2)	
p-value	**	**	**	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/] a-e ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.6 การศึกษาอัตราการรอดตายข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 9 วัน

2.6.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่ออัตราการรอดตายของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่ออัตราการรอดตาย

ของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่ออัตราการรอดตายมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่ออัตราการรอดตายมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.9

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า อัตราการรอดตายข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 9 วัน ต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ อัตราการรอดตายของข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับดีกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.9

2.6.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่ออัตราการรอดตายของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่ออัตราการรอดตายของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 9 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลดีที่สุดและการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีที่สุด แต่ผลของความเข้มข้นต่ออัตราการรอดตายมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่ออัตราการรอดตายมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.9

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า อัตราการรอดตายข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 9 วัน ต้นกล้าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ อัตราการรอดตายของข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับดีกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.9

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในอัตราการรอดตาย

ตารางที่ 4.9 อัตราการรอดตายข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 9 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อัตราการรอดตายข้าว (%) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	73.15b[4/]	73.15b	73.15b
10	95.11a	99.52a	100.00a
50	98.45a	99.84a	100.00a
100	99.26a	100.00a	100.00a
250	99.67a	100.00a	100.00a
1,000	99.93a	100.00a	100.00a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	4.28	4.45	4.48
%C.V. [3/]	11.13	11.43	11.47
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	82.85c	82.85b	82.85b
10	96.22b	99.30a	100.00a
50	99.71a	100.00a	100.00a
100	100.00a	100.00a	100.00a
250	100.00a	100.00a	100.00a
1,000	100.00a	100.00a	100.00a
p-value	**	**	**
SEM	2.79	2.84	2.85
%C.V.	7.08	7.16	7.20
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/] a-c ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.7 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

2.7.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.10

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.10

2.7.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.10

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโน

ไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.10

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.10 การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	1.07f	0.83f	0.97f
10	5,067.04e	9,187.28e	4,327.00e
50	9,745.81d	13,450.00d	8,855.00d
100	16,332.00c	18,012.00c	15,330.00c
250	17,433.00b	19,554.00b	16,553.00b
1,000	21,947.00a	24,189.00a	18,543.00a
p-value	**	**	**
SEM	2,725.03	2,352.27	2,422.05
%C.V.	56.79	40.96	55.96
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.10 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	1.46f[4/]	1.74f	0.85f
10	4,432.02e	7,559.52e	3,109.60e
50	8,720.44d	11,672.71d	7,762.34d
100	13,230.10c	14,321.10c	10,122.00c
250	15,892.57b	17,643.33b	14,564.08b
1,000	18,773.99a	20,163.15a	15,525.00a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	2,912.03	2,986.56	2,50.51
%C.V. [3/]	70.13	61.51	72.52
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.8 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในรากที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกันที่ข้าวอายุ 5 วัน

2.8.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวอายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 อายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสม

ธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.11

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.11

2.8.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวอายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวขาวดอกมะลิ 105 อายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.11

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.11

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าว

ตารางที่ 4.11 การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 5 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.84f[4/]	1.01f	0.78f
10	3,230.00e	6,763.00e	2,212.00e
50	7,433.00d	10,034.00d	6,646,00d
100	11,387.00c	15,539.00c	9,432.00c
250	14,223.00b	18,831.00b	13,210.00b
1,000	16,154.00a	20,445.00a	13,334.00a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	2,585.08	3,192.43	2,275.22
%C.V. [3/]	72.47	65.52	74.58
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.73f	1.09f	0.81f
10	3,201.01e	4,982.31e	2,219,46e
50	6,931.55d	9,010.00d	6,915.90d
100	10,968.30c	12,021.56c	8,723.12c
250	12,122.17b	14,283.37b	11,081.65b
1,000	14,432.06a	15,806.32a	12,904.21a
p-value	**	**	**
SEM	2,275.39	2,447.82	2,052.11
%C.V.	70.17	64.12	72.07
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.9 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกันที่ข้าวอายุ 5 วัน

2.9.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวอายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 อายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.12

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.12

2.9.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวอายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 อายุ 5 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.12

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียม

ไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.12

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าว

ตารางที่ 4.12 การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 5 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	1.07f[4/]	1.08f	1.11f
10	1,003.00e	1,547.00e	403.00e
50	2,276.00d	3,211.00d	1,498.00d
100	3,543.02c	4,012.00c	2,710.00c
250	4,012.00b	4,573,12b	3,534.00b
1,000	4,323.65a	4,991.34a	4,011.00a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	712.48	787.25	675.65
%C.V. [3/]	69.08	63.14	81.68
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.12 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	1.05f	1.62f	1.91f
10	950.50e	1,339.33e	807.19e
50	1,746.12d	2,151.48d	1,627.30d
100	2,544.06c	3,009.97c	2,315.41c
250	3,210.85b	3,811.71b	3,019.00b
1,000	4,011.78a	4,413.69a	3,324.03a
p-value	**	**	**
SEM	603.74	666.86	526.26
%C.V.	71.19	66.55	69.71
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.10 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในรากที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกันที่ข้าวอายุ 9 วัน

2.10.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 อายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสม

ธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.13

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.13

2.10.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่าตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวหอมมะลิกข 105 อายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.13

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.13

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าว

ตารางที่ 4.13 การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	1.07f[4/]	1.84f	1.22f
10	1,766.23e	3,098.00e	1,532.78e
50	5,985.00d	8,321.42d	5,532.93d
100	8,543.04c	11,783.13c	8,032.41c
250	11,121.00b	14,210.55b	8,900.00b
1,000	13,221.31a	16,200.21a	10,211.97a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	2,122.63	2,601.12	1,692.21
%C.V. [3/]	76.77	71.30	72.70
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	1.75f	2.08f	2.27f
10	2,361.17e	4,038.33e	2,005.96e
50	5,409.84d	7,245.90d	5,091.08d
100	8,553.45c	8,720.29c	6,726.14c
250	9,320.00b	10,395.12b	8,748.32b
1,000	11,176.54a	13,269.00a	10,642.05a
p-value	**	**	**
SEM	1,768.19	1,924.61	1,644.07
%C.V.	70.57	64.77	72.74
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [2/]SEM (standard error of mean)

คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวน

ในหน่วยร้อยละ, [4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.11 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกันที่ข้าวอายุ 9 วัน

2.11.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1

อายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.14

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.14

2.11.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 อายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.14

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.14

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าว

ตารางที่ 4.14 การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
	20-30 นาโนเมตร	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	1.41f[4/]	2.20f	1.78f
10	1,226.46e	2,013.59e	290.09e
50	1,652.03d	2,671.68d	1,220.65d
100	2,776.12c	3,115.17c	2,008.00c
250	3,113.51b	3,887.39b	3,009.88b
1,000	3,422.37a	4,328.45a	3,077.00a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	534.57	631.89	540.06
%C.V.[3/]	64.44	57.98	82.61
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.64f	1.87f	1.69f
10	940.58e	1,133.12e	622.07e
50	1,322.31d	1,553.60d	1,109.81d
100	1,894.04c	2,552.48c	1,800.58c
250	2,779.51b	3,211.51b	2,350.65b
1,000	3,309.93a	3,637.34a	2,561.00a
p-value	**	**	**
SEM	496.71	559.63	410.55
%C.V.	71.24	68.03	71.44
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.12 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในใบที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกันที่ข้าวอายุ 9 วัน

2.12.1 ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1

อายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.15

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.15

2.12.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง พบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวขาวดอกมะลิ 105 อายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.15

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว พบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ในข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ พบว่า ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวมากกว่า 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ไม่ใช้ตามลำดับ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.15

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ตารางที่ 4.15 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	2.02f	1.37f	0.97f
10	175.12e	216.87e	89.91e
50	276.00d	338.65d	212.03d
100	331.43c	432.13c	279.09c
250	485.66b	613.44b	354.00b
1,000	628.53a	876.67a	410.25a
p-value	**	**	**
SEM	90.69	125.03	63.90
%C.V.	70.19	74.12	69.75
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.98f[4/]	0.82f	2.61f
10	188.95e	216.92e	67.31e
50	220.15d	308.68d	187.03d
100	378.99c	432.44c	334.71c
250	501.50b	550.00b	427.32b
1,000	530.18a	661.80a	447.00a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	83.24	97.39	76.55
%C.V. [3/]	67.19	65.94	76.74

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)

สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]**หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [2/]SEM (standard error of mean)

คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2.13 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของธาตุไททาเนียมและการเจริญเติบโตของข้าวอายุ 9 วัน

2.13.1 ข้าวปทุมธานี 1

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวปทุมธานี 1 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรแสดงอยู่ในภาพที่ 4.10 (A) พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก (> 0) ทั้งหมด และมีความสัมพันธ์กันมาก

(> 0.8) ของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดตายกับตัวแปรอื่นๆ พบว่า มีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในต้น ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งในระดับมาก (> 0.8) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก และใบในระดับปานกลาง (0.5-0.8)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวปทุมธานี 1 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 นาโนเมตร แสดงอยู่ในภาพที่ 4.10 (B) พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก (> 0) ทั้งหมด และมีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดตายกับตัวแปรอื่นๆ พบว่า มีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดและต้น ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งในระดับมาก (> 0.8) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก และใบ และความสูงในระดับปานกลาง (0.5-0.8)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวปทุมธานี 1 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรแสดงอยู่ในภาพที่ 4.10 (C) พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก (> 0) ทั้งหมด และมีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดตายกับตัวแปรอื่นๆ พบว่า มีความสัมพันธ์กับตัวแปรค่าสีใบ และน้ำหนักแห้งในระดับมาก (> 0.8) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง และน้ำหนักสดในระดับปานกลาง (0.5-0.8)

A

Variables	Seed Ti	Root Ti	Stem Ti	Leaf Ti	Height	SPAD index	Fresh weight	Dry weight	Survival rate
Seed Ti	1.000								
Root Ti	0.989	1.000							
Stem Ti	0.990	0.971	1.000						
Leaf Ti	0.970	0.977	0.960	1.000					
Height	0.988	0.969	0.986	0.974	1.000				
SPAD index	0.964	0.956	0.964	0.958	0.986	1.000			
Fresh weight	0.961	0.929	0.977	0.950	0.990	0.978	1.000		
Dry weight	0.990	0.967	0.997	0.958	0.984	0.950	0.973	1.000	
Survival rate	0.794	0.749	0.845	0.782	0.863	0.898	0.917	0.823	1.000

B

Variables	Seed Ti	Root Ti	Stem Ti	Leaf Ti	Height	SPAD index	Fresh weight	Dry weight	Survival rate
Seed Ti	1.000								
Root Ti	0.979	1.000							
Stem Ti	0.990	0.961	1.000						
Leaf Ti	0.961	0.958	0.948	1.000					
Height	0.988	0.967	0.993	0.979	1.000				
SPAD index	0.996	0.968	0.984	0.961	0.986	1.000			
Fresh weight	0.983	0.938	0.991	0.962	0.992	0.981	1.000		
Dry weight	0.995	0.955	0.992	0.948	0.986	0.995	0.991	1.000	
Survival rate	0.810	0.699	0.852	0.668	0.794	0.802	0.846	0.853	1.000

C

Variables	Seed Ti	Root Ti	Stem Ti	Leaf Ti	Height	SPAD index	Fresh weight	Dry weight	Survival rate
Seed Ti	1.000								
Root Ti	0.993	1.000							
Stem Ti	0.975	0.976	1.000						
Leaf Ti	0.988	0.992	0.983	1.000					
Height	0.944	0.925	0.927	0.959	1.000				
SPAD index	0.972	0.950	0.920	0.956	0.949	1.000			
Fresh weight	0.933	0.920	0.926	0.960	0.994	0.947	1.000		
Dry weight	0.951	0.944	0.916	0.969	0.987	0.962	0.986	1.000	
Survival rate	0.699	0.674	0.592	0.698	0.755	0.840	0.781	0.808	1.000

Pearson Correlation

1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5

ภาพที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวปทุมธานี 1 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (A) 20-30 นาโนเมตร (B) 80-120 นาโนเมตร และ (C) 400-600 นาโนเมตร

2.13.2 ข้าวขาวดอกมะลิ 105

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรแสดงอยู่ในภาพที่ 4.11 (A) พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก (> 0) ทั้งหมด และมีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดตายกับตัวแปรอื่นๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก และใบ ค่าสีใบ น้ำหนักสด

และน้ำหนักแห้งในระดับมาก (> 0.8) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในต้น และความสูงในระดับปานกลาง (0.5-0.8)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 นาโนเมตรแสดงอยู่ในภาพที่ 4.11 (B) พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก (> 0) ทั้งหมด และมีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดตายกับตัวแปรอื่นๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด และค่าสีใบในระดับมาก (> 0.8) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในราก ต้น และใบ ความสูง น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้งในระดับปานกลาง (0.5-0.8)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วัน หลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรแสดงอยู่ในภาพที่ 4.11 (C) พบว่ามีสหสัมพันธ์เชิงบวก (> 0) ทั้งหมด และมีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการรอดตายกับตัวแปรอื่นๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กับตัวแปรความสูง และน้ำหนักแห้งในระดับมาก (> 0.8) และมีความสัมพันธ์กับตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ค่าสีใบ และน้ำหนักสดในระดับปานกลาง (0.5-0.8)

เมื่อเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาจากทิศทางความสหสัมพันธ์ พบว่าในข้าวทั้งสองพันธุ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทุกตัวแปรอยู่ในทิศทางบวกทั้งหมด

A

Variables	Seed Ti	Root Ti	Stem Ti	Leaf Ti	Height	SPAD index	Fresh weight	Dry weight	Survival rate
Seed Ti	1.000								
Root Ti	0.997	1.000							
Stem Ti	0.986	0.971	1.000						
Leaf Ti	0.986	0.975	0.989	1.000					
Height	0.986	0.974	0.995	0.976	1.000				
SPAD index	0.936	0.925	0.947	0.920	0.970	1.000			
Fresh weight	0.972	0.966	0.970	0.949	0.987	0.988	1.000		
Dry weight	0.982	0.978	0.974	0.963	0.987	0.980	0.998	1.000	
Survival rate	0.806	0.809	0.777	0.810	0.797	0.852	0.815	0.832	1.000

B

Variables	Seed Ti	Root Ti	Stem Ti	Leaf Ti	Height	SPAD index	Fresh weight	Dry weight	Survival rate
Seed Ti	1.000								
Root Ti	0.995	1.000							
Stem Ti	0.986	0.982	1.000						
Leaf Ti	0.993	0.993	0.996	1.000					
Height	0.992	0.987	0.983	0.983	1.000				
SPAD index	0.985	0.986	0.976	0.988	0.972	1.000			
Fresh weight	0.992	0.995	0.994	0.997	0.989	0.978	1.000		
Dry weight	0.961	0.951	0.967	0.954	0.986	0.936	0.964	1.000	
Survival rate	0.814	0.776	0.738	0.759	0.800	0.813	0.739	0.760	1.000

C

Variables	Seed Ti	Root Ti	Stem Ti	Leaf Ti	Height	SPAD index	Fresh weight	Dry weight	Survival rate
Seed Ti	1.000								
Root Ti	0.995	1.000							
Stem Ti	0.994	0.991	1.000						
Leaf Ti	0.990	0.985	0.995	1.000					
Height	0.980	0.977	0.984	0.963	1.000				
SPAD index	0.968	0.970	0.986	0.967	0.982	1.000			
Fresh weight	0.944	0.943	0.930	0.927	0.947	0.885	1.000		
Dry weight	0.947	0.959	0.937	0.921	0.962	0.913	0.985	1.000	
Survival rate	0.679	0.677	0.688	0.635	0.801	0.720	0.794	0.809	1.000

Pearson Correlation
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5

ภาพที่ 4.11 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของต้นกล้าข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (A) 20-30 นาโนเมตร (B) 80-120 นาโนเมตร และ (C) 400-600 นาโนเมตร

ตอนที่ 3 การศึกษาผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวในระยะการเจริญเติบโตและการเก็บเกี่ยวผลผลิต

3.1 การศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวที่แช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพียงครั้งเดียวก่อนปลูก

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในระยะต้นกล้าของข้าว 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวไวต่อแสงทำการศึกษากับข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวไม่ไวต่อแสงทำการศึกษากับข้าวปทุมธานี 1 โดยทดลองกับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ขนาดต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองอธิบายได้ดังนี้

3.1.1 การศึกษาคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกันในเมล็ดข้าว

การศึกษาคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกันในเมล็ดข้าวทั้งข้าวปทุมธานี 1 และข้าว กข 105 พบว่า คุณสมบัติของดินก่อนการทดลองมีความเหมาะสมในการปลูกข้าว แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ทั้ง 2 พันธุ์ปริมาณธาตุอาหารในดิน และคุณสมบัติทางเคมีในดินลดลง แต่ไม่แตกต่างกันทุกความเข้มและขนาดของอนุภาค โดยไม่ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.16

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกหลังการทดลอง

ตารางที่ 4.16 คุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	EC (ms/cm)	OM (%)	Total N (%)	Total P_2O_5 (%)	Total K_2O (%)	C/N Ratio	Ti (ppb)
คุณสมบัติของดินก่อนการทดลอง			6.5	4.5	1.3	1.06	1.3	2.5	1.6	4.1
คุณสมบัติของดินหลังการทดลอง										
ข้าวปทุมธานี 1	ไม่เติม (ควบคุม)		6.7	1.8	0.8	0.12	0.23	0.7	2.0	3.9
	ขนาดเล็ก	10	6.7	1.8	0.8	0.12	0.21	0.7	1.9	3.4
		50	6.6	1.7	0.6	0.11	0.23	0.7	2.0	3.6
		100	6.7	1.8	0.8	0.13	0.19	0.6	2.2	3.3
		250	6.7	1.9	0.8	0.12	0.20	0.6	2.1	3.7
		1,000	6.7	1.8	0.7	0.12	0.24	0.7	1.9	4
	p-value		ns[1/]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	ขนาดกลาง	10	6.7	1.7	0.6	0.12	0.23	0.7	1.9	3.2
		50	6.6	1.7	0.7	0.14	0.21	0.6	2.0	3.9
		100	6.7	1.7	0.8	0.11	0.24	0.7	2.1	3.7
		250	6.6	1.8	0.8	0.11	0.23	0.7	2.0	3.1
		1,000	6.8	1.8	0.8	0.12	0.23	0.7	2.1	4.2
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	ขนาดใหญ่	10	6.7	1.7	0.9	0.12	0.21	0.6	2.2	3.6
		50	6.6	1.7	0.8	0.12	0.24	0.6	1.9	3.3
		100	6.7	1.8	0.6	0.11	0.23	0.7	2.0	3
		250	6.8	1.6	0.7	0.14	0.22	0.7	2.0	3.2
		1,000	6.7	1.8	0.8	0.12	0.23	0.6	2.0	3.1
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	EC (ms/cm)	OM (%)	Total N (%)	Total P_2O_5 (%)	Total K_2O (%)	C/N Ratio	Ti (ppb)
	ไม่เติม (ควบคุม)		6.6	1.9	0.8	0.13	0.22	0.7	2.1	3.7
	ขนาดเล็ก	10	6.7	1.8	0.8	0.13	0.21	0.6	2.1	2.5
		50	6.7	1.9	0.8	0.12	0.22	0.6	2.2	3.1
		100	6.8	1.6	0.8	0.12	0.21	0.6	1.9	4.3
		250	6.7	1.8	0.9	0.13	0.23	0.7	2.0	3.6
		1,000	6.6	1.7	0.7	0.11	0.22	0.6	2.2	3.4
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ขนาดกลาง	10	6.6	1.8	0.8	0.13	0.22	0.7	2.2	3.8
		50	6.7	1.7	0.7	0.11	0.22	0.6	2.1	2.7
		100	6.7	1.7	0.7	0.12	0.23	0.7	2.1	3.1
		250	6.7	1.7	0.8	0.12	0.24	0.7	2.0	3
		1,000	6.7	1.6	0.9	0.12	0.21	0.7	2.1	3.2
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	ขนาดใหญ่	10	6.7	1.8	0.8	0.13	0.21	0.7	2.1	2.3
		50	6.8	1.7	0.8	0.11	0.23	0.7	2.2	3.1
		100	6.6	1.7	0.9	0.12	0.24	0.6	2.2	1.7
		250	6.7	1.8	0.7	0.12	0.21	0.6	2.2	3.3
		1,000	6.6	1.8	0.7	0.12	0.22	0.6	2.0	2.9
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$)

3.1.2 การศึกษาความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนทาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 30 90 และ 120 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในทุกความเข้มข้นส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้ นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อความสูงต้นข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงต้นข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.17

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เก็บข้อมูลข้าวอายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน ต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ ความสูงต้นข้าวที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับดีกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.17

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 30 90 และ 120 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในทุกความเข้มข้นส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้ นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อความสูงต้นข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงต้นข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.17

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เก็บข้อมูลข้าวอายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน ต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ ความสูงต้นข้าวที่ปริมาณการใช้

1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับดีกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.17

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในความสูงต้นข้าว

ตารางที่ 4.17 ความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ความสูงต้นข้าว (เซนติเมตร) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**								
	20-30 นาโนเมตร			**80-120 นาโนเมตร**			**400-600 นาโนเมตร**		
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	19.47b[4/]	63.00b	72.41b	19.47b	63.00b	72.41b	19.47b	63.00b	72.41b
10	23.60a	66.00a	79.61a	24.77a	67.31a	80.02a	25.74a	68.00a	80.11a
50	23.72a	64.35a	80.50a	25.26a	67.00a	80.79a	25.96a	68.70a	81.00a
100	24.55a	65.33a	80.89a	25.27a	67.64a	81.06a	26.03a	69.00a	81.25a
250	25.15a	64.68a	81.02a	26.44a	68.00a	81.23a	27.26a	69.37a	81.45a
1,000	25.59a	67.64a	81.09a	27.30a	68.70a	81.60a	28.15a	69.59a	82.58a
p-value	*[1/]	*	*	*	*	*	*	*	*
SEM[2/]	0.90	0.65	1.39	1.12	0.83	1.44	1.25	1.01	1.51
%C.V. [3/]	9.32	2.44	4.29	11.11	3.02	4.43	12.06	3.66	4.65
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	*	*	*	*	*	*	*	*	*

ตารางที่ 4.17 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**ความสูงต้นข้าว (เซนติเมตร) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**								
	20-30 นาโนเมตร			**80-120 นาโนเมตร**			**400-600 นาโนเมตร**		
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	21.11b	64.45b	76.56b	21.11b	64.45b	76.56b	21.11b	64.45b	76.56b
10	26.23a	68.02a	82.34a	26.58a	68.81a	82.77a	27.31a	68.12a	82.88a
50	26.28a	68.33a	82.45a	27.22a	69.56a	83.01a	27.56a	68.34a	83.02a
100	26.35a	68.41a	82.67a	27.89a	69.03a	83.00a	28.02a	69.11a	83.90a
250	26.21a	68.00a	82.65a	27.90a	69.34a	83.34a	28.55a	69.32a	83.81a
1,000	27.03a	68.90a	82.90a	27.87a	69.11a	83.56a	28.79a	70.04a	84.37a
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
p-value	*	*	*	*	*	*	*	*	*
SEM	0.89	0.66	1.01	1.08	0.79	1.10	1.18	0.81	1.18
%C.V.	8.58	2.39	3.03	10.06	2.84	3.29	10.74	2.90	3.50
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	*	*	*	*	*	*	*	*	*

หมายเหตุ [1/]* หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.1.3 การศึกษาสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อสีใบข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อสีใบข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 30 กล่าวคือ การใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีสีใบข้าวสูงสุด และการใช้อนุภาคนาโนในทุกความเข้มข้นส่งผลให้มีสีใบข้าวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้ นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อสีใบข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อสีใบข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น แต่ในส่วนของวันที่ 90 และ 120 ทั้งสองตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าวปทุมธานี 1 ดังอธิบายในตารางที่ 4.18

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เก็บข้อมูลข้าวอายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน สีใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ สีใบข้าวในวันที่ 30 การปลูกที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับดีกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนวันที่ 90 และ 120 วัน ของการปลูกสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณและขนาดทุกระดับไม่แตกต่างกับที่ไม่แช่ โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.18

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อสีใบข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ต่อสีใบข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 30 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีสีใบข้าวสูงสุด และการใช้อนุภาคนาโนในทุกความเข้มข้นส่งผลให้มีสีใบข้าวมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่ใช้ นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อสีใบข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อสีใบข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น แต่ในส่วนของวันที่ 90 และ 120 ทั้งสองตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าวขาวดอกมะลิ 105 ดังอธิบายในตารางที่ 4.18

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เก็บข้อมูลข้าวอายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน สีใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ สีใบข้าวในวันที่ 30 การปลูกที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับดีกว่าที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนวันที่ 90 และ 120 วัน ของการปลูกสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณและขนาดทุกระดับไม่แตกต่างกับที่ไม่แช่ โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.18

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในสีใบข้าว

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

ตารางที่ 4.18 สีใบข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**สีใบข้าว (SPAD index) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**								
	20-30 นาโนเมตร			**80-120 นาโนเมตร**			**400-600 นาโนเมตร**		
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	30.13b[5/]	21.02	15.56	30.13b	21.02	15.56	30.13b	22.46	15.56
10	33.34a	21.21	14.76	33.21a	20.98	16.23	34.07a	22.46	15.60
50	33.68a	22.13	15.66	33.34a	20.13	15.68	34.43a	21.33	15.91
100	34.03a	22.05	15.87	33.83a	19.22	16.02	34.55a	19.95	16.33
250	34.21a	23.14	16.11	33.96a	21.35	16.34	34.97a	20.11	16.20
1,000	34.90a	21.33	16.13	34.23a	22.11	16.77	35.11a	23.02	16.23
p-value	*[2/]	ns [1/]	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
SEM[3/]	0.68	0.32	0.21	0.62	0.41	0.18	0.76	0.50	0.14
%C.V.[4/]	5.03	3.63	3.23	4.57	4.83	2.77	5.53	5.79	2.09
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns

ตารางที่ 4.18 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีใบข้าว (SPAD index) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	29.34c	18.98	13.02	29.34c	18.98	13.02	29.34c	18.98	13.02
10	32.67b	17.90	13.15	33.04a	18.48	13.46	33.34b	18.00	13.55
50	33.56b	18.55	13.69	33.12a	18.97	13.79	33.66b	18.55	13.91
100	34.12b	18.87	12.90	33.46a	19.23	14.06	33.33b	19.01	14.22
250	34.55a	19.11	14.02	34.11a	19.02	14.55	34.89a	19.46	14.78
1,000	35.11a	19.34	14.33	35.67b	19.15	14.80	35.34a	19.89	14.81
p-value	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns
SEM	0.85	0.21	0.24	0.85	0.11	0.27	0.87	0.27	0.29
%C.V.	6.26	2.70	4.32	6.32	1.38	4.78	6.37	3.50	5.00
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	*	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]* หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$),

[3/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[4/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[5/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.1.4 การศึกษาจำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งไม่ผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 30 90 และ 120

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในจำนวนต้นข้าวต่อกอข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เก็บข้อมูลข้าวอายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน จำนวนต้นข้าวต่อกอที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ จำนวนต้นข้าวต่อกอในวันที่ 30, 90 และ 120 วันหลังปลูก ที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ไม่แตกต่างจากที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และไม่สามารถวิเคราะห์ความสำพันธ์ทางสถิติได้ เนื่องจากจำนวนต้นต่อก่อไม่แตกต่างกัน ดังอธิบายในตารางที่ 4.19

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งไม่ผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 30 90 และ 120

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในจำนวนต้นข้าวต่อกอข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เก็บข้อมูลข้าวอายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน จำนวนต้นข้าวต่อกอที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร พบว่า ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดต่างกันทั้ง 3 ระดับ จำนวนต้นข้าวต่อกอในวันที่ 30, 90 และ 120 วันหลังปลูก ที่ปริมาณการใช้ 1,000, 250, 100, 50 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับไม่แตกต่างจากที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และไม่สามารถวิเคราะห์ความสำพันธ์ทางสถิติได้ เนื่องจากจำนวนต้นต่อก่อไม่แตกต่างกัน ดังอธิบายในตารางที่ 4.19

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในจำนวนต้นข้าวต่อกอ

ตารางที่ 4.19 จำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**จำนวนต้นข้าวต่อกอ (ต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน**								
	20-30 นาโนเมตร			**80-120 นาโนเมตร**			**400-600 นาโนเมตร**		
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	3	3	3	3	3	3	3	3	3
50	3	3	3	3	3	3	3	3	3
100	3	3	3	3	3	3	3	3	3
250	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1,000	3	3	3	3	3	3	3	3	3
p-value	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SEM1/	-	-	-	-	-	-	-	-	-
%C.V.2/	-	-	-	-	-	-	-	-	-
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	3	3	3	3	3	3	3	3	3
10	3	3	3	3	3	3	3	3	3
50	3	3	3	3	3	3	3	3	3
100	3	3	3	3	3	3	3	3	3
250	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1,000	3	3	3	3	3	3	3	3	3

ตารางที่ 4.19 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนต้นข้าวต่อกอ (ต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
p-value	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SEM	-	-	-	-	-	-	-	-	-
%C.V.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ [1/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,
[2/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

ในการศึกษาไม่สามารถศึกษาวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยวผลผลิต 50 เปอร์เซ็นต์ คุณภาพผลผลิต และคุณภาพเมล็ดได้ เนื่องจากเมล็ดข้าวไม่มีความสมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากข้าวไม่ให้ผลผลิตดังข้างต้นที่กล่าวมาในส่วนการศึกษาแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ตามการศึกษาตอนที่ 3.1 นี้

3.2 การศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวที่แช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ก่อนปลูกและการเติมที่ 25 วันหลังปลูก

การศึกษานี้ดำเนินการทดลองใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิตคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในระยะต้นกล้าของข้าว 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวไวต่อแสงทำการศึกษากับข้าวขาวดอกมะลิ 105 และข้าวไม่ไวต่อแสงทำการศึกษากับข้าวปทุมธานี 1 โดยทดลองกับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) ขนาดต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร และความเข้มข้นในการใช้ปริมาณต่างกัน 6 ความเข้มข้น ได้แก่ ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ปริมาณ 10, 50, 100, 250 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการทดลองอธิบายได้ดังนี้

3.2.1 การศึกษาความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 30 แต่ในวันที่ 90 และ 120 ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีความสูงของข้าวมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีความสูงของข้าวมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อความสูงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.20

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30 วัน ความสูงต้นที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ความสูงต้นข้าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ความสูงต้นข้าวที่ 90, 120 วัน พบว่า ความสูงต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร สูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ใช้ 80-120 นาโนเมตร และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคที่เติมยิ่งความเข้มข้นมากความสูงยิ่งมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.20

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 30 ในวันที่ 90 ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงของข้าว แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีความสูงของข้าวมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีความสูงของข้าวมากขึ้น แต่ผลของความเข้มข้นต่อความสูงของข้าวไม่แตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงของข้าวไม่แตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น และในวันที่ 120 ตัวแปร

ขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อความสูงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีความสูงของข้าวมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีความสูงของข้าวมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อความสูงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อความสูงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.20

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30 วัน ความสูงต้นที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ความสูงต้นข้าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ความสูงต้นข้าวที่ 90, 120 วัน พบว่า ความสูงต้นข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร สูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ใช้ 80-120 นาโนเมตร และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคที่เติมยิ่งความเข้มข้นมากความสูงยิ่งมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.20

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในความสูงต้นข้าว

ตารางที่ 4.20 ความสูงต้นข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสูงต้นข้าว (เซนติเมตร) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	36.17	65.27e[5/]	72.22f	36.17	65.27d	72.22e	36.17	65.27e	72.22f
10	38.17	89.48d	104.27e	41.33	90.68c	109.71d	42.17	92.44d	110.64e
50	38.67	90.48ac	106.63d	39.00	91.26bc	110.30d	42.00	93.37c	112.78d
100	37.67	90.18bc	107.38c	39.50	91.85ab	112.56c	41.50	93.56bc	115.45c
250	37.50	90.52ab	108.70b	41.17	91.71ab	113.25b	38.50	94.33b	116.26b
1,000	39.00	90.89a	109.82a	42.17	91.96a	116.26a	40.33	94.93a	117.23a
p-value	ns[1/]	**[2/]	**	ns	**	**	ns	**	**
SEM[3/]	0.76	1.58	2.23	0.74	1.65	2.56	0.98	1.80	2.69
%C.V.[4/]	12.11	11.00	13.20	11.24	11.39	14.52	14.67	12.13	15.02
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	35.63	67.87e	75.06d	35.63	67.87e	75.06d	35.63	67.87e	75.06d
10	36.67	92.01bd	107.36c	41.14	92.91cd	112.59c	40.50	95.17cd	113.56c
50	44.33	93.05cd	109.62b	36.00	93.08bd	113.59bc	41.17	96.39c	115.40c
100	38.33	93.06b	109.65b	41.33	94.48b	115.52b	43.33	96.40bd	118.76b
250	42.33	93.39bc	110.80b	38.83	94.48bc	115.56b	52.33	96.52bc	119.42b
1,000	42.67	95.60a	112.93a	41.58	97.24a	120.00a	44.23	99.48a	121.93a
p-value	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	**
SEM	0.93	1.63	2.23	0.81	1.72	2.58	0.89	1.97	2.74
%C.V.	14.12	10.97	12.83	12.49	11.46	14.25	13.02	12.21	14.85

ตารางที่ 4.20 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความสูงต้นข้าว (เซนติเมตร) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
อายุต้นข้าว (วัน)	30	90	120	30	90	120	30	90	120
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	**	**	ns	**	**	ns	ns	**

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[3/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[4/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [5/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.2.2 การศึกษาสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 30 แต่ในวันที่ 90 ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบข้าว กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีสีใบข้าวมากขึ้น และในวันที่ 120 ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบข้าว แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีสีใบข้าวมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีสีใบข้าวมากขึ้น แต่ผลของความเข้มข้นต่อสีใบข้าวไม่แตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อสีใบข้าวไม่แตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.21

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30 วัน สีใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีใบข้าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ความสูงต้นข้าวที่ 90, 120 วัน พบว่า สีใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร สูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ใช้ 80-120 นาโนเมตร และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคที่เติมยิ่งความเข้มข้นมากความสูงยิ่งมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.21

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 30 แต่ในวันที่ 90 ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบข้าว กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีสีใบข้าวมากขึ้น และในวันที่ 120 ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อสีใบข้าว แต่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีใบข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีสีใบข้าวมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีสีใบข้าวมากขึ้น แต่ผลของความเข้มข้นต่อสีใบข้าวไม่แตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อสีใบข้าวไม่แตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.21

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีใบข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30 วัน สีใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีใบข้าวไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ความสูงต้นข้าวที่ 90, 120 วัน พบว่า สีใบข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร สูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ใช้ 80-120 นาโนเมตร และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคที่เติมยิ่งความเข้มข้นมากความสูงยิ่งมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.21

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในสีใบข้าว

ตารางที่ 4.21 สีใบข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีใบข้าว (SPAD index) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
อายุต้นข้าว (วัน)	30	90	120	30	90	120	30	90	120
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	30.87	20.02f[5/]	11.06f	30.87	20.02e	11.06e	30.87	20.02e	11.06e
10	31.37	27.01e	11.81e	32.87	26.82d	11.68de	31.20	26.65d	13.67d
50	34.53	28.54d	12.48d	40.60	28.11d	12.71cd	32.80	28.27c	14.56cd
100	34.93	30.27c	13.45c	35.37	30.08c	13.51c	34.40	30.13bc	15.07bc
250	36.57	31.44b	14.62b	35.23	31.49b	14.78b	33.33	31.65b	16.48ab
1,000	35.63	32.83a	16.12a	33.87	33.87a	16.16a	35.40	34.61a	18.23a
p-value	ns[1/]	**[2/]	**	ns	**	**	ns	**	**
SEM[3/]	0.80	1.01	0.42	0.94	1.07	0.44	0.69	1.12	0.56
%C.V.[4/]	10.03	15.18	13.31	11.18	15.94	13.88	8.64	16.64	16.07
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	**	ns	**	**	ns	ns	ns

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ตารางที่ 4.21 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีใบข้าว (SPAD index) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	33.20	21.96f	13.33e	33.20	21.96e	13.33d	33.20	21.96e	13.33c
10	35.27	29.29e	14.56de	34.97	28.66d	14.62cd	34.97	28.62d	16.94b
50	33.73	30.78d	15.17cd	34.60	30.56c	15.75bd	33.13	30.13cd	17.77b
100	33.80	32.25c	16.77c	34.23	32.34b	16.73bc	32.20	32.08c	17.69b
250	33.13	33.27b	17.48b	34.43	33.65b	17.77b	33.47	33.99b	19.35b
1,000	34.83	35.06a	20.26a	36.20	35.77a	20.58a	33.73	36.79a	22.59a
p-value	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	**
SEM	0.68	1.02	0.56	0.67	1.08	0.59	0.70	1.14	0.70
%C.V.	8.42	14.24	14.63	8.21	15.00	15.26	8.83	15.86	16.52
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	**	ns	**	**	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[3/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[4/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[5/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.2.3 การศึกษาจำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอของข้าวปทุมธานี 1 ในวันที่ 30 แต่ในวันที่ 90 และ 120 ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีจำนวนต้นข้าวต่อกอมากขึ้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.22

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในจำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30 วัน จำนวนต้นข้าวต่อกอที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร จำนวนต้นข้าวต่อกอไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ความสูงต้นข้าวที่ 90, 120 วัน พบว่า จำนวนต้นข้าวต่อกอที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร สูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ใช้ 80-120 นาโนเมตร และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคที่เติมยิ่งความเข้มข้นมากความสูงยิ่งมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.22

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอ และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 30 แต่ในวันที่ 90 และ 120 ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีจำนวนต้นข้าวต่อกอมากขึ้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.22

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในจำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30 วัน จำนวนต้นข้าวต่อกอที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร จำนวนต้นข้าวต่อกอไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ความสูงต้นข้าวที่ 90, 120 วัน พบว่า จำนวนต้นข้าวต่อกอที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 400-600 นาโนเมตร สูงที่สุด รองลงมา คือ ที่ใช้ 80-120 นาโนเมตร และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นของอนุภาคที่เติมยิ่งความเข้มข้นมากความสูงยิ่งมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.22

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในจำนวนต้นข้าวต่อกอ

ตารางที่ 4.22 จำนวนต้นข้าวต่อกอจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนต้นข้าวต่อกอ (ต้น) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
อายุต้นข้าว (วัน)	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**	**30**	**90**	**120**
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	3.83	4.17b[5/]	4.50b	3.83	4.17b	4.50b	3.83	4.17b	4.50b
10	4.00	13.17a	12.83a	4.83	12.33a	13.17a	4.67	13.67a	14.17a
50	3.67	13.33a	14.00a	5.17	13.17a	14.00a	4.00	14.33a	12.83a
100	4.00	13.00a	13.33a	4.50	13.50a	14.17a	4.17	13.33a	13.67a
250	4.83	13.67a	12.83a	4.83	13.33a	13.83a	3.83	13.00a	13.50a
1,000	4.83	13.33a	14.00a	5.00	13.83a	13.17a	4.67	13.50a	14.17a
p-value	ns[1/]	**[2/]	**	ns	**	**	ns	**	**
SEM[3/]	0.17	0.60	0.59	0.16	0.60	0.71	0.18	0.62	0.61
%C.V.[4/]	24.27	30.32	29.51	20.25	30.70	29.88	26.00	30.86	29.94
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	3.33	3.50b	3.67b	3.33	3.50b	3.67b	3.33	3.50b	3.67b
10	2.83	9.00a	9.67a	3.33	9.00a	9.83a	3.67	10.00a	9.83a
50	3.33	9.50a	10.17a	2.83	10.33a	9.33a	3.33	9.33a	9.83a
100	3.00	9.17a	10.17a	3.50	9.83a	10.17a	4.33	10.17a	9.67a
250	4.00	9.17a	9.67a	2.50	9.33a	9.83a	3.67	9.50a	9.33a
1,000	3.00	8.17a	9.67a	3.17	9.17a	8.83a	3.83	9.83a	9.33a
p-value	ns	**	**	ns	**	**	ns	**	**
SEM	0.12	0.40	0.43	0.11	0.42	0.42	0.11	0.44	0.41
%C.V.	22.52	29.33	28.96	21.43	29.73	29.28	18.09	29.97	28.89
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	**	**	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05), [2/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p<0.01), [3/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [4/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [5/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.2.4 การศึกษาวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p<0.01) ต่อวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวสูงขึ้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.23

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ส่วนในขนาดเดียวกันปริมาณการใช้ต่างกันพบว่าทุกปริมาณที่ใช้วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ ช้ากว่าที่ไม่เติม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p<0.01) ดังอธิบายในตารางที่ 4.23

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p<0.01) ต่อวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวสูงขึ้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.23

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ส่วนในขนาดเดียวกันปริมาณการใช้ต่างกันพบว่าทุกปริมาณที่ใช้วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ ช้ากว่าที่ไม่เติม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (p<0.01) ดังอธิบายในตารางที่ 4.23

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.23 วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ (%) ที่ขนาดต่างกัน**		
	20-30 นาโนเมตร	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	94.33b[5/]	94.33b	94.33b
10	101.33a	102.00a	102.00a
50	102.33a	102.17a	101.33a
100	103.00a	102.67a	102.00a
250	101.33a	103.83a	101.83a
1,000	102.17a	101.50a	101.83a
p-value	**[2/]	**	**
SEM[3/]	0.53	0.56	0.51
%C.V.[4/]	3.18	3.35	3.06
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	**	ns

ตารางที่ 4.23 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	105.17b	105.17b	105.17b
10	111.50a	111.67a	112.83a
50	112.83a	112.83a	112.67a
100	113.17a	111.50a	112.17a
250	112.00a	112.33a	112.33a
1,000	111.33a	111.50a	111.17a
p-value	**	**	**
SEM	0.48	0.48	0.51
%C.V.	2.61	2.58	2.74
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns[1/]	**	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$), [2/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [3/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [4/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [5/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.2.5 การศึกษาวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อวันที่เก็บเกี่ยว

50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวสูงขึ้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.24

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ส่วนในขนาดเดียวกันปริมาณการใช้ต่างกันพบว่าทุกปริมาณที่ใช้วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ช้ากว่าที่ไม่เติม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.24

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวสูงขึ้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.24

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ส่วนในขนาดเดียวกันปริมาณการใช้ต่างกันพบว่าทุกปริมาณที่ใช้วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ช้ากว่าที่ไม่เติม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.24

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.24 วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	111.83b[5/]	111.83b	111.83b
10	123.83a	124.67a	125.50a
50	124.67a	125.00a	126.00a
100	125.50a	125.67a	125.67a
250	126.00a	125.17a	125.50a
1,000	125.17a	124.83a	125.33a
p-value	**[2/]	**	**
SEM[3/]	0.85	0.86	0.85
%C.V.[4/]	4.18	4.11	4.15
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	**	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	119.67b	119.67b	119.67b
10	134.50a	134.50a	135.67a
50	135.83a	134.17a	136.00a
100	135.67a	134.67a	135.17a
250	135.17a	136.00a	135.83a
1,000	135.83a	135.00a	135.83a
p-value	**	**	**
SEM	1.02	0.99	1.03
%C.V.	4.60	4.48	4.63
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns[1/]	**	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$), [2/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [3/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [4/]%C.V. (coefficient of

variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [5/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.2.6 การศึกษาน้ำหนักต้นสดและแห้งที่ไม่รวมรากจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์หลังการเก็บเกี่ยว

1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักต้นข้าวสดและแห้งของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักต้นข้าวสดและแห้งของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักสดและแห้งมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักสดและแห้งมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในน้ำหนักต้นข้าวสดและน้ำหนักต้นข้าวแห้งจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร น้ำหนักต้นข้าวสดและน้ำหนักต้นข้าวแห้งไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ส่วนในขนาดเดียวกันปริมาณการใช้ต่างกัน พบว่าทุกปริมาณที่ใช้น้ำหนักต้นข้าวสดและน้ำหนักต้นข้าวแห้งช้ากว่าที่ไม่เติม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักต้นข้าวสดและแห้งของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อน้ำหนักต้นข้าวสดและแห้งของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักสดและแห้งมากที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักสดและแห้งมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในน้ำหนักต้นข้าวสดและน้ำหนักต้นข้าวแห้งจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร น้ำหนักต้นข้าวสดและน้ำหนักต้นข้าวแห้งไม่แตกต่างกันมากนัก ทั้ง 3 ขนาดอนุภาคส่วนในขนาดเดียวกันปริมาณการใช้ต่างกัน พบว่าทุกปริมาณที่ใช้น้ำหนักต้นข้าวสดและน้ำหนักต้นข้าวแห้งช้ากว่าที่ไม่เติม โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.25 และตารางที่ 4.26

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในน้ำหนักต้นสดและแห้ง

ตารางที่ 4.25 น้ำหนักต้นสดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์หลังการเก็บเกี่ยว

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**น้ำหนักต้นสดของข้าว(กรัม) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	45.52b[4/]	45.52b	45.52b
10	201.34a	268.13a	351.20a
50	199.78a	272.49a	349.41a
100	201.20a	270.90a	349.93a
250	201.30a	269.29a	351.60a
1,000	201.21a	271.77a	349.47a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	9.79	14.19	19.21
%C.V.[3/]	33.57	36.52	38.47

ตารางที่ 4.25 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักต้นสดของข้าว(กรัม) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	36.44b	36.44b	36.44b
10	151.86a	171.24a	201.99a
50	152.68a	170.91a	199.60a
100	149.19a	172.08a	200.94a
250	151.42a	171.72a	202.07a
1,000	150.08a	169.39a	200.79a
p-value	**	**	**
SEM	7.19	8.46	10.39
%C.V.	32.80	34.24	35.87
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4.26 น้ำหนักต้นแห้งไม่รวมรากของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์หลังการเก็บเกี่ยว

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักต้นแห้งไม่รวมรากของข้าว(กรัม) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	6.50b[4/]	6.50b	6.50b
10	24.50a	36.80a	39.90a
50	24.46a	33.65a	48.95a
100	23.63a	36.00a	44.29a
250	24.78a	38.72a	43.87a
1,000	24.94a	33.03a	44.23a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	1.19	1.96	2.57
%C.V.[3/]	33.14	38.17	40.62
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.26 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักต้นแห้งไม่รวมรากของข้าว(กรัม) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	4.94b	4.94b	4.94b
10	21.31a	25.12a	28.83a
50	21.50a	25.62a	31.29a
100	21.02a	24.48a	26.23a
250	21.06a	24.18a	27.90a
1,000	21.72a	27.54a	27.74a
p-value	**	**	**
SEM	1.08	1.38	1.57
%C.V.	34.86	37.60	38.43
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3.2.7 การศึกษาคุณภาพผลผลิตข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1) จำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวน

เมล็ดต่อรวงของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดต่อรวงสูงสุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.27

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร จำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและปริมาณการใช้มากขึ้นส่งผลให้จำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้นไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.27

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดต่อรวงสูงสุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.27

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร จำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและปริมาณการใช้มากขึ้นส่งผลให้จำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้นไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.27

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในจำนวนเมล็ดต่อรวง

ตารางที่ 4.27 จำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	จำนวนเมล็ดต่อรวงที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	29.50b	29.50b	29.50b
10	149.33a	164.50a	178.67a
50	148.17a	163.50a	180.67a
100	146.83a	164.67a	178.17a
250	148.83a	165.83a	178.67a
1,000	152.17a	166.17a	181.83a
p-value	**	**	**
SEM	7.55	8.54	9.47
%C.V.	35.09	36.00	36.74
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	27.67b	27.67b	27.67b
10	139.50a	150.83a	161.67a
50	138.83a	152.50a	158.83a
100	137.83a	150.83a	161.33a
250	140.00a	150.50a	160.67a
1,000	141.17a	152.33a	162.00a
p-value	**	**	**
SEM	7.06	7.81	8.41
%C.V.	35.04	35.81	36.36
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a,b ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2) เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์สูงสุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์มากที่สุด นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์มีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.28

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ต่อรวงของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและปริมาณการใช้มากขึ้นส่งผลให้จำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้นไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.28

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์สูงสุด และการใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์มากที่สุด นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์มีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.28

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ต่อรวงของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ขนาดอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นและปริมาณการใช้มากขึ้นส่งผลให้จำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้นไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.28

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์

ตารางที่ 4.28 เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ (%) ที่ขนาดต่างกัน**		
	20-30 นาโนเมตร	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	2.34c[4/]	2.34c	2.34c
10	95.19b	96.33b	96.24b
50	95.23b	96.28b	96.31b
100	95.28b	96.20b	96.16b
250	95.21b	96.21b	96.34b
1,000	97.30a	97.99a	98.72a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	5.88	5.94	5.95
%C.V.[3/]	44.04	44.05	44.06
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	2.44c	2.44c	2.44c
10	95.23b	96.32b	9.62b
50	95.24b	96.24b	96.35b
100	95.20b	96.20b	96.24b
250	95.34b	96.27b	96.18b
1,000	97.22a	97.95a	98.65a
p-value	**	**	**
SEM	5.87	5.93	5.94
%C.V.	43.99	44.00	44.01

ตารางที่ 4.28 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	เปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-c ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3) น้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ดของข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร น้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.29

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ดของข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติม

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร น้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.29

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในน้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ด

ตารางที่ 4.29 น้ำหนักข้าวเปลือก 100 เมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	**น้ำหนัก 100 เมล็ด (กรัม) ที่ขนาดต่างกัน**		
	20-30 นาโนเมตร	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	3.03	2.99	3.00
50	2.98	2.99	2.95
100	2.97	3.05	3.04
250	2.99	3.07	3.13
1,000	3.02	2.98	3.06
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.02	0.03	0.02
%C.V.[3/]	3.19	3.60	3.57
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

ตารางที่ 4.29 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนัก 100 เมล็ด (กรัม) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	3.06	2.97	2.95
50	3.05	3.03	2.94
100	3.03	3.04	3.00
250	3.01	3.01	2.99
1,000	2.90	2.93	3.03
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.03	0.01	0.02
%C.V.	4.15	2.85	3.56
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

4) น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ต่อน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ต่อน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ดของข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติม

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ดแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.30

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ดของข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ดแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.30

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในน้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

ตารางที่ 4.30 น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด (กรัม) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	2.39	2.45	2.59
50	2.70	2.53	2.57
100	2.64	2.60	2.62
250	2.58	2.72	2.57
1,000	2.61	2.57	2.66
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.04	0.02	0.03
%C.V.[3/]	9.22	8.63	6.90
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ตารางที่ 4.30 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด (กรัม) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	2.49	2.63	2.60
50	2.61	2.55	2.47
100	2.55	2.53	2.62
250	2.59	2.58	2.54
1,000	2.56	2.56	2.72
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.03	0.04	0.03
%C.V.	7.31	8.30	6.06
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

5) ความยาวเมล็ดของข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความยาวเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความยาวเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความยาวเมล็ดของข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร

ความยาวเมล็ดของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.31

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความยาวเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความยาวเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความยาวเมล็ดของข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ความยาวเมล็ดของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.31

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในความยาวเมล็ด

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

ตารางที่ 4.31 ความยาวเมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความยาวเมล็ด (มิลลิเมตร) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	10.35	10.57	10.68
50	10.58	10.74	10.84
100	10.61	10.99	10.83
250	10.37	10.51	11.04
1,000	11.02	10.80	10.72
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.08	0.10	0.09
%C.V.[3/]	4.60	5.47	5.19
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	10.61	10.64	11.11
50	10.63	10.46	11.06
100	10.57	10.78	10.99
250	10.58	10.82	10.71
1,000	10.77	10.92	11.02
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.09	0.09	0.09
%C.V.	5.17	4.99	4.71
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

6) ความกว้างเมล็ดของข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความกว้างเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความกว้างเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความกว้างเมล็ดของข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ความกว้างเมล็ดของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.32

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความกว้างเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อความกว้างเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในความกว้างเมล็ดของข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ความกว้างเมล็ดของข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.32

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในความกว้างเมล็ด

ตารางที่ 4.32 ความกว้างเมล็ดของข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความกว้างเมล็ด (มิลลิเมตร) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	2.07	1.94	1.95
50	1.89	2.04	1.85
100	1.83	1.98	1.92
250	1.92	1.96	1.94
1,000	1.95	1.98	2.08
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.03	0.04	0.06
%C.V.[3/]	10.73	8.77	10.19
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	1.90	1.83	1.96
50	2.11	1.88	1.90
100	2.08	2.06	2.03
250	2.15	1.96	2.07
1,000	1.99	2.04	1.98
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.04	0.03	0.04
%C.V.	10.46	9.93	10.91
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

*7) สีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*)*

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวเปลือก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวเปลือกปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีเมล็ดข้าวเปลือกแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุม เนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.33

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวเปลือก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวเปลือกหอมมะลิ กข 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีเมล็ดข้าวเปลือกแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.33

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในสีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*)

ตารางที่ 4.33 สีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*) การแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีเมล็ดข้าวเปลือก (L*a*b*) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
สีเมล็ดข้าว	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	67.0	7.7	41.0	66.0	7.0	41.9	66.8	6.8	40.3
50	65.5	5.5	41.4	66.3	6.9	39.0	67.2	6.7	41.8
100	66.4	6.6	41.3	66.8	5.7	41.6	63.5	6.7	42.2
250	64.6	7.1	42.8	64.8	7.5	41.8	66.2	5.8	41.4
1,000	66.8	6.9	40.3	63.8	5.9	42.1	66.5	5.6	40.4
p-value	ns[1/]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SEM[2/]	0.60	0.27	0.33	0.56	0.31	0.38	0.59	0.33	0.37
%C.V.[3/]	5.41	23.73	4.78	5.14	28.29	5.57	5.36	29.38	5.34
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	66.2	12.5	35.0	67.3	13.5	35.1	65.5	12.8	36.5
50	65.5	13.5	34.6	65.2	14.1	36.0	64.2	12.7	34.8
100	67.3	12.9	35.7	66.0	13.8	35.9	66.4	13.0	35.3
250	66.4	12.3	34.1	65.3	12.8	34.7	68.3	13.3	36.3
1,000	67.3	12.6	34.7	64.4	13.8	36.2	66.7	12.2	34.1
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SEM	0.48	0.28	0.41	0.51	0.25	0.40	0.53	0.23	0.46
%C.V.	4.35	13.04	7.03	4.63	10.99	6.95	4.83	10.64	7.72
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

*8) สีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*)*

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวกล้อง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวกล้องปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีเมล็ดข้าวกล้องแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.34

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวกล้องและปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวกล้องหอมมะลิ กข 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีเมล็ดข้าวกล้องแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.34

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในสีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*)

ตารางที่ 4.34 สีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*) การแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีเมล็ดข้าวกล้อง (L*a*b*) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
สีเมล็ดข้าว	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	71.4	-2.3	16.5	72.0	-2.5	16.6	71.2	-3.0	17.1
50	70.8	-2.4	16.2	70.6	-1.6	16.3	71.0	-2.5	15.8
100	69.6	-4.0	17.5	69.6	-2.1	16.8	70.1	-2.0	16.2
250	73.0	-2.9	16.8	71.6	-3.0	16.6	71.1	-2.5	16.6
1,000	71.7	-2.0	17.2	71.7	-2.0	16.1	70.3	-2.7	17.2
p-value	ns[1/]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SEM[2/]	0.48	0.21	0.20	0.40	0.23	0.19	0.49	0.25	0.22
%C.V.[3/]	4.05	47.30	7.31	3.41	58.26	7.08	4.15	58.26	7.97
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	69.2	1.3	12.6	69.8	1.9	12.5	69.2	2.0	12.4
50	69.4	1.6	12.2	70.6	2.5	12.4	68.8	1.3	12.7
100	68.7	1.8	12.2	69.9	2.1	11.9	69.7	2.2	12.2
250	67.6	2.6	12.5	68.2	1.9	12.7	68.2	1.5	12.1
1,000	68.2	2.4	13.0	68.8	2.3	12.5	67.6	1.6	12.8
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SEM	0.44	0.15	0.20	0.43	0.20	0.19	0.40	0.17	0.22
%C.V.	3.88	44.99	9.36	3.70	55.86	9.12	3.47	61.00	10.71
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

*9) สีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*)*

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวขัดขาว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวขัดขาวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีเมล็ดข้าวขัดขาวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุม เนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.35

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวขัดขาว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อสีเมล็ดข้าวขัดขาวหอมมะลิ กข 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในสีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร สีเมล็ดข้าวขัดขาวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.35

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในสีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*)

ตารางที่ 4.35 สีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*) การแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สีเมล็ดข้าวขัดขาว (L*a*b*) ที่ขนาดอนุภาคต่างกัน								
	20-30 นาโนเมตร			80-120 นาโนเมตร			400-600 นาโนเมตร		
สีเมล็ดข้าว	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***	**L***	**a***	**b***
ข้าวปทุมธานี 1									
ไม่เติม	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	68.3	-1.4	0.1	67.5	0.4	0.6	68.8	-0.9	-0.6
50	68.5	-0.7	-1.3	68.2	1.4	-1.1	68.8	0.1	-1.9
100	66.9	-0.6	0.0	68.1	-0.2	1.2	68.5	-0.7	2.8
250	68.6	1.9	-1.2	68.9	0.9	1.1	68.0	0.2	-0.8
1,000	68.8	0.7	-1.6	68.6	0.0	-0.9	68.9	-0.4	2.3
p-value	ns[1/]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SEM[2/]	0.27	0.65	0.57	0.34	0.55	0.60	0.33	0.57	0.61
%C.V.[3/]	2.38	31.75	139.5	2.95	70.14	139.7	2.92	95.28	139.8
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105									
ไม่เติม	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	64.5	-1.1	3.4	63.8	-0.6	3.1	64.5	-0.8	4.8
50	63.8	-0.6	3.0	65.1	-0.5	3.2	64.1	-0.8	2.9
100	62.1	-1.3	2.5	64.1	-1.1	3.0	63.4	-0.7	2.9
250	63.6	-0.4	4.7	66.3	-1.1	2.8	64.5	-0.9	3.2
1,000	64.4	-1.4	3.8	64.1	-0.6	3.4	63.6	-0.6	3.8
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SEM	0.31	0.13	0.28	0.32	0.15	0.25	0.30	0.14	0.28
%C.V.	2.89	82.33	49.21	2.90	109.5	47.73	2.83	111.8	47.79
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)									
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)			ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)			(1)x(2)		
p-value	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

3.2.8 การศึกษาคุณภาพเมล็ด (ข้าวกล้อง) จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1) ปริมาณแป้งในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแป้งในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณแป้งในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.36

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแป้งในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณแป้งในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.36

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณแป้งในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.36 ปริมาณแป้งในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแป้ง (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	76.76	76.73	77.50
50	76.80	77.08	76.94
100	77.49	77.18	76.95
250	76.11	75.75	77.14
1,000	77.52	76.07	76.54
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.22	0.26	0.21
%C.V.[3/]	1.70	2.07	1.62
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	n
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	77.27	76.31	75.81
50	76.30	76.75	75.86
100	77.79	76.36	76.83
250	76.58	75.77	76.84
1,000	76.76	76.40	76.86
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.21	0.22	0.26
%C.V.	1.62	1.72	2.06
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

2) ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.37

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.37

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.37 ปริมาณโปรตีนในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโปรตีน (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	6.79	7.28	6.63
50	6.89	6.87	7.35
100	6.48	6.80	7.00
250	6.97	6.92	7.06
1,000	6.90	6.66	6.89
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.10	0.08	0.09
%C.V.[3/]	8.78	7.52	7.76
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	7.11	7.45	7.17
50	6.90	6.51	7.28
100	7.25	6.79	7.04
250	7.45	6.98	6.88
1,000	6.94	7.00	6.52
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.10	0.10	0.09
%C.V.	7.48	9.01	8.63
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

3) ปริมาณไขมันในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณไขมันในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณไขมันในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณไขมันในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณไขมันในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.38

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณไขมันในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณไขมันในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณไขมันในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณไขมันในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.38

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณไขมันในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.38 ปริมาณไขมันในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณไขมัน (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.46	0.51	0.51
50	0.52	0.53	0.50
100	0.52	0.51	0.57
250	0.53	0.46	0.56
1,000	0.47	0.46	0.47
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.02	0.01	0.02
%C.V.[3/]	22.96	18.05	17.66
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.58	0.55	0.54
50	0.51	0.50	0.48
100	0.43	0.52	0.50
250	0.51	0.52	0.54
1,000	0.47	0.54	0.54
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.02	0.01	0.01
%C.V.	21.14	15.55	14.76
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

4) ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.29

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.39

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.39 ปริมาณความชื้นในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณความชื้น (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	11.27	11.20	11.94
50	11.82	11.54	11.65
100	11.52	11.80	11.74
250	11.76	11.31	11.61
1,000	11.29	11.64	11.78
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.09	0.08	0.10
%C.V.[3/]	4.56	4.33	5.21
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	11.46	12.10	11.65
50	11.72	11.97	11.89
100	11.43	11.62	11.78
250	11.75	11.63	11.29
1,000	11.42	11.45	11.49
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.09	0.09	0.08
%C.V.	4.76	4.68	4.37
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

5) ปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.40

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.40

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.40 ปริมาณเถ้าในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณเถ้า (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.37	0.40	0.37
50	0.39	0.34	0.36
100	0.39	0.37	0.35
250	0.35	0.38	0.36
1,000	0.38	0.37	0.38
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.01	0.01	0.01
%C.V.[3/]	10.10	13.72	14.21
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.25	0.30	0.29
50	0.29	0.27	0.30
100	0.26	0.29	0.29
250	0.29	0.28	0.30
1,000	0.27	0.25	0.29
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.01	0.01	0.01
%C.V.	16.23	13.86	12.15
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

6) ปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.41

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.41

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.41 ปริมาณแคลเซียมในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคลเซียม (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.08	0.08	0.08
50	0.08	0.08	0.08
100	0.08	0.08	0.09
250	0.08	0.09	0.08
1,000	0.08	0.09	0.08
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.00	0.00	0.00
%C.V.[3/]	11.41	9.12	10.27
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.07	0.08	0.08
50	0.08	0.08	0.08
100	0.08	0.08	0.09
250	0.08	0.08	0.08
1,000	0.08	0.08	0.08
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.00	0.00	0.00
%C.V.	10.07	10.95	10.71
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

7) ปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าว

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.42

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าว และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าว จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งไม่ได้วิเคราะห์รวมกับชุดควบคุมเนื่องจากมีปริมาณข้าวไม่เพียงพอต่อการศึกษา โดยไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.42

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าว

ตารางที่ 4.42 ปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวจากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณโพแทสเซียม (%) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.15	0.16	0.15
50	0.15	0.15	0.14
100	0.16	0.16	0.16
250	0.14	0.16	0.14
1,000	0.14	0.15	0.14
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.00	0.00	0.00
%C.V.[3/]	15.18	10.65	14.97
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	-	-	-
10	0.18	0.17	0.17
50	0.18	0.18	0.18
100	0.18	0.19	0.18
250	0.19	0.18	0.20
1,000	0.18	0.18	0.19
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.00	0.00	0.00
%C.V.	11.01	10.99	11.66
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

3.2.9 การศึกษาคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกันในเมล็ดข้าว

1) การศึกษาคุณสมบัติของดินบางประการ

การศึกษาคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกันในเมล็ดข้าวทั้งข้าวปทุมธานี 1 และข้าว กข 105 พบว่า คุณสมบัติของดินก่อนการทดลองมีความเหมาะสมในการปลูกข้าว แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ทั้ง 2 พันธุ์ปริมาณธาตุอาหารในดินและคุณสมบัติทางเคมีในดินลดลง แต่ไม่แตกต่างกันทุกความเข้มและขนาดของอนุภาค โดยไม่ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.43

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในคุณสมบัติของดินเหล่านี้

ตารางที่ 4.43 คุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	EC	OM	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O	C/N Ratio
คุณสมบัติของดินก่อนการทดลอง			6.5	4.5	1.3	1.06	1.3	2.5	1.6
คุณสมบัติของดินหลังการทดลอง									
ข้าวปทุมธานี 1	ไม่เติม (ควบคุม)		6.7	1.8	0.8	0.11	0.2	0.7	2.0
	ขนาดเล็ก	10	6.7	1.8	0.8	0.10	0.2	0.7	2.0
		50	6.8	1.7	0.8	0.11	0.2	0.6	2.1
		100	6.6	1.8	0.7	0.10	0.3	0.5	2.0
		250	6.7	1.7	0.9	0.12	0.2	0.8	2.1
		1,000	6.7	1.8	0.8	0.10	0.3	0.7	2.0
	p-value		ns[1/]	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ตารางที่ 4.43 (ต่อ)

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	EC	OM	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O	C/N Ratio
	ขนาดกลาง	10	6.6	1.8	0.8	0.10	0.2	0.6	2.0
		50	6.6	1.7	0.7	0.11	0.2	0.7	2.1
		100	6.6	1.8	0.7	0.11	0.3	0.7	2.0
		250	6.7	1.8	0.8	0.10	0.2	0.7	2.0
		1,000	6.7	1.9	0.8	0.11	0.2	0.8	2.2
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	ขนาดใหญ่	10	6.8	1.9	0.8	0.10	0.1	0.7	1.9
		50	6.8	1.8	0.9	0.12	0.2	0.8	2.0
		100	6.8	1.8	0.8	0.12	0.2	0.8	2.2
		250	6.7	1.9	0.8	0.10	0.2	0.7	2.1
		1,000	6.7	1.8	0.7	0.10	0.4	0.7	2.0
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ข้าขาวดอกมะลิ 105	ไม่เติม (ควบคุม)		6.7	1.8	0.9	0.10	0.2	0.6	2.0
	ขนาดเล็ก	10	6.8	1.7	0.8	0.11	0.1	0.7	2.1
		50	6.8	1.7	0.8	0.12	0.2	0.7	1.9
		100	6.7	1.9	0.9	0.12	0.3	0.8	2.0
		250	6.8	1.8	0.8	0.10	0.2	0.7	2.0
		1,000	6.8	1.8	0.8	0.10	0.2	0.7	2.1
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	ขนาดกลาง	10	6.7	1.8	0.8	0.10	0.2	0.7	2.1
		50	6.6	1.9	0.7	0.12	0.2	0.7	2.0
		100	6.7	1.8	0.7	0.13	0.1	0.9	1.9
		250	6.7	1.8	0.8	0.10	0.3	0.7	2.1
		1,000	6.5	1.7	0.8	0.10	0.3	0.6	2.0
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ตารางที่ 4.43 (ต่อ)

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	pH	EC	OM	Total N	Total P_2O_5	Total K_2O	C/N Ratio
	ขนาดใหญ่	10	6.7	1.9	0.8	0.11	0.2	0.7	2.1
		50	6.9	1.7	0.8	0.10	0.3	0.8	2.1
		100	6.7	1.8	0.7	0.12	0.3	0.8	1.9
		250	6.7	1.8	0.7	0.11	0.2	0.7	2.0
		1,000	6.8	1.8	0.9	0.10	0.2	0.7	2.0
	p-value		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05)

2) การสะสมของธาตุสารหนู ปรอท แคตเมียม และไททาเนียมในดิน

การสะสมของธาตุสารหนู ปรอท แคตเมียมในดิน ที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกันในเมล็ดข้าวทั้งข้าวปทุมธานี 1 และข้าว กข 105 พบว่า คุณสมบัติของดินก่อนการทดลองมีความเหมาะสมในการปลูกข้าว แต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า ข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร ทั้ง 2 พันธุ์ปริมาณธาตุอาหารในดิน และคุณสมบัติทางเคมีในดินลดลง แต่ไม่แตกต่างกันทุกความเข้มและขนาดของอนุภาค โดยไม่ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05) ส่วนการสะสมไททาเนียมในดินปริมาณที่เติมมากขึ้นส่งผลทำให้การสะสมมากตามไปด้วย โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ดังอธิบายในตารางที่ 4.44 เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมของสารเหล่านี้ในดิน

ตารางที่ 4.44 การสะสมของธาตุสารหนู ปรอท แคดเมียม และไททาเนียมในดินก่อนและหลังการทดลองที่แช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารหนู (ppb)	ปรอท (ppb)	แคดเมียม (ppb)	Ti (ppb)
คุณสมบัติของดินก่อนการทดลอง			20.3	35.2	18.6	4.4
คุณสมบัติของดินหลังการทดลอง						
ข้าวปทุมธานี 1	ไม่เติม (ควบคุม)		20.2	34.2	18.3	4.2a[3/]
	ขนาดเล็ก	10	20.2	34.1	18.2	77b
		50	19.6	35.2	18.7	295c
		100	19.7	35.0	18.6	912d
		250	20.5	34.8	18.9	2,874e
		1,000	20.1	34.6	18.0	10,119f
	p-value		ns[1/]	ns	ns	**[2/]
	ขนาดกลาง	10	19.8	35.6	18.6	85b
		50	20.2	34.4	18.3	431c
		100	20.3	35.0	18.2	942d
		250	20.0	35.1	18.7	3,002e
		1,000	20.1	34.0	18.5	10,375f
	p-value		ns	ns	ns	**
	ขนาดใหญ่	10	20.4	35.2	18.5	103b
		50	18.5	35.1	18.6	543c
		100	21.2	34.8	18.7	1,091d
		250	19.0	35.3	18.2	3,193e
		1,000	20.5	34.4	18.3	11,412f
	p-value		ns	ns	ns	**

ตารางที่ 4.44 (ต่อ)

ชนิดของข้าว	ขนาดอนุภาค	ปริมาณความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	สารหนู (ppb)	ปรอท (ppb)	แคดเมียม (ppb)	Ti (ppb)
ข้าวขาวดอกมะลิ 105	ไม่เติม (ควบคุม)		20.8	35.4	18.3	4.6a
	ขนาดเล็ก	10	20.5	35.2	18.0	67b
		50	20.6	35.1	17.9	278c
		100	21.1	35.0	18.5	856d
		250	19.8	35.4	18.4	2,340e
		1,000	20.4	35.1	18.2	10,231f
	p-value		ns	ns	ns	**
	ขนาดกลาง	10	19.9	35.2	18.0	80a
		50	20.4	35.1	18.4	417b
		100	20.3	35.0	18.2	901c
		250	19,8	34.9	18.2	2,881d
		1,000	21.1	34.8	18.3	11,138e
	p-value		ns	ns	ns	**
	ขนาดใหญ่	10	20.3	35.0	18.2	94b
		50	19.8	34.9	18.3	477c
		100	20.4	35.2	18.5	953d
		250	21.0	35.6	18.0	3,013e
		1,000	20.6	35.2	18.2	12,264f
	p-value		ns	ns	ns	**

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$),

[2/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[3/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

มหาวิทยาลัยศิลปากร

3.2.10 การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวจากการแช่เมล็ดด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และการเติมอนุภาคในวันที่ 25 ที่อายุการปลูก 30, 90 และ 120 วัน

1) การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.45 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในใบข้าวที่ 30 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.45

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.45 และจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 30 วันแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในใบข้าวที่ 30 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.45

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ตารางที่ 4.45 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 30 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppb) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.63f[4/]	0.23f	0.27f
10	9.70e	8.39e	7.24e
50	18.81d	16.71d	15.34d
100	43.64c	38.76c	35.14c
250	64.54b	58.25b	51.33b
1,000	103.16a	93.19a	82.49a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	8.59	7.79	6.88
%C.V.[3/]	90.97	92.05	91.33

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)

สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.45 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppb) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.24f	0.28f	0.12f
10	8.79e	8.28e	6.85e
50	17.19d	15.96d	13.79d
100	40.56c	36.43c	32.71c
250	59.85b	54.23b	47.98b
1,000	96.74a	86.31a	76.74a
p-value	**	**	**
SEM	8.07	7.19	6.42
%C.V.	92.01	90.88	91.77

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)

สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

2) การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการ

สะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.46

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วันแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในใบข้าวที่ 90 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.46

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.46

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 90 วันแตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในใบข้าวที่ 90 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.46

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ตารางที่ 4.46 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 90 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppb) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.26f[4/]	0.15f	0.17f
10	4.96e	4.26e	3.74e
50	8.26d	7.56d	6.54d
100	19.13c	18.08c	15.38c
250	28.72b	26.49b	23.01b
1,000	46.07a	41.39a	36.85a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	3.82	3.46	3.06
%C.V.[3/]	90.48	89.93	91.04
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.29f	0.15f	0.20f
10	4.62e	3.73e	3.56e
50	7.96d	6.66d	6.16d
100	18.20c	16.46c	14.43c
250	26.88b	24.11b	21.29b
1,000	43.27a	39.11a	34.81a
p-value	**	**	**
SEM	3.58	3.26	2.99
%C.V.	89.95	92.03	91.16
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

3) การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือ การใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.47

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในรากข้าวที่ 120 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.47

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือ การใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.47

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวที่อายุ 120 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในรากข้าวที่

120 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.47

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าว

ตารางที่ 4.47 การสะสมธาตุไททาเนียมในรากข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.17f[4/]	0.27f	0.24f
10	180.60e	162.07e	144.22e
50	360.07d	324.76d	288.58d
100	860.32c	774.49c	688.25c
250	1280.81b	1152.33b	1024.50b
1,000	2060.31a	1854.27a	1648.60a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	172.82	155.50	138.27
%C.V.[3/]	92.77	95.12	98.64
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.47 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.21f	0.16f	0.23f
10	167.86e	151.40e	133.16e
50	337.45d	303.81d	265.78d
100	792.97c	717.21c	638.38c
250	1194.85b	1070.04b	960.27b
1,000	1903.23a	1734.72a	1517.46a
p-value	**	**	**
SEM	159.68	145.27	127.81
%C.V.	92.46	98.86	94.55
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

4) การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสม

ธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.48

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในต้นข้าวที่ 120 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.48

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือ การใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.48

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่อายุ 120 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในต้นข้าวที่ 120 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.48

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าว

ตารางที่ 4.48 การสะสมธาตุไททาเนียมในต้นข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.25f[4/]	0.29f	0.23f
10	2.14e	1.48e	2.01e
50	3.36d	3.15d	2.64d
100	7.39c	6.56c	5.82c
250	9.89b	8.61b	7.97b
1,000	15.50a	14.62a	13.16a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	1.26	1.18	1.09
%C.V.[3/]	83.10	86.74	89.54
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.24f	0.23f	0.12f
10	1.72e	1.94e	1.49e
50	3.36d	2.37d	2.30d
100	6.46c	6.23c	5.62c
250	9.36b	8.29b	7.52b
1,000	14.86a	13.39a	11.36a
p-value	**	**	**
SEM	1.21	1.09	0.94
%C.V.	85.37	90.86	84.28
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$), [2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย, [3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ, [4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

5) การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวปทุมธานี 1 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.49

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในใบข้าวที่ 120 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.49

(2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ส่งผลที่มีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105 กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนขนาดใหญ่ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมน้อยที่สุด แต่การใช้อนุภาคนาโนในความเข้มข้นที่มากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น นอกจากนี้ ผลของความเข้มข้นต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละขนาด และผลของขนาดต่อการสะสมธาตุไททาเนียมมีความแตกต่างกันในแต่ละความเข้มข้น ดังอธิบายในตารางที่ 4.49

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวที่อายุ 120 วัน แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค โดยที่ปริมาณการเติมมากขึ้นส่งผลให้การสะสมเพิ่มตามไปด้วย โดยที่การสะสมในใบข้าวที่

120 วัน เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร การสะสมมากกว่าระดับอื่นๆ โดยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.49

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าว

ตารางที่ 4.49 การสะสมธาตุไททาเนียมในใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.13f[4/]	0.25f	0.10f
10	2.82e	2.33e	2.51e
50	5.31d	5.10d	4.35d
100	11.86c	11.27c	10.04c
250	17.75b	16.05b	13.99b
1,000	28.22a	25.49a	22.53a
p-value	**[1/]	**	**
SEM[2/]	2.34	2.12	1.86
%C.V.[3/]	90.29	89.02	88.38
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

ตารางที่ 4.49 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.19f	0.23f	0.16f
10	2.45e	2.84e	2.08e
50	4.59d	4.72d	4.12d
100	10.93c	10.26c	9.29c
250	16.35b	14.94b	13.37b
1,000	25.45a	22.79a	21.16a
p-value	**	**	**
SEM	2.13	1.88	1.76
%C.V.	90.44	85.81	89.18
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	**	**	**

หมายเหตุ [1/]** หมายถึงมีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญอย่างยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ,

[4/]a-f ระบุถึงค่าที่แตกต่างกันที่มีนัยสำคัญทางสถิติ

6) การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน

(1) ข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวปทุมธานี 1

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน ไม่แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค การการสะสมในระดับต่ำมาก โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.50

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางพบว่า ตัวแปรขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรนี้ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน ของข้าวขาวดอกมะลิ 105

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียวพบว่า ในการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน จากการแช่เมล็ดและเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่างกัน 3 ระดับ ได้แก่ ที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 20-30 นาโนเมตร 80-120 นาโนเมตร และ 400-600 นาโนเมตร การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวที่อายุ 120 วัน ไม่แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาดอนุภาค การการสะสมในระดับต่ำมาก โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ดังอธิบายในตารางที่ 4.50

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญทางสถิติในการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าว

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช

ตารางที่ 4.50 การสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณต่างกัน

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม	**ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน**		
(มิลลิกรัมต่อลิตร)	**20-30 นาโนเมตร**	**80-120 นาโนเมตร**	**400-600 นาโนเมตร**
ข้าวปทุมธานี 1			
ไม่เติม	0.25	0.23	0.22
10	0.31	0.18	0.19
50	0.17	0.25	0.16
100	0.26	0.32	0.34
250	0.13	0.16	0.20
1,000	0.25	0.22	0.26
p-value	ns[1/]	ns	ns
SEM[2/]	0.03	0.02	0.03
%C.V.[3/]	28.8	24.9	28.0
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

ตารางที่ 4.50 (ต่อ)

ปริมาณ TiO_2 ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม (ppm) ที่ขนาดต่างกัน		
	20-30 นาโนเมตร	80-120 นาโนเมตร	400-600 นาโนเมตร
ข้าวขาวดอกมะลิ 105			
ไม่เติม	0.16	0.24	0.27
10	0.16	0.22	0.29
50	0.23	0.12	0.18
100	0.2	0.24	0.17
250	0.16	0.17	0.17
1,000	0.17	0.28	0.13
p-value	ns	ns	ns
SEM	0.02	0.02	0.03
%C.V.	20.2	27.1	31.4
ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two way ANOVA)			
สิ่งที่ศึกษา	ขนาดอนุภาค (1)	ปริมาณ TiO2 ที่เติม (2)	(1)x(2)
p-value	ns	ns	ns

หมายเหตุ [1/]ns หมายถึงไม่มีความแตกต่างหรือผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (p>0.05),

[2/]SEM (standard error of mean) คือ ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย,

[3/]%C.V. (coefficient of variation) คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปรปรวนในหน่วยร้อยละ

3.2.11 การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของธาตุไททาเนียมและการเจริญเติบโตของข้าวที่แช่ในอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และการเติมอนุภาคในวันที่ 25 ที่อายุการปลูก 120 วัน

1) ข้าวปทุมธานี 1

หลังการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบกับค่าสีใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างความสูงต้น จำนวนต้อต่อกอ วันที่ออกดอก 50% วันที่เก็บเกี่ยว 50% น้ำหนักสด น้ำหนักแห้งและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของน้ำหนักสดและแห้งกับจำนวนเมล็ด และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างจำนวนเมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์มีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันอื่นๆมีสหสัมพันธ์เชิงบวกและอยู่ในระดับปานกลาง (> 0.5) หรือน้อย (> 0.2)

หลังการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 นาโนเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบกับค่าสีใบ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างความสูงต้น จำนวนต้อต่อกอ วันที่ออกดอก 50% วันที่เก็บเกี่ยว 50% น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ มีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันอื่นๆ มีสหสัมพันธ์เชิงบวกและอยู่ในระดับปานกลาง (> 0.5) หรือน้อย (> 0.2)

หลังการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบและความสูงกับค่าสีใบ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างความสูงต้น จำนวนต้อต่อกอ วันที่ออกดอก 50% วันที่เก็บเกี่ยว 50% น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ มีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันอื่นๆ มีสหสัมพันธ์เชิงบวกและอยู่ในระดับปานกลาง (> 0.5) หรือน้อย (> 0.2)

2) ข้าวขาวดอกมะลิ 105

หลังการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียม

ในดิน ราก ต้น และใบกับค่าสีใบ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างความสูงต้น จำนวนต้อต่อกอ วันที่ออกดอก 50% วันที่เก็บเกี่ยว 50% น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ มีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันอื่นๆ มีสหสัมพันธ์เชิงบวกและอยู่ในระดับปานกลาง (> 0.5) น้อย (> 0.2) หรือน้อยมาก (> 0.01)

หลังการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบกับค่าสีใบ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างความสูงต้น จำนวนต้อต่อกอ วันที่ออกดอก 50% วันที่เก็บเกี่ยว 50% น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ มีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันอื่นๆ มีสหสัมพันธ์เชิงบวกและอยู่ในระดับปานกลาง (> 0.5) น้อย (> 0.2) หรือน้อยมาก (> 0.01)

หลังการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันของตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ราก ต้น และใบและความสูงกับค่าสีใบ และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างความสูงต้น จำนวนต้อต่อกอ วันที่ออกดอก 50% วันที่เก็บเกี่ยว 50% น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดและเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ มีความสัมพันธ์กันมาก (> 0.8) ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันอื่นๆ มีสหสัมพันธ์เชิงบวกและอยู่ในระดับปานกลาง (> 0.5) น้อย (> 0.2) หรือน้อยมาก (> 0.01)

เมื่อเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาจากทิศทางความสหสัมพันธ์ พบว่าในข้าวทั้งสองพันธุ์ สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทุกตัวแปรอยู่ในทิศทางบวกทั้งหมด

เมื่อเปรียบเทียบสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาจากทิศทางความสหสัมพันธ์ พบว่าในข้าวทั้งสองพันธุ์ สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทุกตัวแปรอยู่ในทิศทางบวกทั้งหมด

Variables	Soil Ti	Leaf Ti	Root Ti	Stem Ti	Height	SPAD	Panicles #	50% flowering	50% harvest	Fresh weight	Dry weight	Grain #	Good grain %
Soil Ti	1												
Leaf Ti	0.920243	1											
Root Ti	0.921224	0.999938	1										
Stem Ti	0.907306	0.998652	0.998585	1									
Height	0.391991	0.605063	0.598264	0.631217	1								
SPAD	0.885079	0.994655	0.993694	0.995423	0.669975	1							
Panicles #	0.354547	0.538181	0.531052	0.565448	0.988931	0.603862	1						
50% flowering	0.293308	0.508099	0.501958	0.541642	0.977547	0.574189	0.98695	1					
50% harvest	0.333101	0.572507	0.56571	0.600475	0.996412	0.641793	0.980193	0.976996	1				
Fresh weight	0.297869	0.506894	0.499619	0.535528	0.991525	0.575007	0.988921	0.979516	0.990899	1			
Dry weight	0.329338	0.527047	0.519496	0.552961	0.992284	0.594383	0.988983	0.969852	0.988466	0.99806	1		
Grain #	0.384209	0.400753	0.392973	0.409905	0.774174	0.435044	0.780464	0.701487	0.744814	0.805883	0.827684	1	
Good grain %	0.315193	0.519258	0.512017	0.547451	0.993046	0.58639	0.991385	0.980497	0.990759	0.999761	0.998528	0.808133	1

Variables	Soil Ti	Leaf Ti	Root Ti	Stem Ti	Height	SPAD	Panicles #	50% flowering	50% harvest	Fresh weight	Dry weight	Grain #	Good grain %
Soil Ti	1												
Leaf Ti	0.915767	1											
Root Ti	0.922216	0.999663	1										
Stem Ti	0.925195	0.998795	0.998256	1									
Height	0.421479	0.620543	0.613201	0.620754	1								
SPAD	0.871528	0.989689	0.987276	0.985739	0.682816	1							
Panicles #	0.244282	0.479565	0.469107	0.478495	0.980385	0.559636	1						
50% flowering	0.213099	0.484022	0.474969	0.473579	0.960414	0.56984	0.981064	1					
50% harvest	0.285002	0.507853	0.498698	0.507445	0.989131	0.580579	0.997709	0.977956	1				
Fresh weight	0.305997	0.510052	0.501871	0.510332	0.990796	0.582268	0.994379	0.97173	0.998154	1			
Dry weight	0.220838	0.461396	0.454366	0.453991	0.968818	0.536932	0.982125	0.991254	0.985462	0.982958	1		
Grain #	0.31352	0.517437	0.509729	0.517152	0.991974	0.587931	0.992735	0.972936	0.997777	0.999694	0.985374	1	
Good grain %	0.316746	0.516432	0.508692	0.516842	0.991847	0.586573	0.992263	0.969621	0.99737	0.999799	0.982828	0.999877	1

Variables	Soil Ti	Leaf Ti	Root Ti	Stem Ti	Height	SPAD	Panicles #	50% flowering	50% harvest	Fresh weight	Dry weight	Grain #	Good grain %
Soil Ti	1												
Leaf Ti	0.915801	1											
Root Ti	0.92042	0.999557	1										
Stem Ti	0.924725	0.999112	0.998356	1									
Height	0.395109	0.619551	0.602275	0.624875	1								
SPAD	0.810838	0.94302	0.937559	0.944545	0.831714	1							
Panicles #	0.35664	0.552109	0.533387	0.564107	0.983511	0.773785	1						
50% flowering	0.307971	0.526666	0.507539	0.535981	0.988502	0.757667	0.996863	1					
50% harvest	0.276862	0.492428	0.473529	0.500065	0.987161	0.741236	0.985874	0.993591	1				
Fresh weight	0.299578	0.513733	0.495153	0.522058	0.990059	0.755991	0.991597	0.997043	0.999057	1			
Dry weight	0.29898	0.512869	0.49506	0.516459	0.979453	0.760347	0.954256	0.967169	0.987683	0.98222	1		
Grain #	0.317704	0.524741	0.506328	0.533278	0.990942	0.765546	0.991051	0.995534	0.998883	0.999596	0.984806	1	
Good grain %	0.325559	0.533047	0.514638	0.541713	0.992	0.770776	0.992663	0.996524	0.998267	0.999563	0.982882	0.999887	1

Pearson Correlation
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

ภาพที่ 4.12 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ใบ ราก และต้น ความสูง ค่าสีใบ จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และร้อยละเมล็ดสมบูรณ์ของข้าวปทุมธานี 1 ที่อายุ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (บน) 20-30 นาโนเมตร (กลาง) 80-120 นาโนเมตร และ (ใหญ่) 400-600 นาโนเมตร

Variables	Soil Ti	Leaf Ti	Root Ti	Stem Ti	Height	SPAD	Panicles #	50% flowering	50% harvest	Fresh weight	Dry weight	Grain #	Good grain %
Soil Ti	1												
Leaf Ti	0.896704	1											
Root Ti	0.902315	0.999891	1										
Stem Ti	0.901675	0.998991	0.999357	1									
Height	0.385009	0.598272	0.597012	0.616625	1								
SPAD	0.890908	0.990841	0.991383	0.994252	0.674867	1							
Panicles #	0.237331	0.462808	0.461178	0.483272	0.985078	0.551991	1						
50% flowering	0.138337	0.402526	0.39983	0.422693	0.955132	0.49273	0.98721	1					
50% harvest	0.31348	0.529837	0.528574	0.549912	0.995824	0.614121	0.996474	0.975192	1				
Fresh weight	0.277562	0.494754	0.493078	0.513395	0.991394	0.578272	0.995312	0.969371	0.996489	1			
Dry weight	0.306241	0.50952	0.508399	0.529195	0.993424	0.593899	0.993801	0.963925	0.997158	0.999168	1		
Grain #	0.300518	0.513543	0.511998	0.532024	0.993629	0.595506	0.993099	0.963868	0.996452	0.999647	0.999516	1	
Good grain %	0.301394	0.514247	0.512735	0.532915	0.993956	0.597252	0.994253	0.966238	0.9973	0.999683	0.999605	0.999887	1

Variables	Soil Ti	Leaf Ti	Root Ti	Stem Ti	Height	SPAD	Panicles #	50% flowering	50% harvest	Fresh weight	Dry weight	Grain #	Good grain %
Soil Ti	1												
Leaf Ti	0.898403	1											
Root Ti	0.914062	0.999134	1										
Stem Ti	0.906047	0.998032	0.997925	1									
Height	0.425565	0.64345	0.618797	0.63775	1								
SPAD	0.896168	0.987967	0.986346	0.984274	0.715547	1							
Panicles #	0.145591	0.430366	0.397461	0.424699	0.952965	0.49787	1						
50% flowering	0.216113	0.458301	0.42894	0.440157	0.958494	0.546876	0.960937	1					
50% harvest	0.320334	0.572284	0.543433	0.562956	0.989189	0.639251	0.978916	0.976632	1				
Fresh weight	0.278875	0.514361	0.485875	0.506934	0.986492	0.593527	0.98378	0.982704	0.994519	1			
Dry weight	0.39554	0.579897	0.556296	0.574644	0.992579	0.665325	0.947473	0.966222	0.981373	0.988573	1		
Grain #	0.29734	0.526141	0.498368	0.518582	0.989024	0.606877	0.979123	0.982913	0.99394	0.999679	0.991811	1	
Good grain %	0.306633	0.535431	0.507754	0.528375	0.990486	0.614379	0.979026	0.980575	0.994972	0.999567	0.992165	0.999866	1

Variables	Soil Ti	Leaf Ti	Root Ti	Stem Ti	Height	SPAD	Panicles #	50% flowering	50% harvest	Fresh weight	Dry weight	Grain #	Good grain %
Soil Ti	1												
Leaf Ti	0.900985	1											
Root Ti	0.9032	0.999818	1										
Stem Ti	0.879345	0.998306	0.997711	1									
Height	0.41291	0.639843	0.631446	0.663903	1								
SPAD	0.840938	0.924375	0.921507	0.923185	0.831553	1							
Panicles #	0.219331	0.430442	0.420716	0.457137	0.967472	0.691172	1						
50% flowering	0.102377	0.335355	0.326376	0.364371	0.935934	0.608535	0.989749	1					
50% harvest	0.297869	0.509322	0.500736	0.533143	0.984252	0.754607	0.994161	0.979413	1				
Fresh weight	0.284855	0.505088	0.496302	0.531102	0.985302	0.744359	0.995512	0.980898	0.998997	1			
Dry weight	0.239214	0.426909	0.417916	0.446746	0.954469	0.707021	0.988832	0.981735	0.990042	0.984815	1		
Grain #	0.296873	0.514563	0.505784	0.540669	0.986847	0.751018	0.994696	0.977896	0.998402	0.999803	0.982231	1	
Good grain %	0.310473	0.523667	0.51482	0.548659	0.988276	0.760943	0.994068	0.975394	0.999003	0.999545	0.984182	0.999707	1

Pearson Correlation
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0

ภาพที่ 4.13 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficients) ระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ใบ ราก และต้น ความสูง ค่าสีใบ จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และร้อยละเมล็ดสมบูรณ์ของหอมมะลิ กข 105 ที่อายุ 120 วัน หลังแช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด (บน) 20-30 นาโนเมตร (กลาง) 80-120 นาโนเมตร และ (ใหญ่) 400-600 นาโนเมตร

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

บทที่ 5
สรุปการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

1. สรุปการวิจัย และอภิปรายผล

ตอนที่ 1 การศึกษาคุณสมบัติของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

1.1 สรุปการวิจัย

การวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่า อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กซึ่งควรมีขนาด 20-30 นาโนเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 23.0 ± 6.5 นาโนเมตร อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางซึ่งควรมีขนาด 80-120 นาโนเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 103.5 ± 35.6 นาโนเมตรและอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ซึ่งควรมีขนาด 400-600 นาโนเมตร มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย 485.7 ± 63.3 นาโนเมตร กล่าวคือขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมทั้งสามเป็นไปตามแผนการทดลอง

การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำด้วยเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัต พบว่า เกิดการจับตัวเป็นก้อนของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในน้ำซึ่งส่งผลให้ขนาดนุภาคเชิงผลศาสตร์มีความแตกต่างกับขนาดจากการวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดมีลักษณะการกระจายแบบที่มีสองฐานนิยม อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีขนาดเชิงพลศาสตร์เฉลี่ย 6.19 ไมโครเมตร ค่ามัธยฐาน 5.45 ไมโครเมตร และค่าการกระจายตัวร้อยละ 65 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางมีขนาดเชิงพลศาสตร์เฉลี่ย 3.54 ไมโครเมตร ค่ามัธยฐาน 0.74 ไมโครเมตร และค่าการกระจายตัวร้อยละ 183 และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่มีขนาดเชิงพลศาสตร์เฉลี่ย 0.45 ไมโครเมตร ค่ามัธยฐาน 0.35 ไมโครเมตร และค่าการกระจายตัวร้อยละ 120 กล่าวคืออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กมีขนาดเชิงพลศาสตร์มากที่สุด ตามด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางและใหญ่ ตามลำดับ การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการวัดการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดมีโครงสร้างผลึกแบบอนาเทส โดยที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไดออกไซด์ขนาดกลางมีขนาดของผลึกแบบอนาเทสที่ใหญ่ที่สุด ตามมาด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ตามลำดับ

1.2 อภิปรายผล

จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดเป็นขนาดที่ใช้ทั่วไป ทั้งนี้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดที่เล็กกว่า 100 นาโนเมตรเช่นอนุภาคขนาดเล็กและกลางในงานวิจัยนี้ เป็นอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้รับการพิจารณาว่ามีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้ในทางชีวภาพ (Raliya et al., 2018) ในส่วนอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดใหญ่กว่าเช่นอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในงานวิจัยนี้จะถูกผลิตในปริมาณมากเพื่อนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมสี และเครื่องสำอาง (Braun et al., 1992) อย่างไรก็ตามอนุภาคนาโนขนาดเล็กในน้ำมักจับกลุ่มกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ดังแสดงในผลเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัตในภาพที่ 4.4 และ 4.5 นอกจากนี้ผลเทคนิคการกระเจิงแสงแบบพลวัตตามในภาพที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่เท่านั้นที่มีจำนวนประชากรอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่จับตัวกัน และมีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตรปริมาณมาก ในขณะที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กและขนาดกลางกลับไม่มีประชากรอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่จึงอาจส่งผลดีกว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดอื่นๆ ต่อการเจริญเติบโตของข้าว นอกจากนี้การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่มีการผลิตในระดับอุตสาหกรรมอาจทำให้มีการเข้าถึงการใช้อนุภาคนาโนในการเกษตรมากขึ้นได้

งานวิจัยก่อนหน้านี้ได้ค้นพบว่าขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีผลสำคัญต่อการดูดซับและการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ในพืช (Rodríguez-González et al., 2019; Silva et al., 2016; Tripathi et al., 2017) กล่าวคือในแต่ละส่วนของพืชจะมีช่วงขนาดยกเว้น (size exclusion range) ของอนุภาคนาโนที่มีขนาดใหญ่กว่าช่วงขนาดยกเว้นไม่สามารถผ่านส่วนเนื้อเยื่อของพืชนั้นได้ อย่างไรก็ตามในงานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้มีการศึกษาการจับตัวเป็นก้อนของของอนุภาคนาโนในน้ำและขนาดอนุภาคเชิงพลศาสตร์ในน้ำ (hydrodynamic size) โดยละเอียดและอย่างเป็นระบบ การจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคนาโนเป็นปรากฏการณ์ที่มีความซับซ้อน แต่เกิดขึ้นทั่วไปและส่งผลอย่างสำคัญต่อคุณสมบัติทางจลพลศาสตร์ (kinetic) ทางเคมี และทางแสงของอนุภาคนาโนและสารแขวนลอยอนุภาคนาโน (Diebold, 2014; Maillard et al., 2005; K. L. Wu & Lai, 2005) ด้วยเหตุผลเหล่านี้ ช่วงขนาดยกเว้นที่ได้ถูกค้นพบในงานวิจัยก่อนหน้านี้อาจจะประเมินขนาดของกลุ่มก้อนอนุภาคนาโนที่สามารถผ่านเนื้อเยื่อของพืชต่ำเกินกว่าค่าจริง ดังนั้นขนาดของอนุภาคนาโนที่ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของพืชอาจถูกประเมินต่ำกว่าขนาดจริงเช่นกัน นอกจากนี้ในบางกรณีอนุภาคนาโนที่จับกลุ่มเป็นก้อนสามารถแยกตัวออกจากกันซึ่งส่งผลให้ขนาดอนุภาคนาโนเชิงพลศาสตร์ในน้ำมีค่าเล็กลง ด้วยเหตุนี้ทฤษฎีช่วงขนาดยกเว้นยังคงมีประเด็นที่มียังไม่ชัดเจนและควรมีการศึกษาต่อไป นอกจากนี้ คุณสมบัติการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสงของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางผลึกของอนุภาค จากผลการวัดการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่า โครงสร้างทางผลึกของตัวอย่างอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดมีลักษณะโครงสร้างแบบอนาเทส ซึ่งถือว่าเป็นลักษณะโครงสร้างผลึกที่ดีที่สุดต่อการเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Zhang et al., 2014) จากที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดมีโครงสร้างผลึกที่เหมือนกัน โครงสร้างทางผลึกจึงเป็นตัวแปรควบคุมในการทดลองนี้

ตอนที่ 2 การศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต คุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในระยะต้นกล้าของข้าว

2.1 สรุปการวิจัย

จากการศึกษาอัตราการงอกของเมล็ดข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมง พบว่า ข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าว และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพบว่าตัวแปรทั้งสองไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าว

การศึกษาความสูงของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 พบว่า วันที่ 1 ของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว และตัวแปรขนาดและอัตราการใช้ไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว ในวันที่ 3 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ขนาด 80-120 นาโนเมตรในความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร และขนาด 400-600 นาโนเมตรในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในวันที่ 5 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรและขนาด 80-120 นาโนเมตร ไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว แต่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในวันที่ 7 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรในและขนาด 80-120 นาโนเมตรในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในวันที่ 9 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในการทดลองวันที่ 3, 5, 7 และ 9 ในขณะที่การไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีความสูงน้อยที่สุด ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

ในส่วนของข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า วันที่ 1 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว และตัวแปรทั้งสองไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว ในวันที่ 3 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรและขนาด 80-120 นาโนเมตร ในความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรไม่ส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว ในวันที่ 5 พบว่า การใช้อนุภาค

นาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในขณะที่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดอื่นในทุกความเข้มข้นส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากกว่าการไม่ใช้อนุภาคนาโน ในวันที่ 7 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในวันที่ 9 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากที่สุด ในการทดลองวันที่ 3, 5, 7 และ 9 ในขณะที่การที่ไม่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ต้นกล้าข้าวมีความสูงน้อยที่สุด ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อความสูงของต้นข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาจำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 พบว่า ในวันที่ 7 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรในทุกความเข้มข้นส่งผลให้ต้นข้าวมีจำนวนใบมากกว่าการไม่เติมอนุภาคนาโนแต่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรไม่ส่งผลต่อจำนวนใบ ในวันที่ 9 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งสามขนาดในทุกความเข้มข้นไม่ส่งผลต่อจำนวนใบ สำหรับการทดลองในข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ในวันที่ 7 และ วันที่ 9 การเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและความเข้มข้นไม่ส่งผลต่อจำนวนใบข้าว

การศึกษาสีของใบของข้าวระยะต้นกล้าหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าในวันที่ 7 และ วันที่ 9 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรในความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลให้ใบมีความเข้มของสีมากที่สุด ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อสีของใบของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลให้ใบมีความเข้มของสีมากที่สุด ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาอัตราการรอดตายของข้าวระยะต้นกล้าอายุ 9 วันหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรในทุกความเข้มข้น ส่งผลให้ข้าวมีอัตราการรอดตายสูงกว่าการไม่ใช้อนุภาคนาโน ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่ออัตราการรอดตายของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรในความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมมากขึ้นตาม และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 นาโนเมตรมีการสะสมมากที่สุด ตามด้วยอนุภาคขนาด 20-30 นาโนเมตรและขนาด 400-600 นาโนเมตรตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในรากและต้นของข้าวอายุ 5 วันหลังจากการแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมมากขึ้นตาม และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 นาโนเมตรมีการสะสมมากที่สุด ตามด้วยอนุภาคขนาด 20-30 นาโนเมตรและขนาด 400-600 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อสะสมธาตุไททาเนียมในรากและต้นของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในราก ต้น และใบของข้าวอายุ 9 วันหลังจากการแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรในความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมมากขึ้นตาม และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 นาโนเมตรมีการสะสมมากที่สุด ตามด้วยอนุภาคขนาด 20-30 นาโนเมตร และขนาด 400-600 นาโนเมตรตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อสะสมธาตุไททาเนียมในราก ต้นและใบของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการสะสมของธาตุไททาเนียมและการเจริญเติบโตของข้าวอายุ 9 วันของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด ราก ต้น และใบ ความสูง ค่าสีใบ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง และอัตราการรอดตายของข้าวหลังการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดมีค่าเป็นบวกทั้งหมด โดยความสัมพันธ์ส่วนมากอยู่ในระดับมากและความสัมพันธ์อื่นๆ อยู่ในระดับปานกลาง

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีความแตกต่างในความสูงของต้นกล้าในวันที่ 3 และวันที่ 5 และจำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าในวันที่ 7 และไม่พบความแตกต่างในตัวแปรอื่นๆ

2.2 อภิปรายผล

งานวิจัยหลายชิ้นได้ข้อสรุปที่แตกต่างกันในประเด็นผลของการแช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยไททาเนียมไดออกไซด์ (Cox et al., 2016; Rodríguez-González et al., 2019) จากตารางที่ 4.4 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการแช่เมล็ดข้าวทั้งสองชนิดไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าว ไม่ว่าจะใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดหรือความเข้มข้นใด ซึ่งเป็นผลที่น่าสนใจเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Debnath et al ในปี 2020 ซึ่งการศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์พื้นเมืองของประเทศอินเดีย *(Oryza sativa* cv. CN 1794-2) ในขั้นตอนการทดลองคณะวิจัยได้นำเมล็ดข้าวมาแช่ในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กกว่า 100 นาโนเมตร และมีความเข้มข้นของอนุภาค 0 ถึง 100 ppm และใช้เวลาในการแช่ทั้งสิ้น 48 ชั่วโมง แล้วนำเมล็ดข้าวมาเพาะในแผ่นกระดาษกรอง จึงสังเกตได้ว่ามีความเหมือนกันในขั้นตอนการทดลองระหว่างงานวิจัยของ Debnath et al ในปี 2020 และงานวิจัยนี้ ในงานวิจัยนี้พบว่าการแช่เมล็ดในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกความเข้มข้น ส่งผลดีต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความแตกต่างของผลการทดลองนี้อาจเป็นเพราะความแตกต่างของสายพันธุ์ข้าวที่ใช้ในการทดลอง นอกจากนี้นั้นยังสังเกตได้ว่าเมล็ดข้าวที่ใช้ในงานวิจัยมีอัตราการเจริญเติบโตในกลุ่มควบคุม (Control) อยู่ที่ร้อยละ 90 ในขณะที่อัตราการเจริญเติบโตของข้าวในกลุ่มควบคุมของงานวิจัยนี้อยู่ที่ร้อยละ 99 ถึง ร้อยละ 100 ด้วยเหตุนี้การทดลองทางสถิติจึงอาจไม่สามารถแสดงผลที่เป็นบวกต่อการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ได้

งานวิจัยของ Yang et al ในปี 2015 ที่มีการศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเฉลี่ย 20 นาโนเมตรในรูปแบบของสารแขวนลอยน้ำที่มีความเข้มข้น 100 ppm ต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ Jijing No. 6 หลังจากแช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าการแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลที่มีนัยสำคัญทางสถิติต่ออัตราการงอกของเมล็ดข้าว ซึ่งเป็นผลที่เหมือนกับงานวิจัยนี้ นอกจากนี้นั้นถึงแม้ว่างานวิจัยของ Yang et al., (2015) ทำการแช่เมล็ดในเวลาแค่ 2 ชั่วโมง การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-MS พบว่ามีการสะสมของธาตุไททาเนียมในเมล็ดเช่นเดียวผล ICP-MS ของงานวิจัยนี้ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.10 ด้วยเหตุนี้จึงวิเคราะห์ได้ว่าการที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อการงอกของเมล็ดไม่ได้เกิดจากที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ได้ถูกดูดซึมเข้าไปในเมล็ดข้าว และจึงสันนิษฐานได้ว่าผลที่แตกต่างของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์นี้เกี่ยวข้องกับชนิดของพันธุ์ข้าว

แม้ว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะไม่ส่งผลต่ออัตราการงอก การใช้อนุภาคส่งผลอย่างชัดเจนในทางบวกต่อการตัวแปรด้านการเจริญเติบโตอื่นๆ ของต้นกล้าข้าว จากตารางที่ 4.5 เห็นได้ว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในทุกขนาดและความเข้มข้นส่งผลดีต่อความสูงของต้นกล้าข้าวที่มีอายุ 7 และ อายุ 9 วัน ในขณะที่ผลในวันที่ 1, 3 และ 5 มีการใช้

อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์บางส่วนที่ไม่ส่งผลต่อความสูงของต้น ในผลการทดลองที่แสดงถึงผลบวกนั้นยังพบว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ (400-600 นาโนเมตร) สามารถเพิ่มความสูงของต้นกล้าข้าวในระดับที่มากที่สุด และการใช้ปริมาณที่สูงขึ้นยิ่งส่งผลดีต่อความสูงของต้นกล้า อย่างไรก็ตาม พบว่าผลของตัวแปรขนาดอนุภาคและปริมาณต่อความสูงมีปฏิสัมพันธ์กัน ดังนั้น จึงควรมีการศึกษาโดยละเอียดถึงปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เหมาะสมในกรณีที่จะมีการอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดอื่นๆ ที่ไม่ได้ศึกษาในงานวิจัยนี้

งานวิจัยชิ้นอื่นได้รายงานผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อความสูงของที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยของ Debnath et al., (2020) กล่าวไว้ข้างต้นได้แสดงผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ กล่าวคือการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 20 ถึง 100 ppm ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโต ในทางกลับกันงานวิจัยของ Ji et al., (2017) ซึ่งมีการทดสอบการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 21 นาโนเมตรกับข้าวพันธุ์ Y Liangyou 1928 ด้วยการแช่ต้นกล้าข้าวในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 100 และ 1000 ppm พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1000 pm ส่งผลเสียต่อความสูงต้นอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยของ Ji et al ในปี 2017 มีความแตกต่างบางส่วนกับงานวิจัยนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค ICP-MS แสดงให้เห็นว่าปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมในต้นข้าวที่แช่ในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้น 1000 ppm ที่ค่าใกล้เคียงกัน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถเปรียบเทียบงานวิจัยทั้งสองได้ระดับหนึ่ง การเปรียบเทียบยังแสดงให้เห็นว่าในงานของ Ji et al., (2017) นั้นปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมที่เพิ่มขึ้นส่งผลเสียมากขึ้นต่อความสูง ในขณะที่จากรูปภาพที่ 4.10 และ 4.11 แสดงให้เห็นว่าปริมาณของธาตุไททาเนียมที่สะสมเพิ่มขึ้นส่งผลดีต่อการความสูงของข้าว ความแตกต่างนี้ชี้ว่าอาจเกิดจากข้าวแต่ละสายพันธุ์มีการตอบสนองต่ออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ดูดซึมเข้าสู่พืชที่แตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างดังกล่าวอาจไม่ขึ้นอยู่กับความไวต่อช่วงแสงของพันธุ์ข้าว เพราะข้าวปทุมธานี 1 และข้าวดอกหอมมะลิไม่มีความแตกต่างในผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อความสูงข้าวและการสะสมธาตุไททาเนียม

ในทำนองเดียวกัน การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ยังส่งผลดีต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของต้นกล้าข้าวทั้งสองพันธุ์อย่างเห็นได้ชัด อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ (400-600 นาโนเมตร) ส่งผลดีที่สุดต่อน้ำหนักสดและแห้ง และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นยังส่งผลดีมากขึ้นเช่นกันตามที่แสดงในตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการสะสมของธาตุไททาเนียมด้วยเทคนิค ICP-MS แสดงให้เห็นว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมที่มากขึ้นซึ่งแสดงถึงประโยชน์ของการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ตามที่แสดงในตารางที่ 4.15 ผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

ต่อน้ำหนักของข้าวสอดคล้องกับผลต่อตัวแปรการเจริญเติบโตอื่นๆที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆยังคงเห็นได้ว่ามีทั้งงานวิจัยที่แสดงผลที่สอดคล้องและไม่สอดคล้องกัน กล่าวคือเมื่อพิจารณางานวิจัยของ Debnath et al. (2020) และ Ji et al. (2017) ที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์แบบอนาเทส ตามที่ได้อภิปรายไว้นั้นจะเห็นได้ว่าในงานที่พบผลเสียของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อความสูงหรืออัตราการรอดของข้าวจะรายงานผลเสียของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าว ในขณะที่ในงานที่พบผลดีของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อความสูงหรืออัตราการรอดของข้าวจะรายงานผลดีของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวเช่นกัน ทว่าในงานวิจัยนี้กลับพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่ออัตราการงอกของเมล็ด แต่ส่งผลดีต่อตัวแปรการเจริญเติบโตอื่นๆ ทั้งนี้ในงานวิจัยอื่นที่เปรียบเทียบเป็นการศึกษาพันธุ์ข้าวที่ต่างกับงานวิจัยนี้

อย่างไรก็ตาม มีงานวิจัยของ Chutipaijit และ Sutjaritvorakul., (2020) ที่ศึกษาผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเกิดเนื้อเยื่อเซลล์พื้นฐานแคลลัส (callus) ของเมล็ดข้าวปทุมธานี 1 โดยใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 25-50 นาโนเมตร การทดลองในงานวิจัยดังกล่าวนำเมล็ดข้าวแช่ในของเหลวสำหรับการเหนี่ยวนำให้เกิดเนื้อเยื่อเซลล์พื้นฐาน โดยในของเหลวดังกล่าวมีความเข้มข้นของสารกรด 2,4-dichlorophenoxyacetic และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เป็นตัวแปรศึกษา โดยที่ความเข้มข้นของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์อยู่ในช่วง 0-600 ppm ผลการทดลองพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวส่งผลดีอย่างมีนัยสำคัญต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของเนื้อเยื่อเซลล์พื้นฐาน แม้ว่าจะเป็นการทดลองที่มีความแตกต่างกับการทดลองในงานวิจัยนี้ แต่ก็ยังแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องของผลดีของการแช่เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 ในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ และยังชี้แนะว่าพันธุ์ข้าวเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีความแตกต่างในแต่ละการทดลอง

แม้ว่างานวิจัยชิ้นอื่นๆ จะรายงานผลที่แตกต่างของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ผลการวิจัยนี้มีข้อเด่นที่แตกต่างกับงานวิจัยอื่นอยู่สองประเด็นหลัก ในประเด็นแรกนั้นผลการทดลองระบุว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีขนาดเฉลี่ย 485 นาโนเมตรและมีขนาดเชิงพลวัติ 450 นาโนเมตรส่งผลที่ดีที่สุดต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ (Cox et al., 2016; Rodríguez-González et al., 2019; Wang et al., 2016) พบว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าว ถ้ามองโดยผิวเผินนั้นอาจวิเคราะห์ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กกว่าได้จับกลุ่มกันเป็นก้อนใหญ่ และทำให้เกิดการดูดซึมเข้าสู่พืชในปริมาณที่น้อยกว่า ทว่าการตีความนี้ไม่สอดคล้องกับผลของเทคนิค ICP-MS ที่แสดงให้เห็นในงานวิจัยนี้และงานอื่นๆ ว่ามีการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในปริมาณที่มากกว่า

ด้วยตุนี้อาจมีการตั้งข้อสันนิษฐานเพิ่มเติมว่าการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก อาจมีมากเกินจนทำให้เป็นพิษต่อพืช ทว่าข้อสันนิษฐานนี้ไม่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ระบุไว้ว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตและส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้นในทำนองเดียวกัน เพราะฉะนั้นจึงควรตีความว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ (400-600 นาโนเมตร) มีประสิทธิภาพการเพิ่มการเจริญเติบโตของเมล็ดและต้นกล้าข้าวมากกว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก ทั้งที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในปริมาณที่น้อยกว่า

ประสิทธิภาพที่ดีกว่าของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ อาจมีสาเหตุมาจากแต่ละส่วนของพืชมีช่วงขนาดจำกัดของอนุภาค (Size exclusion limit) ที่แตกต่างกัน งานวิจัยของ Rodríguez-González et al., (2019) แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าผนังเซลล์รากของพืชจะมีช่วงขนาดจำกัดขนาดเล็ก โดยทั่วไปแล้วอนุภาคขนาดใหญ่ยังสามารถซึมผ่านผนังเซลล์รากเข้าไปได้ ดังนั้น ขนาดของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้จึงไม่ส่งผลต่อการผ่านผนังเซลล์ราก ผลการทดลองในงานวิจัยนี้ที่พบว่ามีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากที่สุดในราก บ่งชี้ว่าการเคลื่อนที่ของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวเกิดขึ้นในท่อลำเลียงน้ำ (xylem) และบ่งชีอีกว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต้องผ่านแคสพาเรียนสตริป (Casparian strip) ด้วยการลำเลียงแบบซิมพลาส (symplastic pathway) ตามที่พบในงานวิจัยของ Pérez-de-Luque., (2017) เนื่องจากที่แคสพาเรียนสตริปสามารถจำกัดการไหลของน้ำ ขนาดของอนุภาคที่แท้จริง (ไม่ใช่ขนาดเชิงพลวัติ) จึงส่งผลต่อปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่สามารถผ่านแคสพาเรียนสตริปและเข้าสู่ระบบน้ำเลี้ยงของพืชได้ ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กจึงสะสมมากกว่าในส่วนต่างๆ ของพืช อย่างไรก็ตามใช่ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกอนุภาคที่สะสมจะถูกเซลล์พืชนำไปใช้ได้ เพราะว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เซลล์พืชนำไปใช้ยังต้องผ่านไซโตพลาส (Cytoplasm) อีกเช่นกัน เนื่องจากในไซโตพลาสมีน้ำอยู่ในปริมาณมาก ขนาดอนุภาคเชิงพลวัติจึงเป็นปัจจัยหลักส่งผลต่อการผ่านไซโตพลาสซึมและการเข้าสู่เซลล์พืช ด้วยเหตุนี้เซลล์พืชจึงนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ไปใช้มากกว่าทั้งที่มีการสะสมที่น้อยกว่าของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่

ประเด็นที่สอง พบว่า การสะสมธาตุไททาเนียมในส่วนต่างๆ ของพืชในปริมาณที่สูงกว่างานวิจัยอื่นๆ ตามที่แสดงในตารางที่ 4.10 ถึง 4.15 และการสะสมของธาตุไททาเนียมในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลดีต่อการเจริญเติบโต เหตุผลที่สามารถอธิบายถึงการสะสมที่มีค่าสูงเกินคาดการณ์ในงานวิจัยนี้คือ การวัดปริมาณธาตุไททาเนียมด้วยเทคนิค ICP-MS ในงานวิจัยนี้ดำเนินการในข้าวที่มีอายุยังน้อย ปริมาณการสะสมของธาตุที่คำนวณเป็นสัดส่วนต่อน้ำหนักของพืชย่อมขึ้นอยู่กับน้ำหนักของพืชและอายุของพืช เนื่องจากในการทดลองนี้ไม่มีการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์หลังจากการแช่เมล็ด มวลของธาตุไททาเนียมสุทธิ (Total Ti content) ในหน่วยกรัมที่ถูกสะสมในต้นกล้าข้าว

จึงไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้หลังจากการแช่ และเมื่อต้นข้าวเจริญเติบโตและมีมวลมากขึ้น จึงส่งผลให้การสะสมของธาตุไททาเนียมในต้นข้าวในหน่วย ppm จึงมีค่าลดลงเมื่อต้นกล้าข้าวมีอายุมากขึ้นตามที่แสดงในตารางที่ 4.10 ถึง 4.15 ตัวอย่างพบว่าในงานวิจัยของ DaCosta และ Sharma ในปี 2016 ที่ได้มีการศึกษาการสะสมของธาตุไททาเนียมในข้าวที่ได้รับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบของสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้น 1000 ppm การวิเคราะห์การสะสมของธาตุไททาเนียมในรากของข้าวที่มีอายุ 30 วัน พบว่า มีการสะสมของธาตุไททาเนียมในปริมาณ 21 ppm ปริมาณนี้มีค่าน้อยกว่าปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมในรากต้นกล้าข้าวอายุ 9 วันในงานวิจัยนี้อยู่ประมาณ 500 เท่า แต่เมื่อพิจารณาสัดส่วนของน้ำหนักของรากข้าวที่อายุ 30 วันในงานวิจัยของ DaCosta และ Sharma., (2016) ต่อน้ำหนักของรากต้นกล้าข้าวที่มีอายุ 9 วัน ในงานวิจัยนี้ พบว่ามีสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับ 500 เช่นกัน เพราะฉะนั้นปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมในงานวิจัยนี้จึงไม่ได้มีค่าที่สูงเกินคาดหมาย อนึ่งเมื่อพิจารณางานวิจัยของ Ji et al., (2017) ที่กล่าวถึงก่อนหน้าต้นข้าว ยังพบว่ามีการสะสมของธาตุไททาเนียมในข้าวที่อายุ 20 วันมีค่าใกล้เคียงกับการสะสมธาตุไททาเนียมในต้นกล้าข้าวที่วันที่ 9 ในงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการสะสมธาตุไททาเนียมในงานวิจัยนี้อาจมีปริมาณที่น้อยกว่าในงานของ Ji et al., (2017) และเป็นเหตุผลที่ Ji et al., (2017) ถึงผลลบของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเหตุผลเหล่านี้การเปรียบเทียบการสะสมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จึงควรพิจารณาถึงอายุของพืชด้วย

เพื่อศึกษาถึงกลไกของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าว จึงมีได้วัดปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวด้วยการวัดค่าสีใบ (SPAD index) ตามผลที่แสดงในตารางที่ 4.7 พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่สูงขึ้นเช่นกัน นอกจากนี้จากภาพที่ 4.10 และ 4.11 พบว่าปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียม และการเจริญเติบโตของข้าวมีปฏิสัมพันธ์ในเชิงบวกทั้งสิ้น ด้วยเหตุนี้จึงสามารถสันนิษฐานได้ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ถูกดูดซึมผ่านทางรากถูกลำเลียงผ่านทางท่อลำเลียงน้ำเข้าสู่ใบพืช และในใบพืชอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่สูงขึ้นซึ่งเร่งการสังเคราะห์แสงและเพิ่มการเจริญเติบโตของพืช กระบวนการของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อพืชพบศึกษาในพืชชนิดอื่นๆ เช่น ป่วยเล้ง (*Spinacia oleracea* ตามงานวิจัยของ Hong et al., (2006) และงานวิจัยของ Lei et al., (2007) และ ข้าวสาลี (*Triticum aestivum* L., ตามงานวิจัยของ Rafique et al., (2018) อย่างไรก็ตามยังคงมีงานวิจัยที่ระบุถึงผลเสียและผลดีของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ในงานวิจัยของ Wu et al., (2017) พบว่า การสะสมของธาตุไททาเนียมไดออกไซด์ในเนื้อเยื่อข้าวส่งผลให้เกิดความเครียดออกซิเดชัน (Oxidative stress) ที่เกิดจากอนุมูลอิสระออกซิเจน (Oxygen) ความเครียดนี้ส่งผลดีคือมีการเร่งการเมตาบอลิซึมเพื่อสร้างพลังงานและเร่งการสังเคราะห์โปรตีนมากขึ้น แต่ส่งผลเสียต่อการผลิตคาร์โบไฮเดรต

ด้วยเหตุนี้นั้นกลไกการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ได้อธิบายผลของงานวิจัยนี้อาจไม่ได้เกิดขึ้นในข้าวสายพันธุ์อื่นหรือพืชชนิดอื่น

ผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ และการสังเคราะห์แสงขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ถูกค้นพบในหลายวิจัยก่อนหน้า (Kužel et al., 2003; Lyu et al., 2017) ทฤษฎีที่งานวิจัยใช้อธิบายผลเป็นทฤษฎีที่เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างธาตุไททาเนียมและธาตุเหล็ก (Fe) ในพืช ที่ Cigler et al., (2010) ได้คิดค้นขึ้นและได้ให้เหตุผลไว้ดังนี้ ธาตุเหล็กเป็นธาตุอาหารเสริมที่สำคัญต่อพืชเพราะเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์และการควบคุมปริมาณอนุมูลอิสระออกซิเจนในพืช ธาตุไททาทาเนียมและธาตุเหล็กเป็นธาตุในกลุ่มทรานซิชันจึงมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ธาตุไททาเนียมมีค่า Electronegativity ที่น้อยกว่า ด้วยเหตุนี้ธาตุไททาเนียมจึงสามารถส่งเสริมกระบวนการสังเคราะห์และการเผาผลาญได้เช่นเดียวกับธาตุเหล็ก เนื่องจากที่ธาตุไททาเนียมมีค่า Electronegativity ที่น้อยกว่าธาตุไททาเนียมจึงปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้มากกว่าและสามารถสร้างพันธะที่แน่นกว่าโปรตีนที่ใช้ในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์เมื่อเทียบกับธาตุเหล็ก ด้วยเหตุผลนี้การใช้ธาตุไททาเนียมจึงส่งเสริมการทำงานของธาตุเหล็ก ทฤษฎีนี้ยังสามารถอธิบายการเป็นพิษของธาตุไททาเนียมเมื่อใช้ในปริมาณที่สูงเกินไปซึ่งเกิดจากที่ธาตุไททาเนียมแย่งจับโปรตีนที่จำเป็นต้องใช้ธาตุเหล็กในการทำงาน ทฤษฎีของ Cigler et al., (2010) นี้จึงมีความสอดคล้องกับผลวิจัยที่ได้อภิปรายไว้และผลวิจัยการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์อื่นๆ เช่นงานของ Kumar et al., (2022)

ตอนที่ 3 การศึกษาผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวในระยะการเจริญเติบโตและการเก็บเกี่ยวผลผลิต

3.1 การศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวที่แช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพียงครั้งเดียวก่อนปลูก

3.1.1 สรุปการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลองที่แช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกันพบว่าค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ค่าปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสเฟต ปริมาณโพแตส และสัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนในดิน ไม่มีความเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการทดลอง และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติเหล่านี้เช่นกัน ในส่วนปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมอยู่ในระดับเดียวกันกับความคลาดเคลื่อนในการวัด (Measurement error) ของเทคนิค ICP-MS ทั้งก่อนและหลังการทดลอง กล่าวคือไม่มีการสะสมของธาตุไททาเนียมก่อนและหลังการทดลอง

การศึกษาความสูงของข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมง ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ในวันที่ 30 90 และ 120 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและในทุกปริมาณ ส่งผลให้ต้นข้าวมีความสูงมากกว่าการไม่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อความสูงของต้นข้าวทั้งสองชนิด แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาสีใบของใบข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมง ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ในวันที่ 30 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและในทุกปริมาณส่งผลให้ใบข้าวมีสีใบมากกว่าการไม่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อสีใบทั้งสองชนิด แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง แต่ในวันที่ 90 และ 120 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและในทุกปริมาณไม่ส่งผลต่อสีของใบข้าว ในส่วนประเด็นจำนวนต้นข้าวต่อกอพบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและในทุกปริมาณไม่ส่งผลเช่นกันในทั้งสามวันที่เก็บตัวอย่าง

ในการศึกษาไม่สามารถศึกษาวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยวผลผลิต 50 เปอร์เซ็นต์ คุณภาพผลผลิต และคุณภาพเมล็ดได้ เนื่องจากข้าวไม่ให้ผลผลิตเพียงพอต่อการศึกษา

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างในตัวแปรที่ศึกษา

3.1.2 อภิปรายผล

การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการทดลองนี้ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของดิน เนื่องจากที่เป็นการใช้ในขั้นตอนการแช่เมล็ดเท่านั้นก่อนการนำต้นกล้าไปปลูกใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ข้าวได้รับจึงถูกดูดซึมเข้าไปในข้าวทั้งหมด จากงานวิจัยของ Murali et al., (2022) พบว่า ในกรณีที่ใช้อนุภาคนาโนเข้าสู่พืชผ่านทางรากนั้น อนุภาคนาโนจะถูกนำไปสะสมในส่วนต่างๆ ของพืช และจะไม่มีการปล่อยให้อนุภาคนาโนเหล่านี้กลับเข้าสู่รากไปยังดิน ในขณะที่การใช้อนุภาคนาโนผ่านทางใบนั้นอาจส่งผลให้อนุภาคนาโนเคลื่อนย้ายไปที่รากพืชได้ ดังนั้นใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบการแช่เมล็ดซึ่งเป็นการให้ผ่านทางรากจึงไม่มีปฏิสัมพันธ์กับดินและไม่ส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงในดิน

เมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพของผลผลิตของข้าวในการทดลองนี้กับงานวิจัยของ Debnath et al., (2020) ซึ่งมีการทดลองที่ใกล้เคียงมากที่สุดกับงานวิจัยนี้ พบว่า ผลการทดลองที่เหมือนและแตกต่างกับงานวิจัยนี้ซึ่งเกิดจากขั้นตอนการทดลองที่แตกต่างกันในบางส่วน ในงาวิจัยของ Debnath et al., (2020) ได้แช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เช่นเดียวกับในงานวิจัยนี้ แต่ไม่ได้มีการศึกษาขนาดและใช้ปริมาณอนุภาคที่แตกต่างกับงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตามนั้นการแช่เมล็ดอนุภาคในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อความสูงของต้นข้าวในงานวิจัยทั้งสองเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องว่าปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในช่วง 10-1000 ppm ในงานวิจัยนี้ และ 10-100 ppm ในงานวิจัยของ Debnath et al., (2020) ไม่ส่งผลต่อความสูงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตามนั้นในงานวิจัยนี้การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอและข้าวไม่สามารถให้ผลผลิตเพียงพอต่อการศึกษาวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยวผลผลิต 50 เปอร์เซ็นต์ คุณภาพผลผลิต และคุณภาพเมล็ด ทว่าในงานวิจัยของ Debnath et al., (2020) กลับพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอและวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุของความแตกต่างของผลการทดลองเกิดจากที่ในงานวิจัยของ Debnath et al., (2020) ได้มีการเติมปุ๋ยลงในดินอย่างสม่ำเสมอในการปลูกข้าว แต่ว่าในงานวิจัยนี้ไม่ได้มีการเติมปุ๋ยแต่อย่างใด เพราะฉะนั้นจึงเห็นได้ว่าการแช่เมล็ดข้าวในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพียงอย่างเดียวจึงไม่เพียงพอต่อการส่งเสริมผลผลิตและการเจริญเติบโตของข้าวทั้งสองชนิด และจึงควรศึกษาการใช้ปุ๋ยหรืออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในระหว่างการปลูกในดินเพื่อส่งเสริมผลผลิตต่อไป

ในการทดลองในระยะต้นกล้าพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อค่าสีใบ ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณคลอโรฟิลล์ ในส่วนการทดลองในระยะปลูกพบว่า การใช้อนุภาคดังกล่าวส่งผลดีต่อสีใบในเฉพาะวันที่ 30 ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการแช่เมล็ดในสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่เพียงพอต่อให้ปริมาณคลอโรฟิลล์มีค่ามากขึ้นในวันที่ 90 และ 120 ได้ ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับที่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เฉพาะการแช่ไม่ส่งผลต่อจำนวนกอและที่ข้าวไม่สามารถมีผลผลิตเพียงพอ ด้วยเหตุนี้จึงควรมีการศึกษาต่อว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพิ่มเติมในรูปแบบการเติมลงในดิน จะเพียงพอต่อการพัฒนาการเจริญเติบโตผลผลิตและคุณภาพผลผลิตได้หรือไม่อย่างไร

3.2 การศึกษาการเจริญเติบโต ผลผลิต และคุณภาพผลผลิตของข้าว และการสะสมไททาเนียมในข้าวที่แช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ก่อนปลูกและการเติมที่ 25 วันหลังปลูก

3.2.1 สรุปการวิจัย

จากการศึกษาคุณสมบัติของดินที่ใช้ปลูกข้าวก่อนและหลังการทดลอง ที่แช่และเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ขนาดและปริมาณต่างกัน พบว่าค่า pH ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ค่าปริมาณสารอินทรีย์ ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสเฟต ปริมาณโพแตส สัดส่วนปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณสารหนู ปริมาณธาตุปรอท และปริมาณธาตุแคดเมียมในดิน ไม่มีความเปลี่ยนแปลงก่อนและหลังการทดลอง และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติเหล่านี้เช่นกัน อย่างไรก็ตามการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมไดออกไซด์มากขึ้นในดินที่ใช้ปลูกข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 และมีการสะสมธาตุไททาเนียมมากที่สุดเมื่อใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตร รองลงมาคืออนุภาคขนาด 80-120 และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ

การศึกษาความสูงของต้นข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า วันที่ 30 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อความสูงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 แต่ในวันที่ 90 และ 120 พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสูงของต้นข้าวทั้งสองชนิดมีค่ามากขึ้น และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลให้มีความสูงมากที่สุด ตามมาด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 และ 20-30 นาโนเมตรตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อความสูงของข้าวแต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาสีใบข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า วันที่ 30 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อสีใบข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 90 และ 120 พบว่า สีใบลดลงตามลำดับ แต่เมื่อเปรียบเทียบสีใบในวันเดียวกัน พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้สีใบข้าวทั้งสองชนิดมีค่ามากขึ้น และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลให้มีสีใบสูงที่สุด ทั้งนี้ในวันที่ 90 ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลต่อสีใบ ในขณะที่ในวันที่ 120 ทั้งสองตัวแปรส่งผลต่อสีใบแต่ไม่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่า วันที่ 90 และ 120 ข้าวปทุมธานี 1 มีสีใบมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

การศึกษาจำนวนต้นข้าวต่อกอหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า วันที่ 30 การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในวันที่ 90 และ 120 พบว่า จำนวนต้นข้าวต่อกอที่

มากขึ้นกว่าในวันที่ 30 และเมื่อเปรียบเทียบสีใบในวันเดียวกัน พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้จำนวนต้นข้าวต่อกอของข้าวทั้งสองชนิดมีค่ามากขึ้นเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้ในวันที่ 90 และ วันที่ 120 ปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลต่อจำนวนต้นข้าวต่อกอ นอกจากนี้ยังพบว่าในวันที่ 90 และ วันที่ 120 ข้าวปทุมธานี 1 มีจำนวนต้นข้าวต่อกอมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

การศึกษาวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้ตัวแปรปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลต่อวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวปทุมธานี 1 มีวันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์น้อยกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

การศึกษาวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม ทั้งนี้ตัวแปรปริมาณการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เท่านั้นที่ส่งผลต่อวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวปทุมธานี 1 มีวันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์น้อยกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

การศึกษาน้ำหนักสดและแห้งของข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักสดและแห้งมากที่สุดตามมาด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อน้ำหนักสดและแห้งของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวปทุมธานี 1 มีน้ำหนักสดและแห้งมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

การศึกษาจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดต่อรวงมากที่สุดตามมาด้วยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 80-120 และ 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อจำนวนเมล็ดต่อรวงของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง นอกจากนี้ยังพบว่า ข้าวปทุมธานี 1 มีจำนวนเมล็ดต่อรวงมากกว่าข้าวขาวดอกมะลิ 105

การศึกษาเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม โดยที่การใช้อนุภาคในปริมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลให้มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์สูงที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์มากที่สุด ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาน้ำหนัก 100 เมล็ด น้ำหนักข้าวกล้อง 100 เมล็ด ความยาวเมล็ด ความกว้างเมล็ด สีเมล็ดข้าวเปลือก สีเมล็ดข้าวกล้อง และสีเมล็ดข้าวขัดขาวของข้าวหลังจากการแช่และการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในขนาดและปริมาณที่แตกต่างกัน ไม่ส่งผลต่อคุณภาพผลผลิตข้าวเหล่านี้ ในทำนองเดียวกันเมื่อศึกษาคุณภาพเมล็ดข้าวกล้อง ได้แก่ ปริมาณแป้ง ปริมาณโปรตีน ปริมาณไขมัน ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า ปริมาณแคลเซียม และปริมาณโปรแตสเซียม พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในขนาดและปริมาณที่แตกต่างกันไม่ส่งผลต่อคุณภาพเมล็ดข้าวกล้องเหล่านี้

การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในส่วนต่างๆของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังจากการแช่และการเติมอนุภาคดังกล่าว โดยในวันที่ 30 และ 90 ศึกษาในส่วนของใบ และในวันที่ 120 ศึกษาในส่วนของราก ต้น และใบ พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30, 80-120 และ 400-600 นาโนเมตรในความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมมากขึ้นตาม และอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20-30 นาโนเมตรมีการสะสมมากที่สุดตามด้วยอนุภาคขนาด 80-120 นาโนเมตรและขนาด 400-600 นาโนเมตรตามลำดับ ทั้งนี้ตัวแปรทั้งสองส่งผลต่อการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดของข้าว แต่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง

การศึกษาการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวหลังแช่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ 48 ชั่วโมงและการเติมอนุภาคในวันที่ 15 ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ในทุกขนาดและปริมาณของอนุภาคที่ใช้ ปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมอยู่ในระดับเดียวกันกับความคลาดเคลื่อนของเทคนิค ICP-MS ดังนั้น การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทุกขนาดและในทุกปริมาณไม่ส่งผลให้เกิดการสะสมธาตุไททาเนียมในเมล็ด

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ใบ ราก และต้น ความสูง ค่าสีใบ จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันระหว่างตัวแปรเหล่านี้ทั้งหมดมีค่าเป็นบวก ในข้าวทั้งสองชนิดการสะสมธาตุไททาเนียมในดิน ใบ ราก และต้น และค่าสีใบ มีความสัมพันธ์กันอย่างมาก นอกจากนี้ในข้าวทั้งสองชนิด จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว

50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ มีความสัมพันธ์อย่างมากในส่วนใหญ่ ในข้าวทั้งสองชนิดที่มีการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตร พบว่า ความสูงต้นข้าวมีความสัมพันธ์อย่างมากกับจำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ ในขณะที่ในข้าวสองชนิดที่ใช้อนุภาคนาโนขนาดเล็กกว่าความสัมพันธ์เหล่านี้เป็นความสัมพันธ์ระดับมากเช่นกัน ยกเว้นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงกับสีใบที่มีความสัมพันธ์ระดับปานกลาง ในข้าวทั้งสองชนิดสีใบมีความสัมพันธ์ระดับปานกลางกับจำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ การสะสมธาตุไททาเนียมในดินมีความสัมพันธ์กับความสูง จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ในระดับน้อยหรือน้อยมาก ในขณะที่การสะสมธาตุไททาเนียมในใบ ราก และต้นมีความสัมพันธ์กับความสูง จำนวนกอต่อต้น วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสด น้ำหนักแห้ง จำนวนเมล็ดต่อรวง และเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์ในระดับปานกลางหรือน้อย

เมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์ โดยพิจารณาความมีนัยสำคัญทางสถิติจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าไม่มีความแตกต่างในตัวแปรที่ศึกษา

3.2.2 อภิปรายผล

จากผลการทดลองของคุณภาพในดินที่มีการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ พบว่าการสะสมของธาตุไททาเนียมในดินเท่านั้นที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้ขนาดและปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาปริมาณของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในดินและปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมพบว่ามีความสอดคล้องกัน กล่าวคือการใส่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงในดินมากขึ้นส่งผลให้มีการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้น แม้ว่าข้าวสามารถนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ได้นั้น ปริมาณของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่พืชนำไปใช้ในช่วงเวลาการปลูก ยังมีค่าน้อยกว่าปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ทั้งหมดที่ใส่ลงในดิน ด้วยเหตุนี้จึงมีการตกค้างของธาตุไททาเนียมในดินที่เป็นไปตามปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใส่ลงในดิน การสะสมของธาตุไททาเนียมไดออกไซด์ในดินมีปริมาณมากที่สุดในการทดลองที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตร ตามมาด้วยขนาด 80-120 นาโนเมตร และขนาด 20-30 นาโนเมตร ตามลำดับ ความสัมพันธ์นี้สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์และการสะสมธาตุไททาเนียมในพืช พบว่า การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใหญ่ขึ้นส่งผลให้มีการสะสมธาตุไททาเนียมในพืชลดลง เมื่อมีการสะสมของธาตุไททาเนียมในพืชที่น้อยกว่าย่อมส่งผลให้มีธาตุไททาเนียมที่สะสมในดินที่มากกว่าซึ่งสอดคล้อง

กับวิเคราะห์คุณภาพของดินดังกล่าว ในประเด็นการสะสมของธาตุฟอสฟอรัสในดิน มีงานวิจัยหลายชิ้น (Rafique et al., 2018, Waani et al., 2021, Zahra et al., 2017) พบว่า การเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลต่อการสะสมของธาตุฟอสฟอรัสในพืช จึงอาจอนุมานได้ว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวสามารถส่งผลต่อการสะสมธาตุฟอสฟอรัสในดินได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามนั้น การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ส่งผลต่อปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในข้าวพบในการทดลองที่มีการเติมปุ๋ยที่มีธาตุฟอสฟอรัสเพิ่มเติมลงในดินหรือในการทดลองที่มีความขาดแคลนธาตุฟอสฟอรัสในดิน ซึ่งในการทดลองนี้ไม่มีการเติมปุ๋ยหรือการขาดแคลนธาตุฟอสฟอรัส โดยเฉพาะอย่างยิ่งในงานวิจัยของ Waani et al., (2021) พบว่า การทดลองควบคุมที่ไม่มีการใส่ธาตุฟอสฟอรัสเพิ่มเติมนั้น การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในข้าว และจึงอนุมานได้ว่าไม่ส่งผลต่อปริมาณธาตุฟอสฟอรัสในดิน ด้วยเหตุนี้ผลการวิเคราะห์การสะสมธาตุฟอสฟอรัสในดินในงานวิจัยนี้จึงสอดคล้องกับงานวิจัยของ Waani et al., (2021)

ในงานวิจัยนี้พบว่าการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงในดินส่งผลดีต่อตัวแปรการเจริญเติบโตของข้าว ได้แก่ ความสูงต้น จำนวนต้นต่อกอ วันที่ออกรวง 50 เปอร์เซ็นต์ วันที่เก็บเกี่ยว 50 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง ผลการทดลองเหล่านี้สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยอื่นๆ ที่มีการทดลองการเติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงในดินที่ใช้ปลูกข้าว ดังนี้ ในงานวิจัยของ Zahra et al., (2017) ที่ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20 นาโนเมตร ด้วยการเติมลงในดินที่ใช้ปลูกต้นข้าว Super Basmati ปริมาณของสารแขวนลอยอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้ คือ 25 มิลลิลิตรโดยมีความเข้มข้น 0 ถึง 750 ppm ซึ่งเป็นปริมาณการใช้ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ จากผลการทดลองพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ดังกล่าวส่งผลดีต่อความสูงและน้ำหนักแห้งของต้นข้าว โดยที่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้ข้าวมีความสูงและน้ำหนักที่มากขึ้นตามไปด้วย ผลการทดลองนี้จึงสอดคล้องกับผลการทดลองในโครงการวิจัย

งานวิจัยของ Rafique et al., (2018) ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20 นาโนเมตรด้วยการเติมลงในดินที่ใช้ปลูกต้นข้าว Galaxy 2013 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงในดินอยู่ในรูปแบบผงและใช้ในปริมาณ 0 ถึง 100 มิลลิกรัมต่อมวลของดิน 1000 กรัม เมื่อเปรียบเทียบปริมาณนี้กับปริมาณที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้พบว่าปริมาณที่ใช้ในงานของ Rafique et al., (2018) เป็นปริมาณที่มากกว่าปริมาณในงานวิจัยกล่าวคือปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในสารแขวนลอยที่มากที่สุด 1000 ppm ที่ใช้ในงานนี้เป็นปริมาณที่เท่ากับการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงในงานของ Rafique et al., (2018) ที่ปริมาณ 40 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัม ผลการทดลองในงานของ Rafique et al., (2018) พบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อความสูงของต้นและน้ำหนักสดของข้าว และยังส่งผลดีต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ใน

ใบข้าวเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุมเช่นกัน โดยที่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 60 มิลลิกรัมต่อดิน 1 กิโลกรัมส่งผลดีมากที่สุด ผลการทดลองของ Rafique et al., (2018) จึงสอดคล้องกับผลการวิจัยในงานวิจัยนี้เพราะแสดงถึงผลดีของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต่อการเจริญเติบโตและปริมาณคลอโรฟิลล์ในทิศทางเดียวกัน แต่จากผลการทดลองของ Rafique et al., (2018) ที่แสดงถึงผลดีที่สุดเมื่อใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบผงปริมาณ 60 ppm นั้นชี้ให้เห็นว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบสารแขวนลอยในงานวิจัยนี้อาจสามารถใช้ในปริมาณที่มากกว่า 1000 ppm เพื่อปรับปรุงการเจริญเติบโตของข้าวที่ดีขึ้นได้

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยของ Xu et al., (2021) ศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 20 ถึง 100 นาโนเมตร ด้วยวิธีการเติมลงในดินที่ใช้ปลูกต้นข้าว *japonica* Wuyunjing 23 อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่เติมลงในดินอยู่ในรูปแบบผงและใช้ในปริมาณ 200 มิลลิกรัมต่อมวลของดิน 1 กิโลกรัม ซึ่งเป็นปริมาณการใช้ที่มากกว่าปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบสารแขวนลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประมาณ 8 เท่า จากผลการทดลองพบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อความสูง น้ำหนักแห้งและจำนวนต้นต่อก่อ และยังส่งผลเสียต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าว ผลที่แตกต่างระหว่างงานวิจัยของ Xu et al., (2021) และงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ปริมาณมากเกินไปอาจไม่ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของข้าว ทั้งนี้ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยของ Xu et al., (2021) ถูกยับยั้งด้วยการทำงานของสาร Peroxidase ที่ถูกกระตุ้นด้วยการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ทำให้ค่าคลอโรฟิลล์ที่ลดลงไม่ส่งผลเสียอย่างมีนัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของข้าว ความสัมพันธ์ระหว่างการเจริญเติบโตของข้าวที่ไม่เปลี่ยนแปลง ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลง และการทำงานของสาร Peroxidase ที่สูงขึ้นในงานของ Xu et al., (2021) ชี้ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีปฏิสัมพันธ์กับการสังเคราะห์แสงในข้าวซึ่งเป็นสิ่งที่พบในงานวิจัยนี้เช่นกัน ด้วยเหตุนี้งานวิจัยของ Xu et al., (2021) และงานนี้จึงมีความสอดคล้องว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะสามารถส่งผลต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในพืช โดยที่ผลจะดีหรือร้ายขึ้นอยู่กับปริมาณของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ใช้

เมื่อพิจารณาการสะสมของธาตุไททาเนียมในข้าวที่มีการใส่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ลงในดิน พบว่าในงานวิจัยนี้มีการสะสมมากที่สุดในรากของข้าว ซึ่งเป็นผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu et al., (2021) การสะสมของธาตุไททาเนียมที่สูงสุดในรากนั้นเกิดจากที่อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ต้องถูกดูดซึมผ่านทางรากก่อนถูกนำไปใช้ในข้าว นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบปริมาณการสะสมของธาตุไททาเนียมในงานวิจัยของ Xu et al., (2021) และงานวิจัยยังพบว่ามีการสะสมของธาตุไททาเนียมของ Xu et al., (2021) ที่มากกว่าในงานวิจัยนี้ถึงประมาณ 100 เท่า ซึ่งสอดคล้องกับที่ในงานวิจัยของ Xu et al., (2021) ใช้ปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่มากกว่าใน

งานวิจัยนี้อย่างมีนัยสำคัญจนทำให้เกิดความเป็นพิษต่อข้าวได้ เมื่อพิจารณาการสะสมของธาตุไททาเนียมในดินพบว่ามีการสะสมของธาตุไททาเนียมในดินมากขึ้นเมื่อใช้ในปริมาณอนุภาคนาโนที่มากขึ้น อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์มีความคงทนทางเคมีและทางกายภาพ จึงไม่สามารถย่อยสลายในดินได้ สารไททาเนียมไดออกไซด์มีอยู่แล้วตามในธรรมชาติซึ่งไม่ส่งผลเสียต่อระบบนิเวศน์

ผลการทดลองหลักของงานวิจัยนี้ ได้แก่ การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่และการใช้อนุภาคในปริมาณมากถึง 1000 มิลลิกรัมต่อลิตรส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตต่อข้าวที่ดีที่สุด การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ส่งผลให้เกิดการสะสมน้อยที่สุดแต่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่สูงขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมมากขึ้น และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ยังส่งผลดีต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบข้าวซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับตัวแปรการเจริญเติบโตอื่นๆ ผลการทดลองหลักเหล่านี้สอดคล้องกับกลไกการทำงานงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่อธิบายไว้ในงานวิจัยของ Tripathi et al., (2016) และ Wang et al., (2016) ตามที่ได้ระบุไว้ในบทที่ 2 กล่าวคือ การเคลื่อนตัวของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ให้ผ่านทางดินไปยังเซลล์พืชในใบข้าวมีหลายขั้นตอนและต้องมีการผ่านช่วงขนาดจำกัด (Size exclusion limit) ที่แตกต่างกัน ในการลำเลียงของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จากเซลล์รากเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำนั้น การผ่านเอ็นโดเดอร์มิสของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์จะถูกควบคุมด้วยแคสพาเรียนสตริปที่มีช่วงขนาดจำกัดที่เล็ก เนื่องจากที่แคสพาเรียนสตริปสามารถควบคุมและป้องกันการไหลของน้ำ ขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่ได้อยู่ในน้ำ (ที่วัดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน) จึงเป็นปัจจัยหลักที่ควบคุมการสะสมของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในส่วนต่างๆ ของพืช ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กจึงเกิดการสะสมในราก ต้น และใบของข้าว มากกว่าอนุภาคนาโนขนาดใหญ่ตามที่ปรากฏในผลการทดลอง นอกจากนี้การใช้ปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในทุกขนาดที่มากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณอนุภาคที่สามารถผ่านช่วงขนาดจำกัดที่มากขึ้น และส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุไททาเนียมที่มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง

แม้ว่าอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กจะเกิดการสะสมในใบพืชมากกว่า พืชไม่สามารถนำอนุภาคเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ดีเท่ากับอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ เพราะในการนำอนุภาคนาโนไปใช้ในเซลล์ใบแต่ละเซลล์นั้นต้องมีการลำเลียงอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปพร้อมกับน้ำ ด้วยเหตุนี้ขนาดอนุภาคเชิงพลวัติจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ควบคุมประสิทธิภาพการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในเซลล์ใบพืช อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ที่มีขนาดเชิงพลวัติที่เล็กที่สุดจึงถูกนำไปใช้ในเซลล์ใบพืชได้ดีที่สุดและส่งผลที่ดีที่สุดต่อการเจริญเติบโตของข้าว

เมื่ออนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เข้าสู่เซลล์ใบข้าว จะเกิดกลไกการทำงานที่ช่วยส่งเสริมการสังเคราะห์แสงตามทฤษฎีที่ Lyu et al., (2017) และ Šebesta et al., (2021)

กล่าวไว้ กลไกดังกล่าวที่สอดคล้องกับผลการทดลองในงานวิจัยนี้ได้แก่ การทำงานร่วมกันระหว่างธาตุไททาเนียมและธาตุเหล็กที่ส่งผลดีต่อการทำงานของคลอโรพลาส กล่าวคือในการสังเคราะห์แสงมีโปรตีนและเอ็นไซม์หลายชนิดที่มีจำเป็นต่อการทำงานของคลอโรพลาสและระบบแสงที่ 2 (Photosystem II) เช่น โปรตีนให้อิเล็กตรอน (Electron donor) โปรตีนและเอนไซม์เหล่านี้มีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบสำคัญในการสังเคราะห์และการทำงาน เนื่องจากที่ไททาเนียมไอออน (Ti^{4+}) และเหล็กไอออน (Fe^{3+}) มีคุณสมบัติทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน ไททาเนียมไอออนที่สามารถส่งเสริมการสังเคราะห์และการทำงานของโปรตีนและเอนไซม์เหล่านี้ได้เช่นเดียวกันกับเหล็กไอออน นอกจากนี้ความสมดุลของเหล็กไอออนยังมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์สารคลอโรฟิลล์ ดังนั้นไททาเนียมไอออนจากอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์สามารถส่งเสริมความสมดุลดังกล่าวได้เช่นกัน ด้วยการกระตุ้นการแสดงออกของยีนส์ที่ควบคุมการผลิตโปรตีนที่ควบคุมสมดุลของเหล็กไอออน จากกระบวนการหลักทั้งสองนี้ อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ข้าวสามารถสังเคราะห์แสงได้ดีขึ้น ตามผลการทดลองที่พบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้ข้าวมีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่สูงขึ้น

ในงานวิจัยนี้ยังพบว่าไม่มีการสะสมของธาตุไททาเนียมไดออกไซด์ในเมล็ดข้าวที่เก็บเกี่ยวจากการทดลอง ผลการทดลองนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xu et al., (2021) ที่ไม่พบการสะสมของธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวเช่นกันแม้ว่าจะใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากจนเป็นพิษ นอกจากนี้งานวิจัย Zahra et al., (2017) ที่ศึกษาการสะสมของธาตุไททาเนียมในข้าวที่ปลูกในดินที่เติมอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrometer เทคนิค Field Emission Scanning Electron Microscope และเทคนิค Energy-dispersive X-ray spectroscopy ยังไม่พบการสะสมของธาตุไททาเนียมในเมล็ดข้าวเช่นกัน ดังนั้นการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบการเติมในดินจึงไม่ส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุไททาเนียมและมีความปลอดภัยต่อการบริโภคผลผลิตของข้าวที่ใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการส่งเสริมการผลิต

การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ ด้วยการเติมลงในดินส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดต่อรวงมากขึ้น และมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดสมบูรณ์สูงขึ้น แต่ไม่ส่งผลต่อน้ำหนักเมล็ดข้าว น้ำหนักข้าวกล้อง ความยาว และความกว้างของเมล็ดข้าว สีเมล็ดข้าวเปลือก ข้าวกล้อง และข้าวขัดขาว และคุณภาพเมล็ดข้าวกล้อง ผลการทดลองนี้แสดงถึงขีดจำกัดของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการเติมแทนการใช้ปุ๋ย ขีดจำกัดของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ถูกค้นพบในงานวิจัยอื่นเช่นกัน อาทิ ในงานวิจัยของ Zahra et al., (2017) พบว่า การอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบการเติมลงในดินส่งผลดีต่อปริมาณกรดอะมิโนบางชนิดและคาร์โบไฮเดรตบางชนิดในเมล็ดข้าว แต่กลับส่งผลเสียต่อปริมาณกรดไขมันบางชนิดในเมล็ดข้าวเช่นกัน ด้วยเหตุนี้นั้นจึงควรมีการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับปุ๋ยหรือสารนาโนอื่นๆเพื่อให้การใช้อนุภาคนาโน

ไททาเนียมไดออกไซด์มีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการนำปุ๋ยไปใช้ในข้าว เช่นในงานวิจัยของ Waani et al., (2021) ที่พบว่าการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลให้พืชนำธาตุฟอสฟอรัสไปใช้ได้มากขึ้นและส่งผลดีต่อผลผลิต ดังนั้นการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับปุ๋ยอื่นๆเป็นอีกแนวทางหนึ่งสำหรับการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพผลผลิตให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

2. สรุปภาพรวมในการดำเนินการวิจัย

เมื่อพิจารณาภาพรวมผลของการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในการผลิตข้าว สามารถสรุปได้ดังนี้

2.1 ผลของขนาดอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลดีที่สุด การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุไททาเนียมน้อยที่สุดในราก ต้น และใบข้าว และส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุไททาเนียมมากที่สุดในดินเมื่อมีการเติมลงในดิน

2.2 ผลของปริมาณอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์

เมื่อพิจารณาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตข้าว สามารถแบ่งเป็นสองกรณีได้แก่ การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 1000 ppm ส่งผลดีที่สุด และการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณ 10-1000 ppm ไม่มีความแตกต่าง แต่แตกต่างจากตัวอย่างควบคุม การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมของธาตุไททาเนียมมากขึ้นในราก ต้น และใบของข้าว และในดินเมื่อมีการเติมลงในดิน แต่ไม่พบการสะสมในผลผลิตเมล็ด

2.3 ผลของวิธีการใช้

การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการแช่เมล็ดเพียงอย่างเดียวสามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวในระยะต้นกล้า แต่ส่งผลเพียงเล็กน้อยในระยะการเจริญเติบโตและไม่ส่งผลในระยะเก็บเกี่ยวผลผลิต การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการแช่เมล็ดและการเติมลงในดินส่งผลดีต่อข้าวในระยะเจริญเติบโตของข้าว แต่ส่งผลดีเล็กน้อยในระยะเก็บเกี่ยวผลผลิต

2.4 ผลของการใช้ในพันธุ์ข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสง

ในระยะการเจริญเติบโตของต้นกล้า พบความแตกต่างของผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวไวต่อช่วงแสงและไม่ไวต่อช่วงแสงเฉพาะในความแตกต่างในความสูงของต้นกล้าในวันที่ 3 และวันที่ 5 และจำนวนใบของข้าวระยะต้นกล้าในวันที่ 7 และไม่พบความแตกต่างในตัวแปรอื่นๆ ในระยะอื่นของการผลิตข้าว ไม่พบความแตกต่างในผลการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในข้าวทั้งสองพันธุ์

3. ข้อเสนอแนะ

การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในรูปแบบการแช่และการเติมลงในดินส่งผลดีต่อการเจริญเติบโตของข้าวปทุมธานี 1 และข้าวขาวดอกมะลิ 105 โดยที่การใช้อนุภาคขนาด 400-600 นาโนเมตรส่งผลดีที่สุดและการใช้ปริมาณที่มากขึ้นส่งผลดีที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่ไม่มีการจับกันเป็นก้อนในน้ำเพื่อความชัดเจนมากขึ้นในความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคในรูปแบบผงและในน้ำต่อการเจริญเติบโตของข้าว และเนื่องจากที่ไม่พบความเป็นพิษในการใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ในงานวิจัยนี้ จึงควรที่จะมีการศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่า 1000 ppm เพื่อที่จะหาความเข้มข้นที่อาจจะทำให้เกิดความเป็นพิษได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรที่สนใจการนำอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไปใช้ ควรศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ด้วยการพ่นผ่านทางใบ รวมทั้งการใช้ในดินประเภทต่างๆ เพื่อค้นหาภาวะการปลูกที่เหมาะสม จากที่การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ไม่ส่งผลต่อคุณภาพเมล็ดของข้าว จึงความศึกษาการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ร่วมกับปุ๋ยและสารอื่นๆ ที่ใช้ในการส่งเสริมการผลิตข้าว เช่น ปุ๋ยอินทรีย์ ปุ๋ยเคมี อนุภาคนาโนชนิดอื่นๆ และจุลินทรีย์ การศึกษาเพิ่มเติมถึงกระบวนการทำงานของอนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ในระดับโมเลกุล จะสามารถสร้างองค์ความรู้การใช้อนุภาคดังกล่าวให้มีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักและเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวในภาวะเครียดจากปัจจัยต่างๆเช่น ความแล้งและความเค็ม ยังเป็นประเด็นที่ควรศึกษาเพิ่มเติมเพื่อได้องค์ความรู้การใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์ที่สมบูรณ์มากขึ้น ท้ายสุดนั้นการใช้อนุภาคนาโนไททาเนียมไดออกไซด์เพื่อส่งเสริมการผลิตพืชเศรษฐกิจชนิดอื่นๆยังคงเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่ใช้พัฒนาการเกษตรในประเทศไทยได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

This is Mendeley biographyกองวิจัยและพัฒนาข้าว. (2559)ก. *การผลิตข้าวอินทรีย์*. สืบค้นจาก http://webold.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=4-2.htm

_____. (2559)ข. *ความสำคัญของพันธุ์ข้าว*. สืบค้นจาก http://webold.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=1.htm

_____. (2559)ค. *ปทุมธานี 1 (Pathum Thani 1)*. สืบค้นจาก http://webold.ricethailand.go.th/rkb3/title-index.php-file=content.php&id=67.htm

กาญจนา สาลีติ๊ด. (2558). *ความหลากหลายของพันธุ์ข้าวพื้นเมืองของชนเผ่ากะเหรี่ยง ในตำบลบ้านบึง อำเภอบ้านคา จังหวัดราชบุรี*. มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง

เกียรติศักดิ์ บัตรสูงเนิน. (2563). *ความปลอดภัยนาโน*. นครราชสีมา: สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ณยา วงษ์พูล, ไจพร พุ่มดำ, และ ศิรศักดิ์ เทพาดำ. (2557). ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับนาโนเทคโนโลยี. *วารสารอาหารและยา, 21*(2), 10-13.

ศูนย์วิจัยข้าวปทุมธานี. (2562). *งานผลิตเมล็ดพันธุ์*. สืบค้นจาก https://ptt-rrc.ricethailand.go.th/category.php?type=1029

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่ม 3. (2527). กรุงเทพฯ: โครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนโดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว

Adisa, I. O., Pullagurala, V. L. R., Peralta-Videa, J. R., Dimkpa, C. O., Elmer, W. H., Gardea-Torresdey, J. L., & White, J. C. (2019). Recent advances in nano-enabled fertilizers and pesticides: A critical review of mechanisms of action. *Environmental Science: Nano*, *6*(7), 2002–2030. doi: 10.1039/C9EN00265K

Akila, Y., Muthukumarasamy, N., & Velauthapillai, D. (2019). Chapter 5—TiO_2-based dye-sensitized solar cells. In S. Thomas, E. H. M. Sakho, N. Kalarikkal, S. O. Oluwafemi, & J. Wu (Eds.), *Nanomaterials for Solar Cell Applications* (pp. 127–144). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-813337-8.00005-9

Alivisatos, A. P. (1996). Perspectives on the Physical Chemistry of Semiconductor Nanocrystals. *The Journal of Physical Chemistry*, *100*(31), 13226–13239. doi: 10.1021/jp9535506

American Public Health Association, Franson, M. A. H., American Water Works Association, & Water Pollution Control Federation. (1989). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (17th ed.). Washington: American Public Health Association.

Andersen, C. P., King, G., Plocher, M., Storm, M., Pokhrel, L. R., Johnson, M. G., & Rygiewicz, P. T. (2016). Germination and early plant development of ten plant species exposed to titanium dioxide and cerium oxide nanoparticles. *Environmental Toxicology and Chemistry*, *35*(9), 2223–2229. doi: 10.1002/etc.3374

Anpo, Masakazu., Shima, Takahito., Kodama, Sukeya., & Kubokawa, Yutaka. (1987). Photocatalytic hydrogenation of propyne with water on small-particle titania: Size quantization effects and reaction intermediates. *The Journal of Physical Chemistry*, *91*(16), 4305–4310. doi: 10.1021/j100300a021

Bahnemann, D. W., Hilgendorff, M., & Memming, R. (1997). Charge Carrier Dynamics at TiO_2 Particles: Reactivity of Free and Trapped Holes. *The Journal of Physical Chemistry B*, *101*(21), 4265–4275. doi: 10.1021/jp9639915

Bai, J., & Zhou, B. (2014). Titanium Dioxide Nanomaterials for Sensor Applications. *Chemical Reviews*, *114*(19), 10131–10176. doi: 10.1021/cr400625j

Boonyanitipong, P., Kositsup, B., Kumar, P., Baruah, S., & Dutta, J. (2011). Toxicity of ZnO and TiO_2 Nanoparticles on Germinating Rice Seed Oryza sativa L. *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, *1*(4), 282–285. doi: 10.7763/IJBBB.2011.V1.53

Boutillier, S., Fourmentin, S., & Laperche, B. (2021). History of titanium dioxide regulation as a food additive: A review. *Environmental Chemistry Letters*, *20*, 1017–1033. doi: 10.1007/s10311-021-01360-2

Braginsky, L., & Shklover, V. (1999). Light absorption in TiO_2 nanoparticles. *The European Physical Journal D*, *9*, 627–630. doi: 10.1007/s100530050514

Braun, J. H., Baidins, A., & Marganski, R. E. (1992). TiO_2 pigment technology: A review. *Progress in Organic Coatings*, *20*(2), 105–138. doi: 10.1016/0033-0655(92)80001-D

Brinker, C. J., Sehgal, R., Hietala, S. L., Deshpande, R., Smith, D. M., Loy, D., & Ashley, C. S. (1994). Sol-gel strategies for controlled porosity inorganic materials. *Journal of Membrane Science*, *94*(1), 85–102. doi: 10.1016/0376-7388(93)E0129-8

Cai, F., Wu, X., Zhang, H., Shen, X., Zhang, M., Chen, W., ... Wang, X. (2017). Impact of TiO_2 nanoparticles on lead uptake and bioaccumulation in rice (Oryza sativa L.). *NanoImpact*, *5*, 101–108. doi: 10.1016/j.impact.2017.01.006

Chaplin, B., Jing, Y., & Nayak, S. (2016, August). Oxygen deficient titanium dioxide: A low cost material for water treatment. In *ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY* (Vol. 252). 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA: AMER CHEMICAL SOC.

Chen, X., & Mao, S. S. (2007). Titanium Dioxide Nanomaterials: Synthesis, Properties, Modifications, and Applications. *Chemical Reviews*, *107*(7), 2891–2959. doi: 10.1021/cr0500535

Choi, H., & Mody, C. C. M. (2009). The Long History of Molecular Electronics: Microelectronics Origins of Nanotechnology. *Social Studies of Science*, *39*(1), 11–50. doi: 10.1177/0306312708097288

Chutipaijit, S., & Sutjaritvorakul, T. (2020). Enhancements of growth and metabolites of Inidca rice callus (Oryza Sativa L. cv. Pathumthani 1) using TiO_2 nanoparticles (nano-TiO_2). *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, *15*(2), 483–489.

Cigler, P., Olejnickova, J., Hruby, M., Csefalvay, L., Peterka, J., & Kuzel, S. (2010). Interactions between iron and titanium metabolism in spinach: A chlorophyll fluorescence study in hydropony. *Journal of Plant Physiology*, *167*(18), 1592–1597. doi: 10.1016/j.jplph.2010.06.021

Cox, A., Venkatachalam, P., Sahi, S., & Sharma, N. (2016a). Silver and titanium dioxide nanoparticle toxicity in plants: A review of current research. *Plant Physiology and Biochemistry*, *107*, 147–163. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.05.022

DaCosta, M. V. J., & Sharma, P. K. (2015). Influence of titanium dioxide nanoparticles on the photosynthetic and biochemical processes in oryza sativa. *International Journal of Recent Scientific Research*, *6*(1), 2445–2451.

Debnath, K., Das, A., Das, B., & Karfoma, J. (2020). TiO_2 Nanoparticles Enhancing Germination, Growth and Yield of Rice. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, *21*(6), 25–30. doi: 10.9734/irjpac/2020/v21i630173

Deng, Y., Petersen, E. J., Challis, K. E., Rabb, S. A., Holbrook, R. D., Ranville, J. F., ... Xing, B. (2017). Multiple Method Analysis of TiO_2 Nanoparticle Uptake in

Rice (Oryza sativa L.) Plants. *Environmental Science & Technology*, *51*(18), 10615–10623. doi: 10.1021/acs.est.7b01364

DeRosa, M. C., Monreal, C., Schnitzer, M., Walsh, R., & Sultan, Y. (2010). Nanotechnology in fertilizers. *Nature Nanotechnology*, *5*(2), 91–91. doi: 10.1038/nnano.2010.2

Diebold, M. P. (2014). TiO_2 Pigments in Liquid Paints. In M. P. Diebold (Ed.), *Application of Light Scattering to Coatings: A User's Guide* (pp. 83–109). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-12015-7_4

Dietz, K.-J., & Herth, S. (2011). Plant nanotoxicology. *Trends in Plant Science*, *16*(11), 582–589. doi: 10.1016/j.tplants.2011.08.003

EFSA (European Food Safety Authority), E. (European F. S. (2019). EFSA statement on the review of the risks related to the exposure to the food additive titanium dioxide (E 171) performed by the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety (ANSES). *EFSA Journal*, *17*(6), e05714. doi: 10.2903/j.efsa.2019.5714

EFSA Panel on Food Additives and Nutrient Sources added to Food (ANS). (2016). Re-evaluation of titanium dioxide (E 171) as a food additive. *EFSA Journal*, *14*(9), e04545. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4545

Emerich, D. F., & Thanos, C. G. (2003). Nanotechnology and medicine. *Expert Opinion on Biological Therapy*, *3*(4), 655–663. doi: 10.1517/14712598.3.4.655

Fatima, F., Hashim, A., & Anees, S. (2021). Efficacy of nanoparticles as nanofertilizer production: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(2), 1292–1303. doi: 10.1007/s11356-020-11218-9

Fei, L., & Perrett, S. (2009). Effect of Nanoparticles on Protein Folding and Fibrillogenesis. *International Journal of Molecular Sciences*, *10*(2), 646–655. doi: 10.3390/ijms10020646

Food and Agricultural Organization of the United Nations. (2004). International Year of Rice 2004: Rice and us. Retrieved February 12, 2022, from https://www.fao.org/rice2004/en/rice-us.htm

Fujishima, A., & Honda, K. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode. *Nature*, *238*(5358), 37–38. doi: 10.1038/238037a0

Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *1*(1), 1–21. doi: 10.1016/S1389-5567(00)00002-2

Geiss, O., Ponti, J., Senaldi, C., Bianchi, I., Mehn, D., Barrero, J., … Anklam, E. (2020). Characterisation of food grade titania with respect to nanoparticle content in pristine additives and in their related food products. *Food Additives & Contaminants: Part A*, *37*(2), 239–253. doi: 10.1080/19440049.2019.1695067

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., … Toulmin, C. (2010). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science (New York, N.Y.)*, *327*(5967), 812–818. doi: 10.1126/science.1185383

Gopal, M., Kumar, R., & Goswami, A. (2012). Nano-pesticides—A recent approach for pest control. *The Journal of Plant Protection Sciences*, *4*(2), 1–7.

Guo, X., Zhang, Q., Ding, X., Shen, Q., Wu, C., Zhang, L., & Yang, H. (2016). Synthesis and application of several sol-gel-derived materials via sol-gel process combining with other technologies: A review. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, *79*(2), 328–358. doi: 10.1007/s10971-015-3935-6

Gupta, S., & Tripathi, M. (2012). A review on the synthesis of TiO_2 nanoparticles by solution route. *Open Chemistry*, *10*(2), 279–294. doi: 10.2478/s11532-011-0155-y

Haider, A. J., Jameel, Z. N., & Al-Hussaini, I. H. M. (2019). Review on: Titanium Dioxide Applications. *Energy Procedia*, *157*, 17–29. doi: 10.1016/j.egypro.2018.11.159

Henglein, A. (1989). Small-particle research: Physicochemical properties of extremely small colloidal metal and semiconductor particles. *Chemical Reviews*, *89*(8), 1861–1873. doi: 10.1021/cr00098a010

Hong, F., Zhou, J., Liu, C., Yang, F., Wu, C., Zheng, L., & Yang, P. (2005). Effect of nano-TiO_2 on photochemical reaction of chloroplasts of spinach. *Biological Trace Element Research*, *105*(1–3), 269–279. doi: 10.1385/BTER:105:1-3:269

Ji, Y., Zhou, Y., Ma, C., Feng, Y., Hao, Y., Rui, Y., … Cao, W. (2017). Jointed toxicity of TiO_2 NPs and Cd to rice seedlings: NPs alleviated Cd toxicity and Cd

promoted NPs uptake. *Plant Physiology and Biochemistry*, *110*, 82–93. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.05.010

Jovanović, B. (2015). Critical review of public health regulations of titanium dioxide, a human food additive. *Integrated Environmental Assessment and Management*, *11*(1), 10–20. doi: 10.1002/ieam.1571

Jr, C. P. P., & Owens, F. J. (2003). *Introduction to Nanotechnology*. Hoboken: John Wiley & Sons.

Khan, R., Javed, S., & Islam, M. (2018). Hierarchical Nanostructures of Titanium Dioxide: Synthesis and Applications. *Titanium Dioxide - Material for a Sustainable Environment*. doi: 10.5772/intechopen.74525

Khush, G. S. (1997). Origin, dispersal, cultivation and variation of rice. In T. Sasaki & G. Moore (Eds.), *Oryza: From Molecule to Plant* (pp. 25–34). Dordrecht: Springer Netherlands. doi: 10.1007/978-94-011-5794-0_3

Kottegoda, N., Sandaruwan, C., Priyadarshana, G., Siriwardhana, A., Rathnayake, U. A., Berugoda Arachchige, D. M., … Amaratunga, G. A. J. (2017). Urea-Hydroxyapatite Nanohybrids for Slow Release of Nitrogen. *ACS Nano*, *11*(2), 1214–1221. doi: 10.1021/acsnano.6b07781

Krishi, M., Pandian, K., Thirunavukkarasu, M., Subramanian, K., & Balaji, T. (2018). Response of Nano-Sulphur to the groundnut. *International Journal of Chemical Studies*, *6*(3), 2067–2072.

Krug, H. F., & Wick, P. (2011). Nanotoxicology: An Interdisciplinary Challenge. *Angewandte Chemie International Edition*, *50*(6), 1260–1278. doi: 10.1002/anie.201001037

Kumar, D., Yadav, M. R., Makarana, G., Rajput, V. D., Biswal, B., Kashyap, S., … Singh, P. (2022). Chapter 10—Effects, uptake, translocation and toxicity of Ti-based nanoparticles in plants. In V. D. Rajput, T. Minkina, S. Sushkova, S. S. Mandzhieva, & C. Rensing (Eds.), *Toxicity of Nanoparticles in Plants* (pp. 211–239). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-323-90774-3.00014-3

Kumaravel, J., Lalitha, K., Arunthirumeni, M., & Shivakumar, M. S. (2021). Mycosynthesis of bimetallic zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles for control of Spodoptera frugiperda. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *178*, 104910. doi: 10.1016/j.pestbp.2021.104910

Kužel, S., Hruby, M., Cígler, P., Tlustoš, P., & Van Nguyen, P. (2003). Mechanism of physiological effects of titanium leaf sprays on plants grown on soil. *Biological Trace Element Research*, *91*(2), 179–189. doi: 10.1385/BTER:91:2:179

Larue, C., Laurette, J., Herlin-Boime, N., Khodja, H., Fayard, B., Flank, A.-M., … Carriere, M. (2012). Accumulation, translocation and impact of TiO_2 nanoparticles in wheat (Triticum aestivum spp.): Influence of diameter and crystal phase. *The Science of the Total Environment*, *431*, 197–208. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.073

Lei, Z., Mingyu, S., Chao, L., Liang, C., Hao, H., Xiao, W., … Fashui, H. (2007). Effects of Nanoanatase TiO_2 on photosynthesis of spinach chloroplasts under different light illumination. *Biological Trace Element Research*, *119*(1), 68–76. doi: 10.1007/s12011-007-0047-3

Li, R., Weng, Y., Zhou, X., Wang, X., Mi, Y., Chong, R., … Li, C. (2015). Achieving overall water splitting using titanium dioxide-based photocatalysts of different phases. *Energy & Environmental Science*, *8*(8), 2377–2382. doi: 10.1039/C5EE01398D

Lian, J., Zhao, L., Wu, J., Xiong, H., Bao, Y., Zeb, A., … Liu, W. (2020). Foliar spray of TiO_2 nanoparticles prevails over root application in reducing Cd accumulation and mitigating Cd-induced phytotoxicity in maize (Zea mays L.). *Chemosphere*, *239*, 124794. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124794

Lim, J.-H., Bae, D. & Fong, A. Titanium Dioxide in Food Products: Quantitative Analysis Using ICP-MS and Raman Spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66*(51), 12522-13540. doi: 10.1021/acs.jafc.8b06571

Linglan, M., Chao, L., Chunxiang, Q., Sitao, Y., Jie, L., Fengqing, G., & Fashui, H. (2008). Rubisco activase mRNA expression in spinach: Modulation by nanoanatase treatment. *Biological Trace Element Research*, *122*(2), 168–178. doi: 10.1007/s12011-007-8069-4

Linsebigler, A. L., Lu, G., & Yates, J. T. (1995). Photocatalysis on TiO_2 Surfaces: Principles, Mechanisms, and Selected Results. *Chemical Reviews*, *95*(3), 735–758. doi: 10.1021/cr00035a013

Liu, R., & Lal, R. (2014). Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (Glycine max). *Scientific Reports*, *4*(1), 5686. doi: 10.1038/srep05686

Lyu, S., Wei, X., Chen, J., Wang, C., Wang, X., & Pan, D. (2017). Titanium as a Beneficial Element for Crop Production. *Frontiers in Plant Science*, *8*, 597.

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. doi: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.031

Macwan, D. P., Dave, P. N., & Chaturvedi, S. (2011). A review on nano-TiO_2 sol–gel type syntheses and its applications. *Journal of Materials Science*, *46*(11), 3669–3686. doi: 10.1007/s10853-011-5378-y

Mahmoodzadeh, H., Aghili, R., & Nabavi, M. (2013). Physiological effects of TiO_2 nanoparticles on wheat (Triticum aestivum). *Technical Journal of Engineering and Applied Sciences*, *3*(14), 1365–1370.

Maillard, F., Schreier, S., Hanzlik, M., Savinova, E. R., Weinkauf, S., & Stimming, U. (2005). Influence of particle agglomeration on the catalytic activity of carbon-supported Pt nanoparticles in CO monolayer oxidation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *7*(2), 385–393. doi: 10.1039/B411377B

Malekshahi Byranvand, M., Nemati Kharat, A., Fatholahi, L., & Malekshahi Beiranvand, Z. (2013). A Review on Synthesis of Nano-TiO_2 via Different Methods. *Journal of Nanostructures*, *3*(1), 1–9. doi: 10.7508/jns.2013.01.001

Marimuthu, S., Rahuman, A. A., Jayaseelan, C., Kirthi, A. V., Santhoshkumar, T., Velayutham, K., ... Rao, K. V. B. (2013). Acaricidal activity of synthesized titanium dioxide nanoparticles using Calotropis gigantea against Rhipicephalus microplus and Haemaphysalis bispinosa. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, *6*(9), 682–688. doi: 10.1016/S1995-7645(13)60118-2

Mills, A., & Le Hunte, S. (1997). An overview of semiconductor photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *108*(1), 1–35. doi: 10.1016/S1010-6030(97)00118-4

Montazer, M., & Pakdel, E. (2011). Functionality of nano titanium dioxide on textiles with future aspects: Focus on wool. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *12*(4), 293–303. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2011.08.005

Murali, M., Gowtham, H. G., Singh, S. B., Shilpa, N., Aiyaz, M., Alomary, M. N., ... Amruthesh, K. N. (2022). Fate, bioaccumulation and toxicity of engineered nanomaterials in plants: Current challenges and future prospects. *Science of The Total Environment*, *811*, 152249. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152249

Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G. F. (2014). An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1324*, 7–14. doi: 10.1111/nyas.12540

Namin, H. E., Hashemipour, H., & Ranjbar, M. (2008). Effect of aging and calcination on morphology and properties of synthesized nanocrystalline TiO_2. *International Journal of Modern Physics B*, *22*, 3210–3215.

Nandini, B., & Geetha, N. (2021). 15—Smart delivery mechanisms of nanofertilizers and nanocides in crop biotechology. In S. Jogaiah, H. B. Singh, L. F. Fraceto, & R. de Lima (Eds.), *Advances in Nano-Fertilizers and Nano-Pesticides in Agriculture* (pp. 385–414). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-12-820092-6.00015-X

Pérez-de-Luque, A. (2017). Interaction of Nanomaterials with Plants: What Do We Need for Real Applications in Agriculture? *Frontiers in Environmental Science*, *5*, 12.

Pestovsky, Y. S., & Martínez-Antonio, A. (2017). The Use of Nanoparticles and Nanoformulations in Agriculture. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, *17*(12), 8699–8730. doi: 10.1166/jnn.2017.15041

Prasad, T. N. V. K. V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y., Latha, P., Munaswamy, V., Reddy, K. R., ... Pradeep, T. (2012). Effect of Nanoscale Zinc Oxide Particles on the Germination, Growth and Yield of Peanut. *Journal of Plant Nutrition*, *35*(6), 905–927. doi: 10.1080/01904167.2012.663443

Rafique, R., Zahra, Z., Virk, N., Shahid, M., Pinelli, E., Park, T. J., ... Arshad, M. (2018). Dose-dependent physiological responses of Triticum aestivum L. to soil applied TiO_2 nanoparticles: Alterations in chlorophyll content, H2O2 production, and genotoxicity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *255*, 95–101. doi: 10.1016/j.agee.2017.12.010

Rahman, D. Y., Rokhmat, M., Yuliza, E., Sustini, E., & Abdullah, M. (2016). New design of potentially low-cost solar cells using TiO_2/graphite composite as photon absorber. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *7*(3), 289–296. doi: 10.1007/s40095-016-0213-5

Raj, S., Jose, S., Sumod, U. S., & Sabitha, M. (2012). Nanotechnology in cosmetics: Opportunities and challenges. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, *4*(3), 186–193. doi: 10.4103/0975-7406.99016

Raliya, R., Biswas, P., & Tarafdar, J. C. (2015). TiO_2 nanoparticle biosynthesis and its physiological effect on mung bean (Vigna radiata L.). *Biotechnology Reports*, *5*, 22–26. doi: 10.1016/j.btre.2014.10.009

Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2018). Nanofertilizer for Precision and Sustainable Agriculture: Current State and Future Perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *66*(26), 6487–6503. doi: 10.1021/acs.jafc.7b02178

Rizwan, M., Ali, S., ur Rehman, M. Z., Malik, S., Adrees, M., Qayyum, M. F., … Ahmad, P. (2019). Effect of foliar applications of silicon and titanium dioxide nanoparticles on growth, oxidative stress, and cadmium accumulation by rice (Oryza sativa). *Acta Physiologiae Plantarum*, *41*(3), 35. doi: 10.1007/s11738-019-2828-7

Roduner, E. (2006). Size matters: why nanomaterials are different. Chemical Society Reviews, 35(7), 582-592. doi: 10.1039/B502142C

Rodríguez-González, V., Terashima, C., & Fujishima, A. (2019). Applications of photocatalytic titanium dioxide-based nanomaterials in sustainable agriculture. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *40*, 49–67. doi: 10.1016/j.jphotochemrev.2019.06.001

Sadati Valojai, S. T., Niknejad, Y., Fallah, H., & Barari Tari, D. (2021). Effect of Nitrogen, Phosphorus and Potassium Nano-Fertilizers on Growth and Seed of Two Rice (Oryza sativa L.) Cultivars. *Journal of Crop Ecophysiology*, *15*(57), 37–56. doi: 10.30495/jcep.2021.681005

Saharan, V., Kumaraswamy, R. V., Choudhary, R. C., Kumari, S., Pal, A., Raliya, R., & Biswas, P. (2016). Cu-Chitosan Nanoparticle Mediated Sustainable Approach

To Enhance Seedling Growth in Maize by Mobilizing Reserved Food. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *64*(31), 6148–6155. doi: 10.1021/acs.jafc.6b02239

Salvador, A., Pascual-Martí, M. C., Adell, J. R., Requeni, A., & March, J. G. (2000). Analytical methodologies for atomic spectrometric determination of metallic oxides in UV sunscreen creams. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, *22*(2), 301–306. doi: 10.1016/s0731-7085(99)00286-1

Satti, S. H., Raja, N. I., Javed, B., Akram, A., Mashwani, Z.-R., Ahmad, M. S., & Ikram, M. (2021). Titanium dioxide nanoparticles elicited agro-morphological and physicochemical modifications in wheat plants to control Bipolaris sorokiniana. *PLOS ONE*, *16*(2), e0246880. doi: 10.1371/journal.pone.0246880

Scott-Fordsmand, J. J., Fraceto, L. F., & Amorim, M. J. B. (2022). Nano-pesticides: The lunch-box principle—deadly goodies (semio-chemical functionalised nanoparticles that deliver pesticide only to target species). *Journal of Nanobiotechnology*, *20*(1), 13. doi: 10.1186/s12951-021-01216-5

Šebesta, M., Ramakanth, I., Zverina, O., Šeda, M., Diviš, P., & Kolenčík, M. (2021). Effects of Titanium Dioxide Nanomaterials on Plants Growth. In *Nanotechnology in Plant Growth Promotion and Protection* (pp. 17–44). John Wiley & Sons, Ltd. doi: 10.1002/9781119745884.ch2

Sharma, A., Karn, R. K., & Pandiyan, S. K. (2014). Synthesis of TiO_2 Nanoparticles by Sol-gel Method and Their Characterization. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, *1*(9), 6.

Silva, S., Oliveira, H., Craveiro, S. C., Calado, A. J., & Santos, C. (2016). Pure anatase and rutile + anatase nanoparticles differently affect wheat seedlings. *Chemosphere*, *151*, 68–75. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.02.047

Singh, R. P., Handa, R, & Manchanda, G. (2021). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release, 329*, 1234-1248. Doi: 10.1016/j.jconrel.2020.10.051

Singhal, R. K., Gangadhar, B., Basu, H., Manisha, V., Naidu, G. R. K., & Reddy, A. V. R. (2012). Remediation of Malathion Contaminated Soil Using Zero Valent

Iron Nano-Particles. *American Journal of Analytical Chemistry*, *3*(1), 76-82. doi: 10.4236/ajac.2012.31011

Skocaj, M., Filipic, M., Petkovic, J., & Novak, S. (2011). Titanium dioxide in our everyday life; is it safe? *Radiology and Oncology*, *45*(4), 227–247. doi: 10.2478/v10019-011-0037-0

Sundrarajan, M., & Gowri, S. (2011). Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles by nyctanthes arbor tristis leaves extract. *Chalcogenide Letters*, *8*(8), 447–451.

Suttiponparnit, K., Jiang, J., Sahu, M., Suvachittanont, S., Charinpanitkul, T., & Biswas, P. (2010). Role of Surface Area, Primary Particle Size, and Crystal Phase on Titanium Dioxide Nanoparticle Dispersion Properties. *Nanoscale Res Lett*, *6*(1), 27. doi: 10.1007/s11671-010-9772-1

Tarafdar, J., Raliya, R., Singh, S., Gautam, R., Choudhary, K. K., Maurino, & Saharan, V. (2014). MgO Nanoparticles Biosynthesis and Its Effect on Chlorophyll Contents in the Leaves of Clusterbean (Cyamopsis tetragonoloba L.). *Advanced Science, Engineering and Medicine*, *6*(5), 538–545. doi: 10.1166/asem.2014.1540

Tarafder, C., Daizy, M., Alam, M. M., Ali, M. R., Islam, M. J., Islam, R., … Khan, M. Z. H. (2020). Formulation of a Hybrid Nanofertilizer for Slow and Sustainable Release of Micronutrients. *ACS Omega*, *5*(37), 23960–23966. doi: 10.1021/acsomega.0c03233

Tripathi, D. K., Shweta, Singh, S., Singh, S., Pandey, R., Singh, V. P., … Chauhan, D. K. (2017). An overview on manufactured nanoparticles in plants: Uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiology and Biochemistry*, *110*, 2–12. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.07.030

Tungittiplakorn, W., Lion, L. W., Cohen, C., & Kim, J.-Y. (2004). Engineered Polymeric Nanoparticles for Soil Remediation. *Environmental Science & Technology*, *38*(5), 1605–1610. doi: 10.1021/es0348997

U.S Food and Drug Administration. (2021). CFR - Code of Federal Regulations Title 21. Retrieved January 10, 2022, from https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm?fr=73.575

U.S. Geological Survey. (2021). Mineral commodity summaries 2021. In *Mineral commodity summaries 2021* (p. 200) [USGS Unnumbered Series]. Reston, VA: U.S. Geological Survey. doi: 10.3133/mcs2021

Vijayalakshmi, R., & Rajendran, V. (2012). Synthesis and characterization of nano-TiO_2 via different methods. *Archives of Applied Science Research*, *4*(2), 1183–1190.

Waani, S. P. T., Irum, S., Gul, I., Yaqoob, K., Khalid, M. U., Ali, M. A., ... Arshad, M. (2021). TiO_2 nanoparticles dose, application method and phosphorous levels influence genotoxicity in Rice (Oryza sativa L.), soil enzymatic activities and plant growth. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *213*, 111977. doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111977

Wang, C.-C., Zhang, Z., & Ying, J. Y. (1997). Photocatalytic decomposition of halogenated organics over nanocrystalline titania. *Nanostructured Materials*, *9*(1–8), 583–586. doi: 10.1016/S0965-9773(97)00130-X

Wang, H., Wang, B., Yu, J., Hu, Y., Xia, C., Zhang, J., & Liu, R. (2015). Significant enhancement of power conversion efficiency for dye sensitized solar cell using 1D/3D network nanostructures as photoanodes. *Scientific Reports*, *5*(1), 9305. doi: 10.1038/srep09305

Wang, P., Lombi, E., Zhao, F.-J., & Kopittke, P. M. (2016). Nanotechnology: A New Opportunity in Plant Sciences. *Trends in Plant Science*, *21*(8), 699–712. doi: 10.1016/j.tplants.2016.04.005

Wang, W.-N., Tarafdar, J. C., & Biswas, P. (2013). Nanoparticle synthesis and delivery by an aerosol route for watermelon plant foliar uptake. *Journal of Nanoparticle Research*, *15*(1), 1417. doi: 10.1007/s11051-013-1417-8

Wang, Y., Sun, C., Zhao, X., Cui, B., Zeng, Z., Wang, A., ... Cui, H. (2016). The Application of Nano-TiO_2 Photo Semiconductors in Agriculture. *Nanoscale Research Letters*, *11*, 529. doi: 10.1186/s11671-016-1721-1

Wani, A. H. & Shah, M. A. (2012). A unique and profound effect of MgO and ZnO nanoparticles on some plant pathogenic fungi. *Journal of Applied Pharmaceutical Science, 2*(3), 40-44.

Weir, A., Westerhoff, P., Fabricius, L., Hristovski, K., & von Goetz, N. (2012). Titanium Dioxide Nanoparticles in Food and Personal Care Products. *Environmental Science & Technology*, *46*(4), 2242–2250. doi: 10.1021/es204168d

Winkler, H. C., Notter, T., Meyer, U., & Naegeli, H. (2018). Critical review of the safety assessment of titanium dioxide additives in food. *Journal of Nanobiotechnology*, *16*(1), 51. doi: 10.1186/s12951-018-0376-8

Wold, A. (1993). Photocatalytic properties of titanium dioxide (TiO_2). *Chemistry of Materials*, *5*(3), 280–283. doi: 10.1021/cm00027a008

Wu, B., Zhu, L., & Le, X. C. (2017). Metabolomics analysis of TiO_2 nanoparticles induced toxicological effects on rice (Oryza sativa L.). *Environmental Pollution*, *230*, 302–310. doi: 10.1016/j.envpol.2017.06.062

Wu, K. L., & Lai, S. K. (2005). Theoretical Studies of the Early Stage Coagulation Kinetics for a Charged Colloidal Dispersion. *Langmuir*, *21*(8), 3238–3246. doi: 10.1021/la0476682

Xu, M., Mao, L., Du, W., Guo, H., & Yin, Y. (2021). Divergence in response of japonica and hybrid rice to titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Soils and Sediments*, *21*(4), 1688–1697. doi: 10.1007/s11368-021-02890-6

Xu, S., Hartvickson, S., & Zhao, J. X. (2011). Increasing Surface Area of Silica Nanoparticles With a Rough Surface. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *3*(6), 1865–1872. doi: 10.1021/am200052a

Yang, F., Hong, F., You, W., Liu, C., Gao, F., Wu, C., & Yang, P. (2006). Influence of nano-anatase TiO_2 on the nitrogen metabolism of growing spinach. *Biological Trace Element Research*, *110*(2), 179–190. doi: 10.1385/BTER:110:2:179

Yang, H., Zhang, K., Shi, R., Li, X., Dong, X., & Yu, Y. (2006). Sol–gel synthesis of TiO_2 nanoparticles and photocatalytic degradation of methyl orange in aqueous TiO_2 suspensions. *Journal of Alloys and Compounds*, *413*(1), 302–306. doi: 10.1016/j.jallcom.2005.06.061

Yang, Z., Chen, J., Dou, R., Gao, X., Mao, C., & Wang, L. (2015). Assessment of the Phytotoxicity of Metal Oxide Nanoparticles on Two Crop Plants, Maize (Zea mays L.) and Rice (Oryza sativa L.). *International Journal of*

Environmental Research and Public Health, *12*(12), 15100–15109. doi: 10.3390/ijerph121214963

Yoon, H. Y., Lee, J. G., Esposti, L. D., Iafisco, M., Kim, P. J., Shin, S. G., ... Adamiano, A. (2020). Synergistic Release of Crop Nutrients and Stimulants from Hydroxyapatite Nanoparticles Functionalized with Humic Substances: Toward a Multifunctional Nanofertilizer. *ACS Omega*, *5*(12), 6598–6610. doi: 10.1021/acsomega.9b04354

Younes, M., Aquilina, G., Castle, L., Engel, K.-H., Fowler, P., Fernandez, M. J. F., ... Wright, M. (2021). Safety assessment of titanium dioxide (E171) as a food additive. *EFSA Journal*, *19*(5), e06585. doi: 10.2903/j.efsa.2021.6585

Zahra, Z., Arshad, M., Rafique, R., Mahmood, A., Habib, A., Qazi, I. A., & Khan, S. A. (2015). Metallic Nanoparticle (TiO_2 and Fe3O4) Application Modifies Rhizosphere Phosphorus Availability and Uptake by Lactuca sativa. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *63*(31), 6876–6882. doi: 10.1021/acs.jafc.5b01611

Zahra, Z., Waseem, N., Zahra, R., Lee, H., Badshah, M. A., Mehmood, A., ... Arshad, M. (2017). Growth and Metabolic Responses of Rice (Oryza sativa L.) Cultivated in Phosphorus-Deficient Soil Amended with TiO_2 Nanoparticles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *65*(28), 5598–5606. doi: 10.1021/acs.jafc.7b01843

Zeng, R., Wang, J., Cui, J., Hu, L., & Mu, K. (2010). Photocatalytic degradation of pesticide residues with RE3+ -doped nano-TiO_2. *Journal of Rare Earths*, *28*, 353–356. doi: 10.1016/S1002-0721(10)60329-8

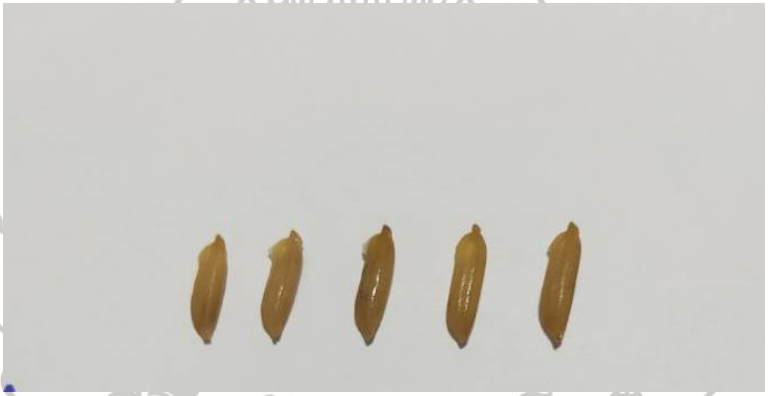
Zhang, J., Zhou, P., Liu, J., & Yu, J. (2014). New understanding of the difference of photocatalytic activity among anatase, rutile and brookite TiO_2. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *16*(38), 20382–20386. doi: 10.1039/C4CP02201G

Zhang, Y., Liu, N., Wang, W., Sun, J., & Zhu, L. (2020). Photosynthesis and related metabolic mechanism of promoted rice (Oryza sativa L.) growth by TiO_2 nanoparticles. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *14*(6), 103. doi: 10.1007/s11783-020-1282-5

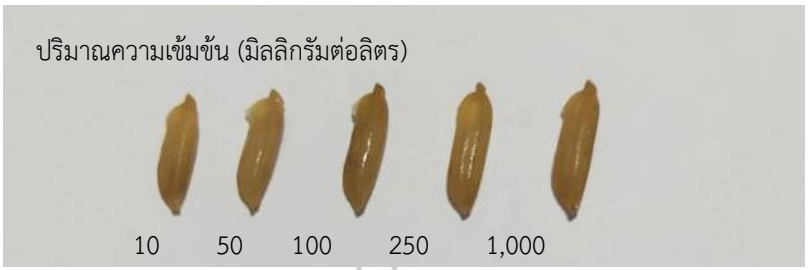
Zhao, X., Liu, W., Cai, Z., Han, B., Qian, T., & Zhao, D. (2016). An overview of preparation and applications of stabilized zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation. *Water Research*, *100*, 245–266. doi: 10.1016/j.watres.2016.05.019

ภาคผนวก

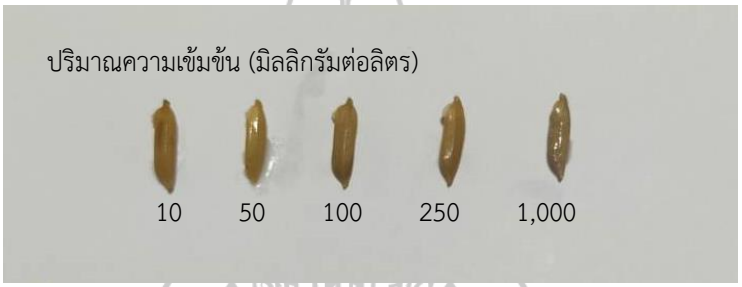
ภาพผนวกที่ 1 การแช่เมล็ดข้าวด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดและปริมาณความเข้มข้นต่างกัน



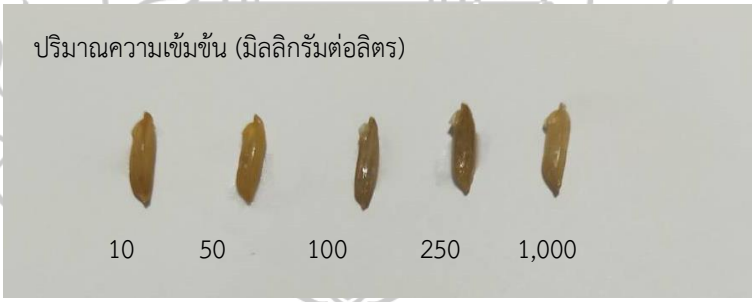
ภาพผนวกที่ 2 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่น้ำ 48 ชั่วโมง



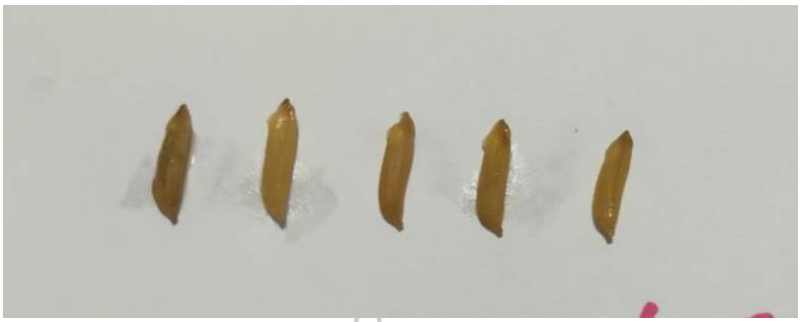
ภาพผนวกที่ 3 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 48 ชั่วโมงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



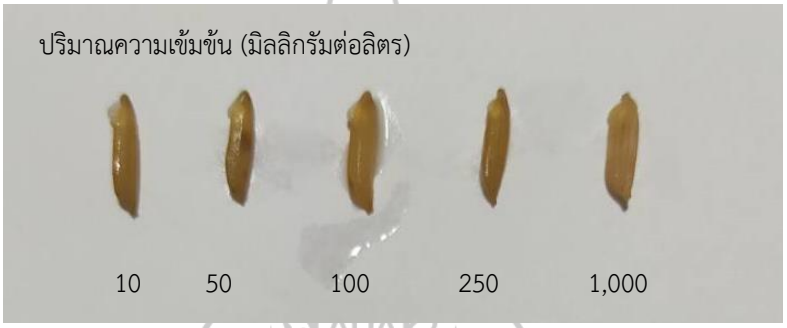
ภาพผนวกที่ 4 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 48 ชั่วโมงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



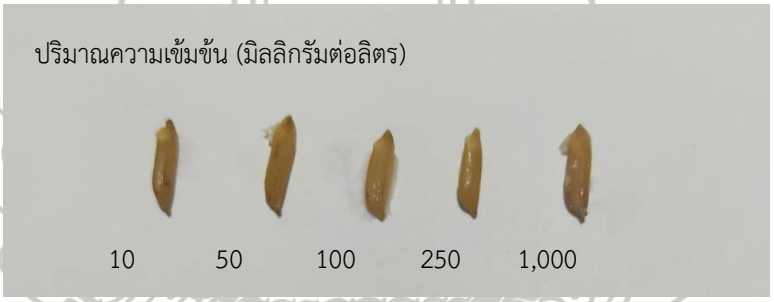
ภาพผนวกที่ 5 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 48 ชั่วโมงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



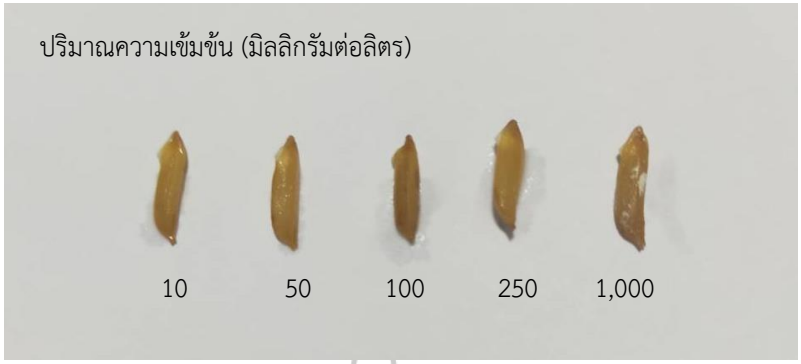
ภาพผนวกที่ 6 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่น้ำ 48 ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ 7 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 48 ชั่วโมงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



ภาพผนวกที่ 8 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 48 ชั่วโมงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



ภาพผนวกที่ 9 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 48 ชั่วโมงด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่

ภาพผนวกที่ 10 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่น้ำ 1 วัน

ภาพผนวกที่ 11 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 1 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก

ภาพผนวกที่ 12 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 1 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง

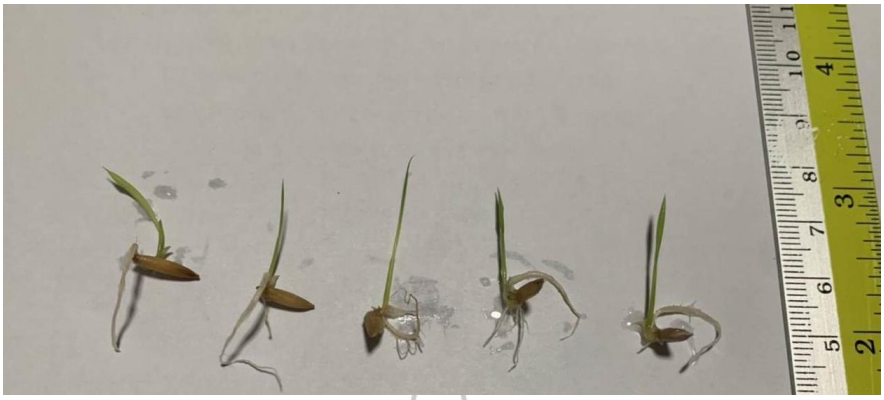
ภาพผนวกที่ 13 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 1 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่

ภาพผนวกที่ 14 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่น้ำ 1 วัน

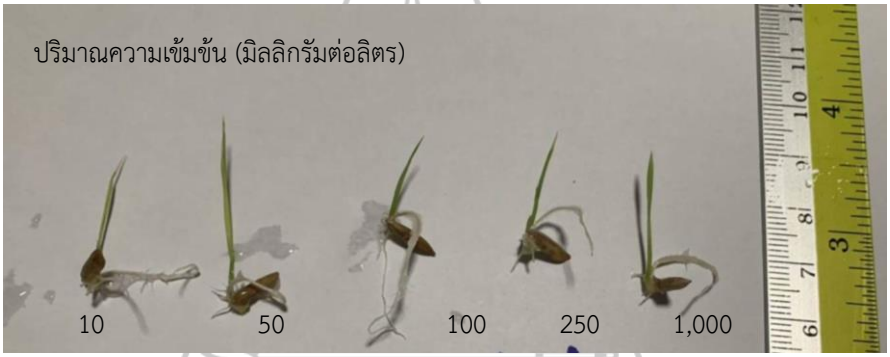
ภาพผนวกที่ 15 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 1 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก

ภาพผนวกที่ 16 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 1 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง

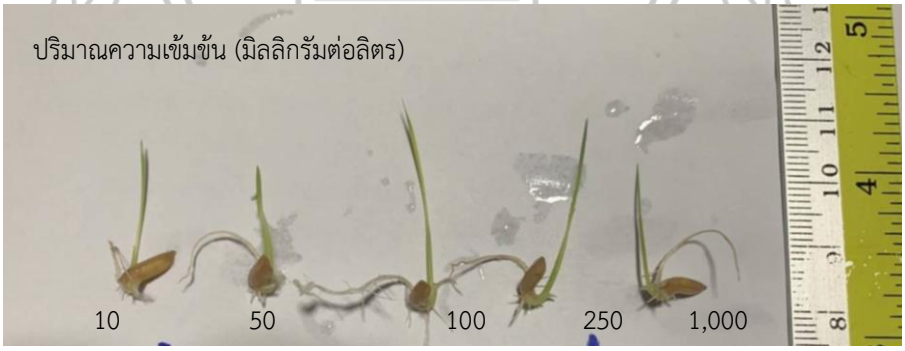
ภาพผนวกที่ 17 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 1 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



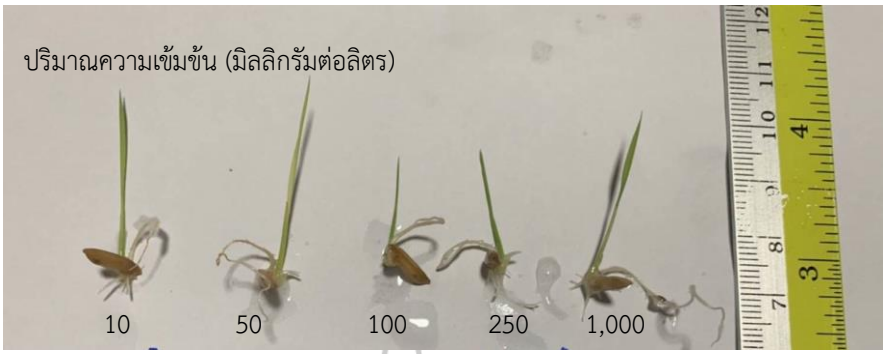
ภาพผนวกที่ 18 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวหอมปทุมธานี 1 หลังแช่น้ำ 3 วัน



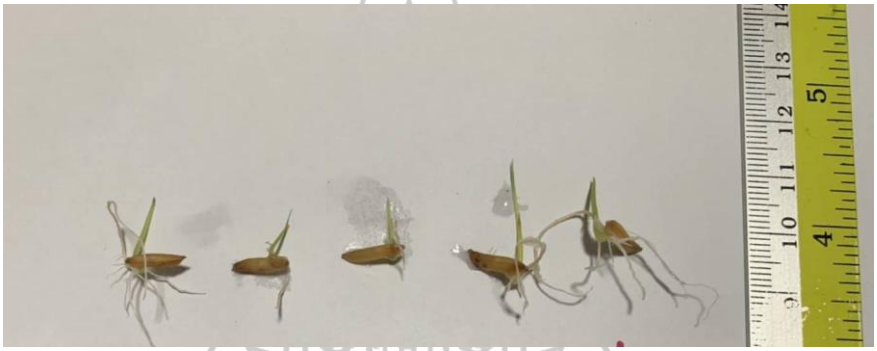
ภาพผนวกที่ 19 เมล็ดข้าวหอมปทุมธานี 1 หลังแช่ 3 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



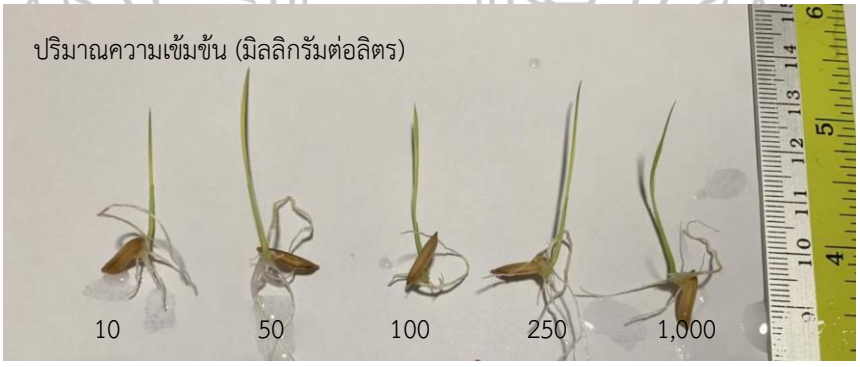
ภาพผนวกที่ 20 เมล็ดข้าวหอมปทุมธานี 1 หลังแช่ 3 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



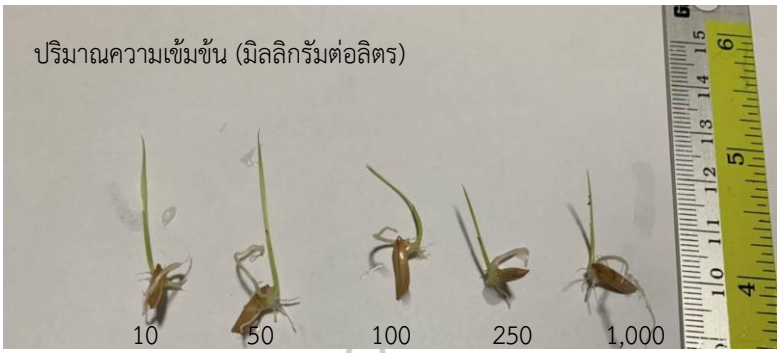
ภาพผนวกที่ 21 เมล็ดข้าวหอมปทุมธานี 1 หลังแช่ 3 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



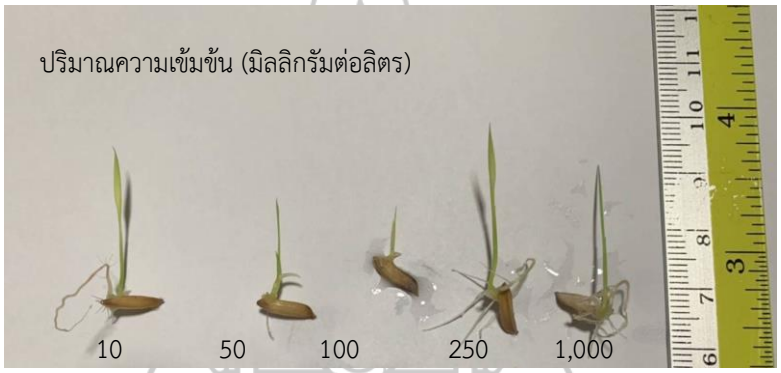
ภาพผนวกที่ 22 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่น้ำ 3 วัน



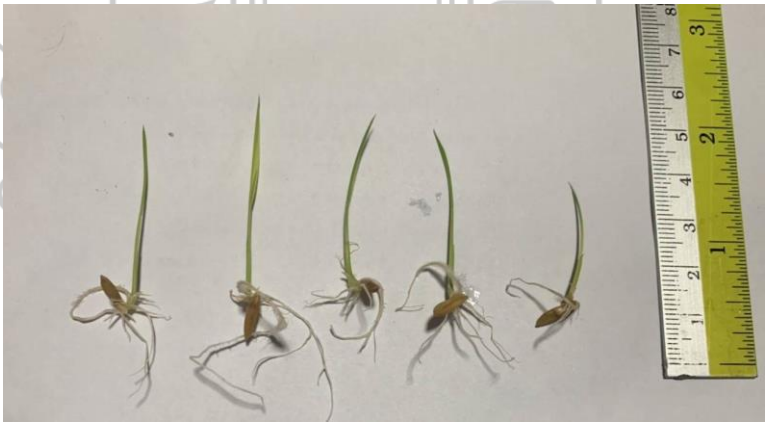
ภาพผนวกที่ 23 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 3 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



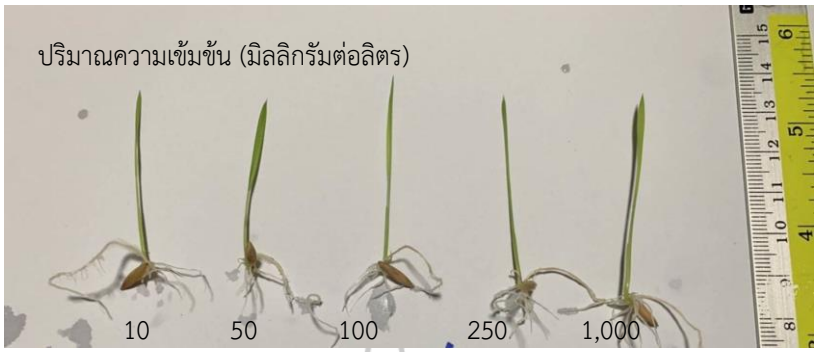
ภาพผนวกที่ 24 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 3 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



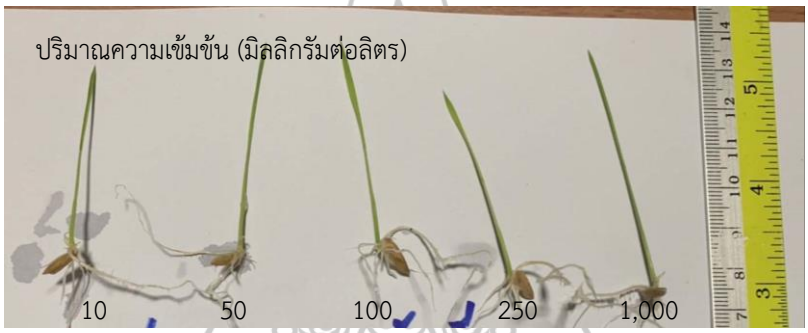
ภาพผนวกที่ 25 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 3 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



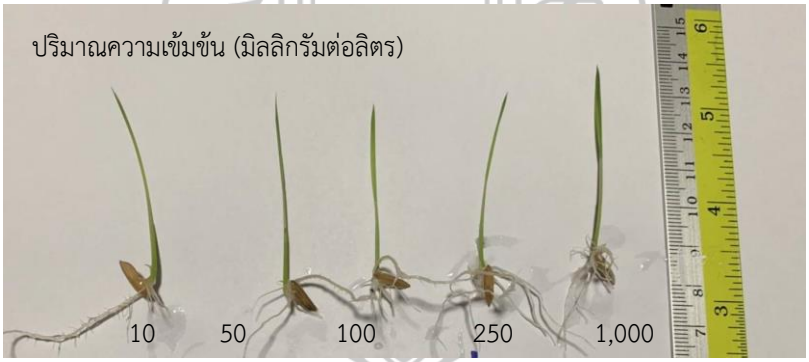
ภาพผนวกที่ 26 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่น้ำ 5 วัน



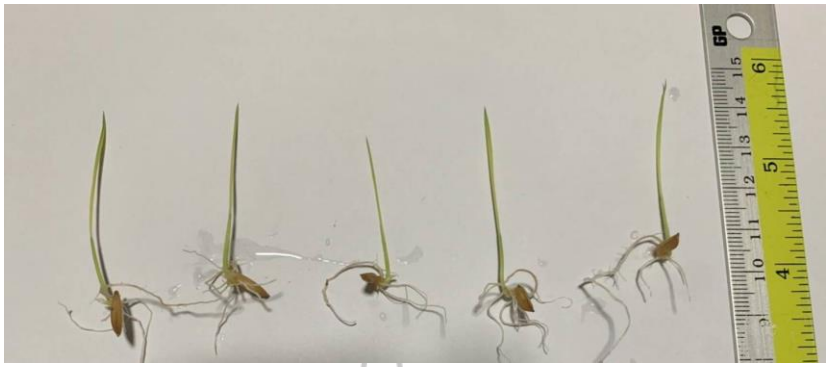
ภาพผนวกที่ 27 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 5 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



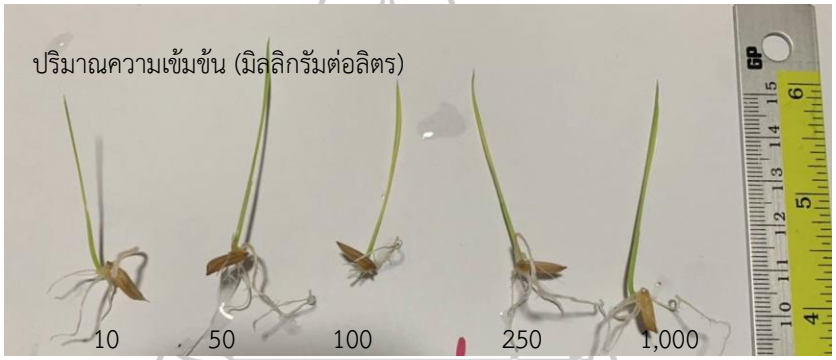
ภาพผนวกที่ 28 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 5 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



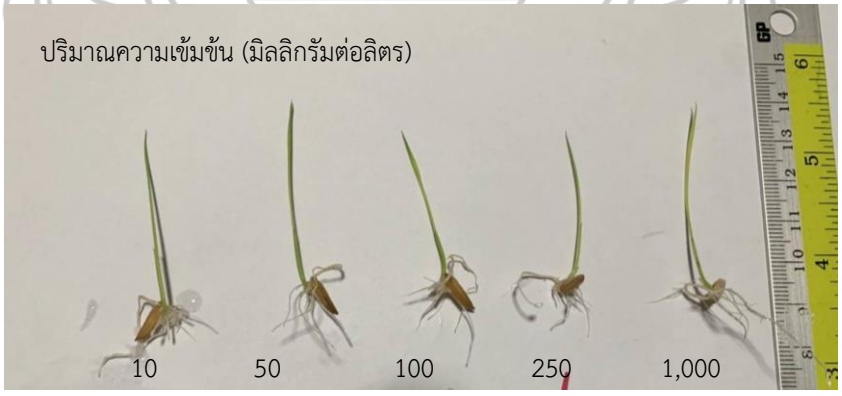
ภาพผนวกที่ 29 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 5 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



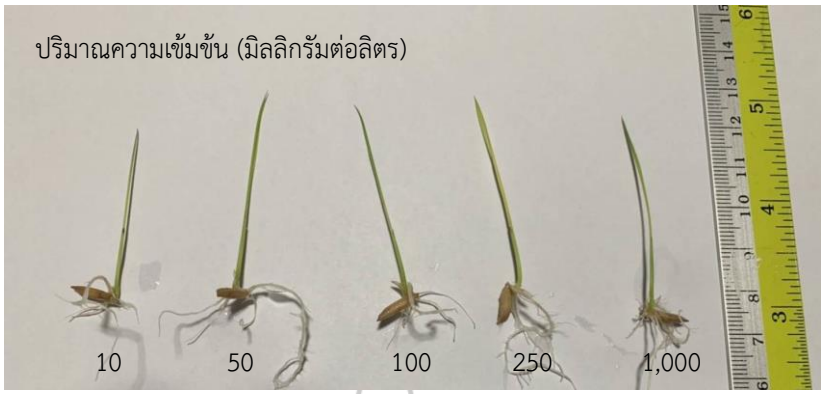
ภาพผนวกที่ 30 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่น้ำ 5 วัน



ภาพผนวกที่ 31 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 5 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก

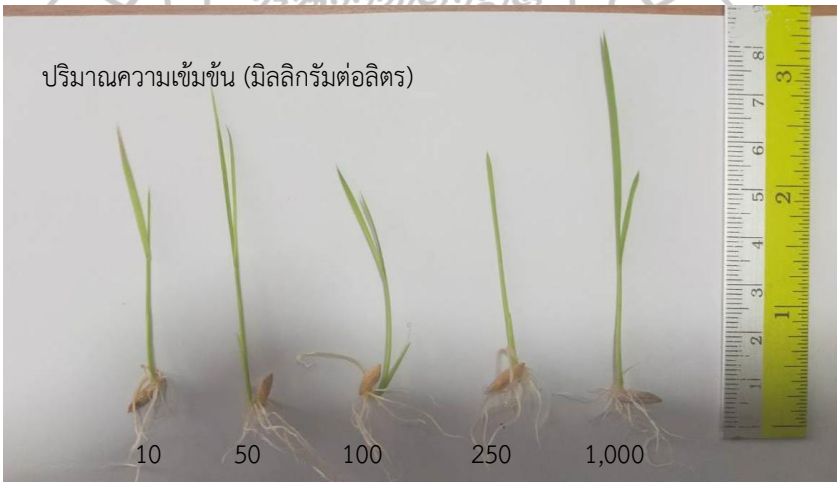


ภาพผนวกที่ 32 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 5 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง

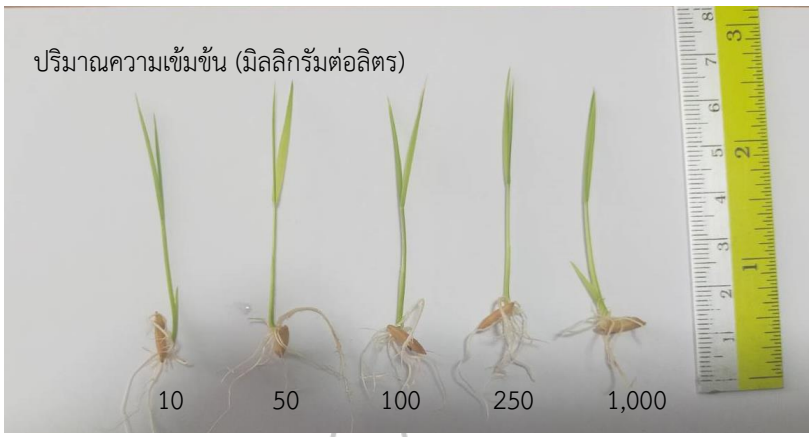


ภาพผนวกที่ 33 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 5 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่

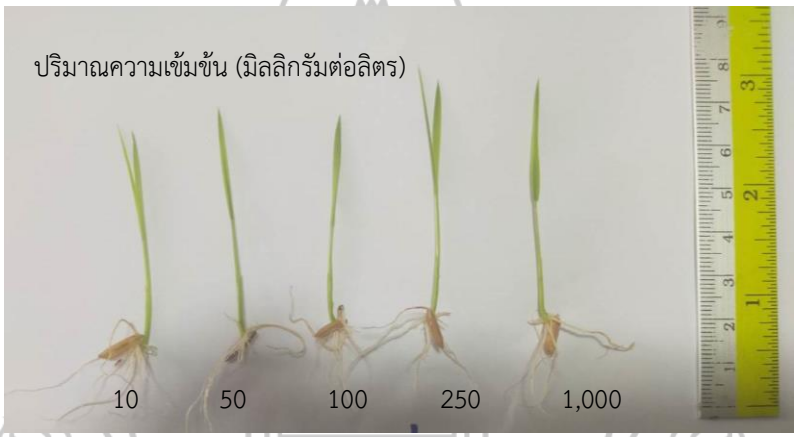
ภาพผนวกที่ 34 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่น้ำ 7 วัน



ภาพผนวกที่ 35 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 7 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก

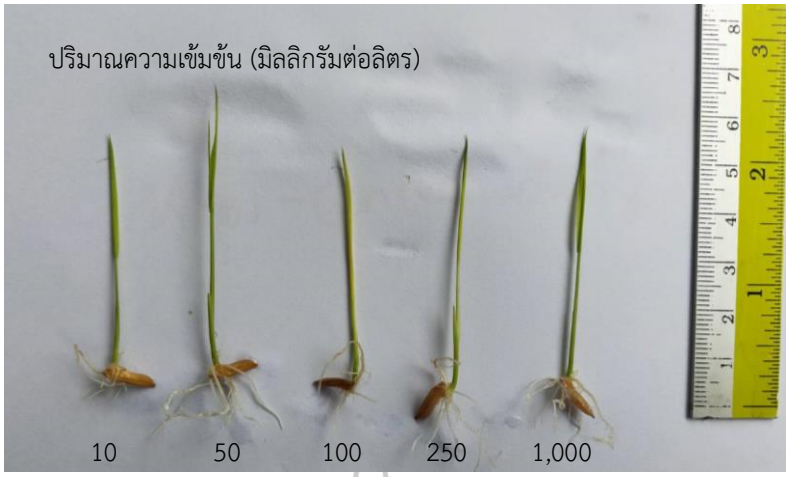


ภาพผนวกที่ 36 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 7 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง

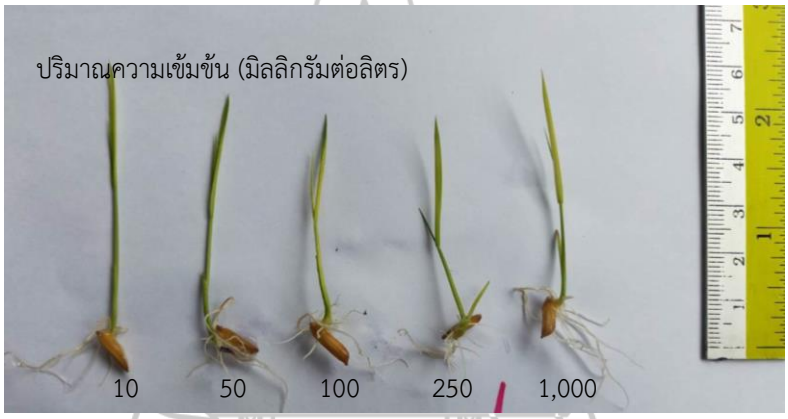


ภาพผนวกที่ 37 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 7 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่

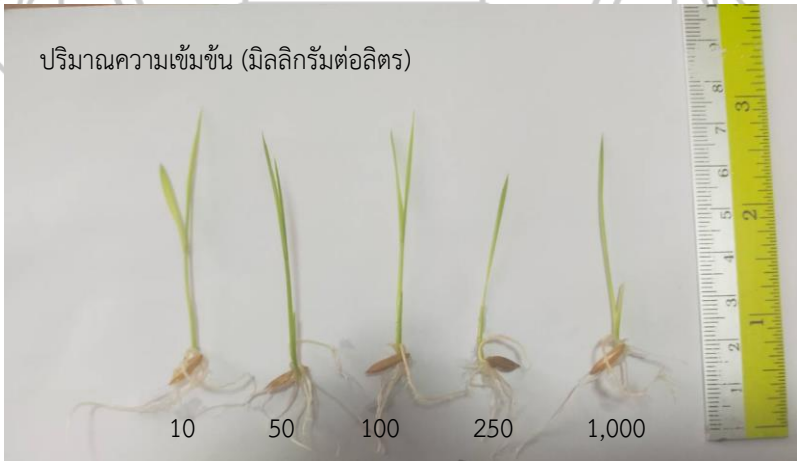
ภาพผนวกที่ 38 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่น้ำ 7 วัน



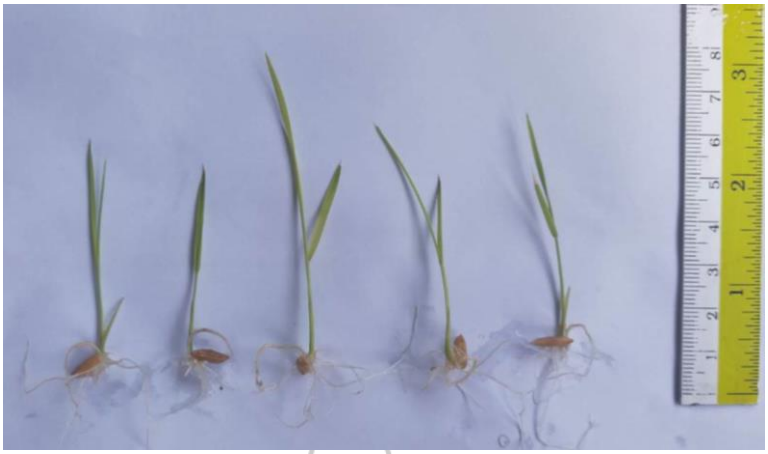
ภาพผนวกที่ 39 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 7 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



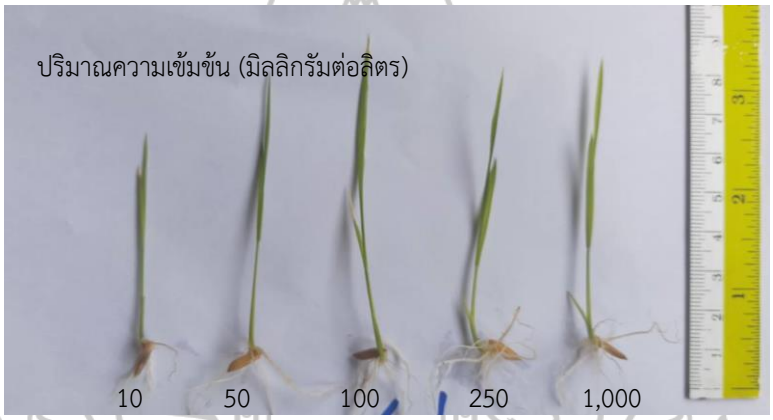
ภาพผนวกที่ 40 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 7 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



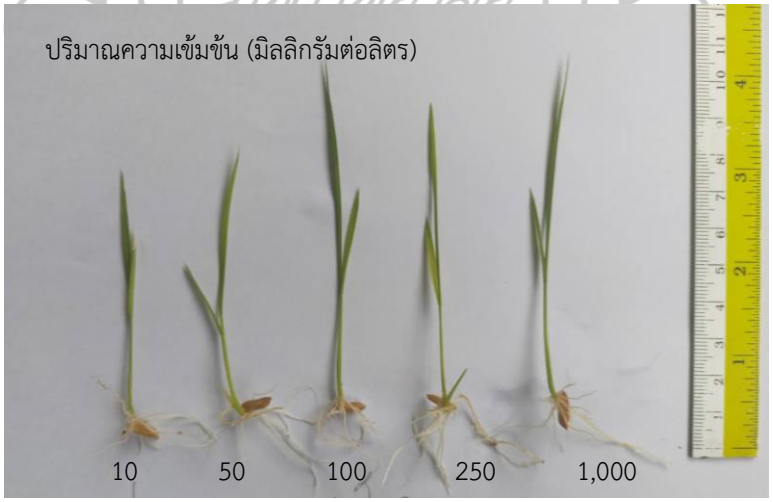
ภาพผนวกที่ 41 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 7 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



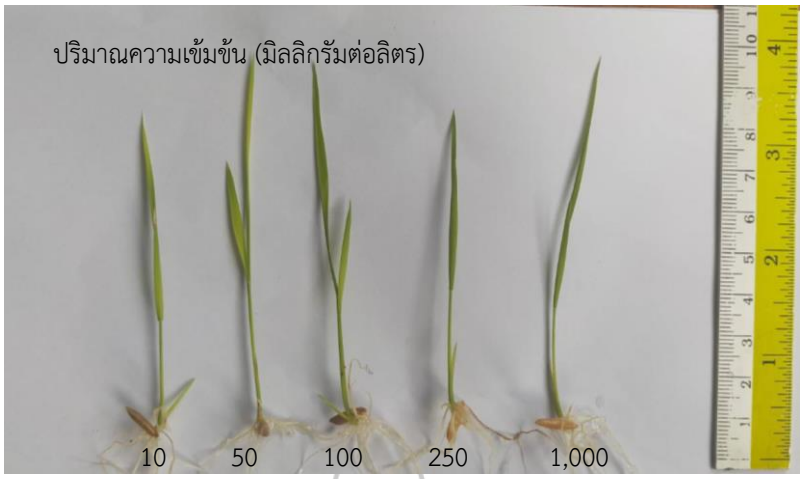
ภาพผนวกที่ 42 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่น้ำ 9 วัน



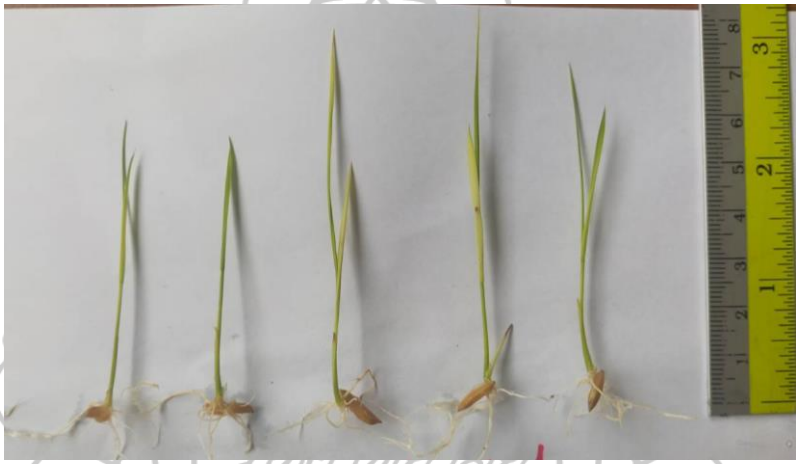
ภาพผนวกที่ 43 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 9 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก



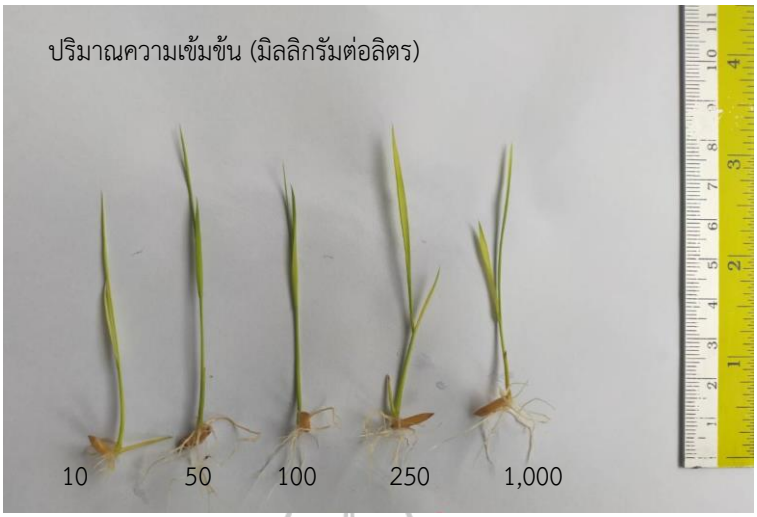
ภาพผนวกที่ 44 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 9 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



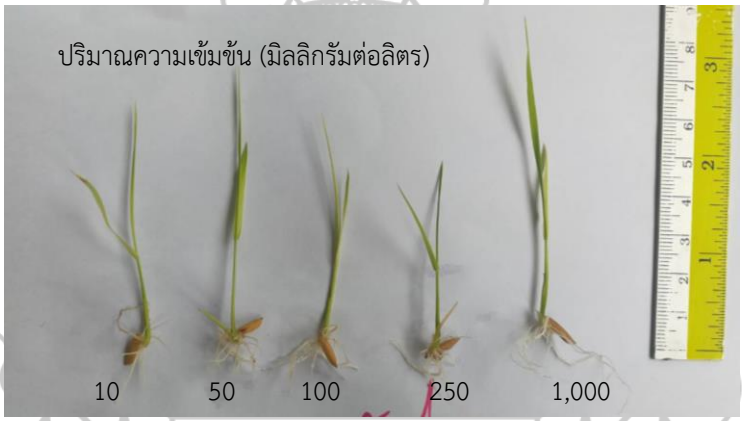
ภาพผนวกที่ 45 เมล็ดข้าวปทุมธานี 1 หลังแช่ 9 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่



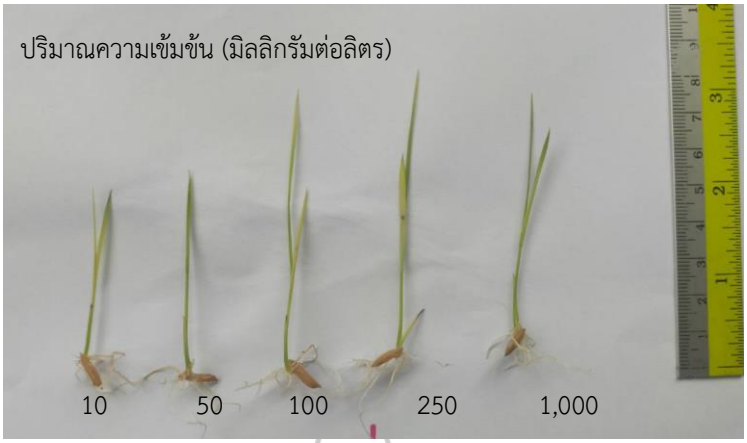
ภาพผนวกที่ 46 ชุดควบคุม (Control) เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่น้ำ 9 วัน



ภาพผนวกที่ 47 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 9 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็ก

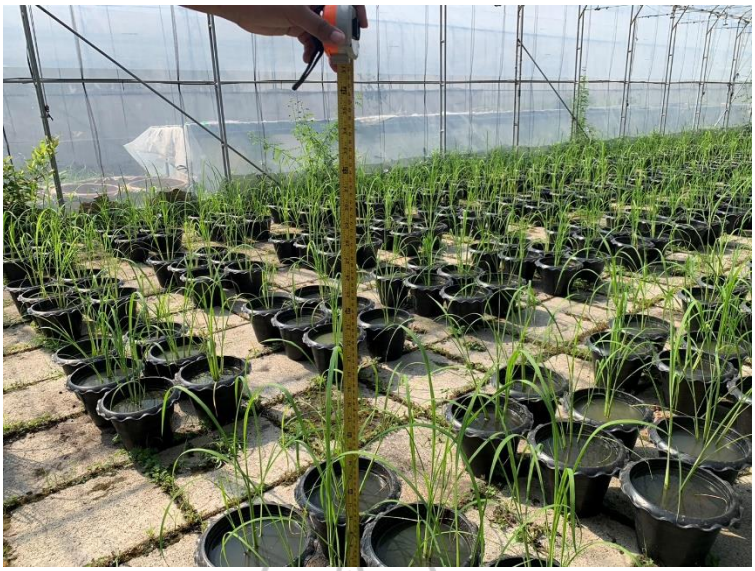


ภาพผนวกที่ 48 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 9 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง



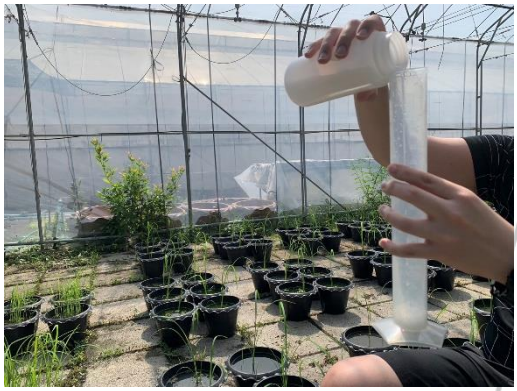
ภาพผนวกที่ 49 เมล็ดข้าวขาวดอกมะลิ 105 หลังแช่ 9 วัน ด้วยอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่

ภาพผนวกที่ 50 ลักษณะโรงเรือนและการจัดวางกระถางในการปลูกข้าวในการทดลอง



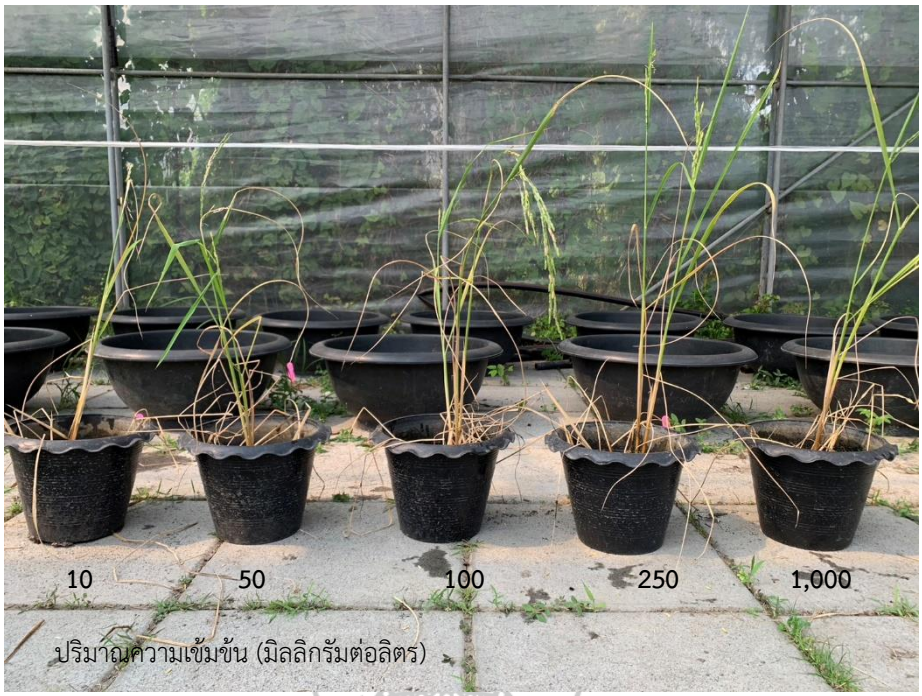
ภาพผนวกที่ 51 การวัดความสูงของต้นข้าว

ภาพผนวกที่ 52 การวัดสีใบของข้าว

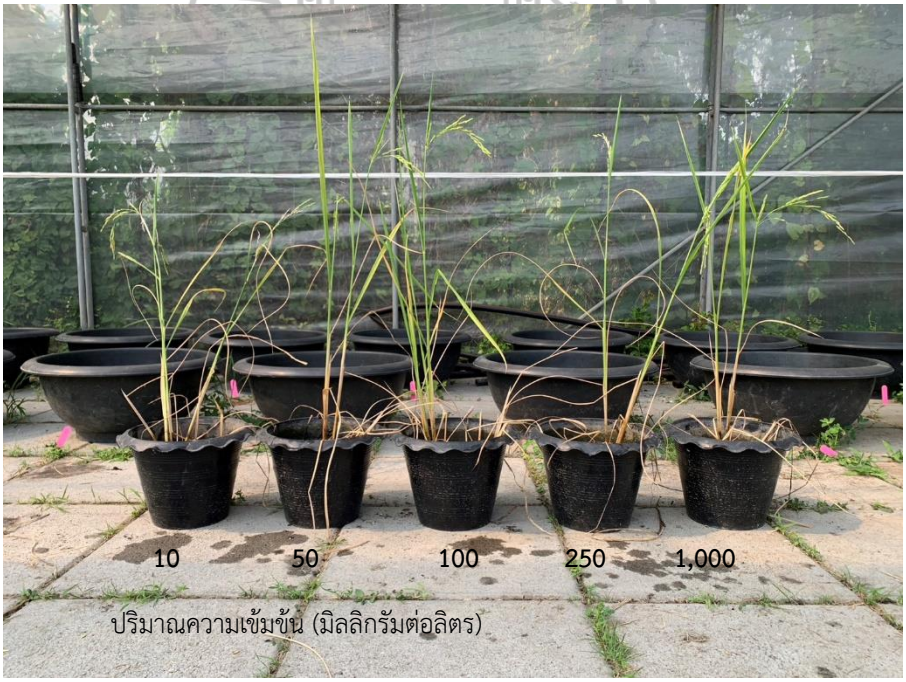


ภาพผนวกที่ 53 การเติมอนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ในกระถางปลูกข้าว

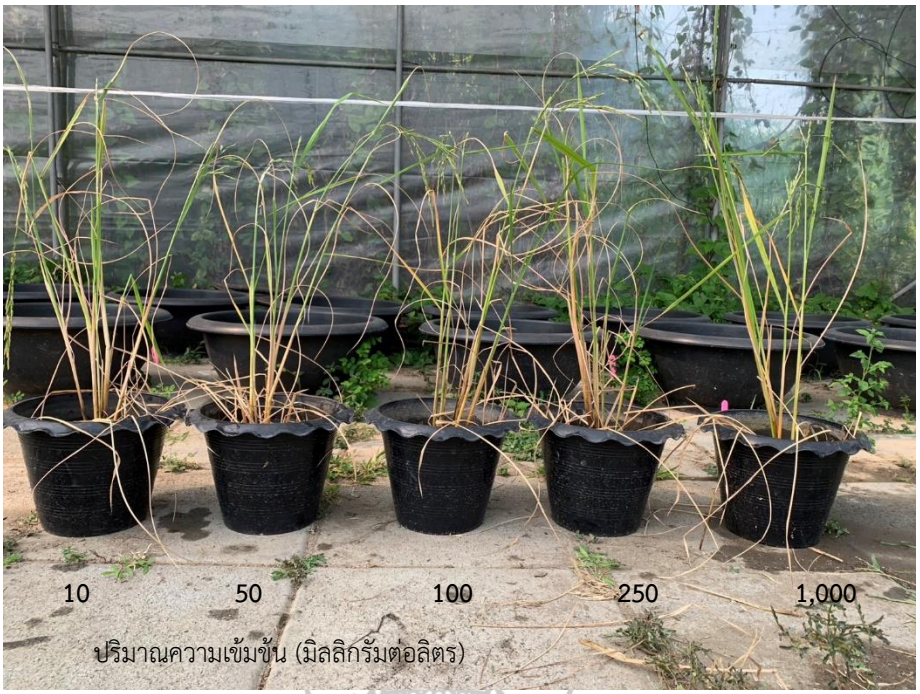
ภาพผนวกที่ 54 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ชุดควบคุมเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพผนวกที่ 55 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในเมล็ดเพียงอย่างเดียว เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

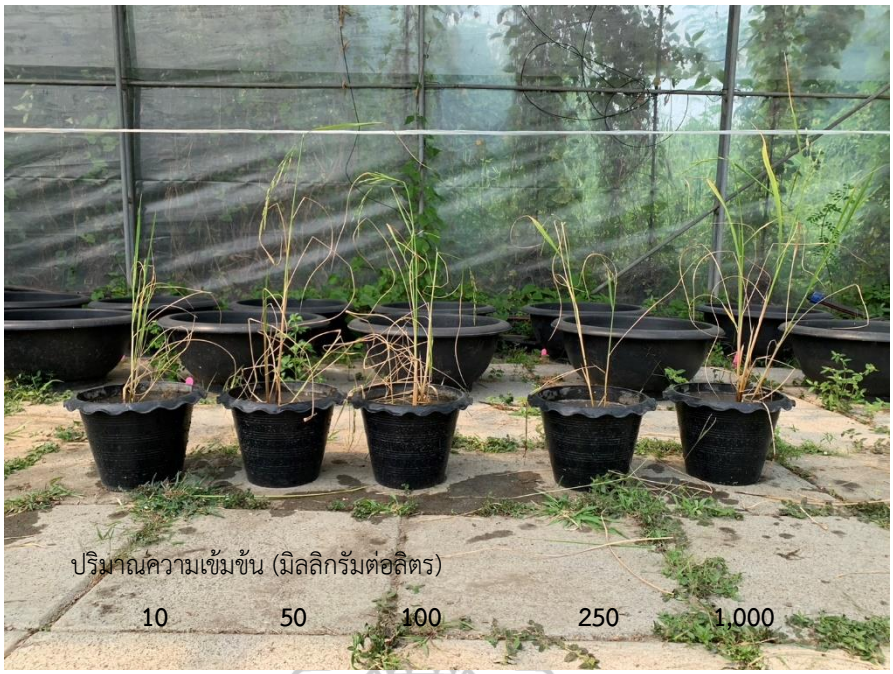


ภาพผนวกที่ 56 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง ในเมล็ดเพียงอย่างเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

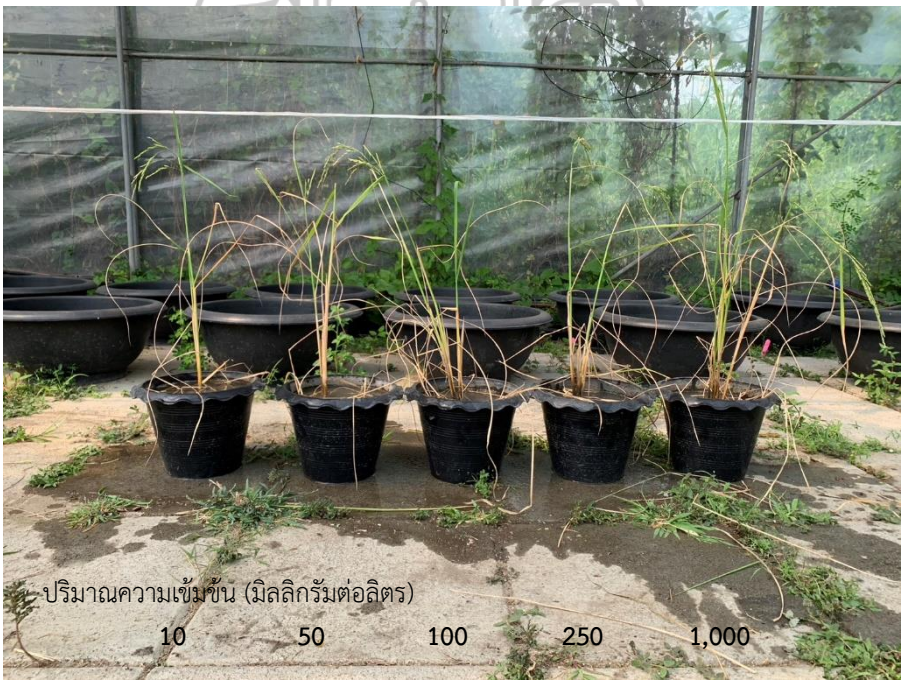


ภาพผนวกที่ 57 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในเมล็ดเพียงอย่างเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

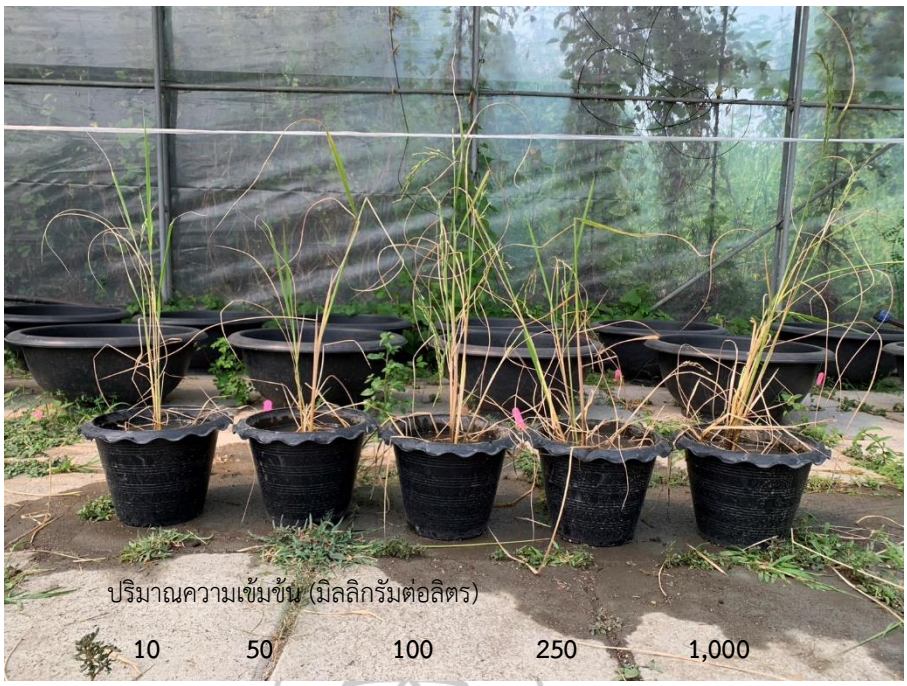
ภาพผนวกที่ 58 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ชุดควบคุมเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



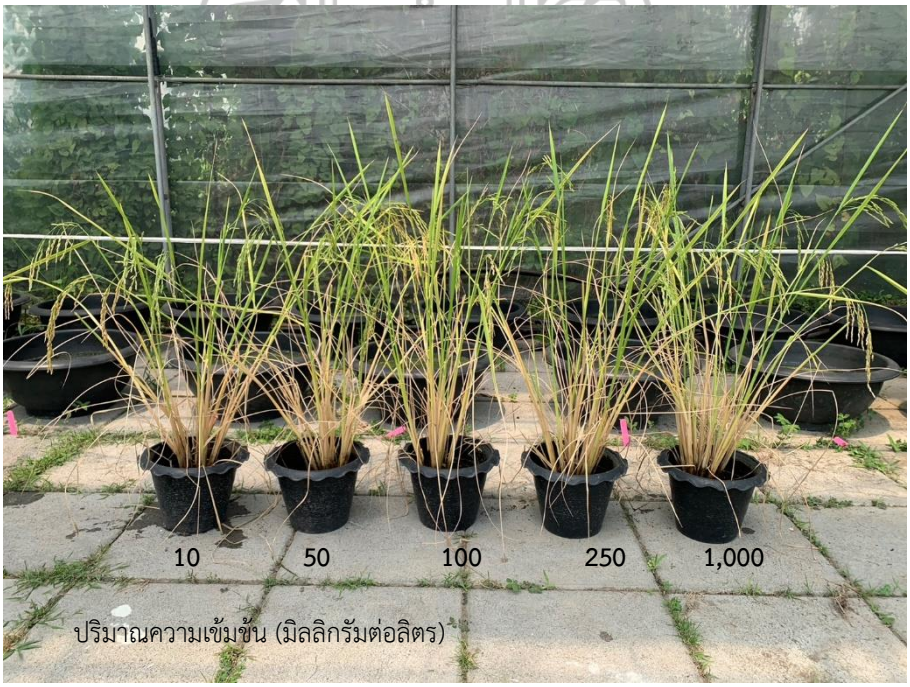
ภาพผนวกที่ 59 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในเมล็ดเพียงอย่างเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



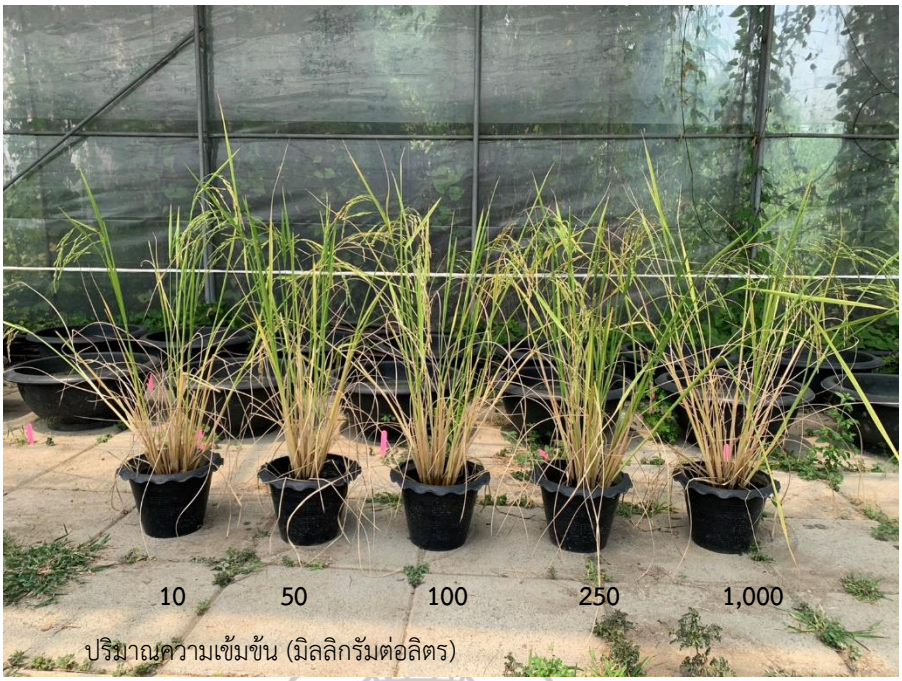
ภาพผนวกที่ 60 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางในเมล็ดเพียงอย่างเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพผนวกที่ 61 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ในเมล็ดเพียงอย่างเดียวเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

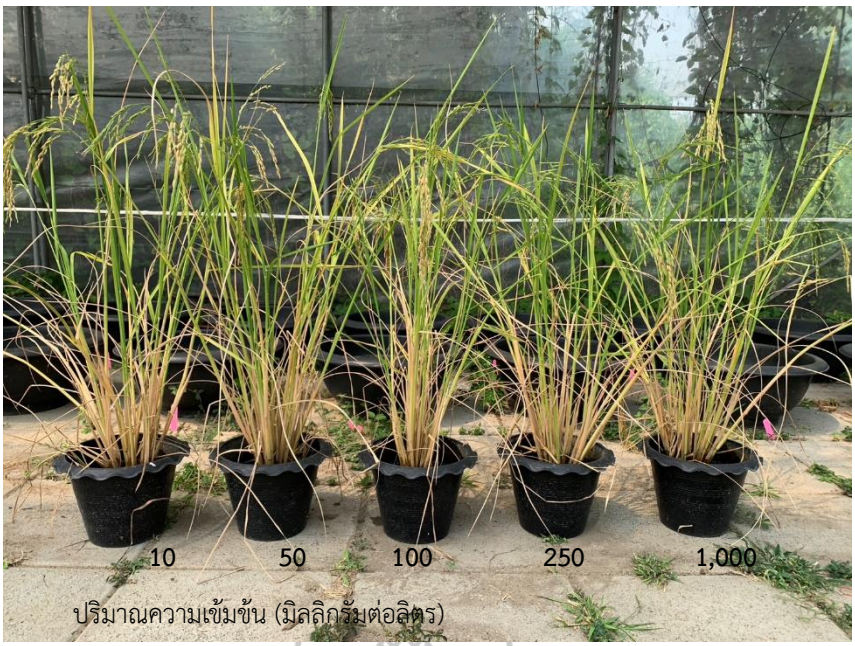


ภาพผนวกที่ 62 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในเมล็ดและเติมวันที่ 25 ของการปลูกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

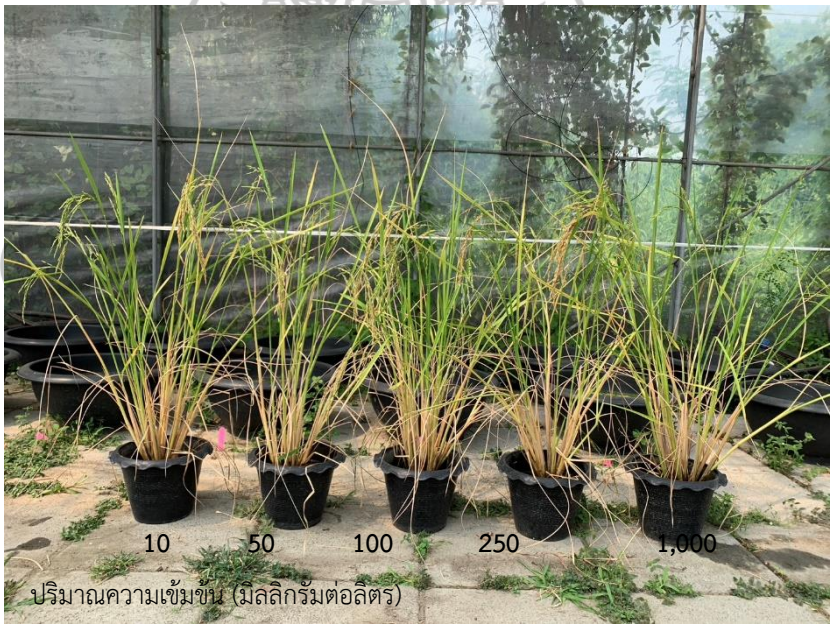


ภาพผนวกที่ 63 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลาง ในเมล็ดและเติมวันที่ 25 ของการปลูกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

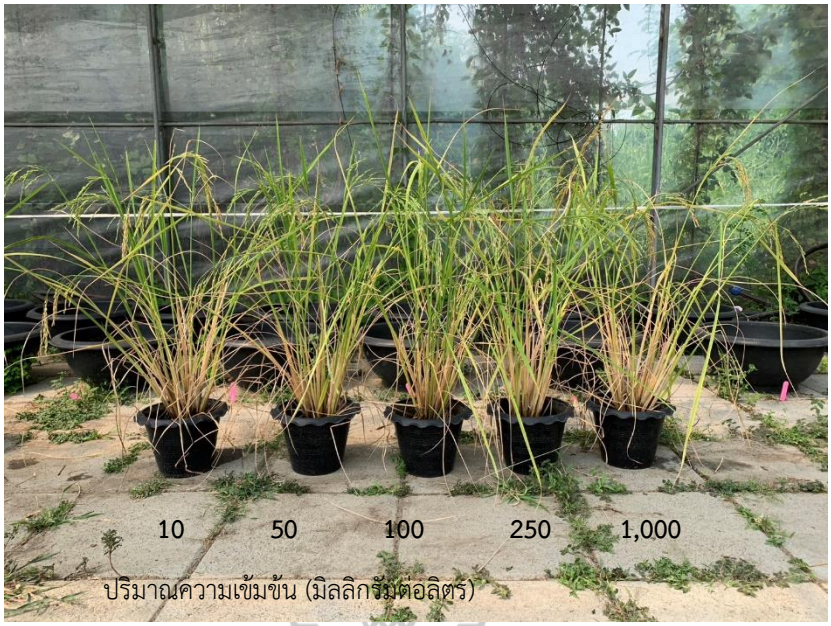
ภาพผนวกที่ 64 ต้นข้าวปทุมธานี 1 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดใหญ่ ในเมล็ดและเติมวันที่ 25 ของการปลูกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพผนวกที่ 65 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดเล็กในเมล็ดและเติมวันที่ 25 ของการปลูกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพผนวกที่ 66 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางในเมล็ดและเติมวันที่ 25 ของการปลูกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพผนวกที่ 67 ต้นข้าวขาวดอกมะลิ 105 ที่แช่อนุภาคไททาเนียมไดออกไซด์ขนาดกลางในเมล็ดและเติมวันที่ 25 ของการปลูกเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ	นายวิณากร ที่รัก
วัน เดือน ปี เกิด	26 มีนาคม 2530
สถานที่เกิด	อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา	กษ.ม. (การจัดการทรัพยากรเกษตร) มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ปี พ.ศ. 2556
สถานที่ทำงาน	คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี
ตำแหน่ง	ผู้ช่วยศาสตราจารย์

มหาวิทยาลัย
สุโขทัยธรรมาธิราช