การตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส

ทศพร บ่อบัวทอง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2561

การตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส

ทศพร บ่อบัวทอง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภา อินสลุด)
วันที่ 9 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชญ์ภาส สังพาลี)
วันที่ 9 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....
(อาจารย์ ดร.จุฑามาศ อาจนาเสียว)
วันที่ 9 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร .....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชญ์ภาส สังพาลี)
วันที่ 9 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว .....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่ 12 เดือน พฤศจิกายน พ.ศ. 2561

ชื่อเรื่อง การตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส
ชื่อผู้เขียน นายทศพร บ่อบัวทอง
ชื่อปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชไร่
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภา อินสลุด

บทคัดย่อ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและพัฒนาการของข้าว หากข้าวขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติจะส่งผลให้มีการเจริญเติบโตช้า แตกกอน้อย และไม่สามารถให้ผลผลิตได้ ด้วยเหตุนี้ระบบรากจึงต้องมีการปรับตัวทางสัณฐานวิทยาอย่างรวดเร็วโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวรากให้มากขึ้น เพื่อให้สามารถหาฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการ โดยในแต่ละระยะการเจริญเติบโตของข้าวต้องการฟอสฟอรัสในปริมาณที่แตกต่างกัน และปริมาณฟอสฟอรัสขั้นต่ำที่ข้าวแต่ละพันธุ์ต้องการหรือระดับวิกฤตินั้นย่อมมีความแตกต่างกันออกไป ในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาลักษณะการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส และหาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า โดยปลูกทดสอบในสารละลายธาตุอาหาร แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 แบ่งย่อยออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1.1 วางแผนการทดลองแบบ 4 x 4 Factorials in CRD (ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ข้าว 4 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 4 ระดับ) การทดลองที่ 1.2 วางแผนการทดลองแบบ 4 x 5 Factorials in CRD (ปัจจัยที่ 1 พันธุ์ข้าว 4 พันธุ์ ปัจจัยที่ 2 ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 5 ระดับ) ปลูกศึกษานาน 28 และ 15 วัน ตามลำดับ เพื่อหาลักษณะการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส และการทดลองที่ 2 วางแผนการทดลองแบบ CRD (ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 7 ระดับ) เพื่อหาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในระยะกล้า ปลูกศึกษานาน 30 วัน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 100 μM ระบบรากของข้าวทุกพันธุ์มีการยืดขยายความยาวมากยิ่งขึ้นตั้งแต่ 7 วันหลังงอก และที่ระยะ 9 วันหลังงอกเป็นต้นไป จำนวนรากต่อต้นและการสะสมน้ำหนักแห้งรากเริ่มลดลง ในขณะที่อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการตอบสนองของพันธุ์ข้าวจากต่างระบบนิเวศพบว่ามีการตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่มีความสามารถในการยืดขยายความยาวราก การสะสมน้ำหนักแห้งราก และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน แต่กลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวนสามารถสร้างรากต่อต้นได้มากกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ โดยเฉพาะขาวดอกมะลิ 105 ซึ่งมีการตอบสนองของระบบรากแปรผันตามระดับความเข้มข้น

ฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างโดดเด่นกว่าพันธุ์อื่นๆ สำหรับการประเมินหาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ในระยะกล้า พบว่าระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของระบบรากและลำต้น อยู่ที่ระดับความเข้มข้น 60 μM แต่มีการตอบสนองในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยระบบรากมีการตอบสนองตั้งแต่ข้าวมีอายุ 15 วันหลังงอกเป็นต้นไป ในขณะที่ส่วนของลำต้นมีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 27 วันหลังงอกเป็นต้นไป ดังนั้น ในช่วงระยะกล้าของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จึงจำเป็นต้องได้รับปุ๋ยฟอสฟอรัสอย่างน้อย 60 μM เพื่อให้กล้าข้าวสามารถเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์

คำสำคัญ : ระบบราก, ฟอสฟอรัส, การตอบสนอง, ระดับความเข้มข้นวิกฤติ

Title	RESPONSES OF RICE ROOT SYSTEM TO PHOSPHORUS DEFICIENCY
Author	Mr. Thossaporn Bobeautong
Degree	Master of Science in Agronomy
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Nednapa Insalud

ABSTRACT

Phosphorus is an essential nutrient for growth and development of rice. Receiving insufficient level of phosphorus below its critical concentration will result in reduced growth tillering and yield of rice. Therefore, the root system has to quickly adapt morphologically in order to increase root surface so that sufficient phosphorus can be absorbed by the root system. At different growth stage, rice has a difference in phosphorus requirement, as well as that the minimum phosphorus requirement or critical level of phosphorus for each rice cultivar is different. The objectives of this study are to investigate the response of root systems of different rice cultivars to phosphorus deficiency, and to find a critical concentration of phosphorus where rice displays deficiency responses during seedling stage when studied under nutrient solution system. Two experiments were conducted in this study. Experiment 1 was divided into two parts whereby part 1.1 was setup in a 4 x 4 factorial in CRD (the first factor are 4 rice cultivars and the second factor are 4 levels of phosphorus concentration). Part 1.2 was setup in a 4 x 5 factorial in CRD (the first factor are 4 rice cultivars and the second factor are 5 levels of phosphorus concentration). Rice plants were grown until 28 days for part 1.1 and 15 days for part 1.2 to evaluate responses of rice root system of different cultivars to phosphorus deficiency. Experiment 2 was setup in a CRD to find a critical concentration of phosphorus for growth of rice cultivar KDML105 by testing in seven different phosphorus concentrations and evaluate root system during the 30 days of seedling growth. It was found that when receiving phosphorus below 100 μM, all tested rice cultivars displayed elongated root at 7 days post germination. From 9 days post germination, number of roots per plant and root

dry weight started to reduce while root:shoot ratio increased. When comparing responses of rice from different ecosystems, it was found that upland rice was able to extend their root longer, had more root dried weight, and had higher root:shoot ratio than lowland rice. However, Lowland rice was able to produce more roots per plant than upland rice, especially in cultivar KDML105, whose root system responses were directly proportional to phosphorus concentration. Evaluation of critical phosphorus concentration for root system responses to phosphorus deficiency during seedling stage for cultivar KDML105 suggested that critical concentration for phosphorus responses in both root and shoot was 60 μM. However, responses were detected at different growing stages, whereby root system responses were visible from 15 days post germination while shoot responses were present from 27 days post germination. Consequently, it is necessary that during seedling stage of cultivar KDML105, phosphorus availability of at least 60 μM is needed in order to ensure optimum growth.

Keyword : Root system, Phosphorus, Responses, Critical concentration

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภา อินสลุด ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นที่ปรึกษา ให้แนวความคิดริเริ่มในการทำวิจัย และกรุณาให้ข้อคิดเห็น คำปรึกษา ตลอดจนดูแลเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้อง และเสร็จสิ้นอย่างสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชญ์ภาส สังพาลี และอาจารย์ ดร.จุฑามาศ อาจนาเสียว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและให้แนวความคิดในสิ่งที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ไม่อาจสำเร็จได้หากปราศจากความช่วยเหลือของอาจารย์ทุกท่านที่กล่าวมา ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งในความช่วยเหลือของอาจารย์เป็นอย่างยิ่งจึงขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร ซึ่งให้ความอนุเคราะห์และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการดำเนินการวิจัยจนลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยหวังว่า งานวิจัยฉบับนี้จะมีประโยชน์อยู่ไม่น้อย และเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง และขอมอบความกตัญญูกตเวทิตาคุณ แด่บิดา มารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน สำหรับข้อบกพร่องต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นนั้น ผู้วิจัยขอน้อมรับผิดแต่เพียงผู้เดียวและยินดีที่จะรับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

ทศพร บ่อบัวทอง

สารบัญ

หน้า

สารบัญตาราง

หน้า

สารบัญภาพ

หน้า

สารบัญตารางผนวก

หน้า

บทที่ 1
บทนำ

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช (Raghothama, 1999) เป็นองค์ประกอบของ nucleic acid (ใน gene บน chromosome) nucleoprotein (เกี่ยวข้องกับการทำงานของเซลล์ การสร้างองค์ประกอบต่างๆ ของเซลล์ การแบ่งเซลล์และการสืบพันธุ์) เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นของสารฟอสเฟตที่ทำหน้าที่รับช่วงถ่ายทอดพลังงานระหว่างสารในกระบวนการต่างๆ ของพืช เช่น กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง กระบวนการหายใจ และกระบวนการที่ต้องการพลังงาน (ATP) ทั้งสิ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) เมื่อพืชได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอจะส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตและการออกดอกติดผลสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามแม้ฟอสฟอรัสมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชมาก แต่ดินส่วนใหญ่มีปริมาณฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ต่ำ (Barber, 1995) เช่น ดินนาชั้นบนของประเทศไทยมีฟอสฟอรัสเฉลี่ยเพียง 0.02 % ซึ่งต่ำกว่าดินนาชั้นบนของประเทศอื่นๆ ทั้งหมด (พม่า 0.08, มาเลเซีย 0.04, ฟิลิปปินส์ 0.06 และญี่ปุ่น 0.08 %) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) โดยสาเหตุที่ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ต่ำ เกิดจากหลายสาเหตุ เช่น 1) วัตถุต้นกำเนิดดินนั้นมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำอยู่แล้วหรืออาจเกิดการชะล้างจนทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในดินต่ำ และ 2) ในดินมีปริมาณฟอสฟอรัสสูง แต่อยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้เนื่องจากถูกตรึงอยู่กับธาตุอื่นๆ ในกรณีที่ดินมีค่า pH ต่ำหรือเป็นกรด ฟอสฟอรัสถูกตรึงด้วยปฏิกิริยาของเหล็กและอลูมินัม ในขณะที่ดินมีค่า pH สูงหรือเป็นด่าง ฟอสฟอรัสถูกตรึงด้วยปฏิกิริยาของแคลเซียมและแมกนีเซียม จากสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้พืชดูดฟอสฟอรัสจากดินได้น้อยลง เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัสจะแสดงอาการชะงักการเจริญเติบโต ลำต้นแคระแกร็น แตกกอน้อย การออกดอกติดผลไม่สมบูรณ์ และการพัฒนาระบบรากช้า (Dobermann and Fairhurst, 2000) เมื่อเจอกับสภาวะขาดฟอสฟอรัส พืชจะมีการปรับตัวเพื่อให้สามารถดูดฟอสฟอรัสในดินได้มากขึ้น เช่น การเพิ่มความยาวรากและจำนวนราก การแตกรากแขนงบริเวณดินชั้นบนให้มากขึ้น เนื่องจากบริเวณดินชั้นบนมักมีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่าดินชั้นล่าง (Lynch and Brown, 2001) รวมทั้งพัฒนาระบบรากให้เจริญไปในทิศทางที่อุดมไปด้วยฟอสฟอรัสอีกด้วย (Smith, 2001) อย่างไรก็ตามการเพิ่มขนาดของระบบรากโดยเพิ่มความยาวรากและจำนวนรากให้มากขึ้นอาจไม่เพียงพอต่อการหาฟอสฟอรัสในดิน การเพิ่มพื้นที่รากโดยการเพิ่มขนรากและเพิ่มความยาวขนรากให้มากขึ้นเป็นสิ่งสำคัญต่อการดูดธาตุอาหารที่มีการเคลื่อนที่ในดินต่ำ เช่น ฟอสฟอรัส (Jungk, 2001) พืชบางชนิดหรือบางสายพันธุ์มีการพัฒนาระบบรากให้มีขนาดใหญ่และแผ่กระจายรากไปในดินมากกว่าปกติ เพื่อให้สามารถดูดหาฟอสฟอรัสในดินได้สูงขึ้น (Jungk, 2001) ลักษณะการปรับตัวของระบบรากดังกล่าวทำให้พืชที่ขาด

ฟอสฟอรัสมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน (root : shoot ratio) สูงกว่าพืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอ (Gaume et al., 2001) ซึ่งการพัฒนาระบบรากให้ใหญ่ขึ้นนี้เป็นผลมาจากการลดการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดิน อาหารที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงถูกส่งมาพัฒนาระบบรากมากขึ้น (Cakmak et al., 1994) นอกจากนี้รากพืชบางชนิดสามารถสร้างกลุ่มรากหรือรากคลัสเตอร์ (cluster root) รากคลัสเตอร์มักมีขนรากขึ้นปกคลุมอย่างหนาแน่นเป็นกระจุกคล้ายแปรง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวรากให้มากขึ้น อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์และหลั่งกรดอินทรีย์ กรดฟอสฟาเทสได้อีกด้วย (Lambers et al., 2006) นอกจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาแล้ว ในสภาวะที่พืชขาดฟอสฟอรัส พืชยังสามารถหลั่งกรดอินทรีย์จากราก เช่น citrate และ malate (Neumann and Römheld, 1999; Dechassa and Schenk, 2004) กรดอินทรีย์เหล่านี้จะเข้าไปแลกเปลี่ยนประจุหรือสลายพันธะฟอสเฟตที่ถูกตรึงในดิน (Raghothama and Karthikeyan, 2005) ซึ่งช่วยย่อยฟอสเฟตรูปที่ไม่ละลายน้ำให้สามารถละลายน้ำได้และเร่งปฏิกิริยาย่อยอินทรีย์ฟอสเฟตให้มีขนาดเล็กลงเร็วขึ้น (Playsted et al., 2006) นอกจากบทบาทในการละลายฟอสเฟตแล้ว สารอินทรีย์เหล่านี้ยังมีส่วนช่วยในการลดความเป็นพิษของอลูมินัมต่อระบบรากในพืชบางชนิดอีกด้วย (Ma, 2000) สำหรับรากพืชบางชนิดหรือบางสายพันธุ์สามารถหลั่งกรดฟอสฟาเทสและไฟเทส (phytases) ซึ่งเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่สามารถย่อยสลายอินทรีย์ฟอสเฟตให้เป็นอนินทรีย์ฟอสเฟตเร็วขึ้น (Tarafdar and Claassen, 1988; Tarafdar and Claassen, 2001; Richardson et al., 2011) โดยสารต่างๆ ที่รากหลั่งออกมาขึ้นอยู่กับชนิดของพืชนั้นๆ (Ohwaki and Hirata, 1992; Dechassa and Schenk, 2004) นอกจากนี้พืชยังมีการปรับตัวโดยลดปริมาณความต้องการฟอสฟอรัสลงเพื่อให้สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ (Yan et al., 2001) ด้วยวิธีการรักษาสมดุลของฟอสฟอรัสในเซลล์ โดยเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสที่เก็บสะสมไว้ในแวคิวโอลมายังไซโตพลาสซึม เพื่อให้กระบวนการต่างๆ ในไซโตพลาสซึมสามารถดำเนินต่อไปได้ (Mimura et al., 1996) หรือเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสที่สะสมในใบเก่าไปยังใบที่เกิดใหม่ เพื่อรักษาสมดุลของระดับฟอสฟอรัสในใบที่เกิดใหม่ (Akhtar et al., 2008) อีกทั้งพืชยังหลีกเลี่ยงกระบวนการที่ต้องใช้พลังงาน (ATP) มาก โดยใช้สารประกอบไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate, PP_i) เป็นแหล่งพลังงานทดแทน และเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีการใช้ฟอสฟอรัสน้อยลง เช่น ใช้ซัลโฟลิพิดและกาแลกโทลิพิดแทนฟอสโฟลิพิดในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Raghothama, 1999; Vance et al., 2003)

ลักษณะการปรับตัวของพืชเมื่อเจอสภาวะขาดฟอสฟอรัสดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น เป็นลักษณะที่ขึ้นอยู่กับศักยภาพของพืชแต่ละชนิดหรือแต่ละสายพันธุ์ สำหรับพันธุ์ข้าวในประเทศไทยนั้นมีความหลากหลายอย่างมาก ด้วยความหลากหลายของพันธุ์ข้าวนี้ส่งผลให้ข้าวแต่ละสายพันธุ์มีศักยภาพที่แตกต่างกันออกไปด้วย พันธุ์ข้าวที่มีประสิทธิภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัสจะมีการเจริญเติบโตและสามารถให้ผลผลิตได้สูงกว่าพันธุ์ที่มีศักยภาพในการดูดใช้ต่ำเมื่อเจอสภาวะดินมีฟอสฟอรัสต่ำ การ

เลือกใช้พันธุ์ข้าวที่มีศักยภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัสในพื้นที่ที่ประสบปัญหาขาดฟอสฟอรัสนั้น จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการจัดการที่เหมาะสม อีกทั้งการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสให้เหมาะสมตามความต้องการของข้าวแต่ละพันธุ์หรือตามความต้องการของข้าวในแต่ละช่วงอายุนั้น จะช่วยยกระดับให้การเพาะปลูกข้าวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เกษตรกรสามารถลดต้นทุนการผลิตและไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสแบบฟุ่มเฟือย

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าระบบรากของพืชมีการตอบสนองต่อระดับหรือปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างรวดเร็ว ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวที่มาจากระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกันต่อความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร และหาระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส และเป็นแนวทางในการจัดการธาตุฟอสฟอรัสให้เหมาะสมกับการปลูกข้าวในแต่ละช่วงอายุได้อย่างเหมาะสม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อหาลักษณะการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส
2. เพื่อหาระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงลักษณะการปรับตัวทางสัณฐานวิทยาของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส
2. ได้ทราบถึงระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า
3. ใช้เป็นแนวทางในการจัดการธาตุฟอสฟอรัสให้เหมาะสมกับการปลูกข้าวในแต่ละช่วงอายุ

ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาข้าว 4 พันธุ์ ซึ่งเป็นตัวแทนจากพันธุ์ข้าวนาสวน 2 พันธุ์ คือ ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 49 ตัวแทนจากพันธุ์ข้าวไร่ 2 พันธุ์ คือ อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน

2. ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัสในสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าว ซึ่งดัดแปลงจาก Yoshida et al. (1976)

3. หาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในระยะกล้า

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช จัดอยู่ในกลุ่ม macronutrient เนื่องจากพืชต้องการในปริมาณมาก แหล่งกำเนิดของฟอสฟอรัสนั้นได้มาจากหินแร่ธรรมชาติ ซึ่งเป็นทรัพยากรที่ใช้แล้วหมดไปและไม่หมุนเวียนในช่วงระยะเวลาสั้น ตรงข้ามกับไนโตรเจนซึ่งมีอยู่ในอากาศมากถึง 78 % และมีการหมุนเวียนตลอดเวลา ในขณะที่ธาตุไนโตรเจนสูญเสียง่ายในดินโดยหลายกระบวนการ เช่น denitrification, leaching และ volatilization แต่ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่มักอยู่ที่เดิมในจุดหรือบริเวณที่ใส่ลงไปในดิน เนื่องจากทำปฏิกิริยากับแคลเซียมหรือเหล็ก และอลูมินัมในสารละลายดิน ทำให้เกิดเป็นสารประกอบในรูปที่ไม่ไม่ละลายน้ำและไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช แม้ว่าการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ดี เมื่อใส่ลงไปในดินแล้ว มักมีเพียงปริมาณ 15 – 20 % ของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่เท่านั้นที่สามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ดังนั้นการจัดการธาตุฟอสฟอรัสให้มีประสิทธิภาพ จึงอาจเป็นเรื่องที่ยุ่งยากได้โดยเฉพาะในดินที่มีการตรึงฟอสฟอรัสสูงและดินประเภท ultisols และ oxisols ด้วยเหตุดังกล่าวทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่มีอยู่ในดินจึงไม่มีหรือมีความสัมพันธ์น้อยมากกับปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืช การทำความเข้าใจเกี่ยวกับความสัมพันธ์และปฏิสัมพันธ์ของฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ ในดิน และปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสจึงมีความสำคัญในการจัดการธาตุฟอสฟอรัสให้มีประสิทธิภาพ (อรวรรณ, 2551)

การหมุนเวียนฟอสฟอรัสในธรรมชาติ

ฟอสฟอรัสมีอยู่ในธรรมชาติหลายแหล่ง แต่มักไม่พบฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของธาตุฟอสฟอรัสเดี่ยว (ธาตุเดี่ยวปกติเป็น P^{+5}) เพราะฟอสฟอรัสไวต่อปฏิกิริยาสูงมากและรวมตัวกับธาตุออกซิเจนเมื่อสัมผัสกับอากาศ โดยปกติแล้วฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในธรรมชาติอยู่ในรูปที่เป็นส่วนหนึ่งของ phosphate ions คือ ประกอบด้วย phosphorus atom และ oxygen atom โดยรูปที่มีมากที่สุด คือ orthophosphate ประกอบด้วย oxygen 4 atom เช่น PO_4^{-3} orthophosphate ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ $H_2PO_4^-$ ในสภาพที่ดินเป็นกรด และอยู่ในรูปของ HPO_4^{-2} ในสภาพที่ดินเป็นด่าง ฟอสฟอรัสต่างจากไนโตรเจนเนื่องจากแหล่งเก็บสะสมฟอสฟอรัสไม่มีในบรรยากาศ แหล่งของฟอสฟอรัสมีอยู่ในน้ำซึ่งละลายในรูปของ PO_4^{-3} เป็นส่วนใหญ่และส่วนน้อยในรูป HPO_4^{-2} อีกแหล่งเก็บสะสมหนึ่งของฟอสฟอรัส คือ ในสิ่งมีชีวิต ซึ่งฟอสฟอรัสอยู่ในเซลล์ของพืชและสัตว์ในรูปของ Deoxyribonucleic

acid (DNA), Ribonucleic acid (RNA), Adenosine Triphosphate (ATP) และในรูปของ $Ca(PO_4)_3(OH, Cl, F)$ ในกระดูก ฟัน และเปลือกหอย เป็นต้น นอกจากในแหล่งน้ำและสิ่งมีชีวิตแล้ว แหล่งของฟอสฟอรัสยังอยู่ในพื้นผิวโลก คือ ในรูปของหินแร่ต่างๆ ซึ่งมีส่วนประกอบของฟอสฟอรัสเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (<0.2 % โดยน้ำหนัก) ฟอสฟอรัสหินแร่เป็นส่วนประกอบในกลุ่มแร่ apatite ได้แก่ แร่ Fluorapatite-$Ca_5(PO_4)_3F$, Chlorapatite-$Ca_5(PO_4)_3Cl$ และ hydroxyapatite-$Ca_5(PO_4)_3OH$ ในพื้นที่ที่มีการสะสมของ apatite มาก มักเป็นแหล่งแร่ที่รู้จักกัน คือ หินฟอสเฟต (phosphate rock) แร่ Fluorapatite ที่ได้มาจากสารอินทรีย์ที่เรียกว่าเป็น crystalline apatite และถ้าได้มาจากการสะสมของสารอินทรีย์ เช่น กระดูกของสัตว์ เรียกแร่ชนิดนี้ว่า phosphorite ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ cryptocrystalline จากทั้งสามแหล่งดังกล่าว พบว่า ฟอสฟอรัสมีการหมุนเวียนทั้งหมดอยู่ในระหว่าง 3 แหล่งนี้ คือ ดินและหินแร่ สิ่งมีชีวิต และน้ำ ซึ่งการหมุนเวียนในบางแหล่งใช้ระยะเวลานานมาก เช่น การสะสมของฟอสฟอรัสจนเกิดเป็นหินแร่ เป็นต้น (อรวรรณ, 2551)

การหมุนเวียนฟอสฟอรัสในดิน

พืชดูดใช้ฟอสเฟตในสารละลายดินซึ่งอยู่ในรูปของ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{-2} เมื่อพืชดูดใช้จึงทำให้ฟอสเฟตในสารละลายดินลดลง ฟอสฟอรัสจากแหล่งสะสมอื่นๆ จึงละลายออกมาในสารละลายดินเพิ่มขึ้นเพื่อให้เกิดความสมดุล กล่าวคือ ฟอสฟอรัสในส่วนที่เป็นแร่ปฐมภูมิและแร่ทุติยภูมิสามารถละลายให้ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{-2} คืนกลับสู่สารละลายดิน และฟอสเฟตในสารละลายดินสามารถตกตะกอนเป็นของแข็งได้อีก สำหรับฟอสเฟตที่อยู่ในอินทรียวัตถุและในเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดกระบวนการปลดปล่อยธาตุอาหาร คือ กระบวนการ mineralization ให้ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์คืนกลับสู่สารละลายดินได้ ในทางกลับกันเมื่อฟอสฟอรัสที่อยู่ในสารละลายดินถูกใช้โดยจุลินทรีย์ดินทำให้ฟอสฟอรัสส่วนนั้นไม่เป็นประโยชน์ คือ เกิดกระบวนการ immobilization นั่นเอง สำหรับฟอสฟอรัสในส่วนที่ดูดซับบนผิวอนุภาคคอลลอยด์ดินเป็นฟอสฟอรัสที่แลกเปลี่ยนได้ สามารถแลกเปลี่ยนกับฟอสฟอรัสในสารละลายดินได้เช่นกัน นอกจากนี้ ถ้าใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสลงไปในดิน เมื่อปุ๋ยละลายน้ำจะเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในสารละลายดิน และในทางกลับกันฟอสเฟตที่ละลายได้จากปุ๋ยสามารถตกตะกอนกับแคลเซียม อลูมินัม หรือเหล็ก กลายเป็นรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ได้เช่นกัน (อรวรรณ, 2551)

สารประกอบและปริมาณของฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสในดินเกือบทั้งหมด ปรากฏอยู่ในรูปของออร์โทฟอสเฟต หรือพวกที่แปลงสภาพมาจากกรดโทฟอสฟอริค (H_2PO_4) เกือบทั้งสิ้น ฟอสเฟตในดินแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ อินทรีย์ฟอสเฟตกับอนินทรีย์ฟอสเฟต ในดินทั่วๆ ไป มีฟอสเฟตทั้งสองส่วนนี้ต่างกัน พวกอินทรีย์ฟอสเฟตมีแนวโน้มที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของอินทรียวัตถุในดิน ดังนั้นในชั้นดินล่างจึงมีอินทรีย์ฟอสเฟตน้อยและมีมากในดินชั้นบน จากผลการวิเคราะห์ดินทั่วๆ ไป พบว่าดินชั้นบนมีอินทรีย์ฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 0.3 ถึง 95 % ของฟอสเฟตทั้งหมดในดิน แต่ในดินที่ใช้ในการเขตกรรมทั่วๆ ไป มีอนินทรีย์ฟอสเฟตมากกว่า 90 % ของฟอสเฟตในดิน (ดินลึก 1 เมตร) อย่างไรก็ตาม จากการสำรวจหาปริมาณฟอสฟอรัสในดินนาของประเทศไทยและประเทศในแถบเอเชีย พบว่า ในดินนาชั้นบนของประเทศไทยมีฟอสฟอรัสเฉลี่ยเพียง 0.02 % ต่ำกว่าดินนาชั้นบนของประเทศอื่นๆ ทั้งหมด (พม่า 0.08, มาเลเซีย 0.04, ฟิลิปปินส์ 0.06, และญี่ปุ่น 0.08 %) ปริมาณของฟอสฟอรัสในดินในแต่ละจุดบนพื้นที่หรือตามแนวความลึก (หรือหน้าตัดดิน) แตกต่างกันไปตามชนิดของวัตถุต้นกำเนิดดิน การชะล้าง และการใช้ที่ดิน ถ้าดินนั้นกำเนิดมาจากวัตถุชนิดเดียวกัน พวกดินเนื้อละเอียด มักมีฟอสฟอรัสมากกว่าดินเนื้อหยาบ ดินที่ถูกใช้นานหรือถูกชะล้างมากกว่า มักมีปริมาณฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่าดินป่าที่เปิดใหม่ และปริมาณของฟอสฟอรัสในดินชั้นบนมักมีน้อยกว่าดินชั้นล่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในชั้นดินที่มีการชะล้างมากๆ คือ ชั้น A_2 ส่วนดินชั้นที่มีการสะสมของสารที่ถูกชะล้างมาก คือ ชั้น B_2 มักมีฟอสฟอรัสมากกว่าทุกชั้นของดินในหน้าตัดดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1. ฟอสเฟตอินทรีย์

ฟอสเฟตอินทรีย์ในดินประกอบด้วยสารประกอบหลายชนิด โดยเฉลี่ยแล้วพบว่ามี nucleic acid 2 % phospholipid 1 % และ inositol phosphate 35 % ส่วนอีก 68 % ของอินทรีย์ฟอสเฟตยังไม่สามารถจำแนกชนิดว่าเป็นสารประกอบใด (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2. ฟอสเฟตอนินทรีย์

ฟอสเฟตอนินทรีย์ในดิน มีทั้งพวกที่เป็นไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินและพวกที่เป็นสารประกอบหรือแร่ที่เป็นของแข็งอยู่ในดิน สารที่เป็นของแข็งของฟอสเฟตในดินมีมากมาย ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 พวก คือ

2.1 พวกแร่ (mineral form) ในดินมีทั้งที่เป็นแร่ปฐมภูมิของดิน เช่น flurapatite,$3Ca_3(PO_4)_2.CaF_2$ และ Chlorapatite, $3Ca_3(PO_4)_2.CaCl_2$ ซึ่งอยู่ในหินอัคนี และแร่ทุติยภูมิ ซึ่งมีจำนวนมาก เนื่องจากไอออนฟอสเฟตมีความรวดเร็วต่อการทำปฏิกิริยามาก

ตารางที่ 1 ตัวอย่างแร่ฟอสเฟตอนินทรีย์และสูตรเคมีของฟอสฟอรัสที่อยู่ในแร่แต่ละชนิด

แร่	สูตรเคมี
carbonate apatite	$3Ca_3(PO_4)_2.CaCO_3$
oxy apatite	$3Ca_3(PO_4)_2.CaO$
hydroxy apatite	$3Ca_3(PO_4)_2.Ca(OH)_2$
strengite	$FePO_4.2H_2O$ (ferric phosphate)
vivianite	$Fe_3(PO_4)_2.8H_2O$ (ferrous phosphate)
variscite	$AlPO_4.2H_2O$
barrandite	$(Al.Fe)PO_4.2H_2O$
wavellite	$Al_8(OH)_3(PO_4)_2.5H_2O$
taranakite	$K_3Al_5H_6(PO_4)_8.18H_2O$
crandallite	$CaAl_3(PO_4)_2(OH)_6$
gorceixite	$BaAl_3(PO_4)_2(OH)_5.H_2O$
fluorencite	$CaAl_3(PO_4)_2(OH)_6$
dicalcium phosphate	$CaHPO_4$, $CaHPO_4.2H_2O$
monocalcium phosphate	$Ca(H_2PO_4)_2$
salts of K NH_4 such as	$(K,NH_4)(Al,Fe)_3H_8(PO_4)_6.6H_2O$
occluded phosphate	$Fe_2(OH)_3PO_4$ in solid solution with FeO(OH)

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

พวกแร่ใหม่เหล่านี้เกิดจากการที่แร่ดั้งเดิมผุพังให้ไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับแคตไอออนต่างๆ เช่น Ca^{+2}, Fe^{+2}, Fe^{+3}, Al^{+3}, NH_4^+, K^+ และ Mg^{+2} เกิดเป็นสารประกอบในรูปแร่ต่างๆ แต่รวมเป็นสารประกอบชนิดใดขึ้นอยู่กับปริมาณการผุพัง (weathering) ของแร่ชนิดต่างๆ ชนิดและปริมาณของแคตไอออนและแอนไอออน ความเป็นกรดเป็นด่างของดินและสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ในดินเกิดใหม่มักมีพวกแร่แคลเซียมฟอสเฟตมากกว่า 80 % และมีอลูมินัมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟตเพียงเล็กน้อยเท่านั้น หรือในดินที่มีการผุพังมากและเป็นเวลานาน เช่น ดินของฮาวายมี occluded phosphate มากกว่า 60 % อลูมินัมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟตมากกว่า 20 % และมีต่ำมากในรูปแคลเซียมฟอสเฟต ดินที่มีปฏิกิริยาเป็นด่างมักมีปริมาณแคลเซียมฟอสเฟต

มากกว่าเหล็กฟอสเฟต อลูมินัมฟอสเฟต และ occluded phosphate แต่ถ้าเป็นดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรด มักมีปริมาณเหล็กฟอสเฟต อลูมินัมฟอสเฟต และ occluded phosphate มากกว่าแคลเซียมฟอสเฟต อย่างไรก็ตามพวกแร่ฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยมาก ถ้าเป็นแร่ที่เกิดใหม่ละลายได้ดีกว่าแร่ที่เกิดนานแล้ว หรือแร่ที่มีโครงสร้างโมเลกุลสลับซับซ้อนมากๆ ละลายได้ยากกว่าแร่ที่มีโครงสร้างโมเลกุลอย่างง่าย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.2 สารประกอบฟอสเฟตที่เกิดจากการใส่ปุ๋ยลงไปในดิน เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ดี เช่น $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$, $NH_4H_2PO_4$ และ $(NH_4)_2HPO_4$ ลงไปในดินที่มีแคลเซียมหรือแมกนีเซียมสูง เกิดเป็นสารฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าเดิมเสมอ เช่น อาจ เปลี่ยนเป็น dibasic calcium phosphate dehydrate, $CaHPO_4.2H_2O$ หรือ $MgNH_4PO_4.6H_2O$, $Mg(PO_4)_2.22H_2O$, $Ca(NH_4)_2.H_2O$ ซึ่งละลายได้น้อยกว่า $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$ แล้วเปลี่ยนไปเป็น octa-calcium phosphate, $Ca_8H_2(PO_4)_6.H_2O$ ซึ่งค่อนข้างเสถียร ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อย และในที่สุดอาจเปลี่ยนไปเป็น hydroxyl apatite, $Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$ และ fluorapatite, $Ca_{10}F_2(PO_4)_6$ ซึ่งละลายยากในที่สุด แต่การใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายได้ดีในดินที่มีธาตุเหล็กมาก หรือดินที่ผ่านการผุพังมานานมักเกิดเป็นสารฟอสเฟตชนิดใดบ้างยังมีการรายงานข้อมูลน้อย แต่คาดว่าเกิดเป็นเหล็กฟอสเฟตที่มีโมเลกุลใหญ่และสลับซับซ้อน ทำให้ฟอสเฟตละลายได้ยากยิ่งขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.3 Adsorbed phosphate ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่ตามผิวของ hydrous oxide ของเหล็ก อลูมินัม และแร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay) ฟอสเฟตเหล่านี้ถูกตรึง และยากแก่การปลดปล่อยกลับสู่สารละลายดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

การย่อยสลายอินทรีย์ฟอสเฟตในดิน

อินทรีย์ฟอสเฟตเป็นส่วนประกอบประมาณ 15 ถึง 80 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดิน ส่วนอินทรียวัตถุในดินมักประกอบไปด้วยสัดส่วนของ C/N/P/S ในอัตราโดยประมาณ 140:10:1.3:1.3 ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับอินทรียวัตถุในดินทำให้เราสามารถคาดคะเนปริมาณของอินทรีย์ฟอสเฟตได้ แหล่งเริ่มต้นของอินทรีย์ฟอสเฟต คือ ซากพืช ซากสัตว์ ซึ่งถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ดินและปลดปล่อยอนินทรีย์ฟอสเฟตออกมา เรียกกระบวนการนี้ว่า P mineralization และการที่อนินทรีย์ฟอสเฟตถูกใช้และกลับไปอยู่ในสิ่งมีชีวิตอีก เรียกว่าเป็น P immobilization กระบวนการทั้งสองกระบวนการนี้ คล้ายกับ N mineralization และ N immobilization สำหรับอินทรีย์ฟอสเฟตที่มีอยู่ในอินทรียวัตถุมักถูกตัดโดยเอนไซม์ที่เราเรียกว่า phosphatases acid ซึ่งผลิตจากรากพืชบางชนิดและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินหลายชนิด (อรวรรณ, 2551)

รูปของฟอสฟอรัสที่พืชดูดใช้

โดยทั่วไปพืชดูดใช้ฟอสฟอรัสในรูปของไอออนฟอสเฟต ซึ่งส่วนใหญ่เป็น monobasic orthophosphate ($H_2PO_4^-$) และ dibasic orthophosphate (HPO_4^{-2}) ส่วน tribasic orthophosphate (PO_4^{-3}) เป็นรูปที่พืชอาจดูดใช้ได้ แต่มีปริมาณอยู่น้อยมากในสารละลายเมื่อเทียบกับพวก mono และ dibasic orthophosphate แม้มีการศึกษาในสารละลายธาตุอาหารพบว่าพืชสามารถดูดใช้ฟอสฟอรัสจากอินทรีย์ฟอสเฟตในรูปของ phytin ได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการ mineralization แต่ในสภาพดินธรรมชาติเป็นไปได้ในปริมาณที่น้อยมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดิน

1. ชนิดของสารฟอสเฟต

1.1 Solution P เป็นกลุ่มฟอสเฟตที่ละลายในสารละลายดินในรูปของ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{-2} ซึ่งสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที

1.2 Labile P เป็นกลุ่มฟอสเฟตที่ถูกดูดซับหรือเกาะยึดบนผิวอนุภาคดิน Labile P ยังรวมถึงส่วนที่เป็นอินทรียวัตถุในดินและฟอสเฟตที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ที่กำลังสลายตัว ซึ่งสามารถเติมฟอสเฟตให้กับสารละลายดินได้ทันที

1.3 Non-labile P เป็นกลุ่มฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำอยู่ในส่วนของแร่ปฐมภูมิ ซึ่งปลดปล่อยฟอสเฟตในอัตราที่ช้ามาก ในส่วนของ non-labile P นี้ ยังรวมถึงอินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในอินทรียวัตถุและในเซลล์จุลินทรีย์กลุ่มที่สลายตัวยากและยังไม่สลายตัวด้วย (อรวรรณ, 2551)

2. ปฏิกิริยาดิน

ปฏิกิริยาดิน คือ ระดับของสภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน ซึ่งแสดงด้วยค่าความเป็นกรด – เบส (pH) ของดิน โดยอธิบายสภาพของดินที่ค่าความเป็นกรด – เบสต่างๆ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลักษณะของสภาพกรดและสภาพด่างของดินที่ค่าความเป็นกรด – เบส ในแต่ละช่วง

ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)	สภาพกรดหรือสภาพด่างของดิน
<3.5	กรดรุนแรงมากที่สุด
3.5 - 4.5	กรดรุนแรงมาก
4.6 - 5.0	กรดจัดมาก
5.1 - 5.5	กรดจัด
5.6 - 6.0	กรดปานกลาง
6.1 - 6.5	กรดเล็กน้อย
6.6 - 7.3	กลาง
7.4 - 7.8	ด่างเล็กน้อย
7.9 - 8.4	ด่างปานกลาง
8.5 - 9.0	ด่างจัด
>9.0	ด่างจัดมาก

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

สำหรับการละลายได้ของเหล็กฟอสเฟต และอลูมินัมฟอสเฟตร่วมกับ hydrous oxide ของเหล็กและอลูมินัม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาดิน สามารถอธิบายด้วยสมการ ดังนี้

$$Al(H_2PO_4)_3 + 3OH^- \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3H_2PO_4^-$$

เมื่อ pH ดินเพิ่มขึ้น หรือความเป็นด่างของดินเพิ่มขึ้น เหล็กฟอสเฟตหรืออลูมินัมฟอสเฟตสามารถปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตออกมาสู่สารละลายดินได้ ในขณะที่เหล็กหรืออลูมินัมยังคงสภาพเป็นสารที่ไม่ละลายในรูปไฮดรอกไซด์ (hydroxide) และในทางตรงกันข้าม ถ้า pH ลดลงหรือเพิ่มความเป็นกรดในดินหรือถ้ามีไอออนฟอสเฟตมากเกินไป จะเกิดปฏิกิริยาผันกลับ คือ เหล็ก ไฮดรอกไซด์หรืออลูมินัมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยาจับกับไอออนฟอสเฟต เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟตหรือ อลูมินัมฟอสเฟตที่ละลายยากขึ้น

ในกรณีของดินที่มีน้ำท่วมขัง (ดินนา) ความเป็นกรดของดินมักลดลง (pH สูงขึ้น) เนื่องจากการขังน้ำเป็นการเพิ่มความเป็นด่างในดิน และการเปลี่ยนสภาพของสารจาก oxidized form มาเป็น reduced form เช่น จาก ferric phosphate เป็น ferrous phosphate ซึ่งส่งผลให้ไอออนฟอสเฟต

ละลายออกมาได้มากขึ้น การละลายได้ของพวกแคลเซียมฟอสเฟตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาดินแสดงได้ดังนี้

$$Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6 + 14H^+ \rightleftharpoons 10Ca^{++} + 2H_2O + 6H_2PO_4^-$$

(hydroxyl apatite)

พวกแคลเซียมฟอสเฟตละลายได้มากขึ้นเมื่อความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (pH ลดลง) เนื่องจากไอออนไฮโดรเจนสามารถจับตัวกับไอออนฟอสเฟต และในกรณีของ hydroxyl apatite ยิ่งละลายได้ดีเมื่อความเป็นกรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอออนไฮดรอกซิล (OH^-) ชอบรวมตัวกับไอออนไฮโดรเจนและเกิดเป็นน้ำ จึงยิ่งส่งเสริมการละลายมากขึ้นในสภาพที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปสารอินทรีย์ฟอสเฟตเมื่ออยู่ในดินกรดอ่อนถึงด่างเล็กน้อย มักถูกจุลินทรีย์เข้าย่อยสลายให้เป็นไอออนฟอสเฟตได้ง่ายกว่าช่วงความเป็นกรด – ด่างอื่นๆ ความเป็นกรด – ด่างของดินยังมีความสำคัญต่อชนิดหรือรูปของไอออนออร์โทฟอสเฟตด้วย เช่น ในสารละลายดินที่เป็นกรดฟอสเฟตมักอยู่ในรูป H_3PO_4, $H_2PO_4^-$, HPO_4^{-2} และ PO_4^{-3} ในกรณีที่สารละลายดินเป็นกรดจัด หรือ pH ต่ำกว่า 5 ฟอสเฟตส่วนใหญ่มักอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$, H_3PO_4 และในกรณีที่สารละลายดินเป็นด่างมาก หรือ pH สูงกว่า 9 ฟอสเฟตส่วนใหญ่มักอยู่ในรูป HPO_4^{-2}, PO_4^{-3} แต่ถ้าในช่วง pH 5 – 9 ไม่ค่อยพบ H_3PO_4 และ PO_4^{-3} มีแต่ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{-2} ในสัดส่วนดังตารางที่ 3 (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

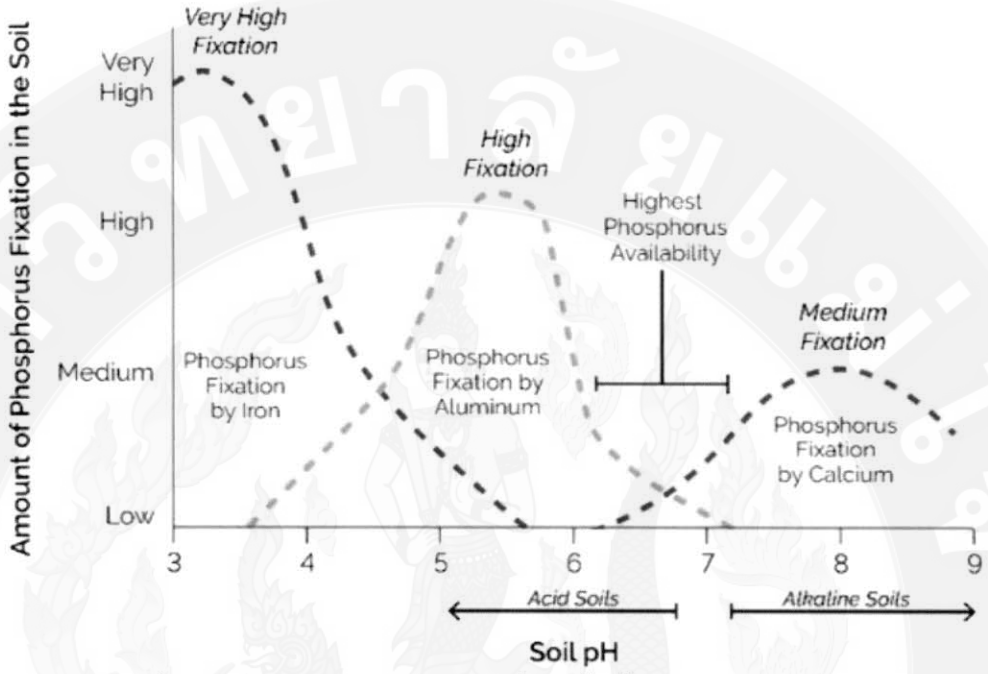
ตารางที่ 3 ความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ

pH ของดิน	ความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ (เปอร์เซ็นต์)		
	$H_2PO_4^-$	HPO_4^{-2}	$PO_4^{-3} + H_3PO_4$
5.0	99.3	0.6	0.1
7.2	50.0	50.0	0.0
9.0	1.5	98.4	0.1

ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548)

เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายได้ดีลงไปในดิน ไอออนฟอสเฟตที่ละลายได้มักถูกตรึงเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าดินนั้นมี pH สูงหรือต่ำ เมื่อ pH ของดินต่ำ ฟอสเฟตถูกตรึงโดยไอออนบวกที่ละลายได้พวก Fe^{+2}, Al^{+3} และ hydrous oxide ของเหล็ก อลูมินัม และแมงกานีส และค่อยๆ ลดปริมาณการตรึงลง

เมื่อ pH ของดินสูงขึ้นจาก 4 เป็น 7 แต่ในเวลาเดียวกัน ฟอสเฟตมักถูกตรึงโดย Ca^{+2}, Mg^{+2} และ $CaCo_3$ เกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟตปริมาณมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อ pH ของดินสูงขึ้นจาก 6 เป็น 8



ภาพที่ 1 สัดส่วนของการตรึงฟอสเฟตซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับ pH ต่างๆ ของดิน

ที่มา : Jeschke (2017)

จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของการตรึงฟอสเฟต ซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับ pH ต่างๆ ของดิน เห็นได้ว่าเมื่อดินมี pH อยู่ระหว่าง 6 ถึง 7 มีปริมาณฟอสเฟตที่อยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์มากที่สุด แต่มิได้หมายความว่าระดับของปริมาณนี้ในดินเพียงพอแก่ความต้องการของพืชที่ปลูก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณแร่ฟอสเฟตและอำนาจในการตรึงฟอสเฟตของดิน ถ้าดินมีอำนาจในการตรึงฟอสเฟตสูง ส่งผลให้มีปริมาณฟอสเฟตที่พืชใช้ได้ต่ำ และในทางตรงกันข้าม ถ้าดินมีอำนาจในการตรึงต่ำ ปริมาณของฟอสเฟตที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3. ปริมาณของแคตไอออนและสารประกอบต่างๆ ที่ทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต

3.1 ไอออนเหล็กและอลูมินัมที่ละลายในดิน ไอออนฟอสเฟตในสารละลายดิน ทำปฏิกิริยาได้ง่ายและรวดเร็วมากกับ Fe^{+2}, Fe^{+3} และ Al^{+3} สารประกอบที่เกิดขึ้นส่วนมากมักละลายน้ำได้ยาก และมีผลทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดินลดต่ำลง สารประกอบต่างๆ ของเหล็กและอลูมินัมที่สะสมอยู่ในดินมักละลายให้แคตไอออน Fe^{+2}, Fe^{+3} และ Al^{+3} มากขึ้นเมื่อดินเป็นกรดจัด แต่

ปริมาณการละลายลดลงเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น ดังนั้นยิ่งดินเป็นกรดจัดการตรึงฟอสเฟตยิ่งมากขึ้น ทำให้ปริมาณของไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินลดลงตามลำดับ เนื่องจากไอออนฟอสเฟตถูกเปลี่ยนให้เป็นสารอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายยากมากขึ้น ส่งผลให้พืชดูดใช้ได้น้อยลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3.2 Hydrous oxides สำหรับ hydrous oxides ของเหล็ก อลูมินัม และแมงกานีสมีอยู่ในดินทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแถบเขตร้อนและเขตชุ่มชื้น hydrous oxides ของเหล็ก อลูมินัม และแมงกานีส สามารถดูดซับไอออนฟอสเฟตได้ปริมาณมาก กระบวนการนี้เรียกว่า polar adsorption นอกจากนี้พวก hydrous oxides เหล่านี้ยังอาจทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟตเกิดเป็นสารที่ละลายได้ยากอีกด้วย ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกตรึงด้วย hydrous oxides ของเหล็ก อลูมินัม และแมงกานีสมักลดลงเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3.3 แร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay mineral) แร่ดินเหนียวพวก kaolinite, montmorillonite และ illite สามารถตรึงฟอสเฟตได้โดยที่แร่ประเภทนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต โดยกระบวนการ surface reaction คือ กระบวนการที่ไอออนฟอสเฟตเข้าแทนที่ hydroxyl group ที่อยู่รอบๆ ผิวผลึกของแร่ดินเหนียวซิลิเกต และทำปฏิกิริยากับอะตอมของอลูมินัมหรืออะตอมของเหล็กที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ซิลิเกต ไอออนฟอสเฟตจึงกลายเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียว ดังสมการ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

$$\mathbf{Al} + H_2PO_4^- + 2H_2O \rightleftharpoons 2H^+ + \mathbf{Al(OH)_2H_2PO_4}$$

(silicate crystal) แร่ฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก

3.4 แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต (carbonates of calcium and magnesium) ดินที่มี pH สูงมักมี $CaCO_3$ หรือ $MgCO_3$ สะสมอยู่ และมี Ca^{+2} และ Mg^{+2} มากด้วย (calcareous soil) ไอออนฟอสเฟตทำปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็วกับ Ca^{+2} และ Mg^{+2} และบางกรณีอาจทำปฏิกิริยาได้กับ $CaCO_3$ แล้วเกิดเป็นสารแคลเซียมหรือแมกนีเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก และพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังสมการ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

$$3Ca^{+2} + 2H_2PO_4^- \rightleftharpoons Ca_3(PO_4)_2 + 4H^+$$

ละลาย ไม่ละลาย

$$3CaCO_3 + 2H_2PO_4^- \rightleftharpoons Ca_3(PO_4)_2 + 3HCO_3^- + H^+$$

ละลาย ไม่ละลาย

3.5 พื้นที่ผิวของสารที่ปลดปล่อยไอออนฟอสเฟต พื้นที่ผิวของสารที่ปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตสามารถจำกัดการปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตได้ ในกรณีที่สารนั้นมีพื้นที่ผิวมาก (อนุภาคเล็ก) ย่อมละลายได้ดี แต่ถ้าสารนั้นมีพื้นที่ผิวน้อย (อนุภาคใหญ่) ย่อมละลายได้ช้า แต่ถ้าเป็นกรณีของสารที่

ละลายได้ดีอยู่แล้ว เช่น ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต การมีพื้นที่ผิวมากย่อมทำให้ไอออนฟอสเฟตละลายได้ดียิ่งขึ้น จึงลดปริมาณไอออนฟอสเฟตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากถูกปลดปล่อยออกมาให้ทำปฏิกิริยากับสารอื่นในดินได้รวดเร็วขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

การตรึงฟอสเฟต

1. การตรึงฟอสเฟตของดิน

เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายได้ดีลงไปในดิน พืชสามารถดูดเข้าไปในต้นพืชได้เพียงเล็กน้อย ประมาณ 10 – 25 % ของฟอสเฟตที่ละลายได้ในปุ๋ยเท่านั้น ฟอสเฟตที่ละลายได้ส่วนที่หายไปประมาณ 75 – 90 % นี้ เรียกว่า ฟอสเฟตที่ถูกตรึงอยู่ในดินให้อยู่ในสภาพที่ไม่ละลายน้ำ พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ปริมาณของปุ๋ยฟอสเฟตที่ใส่ลงไปในดินและถูกตรึงมากน้อยนั้นขึ้นอยู่กับอำนาจในการตรึงของดิน อำนาจในการตรึงฟอสเฟตของดินนั้นขึ้นอยู่กับ 1) ชนิดของส่วนประกอบและสภาพของดินนั้นๆ เช่น ปริมาณอินทรียวัตถุในดิน 2) ระดับ pH ดิน 3) ปริมาณของไอออนบวกและสารประกอบของเหล็ก อลูมินัม แมงกานีส แคลเซียม แมกนีเซียม 4) ปริมาณของไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมินัม และ 5) ปริมาณของแร่ดินเหนียวต่างๆ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1.1 ปฏิกิริยาการตรึงฟอสเฟตของดิน ดินตรึงฟอสเฟตได้หลายปฏิกิริยาด้วยกัน สามารถแบ่งชนิดของปฏิกิริยาเหล่านี้ออกเป็น 3 ชนิด คือ

1.1.1 ปฏิกิริยาการดูดซับอยู่ตามผิว อนุภาคของดินที่มีขนาดเล็กที่อยู่ในสภาพของคอลลอยด์ เช่น พวกแร่ดินเหนียวต่างๆ อินทรียวัตถุและออกไซด์ของเหล็กและอลูมินัมนั้นมีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่ และไอออนฟอสเฟตมีประจุไฟฟ้าแฝงอยู่เช่นเดียวกัน จึงสามารถดูดยึดกันได้ ดังนี้

1) แรงดูดยึดกันด้วยแรง van der Waal เป็นการดูดซับที่เรียกว่า physical adsorption ซึ่งมีผลทำให้ไอออนฟอสเฟตรวมอัดกันอยู่รอบๆ พื้นผิวของคอลลอยด์เท่านั้น โครงสร้างของคอลลอยด์ไม่มีอะไรเปลี่ยนแปลง

2) ถ้าไอออนฟอสเฟตจับตัวกับสารคอลลอยด์ด้วยพันธะเคมี (chemical bond) หรือการจับตัวกันด้วยแขนของแคตไอออน ทำให้เกิดโมเลกุลของสารขึ้น เป็นการดูดซับแบบ chemical adsorption ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้เพราะสารคอลลอยด์เหล่านี้มี hydroxyl และ silicate group ซึ่งอาจหลุดออกไปเหลือตำแหน่งที่ทำให้สมดุลด้วยแอนไอออน ไอออนฟอสเฟตอาจเข้ามาอยู่ในตำแหน่งนี้ได้ จึงก่อให้เกิดการจับตัวด้วยพันธะเคมี ปริมาณของฟอสเฟตที่ถูกดูดซับด้วยวิธี chemical adsorption นี้ โดยทั่วๆ ไปมักต่ำกว่าวิธี physical adsorption เพราะตำแหน่งที่ไอออนฟอสเฟตเข้าจับตัวกับคอลลอยด์มีจำกัด อย่างไรก็ตามไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของสารคอลลอยด์เหล่านี้มักถูกดูดยึดไว้ด้วยแรงจำนวนหนึ่ง น้ำไม่สามารถละลายไอออนฟอสเฟตนี้กลับ

ออกมาอยู่ในสารละลายดินได้ ฟอสเฟตเหล่านี้จึงอยู่ในสภาพที่ถูกตรึง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1.1.2 ปฏิกิริยาการแทนที่ด้วยไอออนที่มีขนาดไอออนเท่ากัน ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่รอบพื้นผิวของแร่ดินเหนียวค่อยๆ เคลื่อนตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างผลึกต่อผลึกของแร่ดินเหนียว ไอออนฟอสเฟตบางไอออนค่อยๆ เปลี่ยนจากสภาพที่ถูกดูดซับเป็นการเข้าแทนที่แอนไอออนของผลึก (เช่น hydroxyl, silicate) แล้วไอออนฟอสเฟตจับตัวกับคอลลอยด์ด้วยพันธะทางเคมี ในสภาพที่คอลลอยด์ยังมี hydroxyl (ขนาดเล็กกว่าไอออนฟอสเฟต) หรือ silicate group (ขนาดใกล้เคียงกับไอออนฟอสเฟต) รวมอยู่ในโครงสร้างของรูปคอลลอยด์นั้น สภาพของโครงสร้างและผลึกจะคงตัวเป็นรูปร่างคงที่ แต่เมื่อไอออนฟอสเฟตเข้ามาแทนที่ hydroxyl และ silicate โครงสร้างของผลึกไม่คงที่อยู่อย่างเดิม เพราะขนาดของไอออนฟอสเฟตกับไอออนที่แทนที่ไม่เท่ากัน เมื่อเป็นเช่นนี้ผลึกของแร่ดินเหนียวที่มีไอออนฟอสเฟตอยู่ด้วยมีการจัดเรียงตัวใหม่ขึ้น เพื่อให้ได้โครงสร้างและรูปร่างของผลึกที่คงที่ ไอออนฟอสเฟตจึงถูกจับติดแน่นเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวชนิดใหม่อย่างถาวร ดังนั้นฟอสเฟตเหล่านี้ถูกตรึงและไม่มีโอกาสหลุดออกมาในสารละลายดินอีกนอกจากแร่ดินเหนียวชนิดนี้ถูกทำให้สลายตัว (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1.1.3 ปฏิกิริยาการแตกตัวและทำปฏิกิริยา สารประกอบฟอสเฟตที่ละลายได้ดีมักละลายและแตกตัวให้ไอออนฟอสเฟตและไอออนบวกอื่นๆ ในดินที่มีสารประกอบต่างๆ เช่น เหล็กออกไซด์ เหล็กไฮดรอกไซด์ อลูมินัมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม สารประกอบเหล่านี้มักละลายและให้ไอออนบวกต่างๆ เช่น แคตไอออนของเหล็ก อลูมินัม แคลเซียมและแมกนีเซียมอยู่ในสารละลายดิน และเมื่อไอออนฟอสเฟตและแคตไอออนเหล่านี้พบกันและทำปฏิกิริยากัน เกิดเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากยิ่งขึ้น เช่น เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟต อลูมินัมฟอสเฟต แคลเซียมฟอสเฟต หรือสารประกอบที่มีสูตรโมเลกุลซับซ้อนยิ่งขึ้น และเป็นการตรึงฟอสเฟตเนื่องจากสารประกอบฟอสเฟตที่เกิดขึ้นละลายน้ำได้ยาก

ปฏิกิริยาการแตกตัวและทำปฏิกิริยานี้ ก่อให้เกิดการตรึงฟอสเฟตตลอดเวลาอย่างช้าๆ ทั้งในดินที่มีความเป็นกรดหรือดินที่มีความเป็นด่าง เนื่องจากฟอสเฟตที่แตกตัวออกมาจากสารประกอบต่างๆ นั้น มักถูกตรึงไอออนของเหล็ก อลูมินัม ในดินที่มีสภาพความเป็นกรดสูง และมักถูกตรึงด้วยไอออนของแคลเซียมในดินที่มีสภาพความเป็นด่างสูง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2. การตรึงฟอสเฟตของอินทรียวัตถุในดิน

อินทรียวัตถุในดินมีโครงสร้างที่ซับซ้อน ซึ่งมีทั้งการตรึงฟอสเฟตและช่วยทำให้ฟอสเฟตอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชพร้อมๆ กัน สามารถอธิบายได้ ดังนี้

2.1 ปฏิกิริยาดูดซับอยู่ตามผิวดิน อินทรียวัตถุมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยกลุ่มที่สามารถแยกตัวออกเป็นไอออนจำนวนมาก กลุ่มไอออนของอินทรียวัตถุเหล่านี้สามารถแก่งแย่งพื้นที่กับไอออนฟอสเฟตในการถูกดูดซับอยู่ที่พื้นผิวของสารคอลลอยด์อื่นๆ ได้เช่นกัน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.2 ปฏิกิริยาการแทนที่ไอออนที่มีขนาดเท่ากัน แอนไอออนที่เกิดจากอินทรียวัตถุ อาจมีขนาดใหญ่จนไม่สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างผลึกของแร่ดินเหนียวได้ แต่ถ้าไอออนของสารอินทรีย์มีขนาดเล็กและสามารถเข้าไปอยู่ในระหว่างผลึกต่อผลึกของแร่ดินเหนียวได้ ไอออนของสารอินทรีย์ดังกล่าวจึงมักแก่งแย่งพื้นที่กับไอออนฟอสเฟต ส่งผลให้การตรึงฟอสเฟตลดลง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2.3 ปฏิกิริยาการแตกตัวแล้วทำปฏิกิริยา เมื่ออินทรียวัตถุสลายตัวและเปลี่ยนรูป มักก่อให้เกิดกรดอินทรีย์บางชนิด จึงทำให้ pH ของดินลดลง ซึ่งเพิ่มการตรึงฟอสเฟตเพราะทำให้ Al^{+3} และ Fe^{+3} ละลายออกมาในสารละลายดินได้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันนี้ การสลายตัวของอินทรียวัตถุก็ก่อให้เกิด hydroxyl acid เช่น tartaric, citric, malonic และ malic acid ขึ้นมา กรดเหล่านี้สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา chelation กับ Al^{+3} และ Fe^{+3} ได้ ดังนั้น จึงเป็นการป้องกันมิให้ Al^{+3} และ Fe^{+3} ไปทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต จึงลดการตรึงฟอสเฟตลงไป ส่วนกรณีของดินที่มี Ca^{+2} มาก แต่ไม่ใช่ calcareous soil ซึ่งมี $CaCo_3$ อยู่มาก อินทรียวัตถุไม่มีผลกระทบต่อการตรึงฟอสเฟตเลย ทั้งนี้เพราะส่วนที่เป็นของแข็งของ $CaCo_3$ ยังคงควบคุม pH และความเข้มข้อง Ca^{+2} อยู่ตลอดเวลา

จากที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของอินทรียวัตถุส่งผลให้การตรึงฟอสเฟตลดลง การตรึงฟอสเฟตในดินไม่ได้เกิดเนื่องจากปฏิกิริยาใดปฏิกิริยาหนึ่งเท่านั้น หากแต่เกิดพร้อมๆ กันหลายปฏิกิริยา เพราะดินเป็นสารผสมที่มีองค์ประกอบหลายชนิด เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตลงไปในดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรด ฟอสเฟตส่วนใหญ่ถูกตรึงทันทีด้วยวิธี polar adsorption กับการตกตะกอนเป็นสารฟอสเฟตที่ละลายได้ยาก และส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกตรึงอย่างช้าๆ ด้วยวิธี isomorphous replacement (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

การสูญเสียฟอสฟอรัสในดิน

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินสูญเสียไปจากดินได้หลายวิธี ดังนี้

1. ติดไปกับส่วนของพืชที่เอาออกไปจากดิน

ในทุกฤดูปลูกต้องเก็บเกี่ยวพืชผลไปใช้ ในเมล็ด ตอซัง หรือต้นและใบของพืชที่มีฟอสฟอรัสติดออกไปด้วย โดยเฉลี่ยแล้วที่ดินแปลงหนึ่งสูญเสียฟอสฟอรัสโดยการติดออกไปกับส่วนของพืช

ประมาณ 0.5 – 1.0 กก. ฟอสฟอรัสต่อปี หรือประมาณ 0.4 % ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่มีในดิน (ชั้นไถพรวน) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2. ถูกชะล้างลงไปในดินล่าง

สารประกอบฟอสเฟตส่วนใหญ่ละลายน้ำได้น้อยมาก และมีไอออนฟอสเฟตที่ละลายอยู่ในสารละลายดินในปริมาณน้อยมาก (น้อยกว่า 0.1 ppm P) อาจเกิดจากการชะล้างเอาฟอสฟอรัสลงไปสู่ดินล่าง ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ อาจมีปริมาณน้อยก็ตาม แต่ถ้าระยะเวลานานนับร้อยปีย่อมมีการสูญเสียไปปริมาณมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3. การระเหย

โดยทั่วไปพวกสารประกอบออร์โทฟอสเฟตในสภาพของดินไร่ไม่มีการระเหยเกิดขึ้น แต่ถ้าเป็นดินที่มีน้ำขังอาจมีการสูญเสียในรูปของ phosphine (PH_3) ได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4. การกร่อนของดิน

ในดินที่ถูกน้ำพัดพาหรือถูกลมพัดออกจากพื้นที่เดิมไป มีฟอสฟอรัสติดออกไปด้วย ในปีหนึ่งอาจสูญเสียฟอสฟอรัสประมาณ 1 – 3 กก. ฟอสฟอรัสต่อปี หรือประมาณ 0.4 – 1.2 % ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในดินชั้นไถพรวน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างฟอสฟอรัสกับธาตุอื่น

ฟอสฟอรัสมีปฏิสัมพันธ์กับธาตุอื่นในแง่การดูดและการเคลื่อนย้ายภายในพืช ซึ่ง Fageria (2001) สรุปไว้ ดังนี้

1. ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนมีปฏิสัมพันธ์แบบมีผลเสริมกัน (synergistic effect) ในด้านการดูดแต่ละธาตุและด้านการเจริญเติบโตของพืช

2. ฟอสฟอรัสมีปฏิสัมพันธ์เชิงบวกกับแมกนีเซียม เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นธาตุซึ่งทำหน้าที่กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์คิเนส (ฟอสโฟคิเนส) ซึ่งเร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายหมู่ฟอสเฟตจาก ATP ไปยังโมเลกุลของสารอื่น

3. การใช้ปุ๋ยฟอสเฟตอัตราสูงทำให้พืชสะสมฟอสฟอรัสระดับฟุ่มเฟือย ซึ่งมีผลให้อัตราส่วน P:Fe และ P:Zn สูงเกินไป อันเป็นเหตุให้พืชแสดงการขาดธาตุทั้งสอง

สาเหตุของปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในอัตราสูง ในดินที่มีระดับความเป็นประโยชน์ของเหล็กและสังกะสีค่อนข้างกำจัด ซึ่งทำให้ 1) เหล็กและสังกะสีที่ละลายได้ กลายเป็นสารประกอบเหล็กฟอสเฟตหรือสารประกอบของสังกะสีฟอสเฟตซึ่งละลายได้น้อยลง 2) ฟอสเฟตขัดขวางการดูดเหล็กและสังกะสีที่ราก การเคลื่อนย้ายจากรากสู่ส่วนเหนือดิน ตลอดจนเข้าสู่กระบวนการเมตาบอลิซึม และ 3) การเพิ่มอัตราปุ๋ยฟอสเฟตช่วยส่งเสริมการสร้างมวลชีวภาพของพืช แต่การที่จุลธาตุทั้งสองเคลื่อนย้ายสู่ส่วนเหนือดินได้น้อยลง ย่อมกระทบต่อสมดุลของธาตุอาหาร คือ อัตราส่วน P:Fe และ P:Zn สูงกว่าระดับปกติ (Marshner, 1995)

อาการขาดฟอสฟอรัสของพืช

แม้ว่าฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายในดินแต่สามารถเคลื่อนย้ายได้ดีในพืช ฟอสฟอรัสจึงสามารถเคลื่อนย้ายจากเนื้อเยื่อที่เจริญเต็มที่แล้วไปยังเนื้อเยื่อใหม่และเนื้อเยื่อที่กำลังเจริญเติบโต พืชจึงตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ระยะแรกของการเจริญเติบโต ส่วนในช่วงของการสืบพันธุ์ฟอสฟอรัสมักเคลื่อนย้ายไปยังผลและเมล็ดของพืช ดังนั้นการขาดฟอสฟอรัสในช่วงนี้จึงมีผลกระทบต่อการพัฒนาเมล็ด และการเจริญเข้าสู่ช่วงเต็มวัยของพืช (อรวรรณ, 2551)

ในสภาวะที่พืชขาดฟอสฟอรัส มักมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 2 ประการ คือ ใบขยายขนาดช้า เล็ก และจำนวนใบน้อย สาเหตุที่แผ่นใบมีการขยายช้าเนื่องจากเซลล์เนื้อเยื่อชั้นผิวไม่ค่อยขยายตัว อันเนื่องมาจากเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวมีฟอสฟอรัสต่ำและสภาพนำน้ำของรากลดลง อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการขยายขนาดของใบลดลงมาก แต่ปริมาณโปรตีนและคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่ใบลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขนาดใบที่ลดลงมากแต่ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงเพียงเล็กน้อยนี้ ส่งผลให้ใบพืชที่ขาดฟอสฟอรัสในระยะแรกมีสีเขียวเข้มขึ้น แต่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อหน่วยคลอโรฟิลล์ลดลงเมื่อการเจริญเติบโตส่วนเหนือดินลดลงมาก แต่มีผลกระทบต่อรากน้อย ดังนั้นพืชที่ขาดฟอสฟอรัสจึงมีค่าสัดส่วนระหว่างส่วนเหนือดินกับราก (shoot : root ratio) ลดลงด้วย (ยงยุทธ, 2546) ตัวอย่างเช่น ถั่วบีน (*Phaseolus vulgaris*) ที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับเพียงพอ มีค่า shoot : root ratio เท่ากับ 5 แต่เมื่อขาดฟอสฟอรัสเหลือเพียง 1.9 ซึ่งตรงกับข้ามกับขาดแมกนีเซียมที่มีค่าเพิ่มเป็น 10 แสดงให้เห็นว่า การขาดแมกนีเซียมส่งผลให้น้ำหนักรากลดลงมาก แต่ส่วนเหนือดินลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Khamis et al., 1990)

การขาดฟอสฟอรัสยังเป็นสาเหตุที่ทำให้การกระจายของคาร์โบไฮเดรตจากส่วนเหนือดินลงมาอยู่ที่รากมากขึ้น สำหรับถั่วที่ขาดฟอสฟอรัสมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตในราก 27 % จากปริมาณทั้งหมดในต้น ในขณะที่พืชปกติมี 15.7 % ด้วยเหตุนี้รากพืชที่ขาดฟอสฟอรัสยังสามารถยืดตัวได้

ในขณะที่ส่วนเหนือดินหยุดการเจริญเติบโตแล้ว การขาดฟอสฟอรัสของถั่วฮามาต้า (*Stylosanthes hamata*) มีผลทำให้มีการสะสมฟอสฟอรัสในรากมาก และยังได้รับอีกส่วนหนึ่งซึ่งเคลื่อนย้ายมาจากส่วนเหนือดินอีกด้วย จึงทำให้รากสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ เนื่องจากพืชพยายามรักษาสภาพให้รากมีความสามารถหาธาตุอาหารที่ขาดแคลนมาเพิ่มเติม (Smith et al., 1990)

การตอบสนองของพืชเมื่อขาดฟอสฟอรัส

เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัสมักมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ยงยุทธ (2552) ได้รายงานว่าพืชมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วเมื่อขาดฟอสฟอรัส เริ่มตั้งแต่การถอดรหัส (transcription) หรือการสร้าง RNA ต่อจากนั้นจึงมีการปรับตัวทางชีวเคมีและทางสรีรวิทยา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแสวงหาฟอสฟอรัสจากดิน หรือปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสภายในพืช การตอบสนองของพืชต่อการขาดฟอสฟอรัส สามารถอธิบายได้เป็น 2 ด้าน คือ การตอบสนองด้านสัณฐานวิทยา และด้านสรีรวิทยา ดังนี้ (Raghothama, 1999; Schachman and Shin, 2007)

1. การตอบสนองด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา

การตอบสนองในด้านนี้ ได้แก่ การเพิ่มอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน โดยเคลื่อนย้ายอาหารมาพัฒนาระบบราก เร่งการเพิ่มพื้นที่ผิวรากเพื่อการดูดฟอสเฟตจากดิน โดยเพิ่มจำนวนและความยาวของราก เพิ่มจำนวนและความยาวของขนราก สร้างรากคลัสเตอร์ (cluster root) และยังเอื้อต่อการเข้ามาอยู่ร่วมกันของเชื้อราไมคอร์ไรซา (mycorrhizal fungi) อีกด้วย

1.1 การเพิ่มจำนวนและความยาวของราก ในส่วนของการพัฒนาระบบราก โดยเปลี่ยนการพัฒนารากแบบยืดตัวยาวไปเรื่อยๆ มาเป็นการยืดตัวของรากแบบจำกัดความยาว ส่งเสริมการเพิ่มจำนวนของรากแขนง และสร้างรากใหม่ขึ้นบริเวณดินชั้นบน และมักยืดตัวออกในทิศทางที่ขนานกับผิวดิน ลักษณะการแผ่กระจายบริเวณดินชั้นบนดังกล่าวเพื่อเน้นการหาฟอสฟอรัสในดินชั้นบน (ยงยุทธ, 2552)

1.2 ขนรากและรากแขนง สำหรับการเพิ่มจำนวนขนรากและความยาวของขนรากมีความสำคัญมาก เนื่องจากรากพืชที่อยู่ในสภาวะขาดฟอสฟอรัสนั้น ประมาณ 90 % ของฟอสฟอรัสที่ดูดได้มาจากการดูดของขนราก นอกจากนั้นพืชที่ขาดฟอสฟอรัสยังมีความยืดหยุ่นในการปรับระบบรากให้เข้ากับสภาพดินซึ่งโดยทั่วไปมีฟอสฟอรัสต่ำ ซึ่งรากส่วนใหญ่ดูดฟอสฟอรัสได้น้อย แต่ยังมีบางบริเวณที่มีฟอสฟอรัสสูงกว่าส่วนอื่น รากจึงแตกแขนงและมีขนรากมากเป็นพิเศษในบริเวณดังกล่าว ซึ่งช่วยให้ดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้นถึง 80 % การเพิ่มความหนาแน่นของขนรากเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญ

มาก เนื่องจากช่วยเพิ่มผิวสัมผัสของรากกับผิวอนุภาคดินและดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้น เพื่อส่งเสริมการพัฒนาขนรากให้ได้ตามเป้าหมาย ส่วนเหนือดินจึงลำเลียงซูโครสทางโฟลเอ็มมาสู่ราก ซึ่งช่วยให้มีขนรากเพิ่มจากเดิมหลายเท่า (ยงยุทธ, 2552)

1.3 รากคลัสเตอร์หรือรากกลุ่ม (Cluster root) มักเกิดขึ้นเมื่อพืชขาดฟอสฟอรัส ซึ่งพืชมักมีการปรับกลไกต่างๆ เพื่อสามารถหาฟอสฟอรัสให้เพียงพอกับความต้องการ อาจเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสเฟตให้เป็นอนินทรีย์ฟอสเฟต หรือลดการตรึงฟอสฟอรัสในดิน (Shane and Lambers, 2005; Lambers et al., 2006) รากคลัสเตอร์มักมีขนรากขึ้นปกคลุมหนาแน่นเป็นกระจุกคล้ายแปรงและสามารถสังเคราะห์และหลั่งกรดอินทรีย์ (โดยเฉพาะ citrate และ malate) และกรดฟอสฟาเทสสู่บริเวณรอบๆ รากพืช เพื่อเพิ่มการละลายของสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยาก เช่น แคลเซียมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟต และอลูมินัมฟอสเฟต เมื่อละลายแล้วกรดอินทรีย์มักทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับแคลเซียม เหล็ก และอลูมินัม รากพืชจึงดูดฟอสเฟตจากดินได้มากขึ้น (ยงยุทธ, 2552) ในดินที่มีการตรึงฟอสฟอรัสสูง รากคลัสเตอร์สามารถขับกรดอินทรีย์ได้มากกว่ารากพืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอ 20 – 40 เท่า (Vance et al., 2003)

1.4 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน (Root : shoot ratio) ฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายในดิน พืชบางชนิดหรือบางสายพันธุ์มีการพัฒนาระบบรากให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถแผ่กระจายรากไปในดิน และดูดหาฟอสเฟตในสารละลายดินได้สูงขึ้น (Jungk, 2001) พืชที่ขาดฟอสฟอรัสมักมีค่าอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าพืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอ (Gaume et al., 2001) ซึ่งเป็นผลจากการลดการเจริญเติบโตด้านลำต้นและใบ อาหารที่ได้จากกระบวนสังเคราะห์ด้วยแสงถูกลำเลียงมายังส่วนใต้ดินเพื่อพัฒนาให้ระบบรากมีขนาดใหญ่ขึ้น (Cakmak et al., 1994) การพัฒนาระบบรากดังกล่าว เพื่อช่วยให้พืชสามารถหาฟอสเฟตที่อยู่บริเวณรอบๆ รากได้มากขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของศักยภาพของพืชหรือสายพันธุ์พืชในการปรับตัวต่อการขาดฟอสฟอรัส (Fohse et al., 1988)

ในช่วงการพัฒนาของรากเพื่อตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสนั้น สารเร่งการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิดเข้ามามีบทบาทสำคัญ ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลของสารเร่งการเจริญเติบโตของพืชบางชนิดต่อการพัฒนารากในช่วงที่พืชขาดฟอสฟอรัส

สารเร่งการเจริญเติบโต	การตอบสนองของเนื้อเยื่อพืชในช่วงที่ขาดฟอสฟอรัส	ผลต่อระบบรากในช่วงที่พืชขาดฟอสฟอรัส
ออกซิน	(1) เพิ่มความไวของเนื้อเยื่อเป้าหมาย	ลดการเจริญของรากปฐมภูมิและเพิ่มการแตกรากแขนง
	(2) เคลื่อนย้ายมากขึ้น	เพิ่มจำนวนเนื้อเยื่อเริ่มเกิดรากแขนง
	(3) เพิ่มความเข้มข้น	เพิ่มความยาวของรากแขนง เกิดรากคลัสเตอร์มากขึ้น และเพิ่มความหนาแน่นของขนราก
ไซโตไคนิน	ลดความเข้มข้นในราก	ลดการยับยั้งการเกิดรากแขนง
เอทิลีน	เพิ่มความเข้มข้นในราก	เพิ่มการเกิดขนราก
กรดแอบส์ซิสิก (ABA)	สังเคราะห์เพิ่มขึ้น	ไม่มีผลใดๆ เนื่องจากส่วนใหญ่เคลื่อนย้ายทางไซเล็มสู่ส่วนเหนือดิน

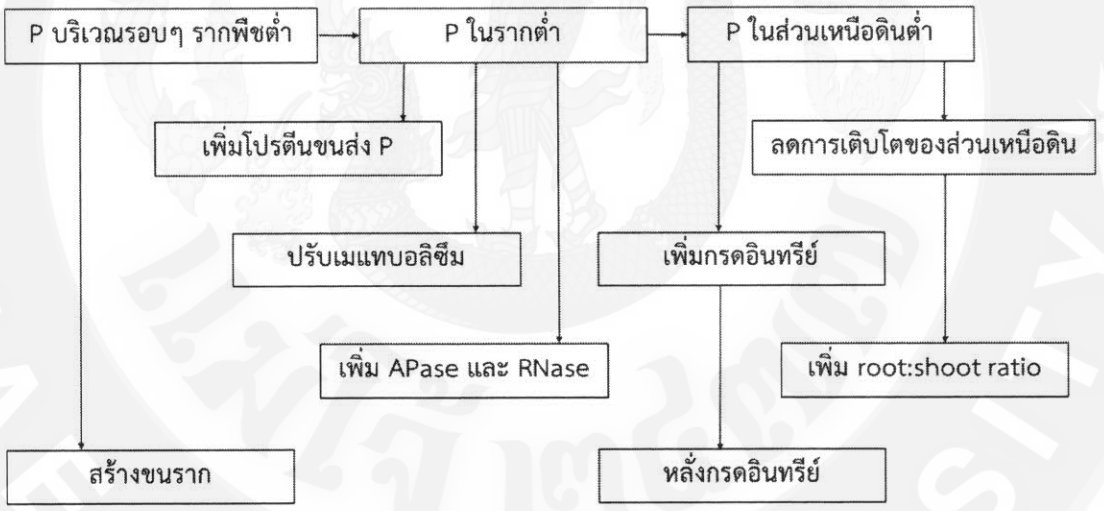
ที่มา : Hammond and White (2008)

2. การตอบสนองด้านสรีรวิทยา

2.1 การปรับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับฟอสฟอรัสในพืช เมื่อพืชเผชิญสภาวะขาดฟอสฟอรัส มักส่งผลให้ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสภายในเซลล์ลดลงอย่างรวดเร็ว (Natr, 1992) อย่างไรก็ตาม พืชยังคงพยายามรักษาความเข้มข้นภายในไซโตพลาสซึมให้สมดุล โดยเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสที่เก็บสะสมไว้ในแวคิวโอลมาชดเชยในส่วนของไซโตพลาสซึม (Plaxton and Carswell, 1999; Raghothama, 1999) กระบวนการดังกล่าวเป็นการรักษาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในไซโตพลาสซึมให้อยู่ในระดับที่ปกติ เพื่อให้กระบวนการต่างๆ ในไซโตพลาสซึมสามารถทำงานต่อไปได้

2.2 การเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินและส่งเสริมให้ระบบรากสามารถดูดได้มากขึ้น โดยการหลั่งกรดอินทรีย์ หลั่งโปรตอนและสารคีเลต (chelates) ตลอดจนการหลั่งกรดฟอสฟาเทสจากระบบราก โดยกระบวนการดังกล่าวเริ่มจากการกระตุ้นการทำงานของยีนที่ควบคุมการสร้างเอนไซม์ เช่น กรดฟอสฟาเทส เอนไซม์ไรโบนิวคลีเอส และโปรตีนขนส่งฟอสเฟต กล่าวคือ เมื่อ

พืชรับรู้ถึงภาวการณ์ขาดฟอสฟอรัส มักส่งสัญญาณซึ่งมีลักษณะต่อเนื่องและหลากหลาย เพื่อให้ส่วนต่างๆ รับรู้และตอบสนองได้ถูกต้อง กระบวนการนี้ประกอบด้วยการทำงานของ transcription factor หลายชนิด สำหรับตัวแรกที่มีบทบาทกระตุ้นให้พืชตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส คือ โปรตีน phosphate starvation response 1 (PHR 1) ซึ่งมีบทบาทเหนี่ยวนำการทำงานของยีนในกลุ่ม P starvation induced genes และปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีบทบาทในวิถีการถ่ายโอนสัญญาณในพืช คือ phospholipase D (PLD) ซึ่งช่วยกระตุ้นให้พืชที่ขาดฟอสฟอรัสมีการพัฒนาราก นอกจากนี้เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัสมักมีความเข้มข้นของไซโตไคนินในต้นลดลง การที่ฮอร์โมนพืชชนิดนี้เคลื่อนย้ายไปยังใบน้อยลงมีบทบาทที่สำคัญที่ทำให้มีการปรับเปลี่ยนระบบการเคลื่อนย้ายสารอาหารในพืช ในแนวทางที่เอื้อต่อการเจริญของราก นอกจากนี้ยังมี transcription factor อื่นๆ ที่มีบทบาทที่สำคัญ ในที่สุดยีนเหล่านี้มักถูกเหนี่ยวนำให้ควบคุมการสร้างโปรตีน ซึ่งทำหน้าที่เป็นโปรตีนสำหรับขนส่งฟอสเฟตไอออน และเอนไซม์ต่างๆ และกรดอินทรีย์ รวมทั้งควบคุมการเปลี่ยนแปลงด้านสัณฐานวิทยาและสรีรวิทยา (ยงยุทธ, 2552)



ภาพที่ 2 การตอบสนองของพืชเมื่อขาดฟอสฟอรัส ทิศทางของลูกศรคือ
การตอบสนองตามที่ได้มีสัญญาณส่งมาควบคุมการทำงานของเซลล์
[APase = กรดฟอสฟาเทส (phosphatase acid),
RNase = เอนไซม์ไรโบนิวคลีเอส (ribonuclease)]

ที่มา : Hammond and White (2008)

การปรับตัวที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของรากพืชที่ขาดฟอสฟอรัส คือ การเพิ่มโปรตีนสำหรับดูดฟอสเฟตไอออน (Pi transporter) ในเนื้อเยื่อให้เพียงพอสำหรับการดูดฟอสเฟตจากดิน ซึ่งละลายได้มากขึ้นจากกิจกรรมของราก รวมทั้งเพื่อกระจายส่วนที่รากดูดได้ไปยังอวัยวะต่างๆ โดยปกติโปรตีนสำหรับขนส่งฟอสเฟตไอออนมี 3 วงศ์ย่อย คือ PHT1, PHT2 และ PHT3 สำหรับ PHT1 นั้นมีบทบาทสำคัญในการดูดฟอสเฟตไอออนจากสารละลายดิน และพบว่ามีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นในรากโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณปลายรากเมื่อพืชขาดฟอสฟอรัส (Hammond and White, 2008)

นอกจากการปรับตัวของระบบรากดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ระบบรากยังเอื้อต่อการเข้ามาอยู่ร่วมกันกับเชื้อราไมคอร์ซาอีกด้วย โดยที่ราได้รับคาร์โบไฮเดรตจากราก ส่วนพืชได้รับฟอสฟอรัสและธาตุอื่นๆ ที่เส้นใยของเชื้อรา (hypha) ดูดได้ รามีประสิทธิภาพสูงกว่ารากในการดูดฟอสฟอรัสเนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ คือ เส้นใยราเล็กกว่าราก 2 - 5 เท่า จึงมีอัตราส่วนพื้นที่ผิว : ปริมาตรสูงกว่า และพื้นที่ผิวสัมผัสกับผิวอนุภาคดินสูงกว่ารากมาก ซึ่งแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างของดินซึ่งเล็กกว่าขนาดรากและรากเข้าไม่ได้ และเส้นใยของเชื้อราไมคอร์ไรซามีความสามารถในการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส โดยการหลั่งกรดอินทรีย์ออกมาสู่ดิน หรือหลั่งกรดฟอสฟาเทส ออกมาย่อยสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟต หรือเหนี่ยวนำให้รากพืชตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส ซึ่งการหลั่งกรดเหล่านี้ มักส่งผลให้ค่า pH ในดินบริเวณรอบๆ รากพืชอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการละลายฟอสเฟตอีกทางหนึ่ง จากการทำงานร่วมกันของรากและเชื้อราดังกล่าว รากซึ่งอยู่ในดินที่มีฟอสฟอรัสต่ำ จึงสามารถเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุนี้ 3 – 5 เท่า เมื่อเทียบกับรากที่ไม่มีเชื้อราไมคอร์ไรซา เพียงแต่พืชที่ขาดฟอสฟอรัสต้องลำเลียงน้ำตาลทางโฟลเอ็มลงมายังรากให้เพียงพอแก่การสนับสนุนกิจกรรมของรากและเชื้อรา สำหรับน้ำตาลกลูโคสและซูโครสที่ลำเลียงจากส่วนเหนือดินมายังรากนอกจากเป็นอาหารเลี้ยงรากแล้วยังเป็นสัญญาณที่ทำให้รากตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสด้วย (Hammond and White, 2008) ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 อิทธิพลจากชนิดของคาร์โบไฮเดรตจากส่วนเหนือดินต่อลักษณะการตอบสนองของรากพืชที่ขาดฟอสฟอรัส

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	ลักษณะการตอบสนองของรากพืชที่ขาดฟอสฟอรัส
ซูโครส	เพิ่มอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน
	เพิ่มการแสดงออกของโปรตีนขนส่งฟอสเฟต PHT1
	เพิ่มการแสดงออกของเอนไซม์ไรโบนิวคลีเอสและกรดฟอสฟาเทส
	เพิ่มการแสดงออกของโปรตีนขนส่งฟอสเฟต PHT1
กลูโคส	เพิ่มความหนาแน่นของรากแขนง
	เพิ่มการแสดงออกของเอนไซม์ไรโบนิวคลีเอส

ที่มา : Hammond and White (2008)

2.3 การปรับกระบวนการเมตาบอลิซึม เช่น การหายใจ การสังเคราะห์ด้วยแสง และเมตาบอลิซึมของคาร์บอน (Raghothama, 1999) กระตุ้นให้กระบวนการไกลโคไลซีสเป็นแบบบายพาส (glycolytic bypass pathway) เพื่อลดขั้นตอนที่ใช้ฟอสเฟตไอออนหรือ ATP เนื่องจากอยู่ในภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัส จึงมี ATP จำกัด เช่น เลือกใช้สารประกอบไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate; PP_i) เป็นแหล่งพลังงานทดแทน และเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีการใช้ฟอสฟอรัสน้อยลง เช่น ใช้ sulfolipid และ galactolipid แทน phospholipid ในกระบวนการเมตาบอลิซึม (Raghothama, 1999; Vance et al., 2003)

การตอบสนองของข้าวในแต่ละช่วงอายุต่อปริมาณฟอสฟอรัสในระดับต่างๆ

ในแต่ละช่วงอายุของข้าวต้องการปริมาณฟอสฟอรัสในระดับที่แตกต่างกัน โดยข้าวมีการตอบสนองต่อปริมาณฟอสฟอรัสที่ได้รับในระดับต่างๆ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การตอบสนองของข้าวในแต่ละช่วงอายุต่อปริมาณฟอสฟอรัสในระดับต่างๆ

อายุหลังงอก/ย้ายปลูก	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อ				
	ขาดแคลน	เกือบขาดแคลน	วิกฤติ	พอเพียง	สูง
14 วัน	0.09 - 0.29			0.43 - 0.83	
25 วัน					
30 วัน				0.37 - 0.55	
35 วัน			0.25		
55 วัน	0.37 - 0.52	0.57		0.59 - 0.66	
73 วัน	0.12	0.22		0.27	
112 วัน	0.11			0.17	

ที่มา : Reuter et al. (1997)

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับข้าว

ข้าวที่ปลูกในปัจจุบันมีอยู่ 2 กลุ่ม ได้แก่ ข้าวปลูกเอเชีย (*Oryza sativa*) และข้าวปลูกแอฟริกา (*Oryza glaberrima*) ข้าวที่ปลูกในทวีปเอเชียมีทั้งประเทศในเขตร้อนและเขตอบอุ่น ได้แก่ ประเทศอินเดีย ไทย กัมพูชา ลาว เวียดนาม พม่า จีน ญี่ปุ่น และอินโดนีเซีย สำหรับข้าวที่ปลูกในแถบแอฟริกามีแหล่งปลูกเริ่มแรกอยู่ในแอฟริกาตะวันตก จากนั้นแพร่กระจายไปทางใต้ของทะเลทรายซาฮารา ข้าวทั้งสองชนิดมีวิวัฒนาการมาจากข้าวป่าเหมือนกัน แต่ข้าวที่ปลูกและซื้อขายกันในตลาดโลกเกือบทั้งหมดเป็นข้าวจากทวีปเอเชีย ซึ่งแบ่งเป็น 3 กลุ่มตามลักษณะ คือ

1. ข้าวอินดิกา (indica) หรือข้าวเจ้า เป็นข้าวที่มีลักษณะเม็ดเรียวยาวรี ลำต้นสูง ตั้งชื่อมาจากแหล่งที่ค้นพบครั้งแรกในประเทศอินเดีย เป็นข้าวที่นิยมเพาะปลูกในทวีปเอเชียเขตมรสุมตั้งแต่จีน เวียดนาม ฟิลิปปินส์ ไทย อินโดนีเซีย ไปจนถึงอินเดียและศรีลังกา

2. ข้าวจาปอนิกา (japonica) เป็นข้าวเหนียวเมล็ดป้อม กลมรี มีแหล่งกำเนิดจากทางภาคเหนือแล้วกระจายตัวลงมาทางลุ่มแม่น้ำโขง หลังจากนั้นลดจำนวนลงไปแพร่หลายในเขตอบอุ่นที่ญี่ปุ่น เกาหลี รัสเซีย ยุโรป และอเมริกา

3. ข้าวจาวานิกา (javanica) เป็นข้าวที่มีลักษณะเมล็ดป้อมใหญ่ สันนิษฐานว่าเป็นข้าวพันธุ์ผสมระหว่างข้าวอินดิกาและจาปอนิกา เนื่องจากเพาะปลูกมากในประเทศอินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์

ไต้หวัน หมู่เกาะริวกิว และญี่ปุ่น แต่ไม่ค่อยได้รับความนิยมเพราะให้ผลผลิตต่ำ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

1. ระยะการเจริญเติบโตของข้าว

1.1 การเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบ (vegetative growth) การเจริญเติบโตในช่วงนี้แบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ

1.1.1 ระยะกล้า (seedling stage) เริ่มตั้งแต่ต้นข้าวงอกจากเมล็ด จนกระทั่งต้นข้าวเริ่มแตกกอ ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 20 วัน ต้นข้าวมีใบประมาณ 4 – 5 ใบ

1.1.2 ระยะแตกกอ (tillering stage) เริ่มตั้งแต่ต้นข้าวเริ่มแตกกอ จนกระทั่งเริ่มสร้างดอกอ่อน ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 30 – 50 วัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวด้วย

1.2 การเจริญเติบโตทางสืบพันธุ์ (reproductive growth) เริ่มจากจากการที่ต้นข้าวสร้างดอกอ่อน ตั้งท้อง ออกดอก จนถึงการผสมพันธุ์ จึงเป็นการสิ้นสุดการเจริญทางสืบพันธุ์ ระยะนี้ใช้เวลาประมาณ 30 – 55 วัน

1.3 การเจริญทางเมล็ด (grain development) เริ่มจากการผสมพันธุ์ของดอกข้าว เมล็ดเป็นน้ำนม เป็นแป้ง จนกระทั่งเมล็ดสุกแก่ ใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 25 – 30 วัน

ดังนั้น การเจริญเติบโตของต้นข้าวจนถึงระยะให้ผลผลิต ถ้าเป็นพันธุ์ข้าวนาปรังมักใช้เวลาตั้งแต่งอกจนถึงเก็บเกี่ยวประมาณ 90 – 120 วัน ส่วนพันธุ์ข้าวนาปรัง มักใช้เวลาประมาณ 120 – 140 วัน (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

2. การจำแนกประเภทของพันธุ์ข้าว

พันธุ์ข้าวที่นิยมปลูกในประเทศไทยในอดีตมีความหลากหลายมากและแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ แต่ปัจจุบันพันธุ์ข้าวที่ปลูกกันทั่วไปมีอยู่ไม่กี่สายพันธุ์ พันธุ์ข้าวส่วนหนึ่งที่เคยเป็นพันธุ์ดั้งเดิมได้สูญหายไปในหลายๆ พื้นที่ เนื่องจากสภาพการทำนาเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของตลาด ทำให้เกษตรกรต้องหันมาปลูกข้าวจำนวนไม่กี่สายพันธุ์ตามที่ตลาดต้องการ พันธุ์ข้าวที่มีการเก็บรวบรวมและจำแนกไว้แล้วโดยหน่วยงานของกรมวิชาการเกษตร มีประมาณ 5,000 กว่าสายพันธุ์ พันธุ์ข้าวมีการจำแนกออกในหลายลักษณะ การจำแนกหลักๆ ที่สำคัญ คือ

2.1 จำแนกตามฤดูการปลูกข้าวหรือสภาพของแสงแดด

2.1.1 ข้าวไวแสง หมายถึง ข้าวที่มีช่วงเวลาของการออกดอกที่แน่นอน เป็นข้าวที่ปลูกในฤดูนาปีเท่านั้น เนื่องจากข้าวออกดอกในช่วงที่เวลากลางวันสั้นกว่ากลางคืน จึงต้องปลูกในฤดูฝนเพื่อให้ออกดอกช่วงฤดูหนาวที่มีช่วงเวลากลางวันสั้นกว่า 12 ชั่วโมง อาจจำแนกออกได้เป็นข้าวที่ไวต่อแสงมาก ข้าวที่ไวต่อแสงน้อย ซึ่งมีช่วงเก็บเกี่ยวที่ต่างกัน ข้าวพันธุ์พื้นเมืองส่วนใหญ่จัดเป็นข้าวไวแสง

2.1.2 ข้าวไม่ไวแสง หมายถึง ข้าวที่ออกดอกตามอายุการเก็บเกี่ยวของข้าวโดยไม่ขึ้นอยู่กับช่วงแสง เป็นข้าวที่ปลูกในฤดูนาปรังเป็นส่วนใหญ่ สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปีถ้ามีน้ำเพียงพอ และปลูกได้ดีในฤดูร้อนเนื่องจากมีช่วงแสงมากกว่าฤดูอื่น อายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 110 - 150 วัน (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

2.2 จำแนกตามสภาพการเก็บเกี่ยว

2.2.1 ข้าวเบา เป็นข้าวที่ใช้ระยะเวลาการปลูกจนถึงเก็บเกี่ยวสั้น แต่ถ้าเป็นข้าวไวแสงจะเก็บเกี่ยวได้ในช่วงเดือนกันยายน - ตุลาคมของทุกภาค ยกเว้นภาคใต้ และสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นข้าวค่อนข้างเบา ข้าวเบาและข้าวเบามาก

2.2.2 ข้าวกลาง เป็นข้าวที่ใช้ระยะเวลาปลูกปานกลาง ถ้าเป็นข้าวไวแสงจะเก็บเกี่ยวได้ในช่วงประมาณเดือนตุลาคม – พฤศจิกายนของทุกปี

2.2.3 ข้าวหนัก เป็นข้าวที่ปลูกโดยใช้เวลานาน ถ้าเป็นข้าวไวแสงจะเก็บเกี่ยวในช่วงประมาณเดือนธันวาคม - มกราคม และยังแบ่งย่อยออกได้อีกเป็นข้าวค่อนข้างหนัก ข้าวหนัก และข้าวหนักมาก (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

2.3 จำแนกตามสภาพการปลูกหรือสภาพแวดล้อมเป็นเกณฑ์

2.3.1 ข้าวไร่ เป็นข้าวที่ปลูกโดยอาศัยตามสภาพน้ำฝนที่ตกตามธรรมชาติในพื้นที่ไร่หรือพื้นที่ดอน ไม่มีการเก็บกักน้ำในแปลงนา ใช้วิธีการปลูกแบบหยอดหรือโรยเมล็ดข้าวแห้ง พันธุ์ข้าวไร่ส่วนมากมักทนต่อความแห้งแล้งได้ดี

2.3.2 ข้าวนาสวน เป็นข้าวที่ปลูกกันทั่วไปในพื้นที่ที่มีน้ำขัง และมีการเก็บกักน้ำไว้ในแปลงนา โดยปลูกได้ที่ระดับน้ำลึก 1 เซนติเมตร แต่ไม่เกิน 50 เซนติเมตร การปลูกข้าวนาสวนแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

1) ข้าวนาน้ำฝน เป็นข้าวที่ปลูกในฤดูนาปี อาศัยน้ำฝนที่ตกตามธรรมชาติ พันธุ์ข้าวที่ใช้ส่วนใหญ่เป็นพันธุ์ข้าวพื้นเมืองหรือเป็นพันธุ์ข้าวที่คัดพันธุ์มาจากข้าวพันธุ์พื้นเมือง เป็นข้าวที่มีคุณภาพของเมล็ดดี แต่มักมีต้นสูงและล้มง่าย

2) ข้าวนาชลประทาน เป็นข้าวชนิดที่ปลูกในเขตพื้นที่ที่มีระบบชลประทาน ปลูกได้ทั้งนาปีและนาปรัง พันธุ์ข้าวที่ใช้ส่วนมากเป็นพันธุ์ข้าวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ที่สามารถให้ผลผลิตสูงในระบบการทำนาแบบใช้ปุ๋ยเคมี

3) ข้าวขึ้นน้ำหรือข้าวฟางลอย เป็นข้าวชนิดที่ปลูกในฤดูนาปี พันธุ์ข้าวส่วนมากมักเป็นพันธุ์พื้นเมือง หรือเป็นพันธุ์ข้าวที่คัดมาจากพันธุ์พื้นเมือง ตัวอย่างเช่น ปิ่นแก้ว 56 เจ๊กเชย 159 เล็บมือนาง 111 พันธุ์ข้าวเหล่านี้สามารถยืดปล้องตามระดับน้ำได้ มีการแตกแขนงที่รากและข้อ และทนต่อสภาพน้ำท่วมขังเป็นเวลานานๆ รวมทั้งสภาพแห้งแล้งได้ดี แต่มักมีผลผลิตต่ำ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

2.4 จำแนกตามประเภทของเนื้อแป้งในเมล็ดข้าวสาร

2.4.1 ข้าวเหนียว เป็นข้าวที่มีเมล็ดข้าวสารสีขาวขุ่น ประกอบด้วยแป้งชนิดอะไมโลเพ็คติน เป็นส่วนใหญ่ และมีแป้งอะไมโลสอยู่เพียงเล็กน้อยหรือไม่มีเลย เมื่อนำไปนึ่งแล้วจะได้ข้าวสุกที่จับตัวติดกัน เป็นแป้งเหนียวแน่นและมีลักษณะใส

2.4.2 ข้าวเจ้า เป็นข้าวที่มีเมล็ดข้าวสารใส ประกอบด้วยแป้งอะไมโลสเป็นส่วนใหญ่ และมีแป้งอะไมโลเพ็คตินอยู่เพียงเล็กน้อย เมื่อนำไปหุงแล้วข้าวสุกมีสีขาวขุ่นและร่วนกว่าข้าวเหนียว มีความนุ่มเหนียวแตกต่างกันตามลักษณะประจำพันธุ์นั้นๆ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

3. พันธุ์ข้าว

พันธุ์ข้าวที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นข้าวที่มาจากสภาพการปลูกหรือระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกัน (ข้าวนาสวนและข้าวไร่) สำหรับพันธุ์ข้าวนาสวนที่ใช้ในการศึกษานี้ คือ ขาวดอกมะลิ 105 กข 49 อาร์ 258 และซิวแม่จัน โดยลักษณะการเจริญเติบโตและรายละเอียดของพันธุ์ข้าวแต่ละพันธุ์มีดังนี้

ขาวดอกมะลิ 105 เป็นข้าวนาสวนไวต่อแสง ได้มาจากการรวบรวมและคัดเลือกพันธุ์เมื่อปี พ.ศ.2493 - 2494 โดยนายสุนทร สีหะเนิน เจ้าพนักงานข้าวรวบรวมจากอำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา ลักษณะประจำพันธุ์เป็นข้าวเจ้าสูงประมาณ 140 เซนติเมตร ลำต้นสีเขียวจาง ใบสีเขียวยาวค่อนข้างแคบ ฟางอ่อน ใบธงทำมุมกับคอรวง เมล็ดข้าวรูปร่างเรียวยาว ข้าวเปลือกสีฟาง อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 25 พฤศจิกายน ปริมาณอะไมโลส 12 – 17 % คุณภาพข้าวสุก นุ่ม มีกลิ่นหอม ลักษณะเด่น ทนแล้งได้ดีพอสมควร เมล็ดข้าวสารใส แกร่ง คุณภาพการสีดี คุณภาพการหุงต้มดี อ่อนนุ่ม มีกลิ่นหอม ทนต่อสภาพดินเปรี้ยวและดินเค็ม ไม่ต้านทานโรคใบสีส้ม โรคขอบใบแห้ง โรคไหม้และโรคใบหงิก ไม่ต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาล เพลี้ยจักจั่นสีเขียวและหนอนกอ พื้นที่แนะนำ คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือตอนบน (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

กข 49 เป็นข้าวนาสวนไม่ไวแสง ได้จากการผสม 3 ทาง ระหว่าง PSL00508-3-1-1-4 กับ IR66738-118-1-2 และ IR68544-29-2-1-3-1-2 ได้สายพันธุ์ PSL05102-19-1-5-4 ที่ศูนย์วิจัยข้าวพิษณุโลกในฤดูนาปรัง พ.ศ.2548 ลักษณะประจำพันธุ์เป็นข้าวเจ้าต้นสูงประมาณ 80 - 89 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยว 102 - 107 วัน (นาหว่านน้ำตม) ทรงกอตั้ง ใบสีเขียวเข้ม ใบธงตั้ง รวงแน่นปานกลาง ระแง้ถี่ คอรวงสั้น ฟางแข็งเมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง ค่อนข้างต้านทานเพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลชนิดใหม่ ต้านทานโรคไหม้ พื้นที่แนะนำ คือ พื้นที่นาชลประทาน (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

อาร์ 258 เป็นข้าวไร่ไม่ไวแสง คัดเลือกจากข้าวไร่พันธุ์พื้นเมือง ชื่อมะกอกปีหรือ ดอสามเดือน และให้เลขประจำพันธุ์ว่า อาร์ 258 โดยศูนย์วิชาการโครงการพัฒนาที่ดินเพื่อการเกษตรภาคเหนือ อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง และคณะทำงานโครงการข้าวไร่ที่สูง ปลูกศึกษาพันธุ์และ

เปรียบเทียบผลผลิตระหว่างสถานีและทดสอบพันธุ์ข้าวไร่ท้องถิ่น ระหว่างปี พ.ศ.2525 - 2529 ลักษณะประจำพันธุ์เป็นข้าวเหนียว สูงประมาณ 127 เซนติเมตร ปลูกได้ทั้งนาปีและนาปรัง อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 106 - 134 วัน ลำต้นค่อนข้างแข็ง ลำต้น ข้อและกาบใบสีเขียว ใบและใบธงค่อนข้างกว้าง ยาวปานกลาง มีขนเล็กน้อย ใบธงตกเมื่อรวงแก่ รวงยาวปานกลาง ระแง้ถี่ คอรวงสั้นโผล่พ้นใบธงพอดี เมล็ดร่วงง่าย เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 1 สัปดาห์ คุณภาพข้าวสุก นุ่ม มีกลิ่นหอมเล็กน้อย (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

ซิวแม่จัน เป็นข้าวไร่ไวแสง ได้จากการเก็บรวบรวมพันธุ์จากเกษตรกรในหมู่บ้านหนองบัว ตำบลรอบเวียง อำเภอเมือง จังหวัดเชียงราย ปลูกคัดเลือกและเปรียบเทียบผลผลิตที่สถานีทดลองพืชไร่เชียงรายและสถานีทดลองข้าวพาน ลักษณะประจำพันธุ์เป็นข้าวเหนียวพันธุ์พื้นเมือง สูงประมาณ 110 – 150 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยวประมาณปลายเดือนกันยายนถึงกลางเดือนตุลาคม ลำต้นและใบสีเขียว ข้อต่อใบ ขอบใบและเขี้ยวกันแมลงสีม่วง ใบแคบและยาว คอรวงยาว เมล็ดยาว เมล็ดข้าวเปลือกสีฟาง ก้นจุดสีม่วง ระยะพักตัวของเมล็ดประมาณ 5 สัปดาห์ ลักษณะเด่น คือ ปลูกได้ทั้งสภาพไร่และสภาพนาปี ลักษณะเมล็ดยาวเป็นที่นิยมของตลาด คุณภาพการสีและการหุงต้มดี ต้านทานโรคไหม้ในสภาพธรรมชาติ ทนแล้งปานกลาง ข้อควรระวัง คือ ไม่ต้านทานโรคเน่าคอรวงและแมลงบั่ว พื้นที่แนะนำ คือ พื้นที่ข้าวไร่และข้าวนาสวนในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (กองวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

สถานที่ทำการศึกษา

ทำการศึกษาภายใต้สภาพโรงเรือน ณ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วัสดุและอุปกรณ์

1. เมล็ดพันธุ์ข้าว 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข 49 อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน
2. เครื่องวัดค่า pH (Waterproof pHTestr 30) ยี่ห้อ Oakton Instruments
3. ตู้อบความร้อน ความจุ 108 ลิตร ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNB 500
4. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น ML 204
5. อุปกรณ์การทดลองปลูกข้าวในสารละลายธาตุอาหาร
6. อุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าว
7. สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าว (ตารางที่ 7)

วิธีการดำเนินงาน

1. การเตรียมสารละลายธาตุอาหารความเข้มข้น 1,000 เท่า (stock solution) และการเตรียมสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าว (solution)

เตรียมสารละลายธาตุอาหารความเข้มข้น 1,000 เท่า (stock solution) โดยใช้สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าวซึ่งดัดแปลงจาก Yoshida et al. (1976) (ตารางที่ 7) โดยเมื่อนำมาใช้เป็น solution ให้ใช้ stock solution 1 มิลลิลิตร ละลายในน้ำกลั่น 1 ลิตร (ยกเว้น KH_2PO_4 ที่ใช้ตามปริมาณความเข้มข้นในแต่ละกรรมวิธี) ปรับค่า pH ที่ 6.5 ± 0.01

2. การเตรียมอุปกรณ์การเพาะปลูก

2.1 เตรียมโฟมสำหรับเพาะกล้าข้าวอายุ 1 – 7 วัน โดยตัดโฟมเป็นรูปวงกลม เจาะรูตรงกลางให้เป็นวงกลมและติดด้วยตาข่ายรูขนาดเล็ก เพื่อใช้สำหรับเพาะกล้าข้าว

2.2 เตรียมโฟมสำหรับย้ายปลูกข้าวอายุ 7 วันเป็นต้นไป โดยตัดโฟมเป็นรูปวงกลมและเจาะรูบนแผ่นโฟม 4 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู 4.5 เซนติเมตร เพื่อใช้สำหรับย้ายกล้าข้าวลงปลูกในแต่ละกรรมวิธี

3. การเตรียมกล้าข้าวและการย้ายปลูก

ดำเนินการทดลองโดยนำเมล็ดข้าวทั้ง 4 พันธุ์ที่ผ่านการทดสอบความงอกแล้วมาแช่น้ำ 12 ชั่วโมง บ่มที่อุณหภูมิห้องอีก 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดที่งอกย้ายลงสู่ตาข่ายสำหรับเพาะกล้าข้าวซึ่งลอยสัมผัสกับผิวสารละลายธาตุอาหารในแต่ละกรรมวิธี ปรับ pH ให้อยู่ที่ระดับ 6.5 ± 0.01 เป็นเวลา 7 วัน เมื่อครบ 7 วันหลังงอกแล้ว ทำการย้ายกล้าข้าวในแต่ละกรรมวิธีลงปลูก และเปลี่ยนสารละลายธาตุอาหารทุกสัปดาห์ (แต่ละกระถางที่ใช้ปลูกข้าวมีสารละลายธาตุอาหาร 2 ลิตร)

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

การทดลองที่ 1 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส โดยมี 2 การทดลองย่อย ได้แก่

การทดลองที่ 1.1 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว 4 พันธุ์ ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 4 ระดับ ได้แก่ 0, 100, 200 และ 400 μM

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว 4 พันธุ์ ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 5 ระดับ ได้แก่ 0, 25, 50, 100 และ 200 μM

การทดลองที่ 2 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 7 ระดับ ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μM และหาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า

1. การทดลองที่ 1 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส โดยมี 2 การทดลองย่อย ได้แก่

การทดลองที่ 1.1 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว 4 พันธุ์ ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 4 ระดับ วางแผนการทดลองแบบ 4 × 4 Factorials in CRD ปัจจัยที่ 1 คือ พันธุ์ข้าว 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข 49 อาร์ 258 และซิวแม่จัน ปัจจัยที่ 2 คือ ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 4 ระดับ ได้แก่ 0, 100, 200 และ 400 μM โดยที่ 200

μM คือ ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่พอเพียงในสูตรสารละลายธาตุอาหารดังกล่าว ซึ่งดัดแปลงจากสูตรของ Yoshida et al (1976) ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของระบบราก ได้แก่ การยืดขยายความยาวราก การสร้างจำนวนรากต่อต้น การสะสมน้ำหนักแห้งราก และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน ที่ระยะ 7, 14, 21 และ 28 วันหลังงอก จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ Analysis of Variances (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม R

การทดลองที่ 1.2 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว 4 พันธุ์ ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 5 ระดับ วางแผนการทดลองแบบ 4 × 5 Factorials in CRD ปัจจัยที่ 1 คือ พันธุ์ข้าว 4 พันธุ์ ได้แก่ ขาวดอกมะลิ 105 กข 49 อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน ปัจจัยที่ 2 คือ ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 5 ระดับ ได้แก่ 0, 25, 50, 100 และ 200 μM ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของระบบราก ได้แก่ การยืดขยายความยาวราก การสร้างจำนวนรากต่อต้น การสะสมน้ำหนักแห้งราก และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน ที่ระยะ 3, 6, 9, 12 และ 15 วันหลังงอก จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ Analysis of Variances (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม R

2. การทดลองที่ 2 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 7 ระดับ และหาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า

วางแผนการทดลองแบบ CRD โดยปลูกข้าวในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μM ทำการบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของระบบรากและต้น ได้แก่ การยืดขยายความยาวราก การสร้างจำนวนรากต่อต้น การสะสมน้ำหนักแห้งราก อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน การสร้างจำนวนใบต่อต้น จำนวนต้นต่อกอ และการสะสมน้ำหนักแห้งต้น ที่ระยะ 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27 และ 30 วันหลังงอก และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อของต้นและรากที่ระยะ 30 วันหลังงอก จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ Analysis of Variances (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม R

ตารางที่ 7 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าว ซึ่งดัดแปลงจาก Yoshida et al. (1976)

Reagents	Nutrient concentration (μM)
KNO_3	3750
KH_2PO_4	200
NH_4NO_3	625
$MgSO_4$	400
$CaSO_4.2H_2O$	1500
NaCl	50
$MnSO_4.H_2O$	2
$ZnSO_4.7H_2O$	2
$NiCl_2.6H_2O$	1
$CuSO_4.5H_2O$	0.5
H_3BO_3	25
$NaMoO_4.H_2O$	0.5
Fe-EDTA	50
Adjust pH 6.5 using NaOH 1 N and HCl 1 N	

การเก็บข้อมูล

ตารางที่ 8 การเก็บข้อมูลลักษณะการเจริญเติบโตของระบบรากและต้นข้าว

ลักษณะการเจริญเติบโต	วิธีการประเมิน
ความยาวราก	วัดตั้งแต่โคนต้นจนถึงปลายรากที่ยาวที่สุด
จำนวนราก	นับจำนวนรากต่อต้น โดยนับรากที่งอกออกมาจากโคนต้น
น้ำหนักแห้งราก	ชั่งน้ำหนักแห้งราก ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง และชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน	คำนวณได้จาก น้ำหนักแห้งราก/น้ำหนักแห้งต้น
การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัส	นำตัวอย่างที่อบแห้งและชั่งน้ำหนักแห้งแล้วมาบดและนำตัวอย่างพืชไปเผาให้เป็นเถ้า ที่อุณหภูมิ 535 °C นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาละลายใน 0.1 N HCl และแบ่งสารละลายตัวอย่างพืชไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธี colorimetric assay (molybdovanado-phosphoric acid method) โดยใช้เครื่อง spectrophotometer (Murphy and Riley, 1962)
จำนวนใบต่อต้น	นับจำนวนใบต่อต้น โดยนับใบที่โผล่พ้นออกมาและคลี่แผ่นใบหมด
จำนวนต้นต่อกอ	นับจำนวนต้นที่แตกออกมาจากกอ
น้ำหนักแห้งต้น	ชั่งน้ำหนักแห้งต้น ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง และชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองที่ 1 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว ต่อการขาดฟอสฟอรัส

1. ผลการทดลองที่ 1.1 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว 4 พันธุ์ ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 4 ระดับ

การศึกษาการเจริญเติบโตของกล้าข้าว 4 พันธุ์ ในสภาพสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสแตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ 0, 100, 200 และ 400 μM โดยปลูกศึกษานาน 28 วัน ผลการศึกษาพบว่าการยืดขยายความยาวราก การสร้างจำนวนรากต่อต้น และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน มีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว อิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย ในขณะที่การสะสมน้ำหนักแห้งรากมีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันเท่านั้น โดยในแต่ละลักษณะมีการตอบสนอง ดังนี้

1.1 การยืดขยายความยาวราก

การยืดขยายความยาวรากเป็นลักษณะที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วตั้งแต่ 7 วันหลังงอก ซึ่งเกิดจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน ในขณะที่ระยะ 14 21 และ 28 วันหลังงอก มีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว อิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันและอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย ในระยะแรกหรือที่กล้าข้าวอายุ 7 วันหลังงอก ปรากฏผลการขาดฟอสฟอรัสในลักษณะเพิ่มความยาวรากให้มากขึ้นที่ระดับ 0 μM การตอบสนองดังกล่าวยังคงให้ผลต่อเนื่องเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้น โดยที่ระยะ 28 วันหลังงอก ต้นข้าวที่ไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยมีการยืดขยายความยาวรากมากกว่าต้นข้าวที่ปลูกในระดับ 200 μM ถึง 20 % ในขณะที่ระดับ 100 และ 400 μM ยังมีการยืดขยายความยาวรากที่ใกล้เคียงกับระดับ 200 μM นอกจากนี้ที่ระยะ 14 วันหลังงอกเป็นต้นไป พันธุ์ข้าวเริ่มมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสชัดเจนมากยิ่งขึ้น อาร์ 258 แสดงการตอบสนองโดยสามารถยืดขยายความยาวรากได้เพิ่มขึ้นมากกว่าทุกพันธุ์ ในขณะที่ขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ที่มีความยาวรากสั้นกว่าพันธุ์อื่นๆ แต่มีการตอบสนองแปรผันตามระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างโดดเด่นในทุกระยะที่ทำการศึกษา ในส่วนของ กข 49 และซิวแม่จันมีความยาวรากใกล้เคียงกันในทุกระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 - 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		ความยาวราก (เซนติเมตร)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	8.9^{b}	12.9^{c}	20.8^{d}	24.5^{c}
	กข 49	13.7^{a}	17.6^{b}	24.9^{b}	27.4^{b}
	อาร์ 258	12.7^{a}	22.1^{a}	29.5^{a}	32.2^{a}
	ซิวแม่จัน	13.4^{a}	18.3^{b}	22.8^{c}	25.9^{bc}
F-test		***	***	***	***
$HSD_{0.05}$		1.0	1.3	1.9	2.4
ความเข้มข้น P (μM)	0	13.0^{a}	19.8^{a}	27.1^{a}	31.0^{a}
	100	12.0^{ab}	17.3^{b}	24.0^{bc}	27.1^{b}
	200	11.9^{b}	16.9^{b}	24.5^{b}	26.0^{b}
	400	11.7^{b}	16.8^{b}	22.5^{c}	25.8^{b}
F-test		*	***	***	***
$HSD_{0.05}$		1.0	1.3	1.9	2.4
พันธุ์ข้าว x ความเข้มข้น P (μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	10.0	14.6^{g-i}	24.7^{b-e}	28.5^{b-d}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	8.8	13.2^{hi}	20.4^{ef}	23.5^{cd}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	7.9	11.8^{i}	20.2^{ef}	23.5^{cd}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 400	8.9	11.8^{i}	17.8^{f}	22.4^{d}
	กข 49 x 0	13.4	19.3^{b-e}	26.7^{b-d}	29.3^{bc}
	กข 49 x 100	12.8	15.9^{e-h}	23.8^{c-e}	27.2^{b-d}
	กข 49 x 200	14.4	16.8^{d-g}	24.6^{b-e}	25.4^{cd}
	กข 49 x 400	14.0	18.3^{c-f}	24.6^{b-e}	27.5^{b-d}
	อาร์ 258 x 0	14.2	25.0^{a}	34.8^{a}	39.3^{a}
	อาร์ 258 x 100	12.4	21.3^{bc}	28.7^{bc}	32.8^{ab}
	อาร์ 258 x 200	11.9	20.4^{bc}	29.6^{ab}	30.0^{bc}
	อาร์ 258 x 400	12.0	21.7^{ab}	24.9^{b-e}	26.6^{b-d}

ตารางที่ 9 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		ความยาวราก (เซนติเมตร)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว x	ซิวแม่จัน x 0	14.4	20.2^{b-d}	22.1^{d-f}	26.7^{b-d}
ความเข้มข้น P	ซิวแม่จัน x 100	14.1	18.8^{b-f}	23.3^{de}	25.0^{cd}
(μM)	ซิวแม่จัน x 200	12.5	18.5^{b-f}	23.5^{c-e}	25.1^{cd}
	ซิวแม่จัน x 400	12.5	15.6^{f-h}	22.5^{d-f}	26.7^{b-d}
F-test		ns	**	**	**
$HSD_{0.05}$		-	3.4	5.3	6.7
CV (%)		8.0	6.4	7.1	8.0

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

1.2 การสร้างจำนวนรากต่อต้น

หลังการย้ายกล้าข้าว 4 พันธุ์ ลงปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสแตกต่างกัน ในช่วง 7 วันหลังงอก การสร้างจำนวนรากต่อต้นของข้าวยังไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อผ่านไป 14 วันหลังงอก กข 49 และขาวดอกมะลิ 105 เริ่มมีการสร้างจำนวนรากต่อต้นมากกว่าอาร์ 258 และซิวแม่จัน รวมทั้งยังปรากฏผลของการขาดฟอสฟอรัสที่ระดับ 0 μM ทำให้การสร้างจำนวนรากต่อต้นลดลงจากระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอื่นๆ 9 - 18 % การไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยยังมีผลยับยั้งการสร้างรากใหม่ของข้าวทุกพันธุ์อย่างชัดเจนตั้งแต่ระยะ 21 วันหลังงอกเป็นต้นไป โดยข้าวทุกพันธุ์มีการสร้างจำนวนรากต่อต้นสูงที่สุดเมื่อปลูกระดับ 200 μM และมีจำนวนรากที่ใกล้เคียงกับต้นข้าวที่ได้รับระดับ 100 μM สำหรับ กข 49 และอาร์ 258 มีการสร้างจำนวนรากที่ลดลงประมาณ 15 % เมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่สูงเกินความต้องการ อย่างไรก็ตามการไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยเป็นเวลานานๆ ย่อมส่งผลกระทบต่อการสร้างจำนวนรากมากยิ่งขึ้น โดยที่ระยะ 21 วันหลังงอก ข้าวที่ไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยมีจำนวนรากน้อยกว่าระดับความเข้มข้นอื่นๆ ถึง 55 - 61 % และผลของการขาดฟอสฟอรัสต่อการลดการสร้างจำนวนรากต่อต้นยังปรากฏผลชัดเจนมากขึ้นเมื่อต้นข้าวขาดฟอสฟอรัสเป็นระยะเวลาที่นานขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ยังพบลักษณะการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสที่เด่นชัดของกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ที่ระยะ 28 วันหลังงอกอีกด้วย โดย อาร์ 258 และ

ซิวแม่จันที่ได้รับระดับความเข้มข้นเพียง 100 μM มีการสร้างรากกลุ่มและขนรากขึ้นมาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวรากให้สามารถดูดหาฟอสฟอรัสได้มากขึ้น (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 จำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 - 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		จำนวนรากต่อต้น			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	3.2	11.8^{ab}	29.0^{b}	76.0^{a}
	กข 49	3.5	12.4^{a}	33.0^{a}	78.2^{a}
	อาร์ 258	3.8	10.2^{c}	21.9^{c}	46.8^{c}
	ซิวแม่จัน	3.5	11.5^{b}	24.9^{c}	53.0^{b}
	F-test	ns	***	***	***
	$HSD_{0.05}$	-	0.7	3.1	4.6
ความเข้มข้น P (μM)	0	3.4	10.4^{c}	14.4^{b}	17.0^{c}
	100	3.3	11.8^{ab}	32.0^{a}	76.3^{b}
	200	3.8	12.3^{a}	32.7^{a}	81.8^{a}
	400	3.4	11.3^{b}	29.8^{a}	78.7^{ab}
	F-test	ns	***	***	***
	$HSD_{0.05}$	-	0.7	3.1	4.6
พันธุ์ข้าว x ความเข้มข้น P (μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	2.7	10.6	15.3^{g}	20.2^{c}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	3.3	12.1	33.0^{a-d}	90.7^{a}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	3.3	12.3	33.7^{a-d}	98.0^{a}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 400	3.3	12.0	34.1^{a-c}	95.0^{a}
	กข 49 x 0	3.7	10.8	16.0^{fg}	17.8^{c}
	กข 49 x 100	3.3	13.2	39.6^{a}	92.3^{a}
	กข 49 x 200	4.0	13.6	41.2^{a}	102.3^{a}
	กข 49 x 400	3.0	11.9	35.2^{ab}	100.2^{a}
	อาร์ 258 x 0	4.0	9.5	11.0^{g}	14.2^{c}
	อาร์ 258 x 100	3.7	10.1	26.0^{c-e}	55.8^{b}
	อาร์ 258 x 200	4.0	10.8	25.1^{de}	60.0^{b}
	อาร์ 258 x 400	3.7	10.2	25.4^{de}	57.0^{b}

ตารางที่ 10 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		จำนวนรากต่อต้น			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว x	ซิวแม่จัน x 0	3.3	10.8	15.1[g]	16.0[c]
ความเข้มข้น P	ซิวแม่จัน x 100	3.0	11.9	29.3[b-e]	66.5[b]
(μM)	ซิวแม่จัน x 200	4.0	12.4	30.7[b-e]	67.0[b]
	ซิวแม่จัน x 400	3.7	11.0	24.2[ef]	62.7[b]
F-test		ns	ns	*	***
$HSD_{0.05}$		-	-	8.6	12.5
CV (%)		20.0	5.5	10.4	6.5

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

1.3 การสะสมน้ำหนักแห้งราก

การสะสมน้ำหนักแห้งรากเป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงความเครียดของข้าวเนื่องจากการขาดฟอสฟอรัส โดยเมื่อข้าวประสบปัญหาขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติมักสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้ลดลง ในช่วง 21 วันแรกหลังงอก อาร์ 258 ซึ่งมีศักยภาพโดดเด่นในด้านการยืดขยายความยาวรากยังสามารถแสดงศักยภาพในการสะสมน้ำหนักแห้งรากได้สูงกว่าพันธุ์อื่นๆ ซึ่งการยืดขยายความยาวรากและการสร้างจำนวนรากต่อต้นนั้นเป็นลักษณะที่ส่งผลโดยตรงต่อการสะสมน้ำหนักแห้งราก สำหรับการตอบสนองของข้าวต่อการระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสนั้น ข้าวเริ่มแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะ 21 และ 28 วันหลังงอก โดยข้าวที่ไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยมีการสะสมน้ำหนักแห้งรากได้ลดลงถึง 57 - 87 % ตามลำดับ เมื่อเทียบกับข้าวที่ได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอย่างพอเพียง (200 μM) นอกจากนี้ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับ 100 และ 400 μM ยังยังสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้เบื้องต้นให้เห็นว่าที่ระดับ 100 μM ต้นข้าวยังมีการเจริญเติบโตที่สมบูรณ์เทียบเท่าระดับความเข้มข้นพอเพียง (ตารางที่ 11)

ตารางที่ 11 การสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 - 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		การสะสมน้ำหนักแห้งราก (มิลลิกรัม/ต้น)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	1.5[c]	12.1[c]	75.2[c]	387.4
	กข 49	1.8[b]	18.8[b]	105.5[ab]	438.7
	อาร์ 258	2.6[a]	26.4[a]	119.9[a]	429.3
	ซิวแม่จัน	1.9[b]	20.3[b]	98.7[b]	429.9
F-test		***	***	***	ns
$HSD_{0.05}$		0.3	4.6	19.1	-
ความเข้มข้น P (μM)	0	1.9	20.0	48.3[b]	72.4[b]
	100	2.0	18.4	117.3[a]	517.8[a]
	200	1.9	19.6	114.6[a]	537.0[a]
	400	2.0	19.6	119.0[a]	558.1[a]
F-test		ns	ns	***	***
$HSD_{0.05}$		-	-	19.1	82.2
พันธุ์ข้าว x ความเข้มข้น P (μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	1.4	11.3	33.5	57.8
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	1.4	11.7	81.6	478.8
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	1.5	12.1	95.7	502.0
	ขาวดอกมะลิ 105 x 400	1.6	13.1	90.0	511.0
	กข 49 x 0	1.8	19.0	49.8	72.1
	กข 49 x 100	1.9	17.3	126.7	548.8
	กข 49 x 200	1.8	18.2	127.5	528.9
	กข 49 x 400	1.7	20.9	118.0	605.1
	อาร์ 258 x 0	2.4	26.6	69.0	98.0
	อาร์ 258 x 100	2.7	26.5	135.3	483.4
	อาร์ 258 x 200	2.5	25.1	113.2	529.5
	อาร์ 258 x 400	2.6	27.5	162.1	606.4

ตารางที่ 11 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		การสะสมน้ำหนักแห้งราก (มิลลิกรัม/ต้น)			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว x	ซิวแม่จัน x 0	2.0	23.1	41.0	61.7
ความเข้มข้น P	ซิวแม่จัน x 100	1.8	17.8	125.6	560.4
(μM)	ซิวแม่จัน x 200	1.8	23.2	122.1	587.7
	ซิวแม่จัน x 400	1.9	17.0	105.9	509.8
F-test		ns	ns	ns	ns
$HSD_{0.05}$		-	-	-	-
CV (%)		13.2	21.2	17.3	17.6

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

1.4 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน

อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน (root : shoot ratio) เป็นลักษณะที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถของรากข้าวในการสร้างต้น โดยอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินเท่ากับ 1 หมายถึงต้องใช้รากในปริมาณมากในการสร้างต้นซึ่งทั้งต้นและรากมีปริมาณเท่ากัน ในขณะที่อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินต่ำกว่า 1 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของรากในการสร้างต้นได้ดี สำหรับข้าวที่ขาดฟอสฟอรัสจะมีการปรับตัวเพื่อให้สามารถหาฟอสฟอรัสได้เพียงพอต่อความต้องการโดยเพิ่มอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือให้สูงขึ้น การปรับตัวในลักษณะดังกล่าวเริ่มปรากฏผลชัดเจนเมื่อข้าวอายุ 14 วันหลังงอกเป็นต้นไป ในภาพรวมจะเห็นได้ว่าเมื่อข้าวไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลย ส่งผลให้ข้าวมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงขึ้นถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นพอเพียง (200 μM) การตอบสนองดังกล่าวยังส่งผลต่อเนื่องและรุนแรงมากยิ่งขึ้นเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้นอีกด้วย การตอบสนองในลักษณะนี้แสดงให้ถึงความพยายามของข้าวในการแสวงหาฟอสฟอรัสเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ ในขณะที่ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับ 100 ถึง 400 μM มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินไม่แตกต่างกัน สำหรับการตอบสนองด้านอิทธิพลของสายพันธุ์ข้าวเริ่มปรากฏผลเมื่อข้าวอายุ 14 วันหลังงอกเป็นต้นไปเช่นกัน กลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ซึ่งมีระบบนิเวศการปลูกในพื้นที่ดอนหรือที่สูง มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน โดยเฉพาะ

อาร์ 258 ที่ปลูกในกรรมวิธีที่ไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลย มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าพันธุ์อื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 - 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	0.21^{a}	0.26^{b}	0.26^{c}	0.29^{c}
	กข 49	0.20^{b}	0.27^{b}	0.31^{b}	0.33^{b}
	อาร์ 258	0.22^{a}	0.34^{a}	0.36^{a}	0.39^{a}
	ซิวแม่จัน	0.23^{a}	0.32^{a}	0.33^{ab}	0.36^{b}
	F-test	***	***	***	***
	$HSD_{0.05}$	0.02	0.04	0.03	0.03
ความเข้มข้น P (μM)	0	0.22	0.45^{a}	0.54^{a}	0.56^{a}
	100	0.20	0.24^{b}	0.23^{b}	0.27^{b}
	200	0.19	0.25^{b}	0.23^{b}	0.27^{b}
	400	0.21	0.25^{b}	0.25^{b}	0.27^{b}
	F-test	ns	***	***	***
	$HSD_{0.05}$	-	0.04	0.03	0.03
พันธุ์ข้าว x ความเข้มข้น P (μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	0.22^{a-c}	0.42	0.45^{b}	0.46^{b}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	0.18^{bc}	0.20	0.19^{d}	0.23^{d}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	0.21^{bc}	0.21	0.19^{d}	0.24^{cd}
	ขาวดอกมะลิ 105 x 400	0.22^{a-c}	0.20	0.19^{d}	0.23^{cd}
	กข 49 x 0	0.18^{bc}	0.39	0.51^{b}	0.51^{b}
	กข 49 x 100	0.19^{bc}	0.22	0.24^{cd}	0.28^{cd}
	กข 49 x 200	0.18^{c}	0.22	0.24^{cd}	0.27^{cd}
	กข 49 x 400	0.18^{bc}	0.23	0.24^{cd}	0.28^{cd}
	อาร์ 258 x 0	0.20^{bc}	0.53	0.65^{a}	0.74^{a}
	อาร์ 258 x 100	0.24^{ab}	0.26	0.25^{cd}	0.27^{cd}
	อาร์ 258 x 200	0.22^{a-c}	0.26	0.25^{cd}	0.27^{cd}
	อาร์ 258 x 400	0.24^{a-c}	0.30	0.28^{c}	0.28^{cd}

ตารางที่ 12 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน			
		7 วัน	14 วัน	21 วัน	28 วัน
พันธุ์ข้าว x	ซิวแม่จัน x 0	0.28^{a}	0.48	0.54^{b}	0.52^{b}
ความเข้มข้น P	ซิวแม่จัน x 100	0.21^{a-c}	0.25	0.26^{cd}	0.31^{c}
(μM)	ซิวแม่จัน x 200	0.19^{bc}	0.29	0.26^{cd}	0.31^{c}
	ซิวแม่จัน x 400	0.21^{bc}	0.27	0.27^{cd}	0.30^{cd}
F-test		**	ns	*	***
$HSD_{0.05}$		0.07	-	0.09	0.08
CV (%)		10.3	11.0	9.8	7.2

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1.1

ลักษณะสัณฐานวิทยาของระบบรากข้าวมีการตอบสนองต่อการได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันอย่างรวดเร็ว ในภาพรวมจะเห็นได้ว่าระบบรากของข้าวทั้ง 4 พันธุ์ แสดงอาการวิกฤติอย่างเห็นได้ชัดเมื่อไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลย (0 μM) โดยมีการยืดขยายความยาวรากมากกว่าระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอื่นๆ ตั้งแต่ 7 วันหลังงอก ทั้งนี้เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายหรือมีการเคลื่อนย้ายต่ำ และเคลื่อนย้ายเข้าสู่รากข้าวด้วยกระบวนการสัมผัสทางกายภาพและแลกเปลี่ยนประจุกัน ดังนั้นเมื่อข้าวขาดฟอสฟอรัสระบบรากจึงจำเป็นต้องมีการยืดขยายความยาวรากให้มากขึ้น เพื่อให้รากสามารถกระจายตัวออกไปหาฟอสฟอรัสที่อยู่บริเวณรอบๆ ต้นข้าว (Richardson et al., 2011) นอกจากนี้การยืดขยายรากยังใช้ทรัพยากรหรือฟอสฟอรัส (ATP) ในปริมาณที่น้อยกว่าการสร้างรากใหม่ การเพิ่มความยาวรากจึงเป็นลักษณะที่มีการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็วที่สุด (Kirk and Du, 1997) อย่างไรก็ตาม การได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพียง 100 μM และการได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่เกินความพอเพียง (400 μM) นั้น ส่งผลให้ต้นข้าวมีความยาวรากที่ใกล้เคียงกับต้นข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสพอเพียง (200 μM) สำหรับข้าวขาวดอกมะลิ 105 เป็นพันธุ์ที่มีการตอบสนองของความยาวรากต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับโดดเด่นกว่าพันธุ์อื่นๆ ในลักษณะแปรผกผันกัน เมื่อเข้าสู่ระยะ

14 วันหลังงอกเป็นต้นไป ลักษณะยืดขยายความยาวรากเพียงอย่างเดียวนั้นอาจหาฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ข้าวจึงต้องมีการพัฒนาลักษณะอื่นๆ ขึ้นมาเพื่อชดเชยและส่งเสริมการดูดหาฟอสฟอรัสร่วมกับลักษณะการยืดขยายความยาวราก นั่นก็คือการสร้างจำนวนรากต่อต้นให้สูงขึ้น โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อข้าวได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพียง 100 μM มีการเพิ่มจำนวนรากต่อต้นให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะการปรับตัวเพื่อเพิ่มผิวสัมผัสหรือเพิ่มปริมาตรพื้นที่ผิวรากต่อหน่วยพื้นที่ให้มากขึ้นนั่นเอง ลักษณะดังกล่าวเป็นการเพิ่มอัตราการดูดซึมฟอสฟอรัสอย่างเห็นได้ชัด (Fohse et al., 1988) สำหรับข้าวแต่ละพันธุ์ยังมีการสร้างจำนวนรากที่แตกต่างกันออกไป โดยกลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวนมีการสร้างจำนวนรากต่อต้นที่สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ แต่กลุ่มพันธุ์ข้าวไร่นั้นมีการยืดขยายความยาวรากที่สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน ซึ่งเป็นลักษณะของการชดเชยซึ่งกันและกัน และที่ระยะ 28 วันหลังงอก อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน (กลุ่มพันธุ์ข้าวไร่) ที่ได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพียง 100 μM สามารถสร้างรากกลุ่ม (cluster root) และขนรากขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Benjamin et al. (1988) ที่พบว่าถั่ว *Lupinus albus* เมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับ 100 μM เป็นเวลานาน 3 สัปดาห์ มีการสร้างรากกลุ่มและแตกรากแขนงเป็นจำนวนมาก เมื่อนำผลการตอบสนองของพืชทั้งสองมาเปรียบเทียบกัน จะเห็นได้ว่าพืชทั้งสองชนิดมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ระดับเดียวกัน แต่มีการแสดงออกในช่วงเวลาที่แตกต่างกันเท่านั้น สำหรับรากกลุ่มดังกล่าวมักเกิดขึ้นเมื่อพืชเจอสภาวะขาดฟอสฟอรัสเป็นเวลานานๆ โดยมีขนรากขึ้นปกคลุมอย่างหนาแน่นเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวรากให้มากขึ้นกว่าปกติ อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์และหลั่งสารอินทรีย์ (โดยเฉพาะ citrate และ malate) และกรดฟอสฟาเทสได้อีกด้วย ซึ่งช่วยให้ฟอสฟอรัสรูปที่ไม่ละลายน้ำสามารถละลายน้ำได้ และย่อยอินทรีย์ฟอสเฟตให้มีขนาดเล็กลง (Playsted et al., 1988; Lambers et al., 2006)

สำหรับลักษณะการยืดขยายความยาวรากและการสร้างจำนวนรากต่อต้นของข้าวที่ได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่แตกต่างกัน ยังส่งผลต่อเนื่องถึงการสะสมน้ำหนักแห้งราก โดยเมื่อข้าวขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติจะสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้ลดลง ซึ่งเป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงความเครียดของพืชจากการขาดฟอสฟอรัส (Dobermann and Fairhurst, 2000) จากผลการทดลองที่ผ่านมาพบว่าระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ข้าวได้รับเริ่มส่งผลกระทบต่อการสะสมน้ำหนักแห้งรากเมื่อข้าวมีอายุ 21 วันหลังงอกเป็นต้นไป โดยข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับ 100 ถึง 400 μM ยังสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้ไม่แตกต่างกัน มีเพียงระดับ 0 μM เท่านั้นที่มีน้ำหนักแห้งรากลดลงอย่างมากเมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสคือ ระดับ 0 μM ในส่วนของข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสเพียง 100 μM นั้น ยังสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้เทียบเท่ากับระดับ 200 μM เช่นเดียวกับระดับ 400 μM ที่ยังไม่ส่งผลกระทบต่อการสะสมน้ำหนักแห้งรากเช่นกัน

ข้าวที่ขาดฟอสฟอรัสมักมีกลไกการปรับตัวเพื่อให้อยู่รอดโดยเพิ่มอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินให้สูงขึ้น และเริ่มมีการปรับตัวในลักษณะดังกล่าวเมื่อมีอายุ 14 วันหลังงอกเป็นต้นไป ต้นข้าวที่ไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าระดับความเข้มข้นอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ต้นข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 100 ถึง 400 μM มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อข้าวขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติ (0 μM) มีความพยายามแสวงหาฟอสฟอรัสเพื่อให้สามารถอยู่รอดต่อไปได้ โดยเพิ่มอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินให้สูงขึ้น โดยเป็นผลมาจากการลดการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบ อาหารที่ได้จากกระบวนสังเคราะห์ด้วยแสงถูกส่งมาพัฒนาระบบรากมากขึ้น (Cakmak et al., 1994) ทั้งนี้การพัฒนาของระบบรากดังกล่าวเพื่อช่วยให้ข้าวสามารถหาฟอสฟอรัสที่อยู่บริเวณรอบๆ รากให้ได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Gaume et al. (2001) ที่พบว่าพืชที่เจอสภาวะขาดฟอสฟอรัสจะมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าพืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างพอเพียง

จากผลการทดลองที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าระบบรากข้าวมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างชัดเจน และแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสที่ระดับ 0 μM เพียงระดับเดียวเท่านั้น เมื่อข้าวไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยจะส่งผลให้ระบบรากมีการยืดขยายความยาวรากมากขึ้น ปรับอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินให้สูงขึ้น แต่ในขณะที่การสร้างจำนวนรากต่อต้นและการสะสมน้ำหนักแห้งรากลดลง ในส่วนของระบบรากข้าวที่ได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพียง 100 μM ยังส่งผลให้ระบบรากมีการพัฒนาได้อย่างปกติเช่นเดียวกับระดับ 200 μM ทั้งนี้อาจเกิดจากต้นข้าวเองรับรู้ถึงสภาวะที่มีฟอสฟอรัสต่ำ จึงมีการเตรียมความพร้อมเพื่อเจอกับสถานการณ์ดังกล่าว โดยมีการเก็บรักษาฟอสฟอรัสที่หาได้ไว้ให้มากที่สุด อาจมีการนำฟอสฟอรัสที่หาได้มาเก็บสะสมไว้ภายในเซลล์ หรือมีการรักษาปริมาณฟอสฟอรัสภายในเซลล์ให้สมดุล และลดปริมาณความเข้มข้นในแวคิวโอลลงแล้วกระจายไปยังส่วนของไซโตพลาสซึม เพื่อให้กิจกรรมต่างๆ ในส่วนของไซโตพลาสซึมดำเนินต่อไปได้อย่างปกติ (Lauer et al., 1988; Raghothama, 1999) นอกจากนี้ ยังพบว่าพันธุ์ข้าวที่นำมาศึกษามีการตอบสนองที่แตกต่างกันออกไป โดยเฉพาะขาวดอกมะลิ 105 ที่มีการตอบสนองแปรผันตามระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างเด่นชัดกว่าพันธุ์อื่นๆ การตอบสนองของพันธุ์ข้าวโดยภาพรวมจะเห็นได้ว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวไร่มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน โดยเฉพาะอาร์ 258 ที่มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าพันธุ์ส่วนใหญ่อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเป็นกลไกการปรับตัวตามลักษณะประจำพันธุ์พืชนั้นเอง เนื่องจากข้าวไร่เป็นพันธุ์ข้าวที่มีระบบนิเวศการปลูกบนพื้นที่ดอนซึ่งมีสภาพภูมิประเทศที่หลากหลาย เมื่อข้าวเจอกับสภาวะขาดฟอสฟอรัสจึงต้องมีกลไกการปรับตัวเพื่อความอยู่รอดอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สามารถหาฟอสฟอรัสได้เพียงพอต่อความต้องการนั่นเอง

2. ผลการทดลองที่ 1.2 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าว 4 พันธุ์ ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 5 ระดับ

จากผลการทดลองที่ 1.1 ที่ผ่านมา ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าระบบรากข้าวแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสที่ระดับ 0 μM แต่ที่ระดับ 100 μM ยังมีการพัฒนาระบบรากที่ใกล้เคียงกับระดับ 200 μM ในการทดลองนี้จึงยังเป็นการศึกษาเพื่อหาลักษณะการตอบสนองของระบบรากต่อการขาดฟอสฟอรัสที่นำผลการทดลองที่ 1.1 มาศึกษาต่อยอดเพื่อให้สามารถระบุได้ว่าระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเท่าใดที่ส่งผลให้ระบบรากแสดงอาการขาด และข้าวเริ่มมีการตอบสนองตั้งแต่อายุกี่วัน โดยมีการเพิ่มความถี่ของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสและการเก็บข้อมูลมากยิ่งขึ้น

สำหรับการทดลองที่ 1.2 นี้ เป็นการศึกษาการเจริญเติบโตของกล้าข้าว 4 พันธุ์ ในสภาพสารละลายธาตุอาหารที่มีระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสแตกต่างกัน 5 ระดับ ได้แก่ 0, 25, 50, 100 และ 200 μM โดยปลูกศึกษานาน 15 วัน ผลการศึกษาพบว่าลักษณะการยืดขยายความยาวราก การสร้างจำนวนรากต่อต้น และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน มีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว อิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน และอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัย ในขณะที่การสะสมน้ำหนักแห้งรากมีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันเท่านั้น โดยในแต่ละลักษณะมีการตอบสนองดังนี้

2.1 การยืดขยายความยาวราก

ในช่วง 3 และ 6 วันหลังงอก มีเพียงความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวเท่านั้น ซึ่งปรากฏผลชัดเจนเมื่อข้าวอายุ 6 วันหลังงอก การตอบสนองของระบบรากดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองที่ 1.1 ที่ผ่านมา อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน (กลุ่มพันธุ์ข้าวไร่) ยังคงมีการยืดขยายความยาวรากได้มากกว่า ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 49 (กลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน) ซึ่งส่งผลต่อเนื่องจนถึงระยะสุดท้ายที่ทำการศึกษา (15 วันหลังงอก) สำหรับการตอบสนองด้านการยืดขยายความยาวรากของข้าวต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันนั้น ปรากฏผลความแตกต่างเมื่อข้าวอายุ 9 วันหลังงอกเป็นต้นไป ที่ระดับ 0 μM และ 100 μM มีการยืดขยายความยาวรากสูงที่สุด ในขณะที่ระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอื่นๆ มีผลทำให้ความยาวรากข้าวไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่า ขาวดอกมะลิ 105 เริ่มมีการยืดขยายความยาวรากที่ตอบสนองแปรผกผันกับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเมื่ออายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป ในขณะที่พันธุ์อื่นๆ ยังมีการตอบสนองที่ไม่ชัดเจน (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 ความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 3 - 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		ความยาวราก (เซนติเมตร)				
		3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	5.5^{b}	9.2^{b}	10.9^{b}	13.1^{c}	18.7^{b}
	กข 49	5.8^{ab}	9.2^{b}	12.7^{a}	14.0^{bc}	18.1^{b}
	อาร์ 258	5.0^{b}	10.0^{ab}	12.5^{a}	16.5^{a}	21.5^{a}
	ซิวแม่จัน	6.6^{a}	12.0^{a}	13.8^{a}	15.2^{ab}	20.5^{a}
	F-test	***	***	***	***	***
	$HSD_{0.05}$	0.9	1.6	1.5	1.4	1.3
ความเข้มข้น P	0	6.1	10.6	11.5^{bc}	16.4^{a}	20.1^{ab}
(μM)	25	5.8	10.2	11.3^{c}	12.8^{c}	19.0^{b}
	50	5.8	9.9	13.0^{a-c}	14.6^{b}	18.6^{b}
	100	5.5	9.9	13.7^{a}	15.7^{ab}	21.3^{a}
	200	5.5	9.5	13.3^{ab}	14.1^{bc}	19.6^{b}
	F-test	ns	ns	**	***	***
	$HSD_{0.05}$	-	-	1.8	1.7	1.6
พันธุ์ข้าว x	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	4.7	9.1	9.9^{bc}	13.0	19.7
ความเข้มข้น P	ขาวดอกมะลิ 105 x 25	4.2	9.7	9.6^{c}	12.1	16.7
(μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 50	5.0	9.4	9.9^{bc}	14.0	18.4
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	5.5	7.6	12.1^{a-c}	14.7	19.0
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	6.2	9.8	13.1^{a-c}	14.4	19.5
	กข 49 x 0	6.5	10.6	11.6^{a-c}	15.6	19.4
	กข 49 x 25	6.0	8.5	9.6^{c}	10.9	15.1
	กข 49 x 50	5.9	9.3	14.4^{a-c}	14.4	16.7
	กข 49 x 100	5.2	10.4	14.4^{a-c}	15.7	19.5
	กข 49 x 200	5.9	9.5	13.4^{a-c}	13.0	17.5
	อาร์ 258 x 0	6.1	10.5	12.0^{a-c}	19.2	21.8
	อาร์ 258 x 25	6.0	9.8	14.7^{ab}	13.6	20.9

ตารางที่ 13 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		ความยาวราก (เซนติเมตร)				
		3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว x	อาร์ 258 x 50	5.0	10.0	11.9[a-c]	16.3	19.4
ความเข้มข้น P	อาร์ 258 x 100	4.4	11.8	12.6[a-c]	18.2	23.4
(μM)	อาร์ 258 x 200	5.0	8.3	11.2[a-c]	15.5	21.9
	ซิวแม่จัน x 0	6.2	11.0	12.4[a-c]	15.0	19.6
	ซิวแม่จัน x 25	7.6	12.1	11.2[a-c]	14.1	19.6
	ซิวแม่จัน x 50	7.2	10.9	14.2[a-c]	14.8	18.8
	ซิวแม่จัน x 100	6.4	12.2	15.6[a]	18.4	23.3
	ซิวแม่จัน x 200	7.7	11.7	15.5[a]	14.7	20.5
F-test		ns	ns	**	ns	ns
$HSD_{0.05}$		-	-	4.9	-	-
CV (%)		15.8	16.8	12.7	9.8	6.7

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

2.2 การสร้างจำนวนรากต่อต้น

อิทธิพลของพันธุ์ข้าวมีผลต่อการสร้างจำนวนรากของข้าวตั้งแต่ 3 วันแรกหลังงอก ซึ่งมีการตอบสนองคล้ายคลึงกับการทดลองที่ 1.1 เช่นกัน กลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน (ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 49) ยังสามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ (อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน) การตอบสนองดังกล่าวยังส่งผลต่อเนื่องเมื่อปลูกข้าวเป็นระยะเวลานานขึ้น สำหรับการตอบสนองด้านการสร้างจำนวนรากต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน เริ่มปรากฏผลความแตกต่างเมื่อข้าวมีอายุ 9 วันหลังงอก และหลังจากปลูกข้าวนาน 12 วันเป็นต้นไป ทำให้เห็นถึงผลกระทบของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่อการสร้างจำนวนรากอย่างชัดเจน ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้น 0 ถึง 50 μM สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ลดลงถึง 18 - 22 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในระดับ 200 μM ในส่วนของข้าวที่ปลูกในระดับ 100 และ 200 μM ยังสามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ยังพบการตอบสนองของพันธุ์ กข 49 และ

อาร์ 258 ที่อายุ 12 วันหลังงอก ซึ่งสามารถสร้างจำนวนรากเพิ่มขึ้นเมื่อไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลย ซึ่งเป็นลักษณะการพยายามเพิ่มพื้นที่ผิวรากเพื่อให้สามารถกระจายตัวออกไปหาฟอสฟอรัสที่อยู่บริเวณรอบๆ ได้มากขึ้น แต่เมื่อข้าวมีอายุมากขึ้นความพยายามดังกล่าวไม่สามารถพัฒนาต่อไปได้เนื่องจากต้นข้าวเองขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติเป็นเวลานาน ในขณะที่ขาวดอกมะลิ 105 และซิวแม่จัน มีการสร้างจำนวนรากลดลงเมื่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับต่ำลงในลักษณะแปรผันตามกัน ลักษณะการสร้างจำนวนรากต่อต้นดังกล่าวยังคงส่งผลแบบต่อเนื่องและรุนแรงยิ่งขึ้นเมื่อระยะเวลาในการปลูกข้าวนานยิ่งขึ้น (15 วันหลังงอก) ข้าวที่ได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 0 ถึง 50 μM สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ลดลงถึง 20 – 32 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในระดับ 200 μM (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 จำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 3 - 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		จำนวนรากต่อต้น				
		3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	3.0^{a}	7.1^{ab}	11.4^{b}	15.4^{a}	21.1^{a}
	กข 49	2.5^{ab}	7.6^{a}	12.7^{a}	14.9^{a}	22.0^{a}
	อาร์ 258	1.4^{c}	4.9^{c}	8.5^{c}	10.2^{c}	13.8^{c}
	ซิวแม่จัน	2.3^{b}	5.9^{bc}	10.3^{b}	12.1^{b}	17.9^{b}
F-test		***	***	***	***	***
$HSD_{0.05}$		0.6	1.4	1.2	1.5	2.1
ความเข้มข้น P (μM)	0	5.8	10.3	9.7^{b}	12.5^{b}	14.8^{c}
	25	5.9	10.0	10.1^{b}	11.3^{b}	16.3^{bc}
	50	5.8	9.9	10.8^{ab}	11.9^{b}	17.5^{b}
	100	5.4	10.5	11.1^{ab}	14.7^{a}	23.1^{a}
	200	6.2	9.8	12.0^{a}	15.3^{a}	21.8^{a}
F-test		ns	ns	***	***	***
$HSD_{0.05}$		-	-	1.5	1.7	2.5

ตารางที่ 14 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		จำนวนรากต่อต้น				
		3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว x	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	3.0	6.7	10.7^{b-e}	12.7^{c-e}	15.7
ความเข้มข้น P	ขาวดอกมะลิ 105 x 25	3.0	7.0	9.0^{c-f}	12.5^{c-e}	17.8
(μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 50	3.0	7.3	11.3^{a-e}	15.2^{a-d}	21.0
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	3.3	7.0	13.3^{ab}	18.3^{a}	25.8
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	2.7	7.3	12.7^{a-c}	18.2^{a}	25.3
	กข 49 x 0	3.0	7.0	12.0^{a-d}	14.8^{a-d}	16.3
	กข 49 x 25	2.7	7.7	12.0^{a-d}	12.3^{c-e}	18.5
	กข 49 x 50	2.0	8.7	12.0^{a-d}	12.8^{c-e}	21.2
	กข 49 x 100	2.0	7.0	12.3^{a-c}	16.8^{a-c}	28.5
	กข 49 x 200	2.7	7.7	15.0^{a}	17.5^{ab}	25.5
	อาร์ 258 x 0	1.7	5.0	6.3^{f}	11.5^{de}	12.7
	อาร์ 258 x 25	1.3	5.3	8.3^{d-f}	9.2^{e}	12.7
	อาร์ 258 x 50	1.3	4.7	9.7^{b-f}	8.8^{e}	11.7
	อาร์ 258 x 100	1.0	4.3	7.7^{ef}	10.7^{de}	15.7
	อาร์ 258 x 200	1.7	5.0	10.3^{b-e}	11.0^{de}	16.3
	ซิวแม่จัน x 0	2.0	6.3	9.7^{b-f}	11.2^{de}	14.7
	ซิวแม่จัน x 25	2.0	5.7	11.0^{b-e}	11.3^{de}	16.3
	ซิวแม่จัน x 50	2.0	6.3	10.0^{b-f}	10.8^{de}	16.0
	ซิวแม่จัน x 100	3.3	5.7	11.0^{b-e}	13.0^{b-e}	22.5
	ซิวแม่จัน x 200	2.3	5.3	10.0^{b-f}	14.3^{a-d}	20.2
	F-test	ns	ns	**	*	ns
	$HSD_{0.05}$	-	-	3.9	4.6	-
	CV (%)	28.1	23	11.7	11.3	11.3

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

2.3 การสะสมน้ำหนักแห้งราก

เมื่อพิจารณาถึงการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวที่ได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่แตกต่างกันนั้น จะเห็นได้ว่าลักษณะดังกล่าวได้รับอิทธิพลจากพันธุ์ข้าวและระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันเท่านั้น ในช่วง 9 และ 15 วันหลังงอก ซิวแม่จันเป็นพันธุ์ที่สามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้มากกว่าพันธุ์อื่นๆ นอกจากนี้การสะสมน้ำหนักแห้งของรากข้าวยังแปรผันตามระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่ 9 วันหลังงอกเป็นต้นไป โดยข้าวเริ่มมีการสะสมน้ำหนักแห้งรากลดลงเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM ถึง 23 – 30 % เมื่อเทียบกับรากข้าวในระดับ 200 μM โดยการลดลงของน้ำหนักแห้งรากนี้แสดงให้เห็นถึงความเครียดของข้าวเนื่องจากการขาดฟอสฟอรัสนั่นเอง (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 การสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 6 - 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		การสะสมน้ำหนักแห้งราก (มิลลิกรัม/ต้น)			
		6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	3.1^{b}	8.0^{b}	19.6	30.4^{b}
	กข 49	3.7^{a}	9.1^{b}	13.7	26.9^{c}
	อาร์ 258	3.6^{a}	9.0^{b}	16.8	29.6^{bc}
	ซิวแม่จัน	3.7^{a}	12.6^{a}	21.9	37.3^{a}
F-test		***	***	ns	***
$HSD_{0.05}$		0.3	1.4	-	3.0
ความเข้มข้น P (μM)	0	3.4	7.4^{b}	14.1	25.5^{b}
	25	3.6	8.4^{b}	15.9	28.5^{b}
	50	3.6	10.2^{a}	17.2	28.4^{b}
	100	3.6	11.1^{a}	21.1	36.0^{a}
	200	3.6	11.3^{a}	21.8	36.9^{a}
F-test		ns	***	ns	***
$HSD_{0.05}$		-	1.7	-	3.6

ตารางที่ 15 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		การสะสมน้ำหนักแห้งราก (มิลลิกรัม/ต้น)			
		6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว x	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	3.0	6.7	14.8	23.9
ความเข้มข้น P	ขาวดอกมะลิ 105 x 25	3.2	7.5	16.9	28.9
(μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 50	3.0	8.1	18.7	28.5
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	3.1	8.9	23.1	35.1
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	3.0	9.1	24.3	35.6
	กข 49 x 0	3.5	6.8	10.8	21.7
	กข 49 x 25	3.8	7.6	10.9	21.9
	กข 49 x 50	3.8	10.3	13.9	21.0
	กข 49 x 100	3.7	10.4	16.2	34.7
	กข 49 x 200	3.8	10.4	16.9	34.9
	อาร์ 258 x 0	3.5	6.9	13.0	23.3
	อาร์ 258 x 25	3.6	9.1	15.0	27.1
	อาร์ 258 x 50	3.7	9.2	15.1	27.5
	อาร์ 258 x 100	3.7	9.6	20.4	34.0
	อาร์ 258 x 200	3.7	10.1	20.7	36.0
	ซิวแม่จัน x 0	3.4	9.1	17.8	33.1
	ซิวแม่จัน x 25	3.7	9.5	20.8	35.9
	ซิวแม่จัน x 50	3.8	13.2	21.0	36.5
	ซิวแม่จัน x 100	3.8	15.5	24.4	40.0
	ซิวแม่จัน x 200	3.9	15.5	25.2	41.0
	F-test	ns	ns	ns	ns
	$HSD_{0.05}$	-	-	-	-
	CV (%)	9.3	15.1	11.0	9.9

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

2.4 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน

ข้าวที่ขาดฟอสฟอรัสมักมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงขึ้น และมีการตอบสนองแบบแปรผกผันกับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับ โดยเริ่มปรากฏผลการตอบสนองที่ระยะ 9 วันหลังงอกเป็นต้นไป ข้าวที่ได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับ 0 ถึง 50 μM เริ่มมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 34 % เมื่อเทียบกับข้าวที่ปลูกในระดับ 200 μM การตอบสนองดังกล่าวยังคงส่งผลต่อเนื่องเมื่อระยะเวลาที่ปลูกข้าวนานยิ่งขึ้น โดยที่ระยะ 15 วันหลังงอก ข้าวที่ปลูกในระดับ 0 ถึง 50 μM มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงขึ้นถึง 2 เท่าตัวอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับข้าวที่ปลูกในระดับ 200 μM อย่างไรก็ตามการได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 100 และ 200 μM ยังคงมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่ใกล้เคียงกันในทุกช่วงอายุที่ทำการศึกษา นอกจากนี้พันธุ์ข้าวยังมีการตอบสนองที่แตกต่างกันออกไป ที่ระยะ 12 วันหลังงอก กข 49 ยังคงมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่ใกล้เคียงกันในทุกระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส ในขณะที่พันธุ์อื่นๆ มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่แปรผันตามระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับในลักษณะแปรผกผันกัน กล่าวคือข้าวมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM ตามลำดับ และเมื่อเข้าสู่ระยะ 15 วันหลังงอก กข 49 จึงเริ่มมีการตอบสนองของอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่แปรผันตามระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับเช่นเดียวกับพันธุ์อื่นๆ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวนและกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ มีการตอบสนองด้านอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สอดคล้องกับผลการทดลองที่ 1.1 โดยกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวนเฉลี่ย 25 % (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 6 - 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน		อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน			
		6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว	ขาวดอกมะลิ 105	0.29	0.35^{b}	0.36	0.30^{b}
	กข 49	0.33	0.32^{b}	0.27	0.27^{b}
	อาร์ 258	0.35	0.35^{b}	0.35	0.37^{a}
	ซิวแม่จัน	0.33	0.42^{a}	0.40	0.40^{a}
	F-test	ns	**	ns	***
	$HSD_{0.05}$	-	0.07	-	0.04
ความเข้มข้น P (μM)	0	0.34	0.39^{ab}	0.41	0.47^{a}
	25	0.34	0.39^{ab}	0.37	0.42^{a}
	50	0.32	0.40^{a}	0.38	0.36^{b}
	100	0.32	0.32^{bc}	0.29	0.22^{c}
	200	0.29	0.30^{c}	0.29	0.21^{c}
	F-test	ns	**	ns	***
	$HSD_{0.05}$	-	0.08	-	0.05
พันธุ์ข้าว x ความเข้มข้น P (μM)	ขาวดอกมะลิ 105 x 0	0.35	0.46^{ab}	0.48	0.49
	ขาวดอกมะลิ 105 x 25	0.28	0.45^{ab}	0.36	0.38
	ขาวดอกมะลิ 105 x 50	0.28	0.34^{a-c}	0.32	0.28
	ขาวดอกมะลิ 105 x 100	0.29	0.25^{bc}	0.31	0.18
	ขาวดอกมะลิ 105 x 200	0.26	0.24^{c}	0.31	0.18
	กข 49 x 0	0.34	0.29^{bc}	0.30	0.37
	กข 49 x 25	0.35	0.30^{a-c}	0.27	0.34
	กข 49 x 50	0.32	0.42^{a-c}	0.32	0.25
	กข 49 x 100	0.33	0.31^{a-c}	0.23	0.19
	กข 49 x 200	0.30	0.27^{bc}	0.25	0.19
	อาร์ 258 x 0	0.38	0.38^{a-c}	0.34	0.49
	อาร์ 258 x 25	0.37	0.36^{a-c}	0.39	0.47

ตารางที่ 16 (ต่อ)

แหล่งของความแปรปรวน		อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน			
		6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
พันธุ์ข้าว x	อาร์ 258 x 50	0.34	0.34[a-c]	0.40	0.45
ความเข้มข้น P	อาร์ 258 x 100	0.34	0.34[a-c]	0.32	0.27
(μM)	อาร์ 258 x 200	0.30	0.31[a-c]	0.31	0.26
	ซิวแม่จัน x 0	0.31	0.42[a-c]	0.50	0.61
	ซิวแม่จัน x 25	0.38	0.44[a-c]	0.46	0.50
	ซิวแม่จัน x 50	0.34	0.50[a]	0.48	0.45
	ซิวแม่จัน x 100	0.33	0.36[a-c]	0.28	0.23
	ซิวแม่จัน x 200	0.29	0.37[a-c]	0.29	0.22
F-test		ns	*	ns	ns
$HSD_{0.05}$		-	0.21	-	-
CV (%)		20	18.6	9.7	12.3

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1.2

จากผลการทดลองที่ 1.2 นี้ ทำให้ทราบได้ว่าระบบรากข้าวมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับคล้ายคลึงกับการทดลองที่ 1.1 และแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM (0 – 50 μM) ลงมา โดยมีการปรับตัวอย่างรวดเร็วในลักษณะของการยืดขยายรากให้มีความยาวมากยิ่งขึ้นตั้งแต่ 9 วันหลังงอก การยืดขยายรากดังกล่าวเป็นลักษณะที่ตอบสนองรวดเร็วกว่าการสร้างรากใหม่ เนื่องจากการยืดขยายรากใช้ทรัพยากรหรือฟอสฟอรัส (ATP) ในปริมาณที่น้อยกว่าการสร้างรากใหม่ (Kirk and Du, 1997) หลังจากที่ข้าวมีการปรับตัวโดยเพิ่มความยาวรากให้มากขึ้นแล้ว ลักษณะดังกล่าวเพียงอย่างเดียวอาจหาฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการได้ เมื่อข้าวอายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป จึงมีการปรับตัวในลักษณะสร้างรากต่อต้นให้มากขึ้น เพื่อเพิ่มพื้นที่รากและสามารถดูดหาฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่มากขึ้น (Fohse et al., 1988; Gahoonia and Nielsan, 2004) ซึ่งเป็นลักษณะที่ส่งเสริมการดูดหา

ฟอสฟอรัสร่วมกับลักษณะการยืดขยายความยาวราก อย่างไรก็ตามเมื่อข้าวเจอกับสภาวะขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติเป็นเวลานานๆ ความสามารถในการสร้างรากใหม่จะลดลง โดยข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่า 100 μM (0 – 50 μM) มีจำนวนรากต่อต้นที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่การได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพียง 100 μM ยังส่งให้ข้าวมีจำนวนรากต่อต้นที่ใกล้เคียงกับระดับ 200 μM สำหรับความแตกต่างของพันธุกรรมของข้าวด้านการสร้างรากต่อต้นนั้นยังคงให้ผลการตอบสนองที่สอดคล้ายกับการทดลองที่ 1.1 เช่นเดิม กลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน (ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 49) มีการสร้างรากต่อต้นได้สูงกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ (อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน) แต่กลุ่มพันธุ์ข้าวไร่มีการยืดขยายรากได้ดีกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน ซึ่งเป็นลักษณะที่ชดเชยซึ่งกันและกัน นอกจากการสร้างรากต่อต้นของข้าวที่มีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไปแล้ว ลักษณะการสะสมน้ำหนักแห้งรากยังมีการตอบสนองที่ระยะ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไปเช่นกัน ที่ระดับ 0 – 50 μM ส่งผลให้ข้าวสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้ลดลงตามลำดับเมื่อเทียบกับระดับ 100 และ 200 μM ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการสร้างรากต่อต้นของ การตอบสนองในลักษณะนี้บ่งชี้ให้เห็นถึงความเครียดของข้างจากการขาดฟอสฟอรัส (Dobermann and Fairhurst, 2000) ในขณะที่ความแตกต่างด้านพันธุกรรมของข้าวต่อการสะสมน้ำหนักแห้งราก ยังให้ผลการทดลองที่ไม่ชัดเจนเท่ากับการทดลองที่ 1.1 ที่ผ่านมา ทั้งนี้อาจเกิดจากอายุของข้าวในการศึกษาน้อยเกินไป ทำให้ไม่เห็นถึงความแตกต่างของกลุ่มพันธุ์ข้าว

สำหรับลักษณะอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินมีการแปรผันตามการตอบสนองของสามลักษณะก่อนหน้านี้ โดยข้าวเริ่มมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงขึ้นเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM ตามลำดับ ลักษณะเช่นนี้เป็นการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลมาจากการลดการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบ อาหารที่ได้จากกระบวนสังเคราะห์ด้วยแสงถูกส่งมาพัฒนาระบบรากให้มากขึ้น (Cakmak et al., 1994) ทั้งนี้การพัฒนาของระบบรากดังกล่าวเพื่อช่วยให้ข้าวสามารถหาฟอสฟอรัสที่อยู่บริเวณรอบๆ รากให้ได้มากขึ้นนั่นเอง

จากผลการทดลองที่ 1.1 และ 1.2 ที่ผ่านมา ทำให้ทราบได้ว่าระบบรากข้าวทั้ง 4 พันธุ์ เริ่มมีการพัฒนาที่ลดลงเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM โดยมีการยืดขยายความยาวรากมากขึ้นตั้งแต่ 7 - 9 วันหลังงอก และเมื่อข้าวมีอายุ 9 - 12 วันหลังงอก การสร้างรากต่อต้นและการสะสมน้ำหนักแห้งรากเริ่มลดลง ในขณะที่อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินมีค่าเพิ่มขึ้น สำหรับการได้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสเพียง 100 μM ยังส่งผลให้ระบบรากมีการพัฒนาได้ตามปกติเทียบเท่าระดับความเข้มข้นพอเพียง (200 μM) สำหรับพันธุ์ข้าวที่มีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างโดดเด่นที่สุด คือ พันธุ์ขาวดอกมะลิ 105

ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาการตอบสนองของระบบรากข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหาร 7 ระดับ และหาระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส ของข้าวในระยะกล้า

สำหรับการทดลองที่ 2 นี้ เป็นการนำผลการทดลองที่ 1 มาศึกษาต่อเพื่อให้สามารถระบุถึงระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้าได้ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองที่ 1 ที่ผ่านมา ทำให้ทราบได้ว่าระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองของระบบรากข้าวต่อการขาดฟอสฟอรัส อยู่ในช่วงระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่า 100 μM เพื่อให้สามารถระบุถึงระดับความเข้มข้นวิกฤติได้อย่างแม่นยำ และสามารถอธิบายได้ว่าต้นข้าวแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสที่ระดับความเข้มข้นเท่าใดและแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสเมื่อข้าวมีอายุกี่วัน ในการศึกษานี้จึงมีการเพิ่มความถี่ของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสให้มากขึ้น และเลือกใช้พันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ 105 เพียงพันธุ์เดียวมาศึกษาต่อ เนื่องจากพันธุ์ดังกล่าวมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับอย่างชัดเจนกว่าพันธุ์อื่นๆ โดยปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส 7 ระดับ ได้แก่ 0, 20, 40, 60, 80, 100 และ 200 μM เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของระบบรากและต้นทุกๆ 3 วัน จนถึง 30 วันหลังงอก ได้แก่ การยืดขยายความยาวราก จำนวนรากต่อต้น การสะสมน้ำหนักแห้งราก อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน จำนวนใบต่อต้นและการแตกกอ การสะสมน้ำหนักแห้งต้น และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อที่ระยะ 30 วันหลังงอก ผลการศึกษาพบว่าทุกลักษณะที่ทำการศึกษา มีความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส แต่มีการตอบสนองในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยในแต่ละลักษณะมีการตอบสนอง ดังนี้

1. การยืดขยายความยาวราก

การยืดขยายความยาวรากมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็วกว่าลักษณะอื่นๆ โดยเริ่มปรากฏผลการตอบสนองตั้งแต่อายุ 9 วันหลังงอกเป็นต้นไป และเริ่มแสดงผลการตอบสนองอย่างชัดเจนเมื่อเข้าสู่ช่วงอายุ 15 วันหลังงอก ซึ่งมีการตอบสนองแปรผกผันกับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับ กล่าวคือ ระบบรากข้าวมีการยืดขยายความยาวรากมากขึ้นเมื่อได้รับฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด สำหรับในช่วงอายุ 15 – 24 วันหลังงอก ข้าวที่ปลูกในระดับ 0 μM มีการยืดขยายความยาวรากมากกว่าข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้น 200 μM ถึง 20 – 37 % นอกจากนี้ในช่วงระยะสุดท้ายที่ทำการศึกษา (27 – 30 วันหลังงอก) พบว่าข้าวที่ปลูกในทุกระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสมีการยืดขยายความยาวรากที่ไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากการยืดขยายความยาวรากให้มากขึ้นอย่างเดียวอาจหาฟอสฟอรัสได้ไม่

เพียงพอต่อความต้องการของข้าว ระบบรากจึงมีการพัฒนาลักษณะอื่นๆ ขึ้นมาชดเชยและส่งเสริมเพื่อให้สามารถดูดหาฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในสารละลายให้ได้มากขึ้น ได้แก่ การสร้างจำนวนรากต่อต้นให้มากขึ้น (ตารางที่ 17 และ 18)

ตารางที่ 17 ความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 – 15 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	ความยาวราก (เซนติเมตร)				
P (μM)	3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
0	4.5	9.1	12.1^{ab}	15.2^{a}	19.3^{a}
20	4.5	8.8	13.7^{a}	14.9^{ab}	16.1^{ab}
40	4.5	9.2	13.2^{ab}	12.7^{ab}	15.3^{ab}
60	4.8	8.6	11.0^{b}	14.2^{ab}	15.0^{ab}
80	4.6	8.7	12.6^{ab}	12.8^{ab}	13.4^{b}
100	4.5	8.9	11.2^{b}	11.5^{b}	14.2^{b}
200	4.4	9.1	12.9^{ab}	12.4^{ab}	13.1^{b}
F-test	ns	ns	**	*	*
$HSD_{0.05}$	-	-	2.3	3.5	4.8
CV (%)	6.0	10.2	6.5	9.4	11.4

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

ตารางที่ 18 ความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 – 30 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	ความยาวราก (เซนติเมตร)				
P (μM)	18 วัน	21 วัน	24 วัน	27 วัน	30 วัน
0	20.9[a]	22.4[a]	29.4[a]	32.8	35.7
20	17.9[ab]	21.8[a]	29.4[a]	33.3	35.4
40	17.7[a-c]	21.2[a]	27.9[ab]	30.8	35.0
60	16.0[b-d]	21.1[a]	27.8[ab]	31.1	33.1
80	14.2[cd]	19.3[ab]	26.4[ab]	28.4	33.1
100	14.3[b-d]	17.1[b]	23.3[b]	25.0	29.4
200	13.0[d]	17.3[b]	23.8[b]	28.6	30.4
F-test	***	***	*	ns	ns
$HSD_{0.05}$	3.6	3.6	6.2	-	-
CV (%)	7.9	6.4	8.3	10.2	8.1

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

2. การสร้างจำนวนรากต่อต้น

ในช่วงที่กล้าข้าวยังมีอายุน้อย (3 – 9 วันหลังงอก) การสร้างจำนวนรากของกล้าข้าวยังไม่มีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัส โดยเริ่มปรากฏผลความแตกต่างที่ระยะ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป การสร้างจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 มีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในลักษณะแปรผกผันกันเช่นเดียวกับการยืดขยายความยาวราก ในช่วง 12 – 18 วันหลังงอก การสร้างจำนวนรากต่อต้นเริ่มลดลงเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 40 μM และมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้สูงที่สุด (ระดับ 200 – 40 μM) กลุ่มที่สองคือกลุ่มที่สามารถสร้างจำนวนรากได้ปานกลาง ได้แก่ ระดับ 20 μM และกลุ่มที่สามเป็นกลุ่มที่สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ต่ำที่สุด คือ ระดับ 0 μM โดยกลุ่มที่สองและสามมีจำนวนรากต่อต้นลดลง 27 และ 35 % ตามลำดับเมื่อเทียบกับกลุ่มที่หนึ่ง การตอบสนองดังกล่าวยังส่งผลต่อเนื่องเมื่อข้าวมีอายุมากยิ่งขึ้น ในช่วง 24 – 30 วัน

หลังงอก พบว่าการสร้างจำนวนรากต่อต้นของข้าวเริ่มลดลงเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 60 μM โดยระบบรากยังมีการตอบสนองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มเช่นเดิม แต่ในบางระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสมีการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไป โดยกลุ่มที่สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้สูงที่สุด ประกอบไปด้วยระดับ 200 – 60 μM กลุ่มที่สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ปานกลาง ได้แก่ ระดับ 40 และ 20 μM ในขณะที่ระดับ 0 μM ยังเป็นระดับที่สามารถสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ต่ำที่สุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการตอบสนองกับช่วงอายุก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้นระดับความต้องการฟอสฟอรัสขั้นต่ำก็มีมากขึ้นตามไปด้วยนั่นเอง ทำให้การตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสมีการเปลี่ยนแปลงไป (ตารางที่ 19 และ 20)

ตารางที่ 19 จำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 – 15 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	จำนวนรากต่อต้น				
P (μM)	3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
0	2.0	4.7	7.0	11.7^{b}	11.3^{d}
20	2.0	5.7	7.7	11.7^{b}	19.0^{c}
40	2.0	6.7	7.0	14.3^{ab}	23.3^{ab}
60	2.0	6.7	7.7	13.3^{b}	23.7^{ab}
80	2.0	5.3	9.3	15.0^{ab}	23.7^{ab}
100	2.0	6.7	8.7	16.0^{ab}	22.3^{bc}
200	2.0	6.0	8.3	18.7^{a}	26.7^{a}
F-test	ns	ns	ns	**	***
$HSD_{0.05}$	-	-	-	4.4	3.9
CV (%)	0	14.2	13.2	11	6.6

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

ตารางที่ 20 จำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 – 30 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	จำนวนรากต่อต้น				
P (μM)	18 วัน	21 วัน	24 วัน	27 วัน	30 วัน
0	12.3^{c}	11.3^{c}	14.0^{c}	15.0^{c}	13.3^{c}
20	27.3^{b}	44.7^{b}	75.7^{b}	79.7^{b}	108.3^{b}
40	35.0^{a}	47.3^{ab}	78.3^{b}	84.3^{b}	130.7^{b}
60	32.7^{a}	48.0^{ab}	94.7^{a}	113.0^{a}	197.3^{a}
80	35.7^{a}	56.0^{ab}	99.7^{a}	110.3^{a}	180.3^{a}
100	33.3^{a}	48.0^{ab}	92.0^{a}	108.7^{a}	174.0^{a}
200	37.0^{a}	62.0^{a}	93.3^{a}	109.3^{a}	178.0^{a}
F-test	***	***	***	***	***
$HSD_{0.05}$	9.9	14.1	14.3	19.7	32.8
CV (%)	11.4	11	15.6	7.4	8.4

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

3. การสะสมน้ำหนักแห้งราก

สำหรับการตอบสนองด้านการสะสมน้ำหนักแห้งรากข้าวปรากฏผลความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันเมื่อข้าวมีอายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป เช่นเดียวกับการสร้างจำนวนรากต่อต้น และเริ่มมีการตอบสนองชัดเจนมากยิ่งขึ้นที่ระยะ 15 วันหลังงอก การสะสมน้ำหนักแห้งรากนี้เป็นหนึ่งในลักษณะที่ใช้ประเมินเบื้องต้นถึงความเครียดของข้าวเนื่องจากการขาดฟอสฟอรัส โดยข้าวที่ขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติมักสามารถสะสมหนักแห้งได้ลดลง ในภาพรวมจะเห็นได้ว่าที่ระยะ 21 หลังงอกเป็นต้นไป ระบบรากข้าวมีการสะสมน้ำหนักแห้งได้ไม่แตกต่างกันเมื่อปลูกในระดับ 60 – 200 μM และมีน้ำหนักแห้งรากลดลงที่ระดับความเข้มข้น 20 และ 0 μM ตามลำดับ ในขณะที่ระดับ 40 μM ยังมีน้ำหนักที่คาบเกี่ยวกับระดับ 20 μM และ 60 – 200 μM นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าในช่วงเวลาดังกล่าว ระบบรากสามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้สูงที่สุดเมื่อปลูกในระดับ 60 – 80 μM ลักษณะการตอบสนองเช่นนี้ อาจเกิดจากปริมาณฟอสฟอรัสที่

ระบบรากหามาได้นั้นยังไม่เพียงพอต่อความต้องการ ข้าวจึงพัฒนาระบบรากให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแสวงหาฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในสารละลายธาตุอาหาร (ตารางที่ 21 และ 22)

ตารางที่ 21 การสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 – 15 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	การสะสมน้ำหนักแห้งราก (มิลลิกรัม/ต้น)				
P (μM)	3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
0	0.9	2.7	4.4	6.6^{b}	11.9^{b}
20	0.7	2.6	4.3	9.7^{ab}	21.3^{ab}
40	0.7	3.0	5.1	10.8^{ab}	22.0^{ab}
60	0.8	2.9	4.2	9.8^{ab}	23.1^{a}
80	0.6	2.8	5.0	10.6^{ab}	22.1^{ab}
100	0.5	3.1	4.4	10.6^{ab}	20.9^{ab}
200	0.7	3.0	5.2	13.1^{a}	22.6^{a}
F-test	ns	ns	ns	**	*
$HSD_{0.05}$	-	-	-	4.3	
CV (%)	18.4	16.0	13.7	15.3	18.3

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

ตารางที่ 22 การสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 – 30 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	การสะสมน้ำหนักแห้งราก (มิลลิกรัม/ต้น)				
P (μM)	18 วัน	21 วัน	24 วัน	27 วัน	30 วัน
0	13.1^{c}	14.3^{c}	23.7^{c}	27.2^{c}	22.4^{c}
20	56.2^{ab}	82.3^{b}	179.5^{b}	299.5^{b}	641.1^{b}
40	64.4^{a}	87.7^{ab}	213.1^{ab}	315.6^{ab}	762.4^{ab}
60	55.1^{ab}	99.0^{a}	245.9^{a}	425.2^{a}	957.6^{a}
80	54.2^{ab}	102.2^{a}	248.3^{a}	372.9^{a}	954.9^{a}
100	44.5^{b}	97.8^{a}	220.4^{a}	370.5^{a}	794.5^{a}
200	52.5^{ab}	103.5^{a}	220.9^{a}	372.9^{a}	795.5^{a}
F-test	***	***	***	***	***
$HSD_{0.05}$	18.7	23.4	35.6	65.8	289.0
CV (%)	13.8	18.9	20.6	15.0	16.4

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

4. อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน

สำหรับการประเมินผลการตอบสนองของระบบรากโดยรวมต่อการขาดฟอสฟอรัส ซึ่งประเมินด้วยอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน ซึ่งแปรผันตามลักษณะการยืดขยายความยาวราก การสร้างจำนวนรากต่อต้นและการสะสมน้ำหนักแห้งรากนั้น ซึ่งเริ่มปรากฏผลความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่กล้าข้าวอายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป และมีการตอบสนองแปรผกผันกับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ข้าวได้รับ กล่าวคือ เมื่อข้าวได้รับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่ำลงจะส่งผลให้อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงขึ้น การไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยส่งผลให้ข้าวมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าระดับอื่นๆ อย่างชัดเจนในทุกช่วงอายุที่ทำการศึกษา ในช่วงอายุ 12 – 18 วันหลังงอก ข้าวที่ปลูกในระดับ 20 – 200 μM ยังมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่ใกล้เคียงกัน แต่ที่ระยะ 21 – 27 วันหลังงอก ต้นข้าวที่ปลูกในระดับ 0 และ 20 μM เริ่มมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงถึง 2 เท่าเมื่อเทียบกับระดับ 200 μM ทั้งนี้อาจเกิดจากการรับรู้ของระบบรากต่อปริมาณ

ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ต่ำ ต้นข้าวจึงต้องมีการปรับตัวเพื่อให้ระบบรากมีขนาดใหญ่กว่าปกติ และที่ระยะ 30 วันหลังงอก ต้นข้าวที่ปลูกในระดับ 40 μM เริ่มมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเกิดจากการได้รับฟอสฟอรัสในระดับต่ำเป็นเวลานาน ในส่วนของระดับ 60 – 200 μM ยังมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบรากยังสามารถหาฟอสฟอรัสได้เพียงพอต่อความต้องการของต้น (ตารางที่ 23 และ 24)

ตารางที่ 23 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 – 15 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน				
P (μM)	3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
0	0.43	0.33	0.29	0.29^{a}	0.31^{a}
20	0.40	0.37	0.26	0.26^{ab}	0.19^{b}
40	0.37	0.41	0.24	0.21^{bc}	0.16^{b}
60	0.35	0.38	0.21	0.20^{bc}	0.17^{b}
80	0.36	0.39	0.25	0.18^{c}	0.15^{b}
100	0.34	0.35	0.25	0.18^{c}	0.17^{b}
200	0.40	0.32	0.25	0.20^{bc}	0.17^{b}
F-test	ns	ns	ns	**	***
$HSD_{0.05}$	-	-	-	0.08	0.07
CV (%)	16.1	16.3	11.8	13	12.6

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

ตารางที่ 24 อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 – 30 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน				
P (μM)	18 วัน	21 วัน	24 วัน	27 วัน	30 วัน
0	0.36^{a}	0.38^{a}	0.40^{a}	0.41^{a}	0.39^{a}
20	0.19^{b}	0.23^{b}	0.24^{b}	0.30^{b}	0.36^{a}
40	0.17^{bc}	0.18^{c}	0.19^{c}	0.22^{c}	0.28^{b}
60	0.17^{bc}	0.16^{c}	0.17^{c}	0.19^{c}	0.24^{bc}
80	0.17^{bc}	0.16^{c}	0.17^{c}	0.19^{c}	0.22^{bc}
100	0.14^{c}	0.16^{c}	0.16^{c}	0.17^{c}	0.20^{c}
200	0.15^{bc}	0.15^{c}	0.17^{c}	0.18^{c}	0.18^{c}
F-test	***	***	***	***	***
$HSD_{0.05}$	0.05	0.03	0.04	0.08	0.06
CV (%)	8.3	5.6	6.4	12.1	8.5

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ P value ≤ 0.05

5. การสร้างจำนวนใบและการแตกกอ

การสร้างจำนวนใบและการแตกกอของข้าวเป็นลักษณะที่ใช้ประเมินถึงการเจริญเติบโตของข้าว ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับที่เพียงพอต่อความต้องการนั้น มักสามารถสร้างจำนวนใบได้มาก มีการแตกกอดี และเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์ หากข้าวขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติมักมีจำนวนใบและการแตกกอน้อย สำหรับการศึกษานี้พบว่าการสร้างจำนวนใบต่อต้นของข้าวตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสตั้งแต่อายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป ในช่วง 12 และ 15 วันหลังงอก ข้าวที่ได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับ 20 – 200 μM ยังสามารถสร้างจำนวนใบต่อต้นได้สูง มีเพียงระดับ 0 μM เท่านั้น ที่มีจำนวนใบต่อต้นน้อยที่สุด และเมื่อข้าวมีอายุ 18 – 24 วันหลังงอก เป็นช่วงที่ข้าวเริ่มมีการแตกกอ จะเห็นได้ว่าลักษณะการตอบสนองในช่วงดังกล่าวยังมีความสอดคล้องกับการตอบสนองในช่วง 12 – 15 วันหลังงอก ต้นข้าวที่ไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยแสดงอาการหยุดชะงักการเจริญเติบโตและไม่สามารถแตกกอได้เหมือนระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอื่นๆ อย่างไรก็ตามการ

ได้รับฟอสฟอรัสต่ำเป็นเวลานานๆ ย่อมส่งผลต่อการเจริญเติบโตเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้น ที่ระยะ 27 วันหลังงอกเป็นต้นไป ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับ 20 และ 40 μM เริ่มแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสในลักษณะมีการแตกกอลดลงถึง 53 - 40 % เมื่อเทียบกับระดับ 200 μM ในขณะที่การได้รับฟอสฟอรัสเพียง 60 - 100 μM นั้น ยังทำให้ต้นข้าวมีการแตกกอได้ใกล้เคียงกับระดับ 200 μM (ตารางที่ 25 และ 26)

ตารางที่ 25 จำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 – 15 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	จำนวนใบต่อต้น				
P (μM)	3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
0	1.0	2.0	2.3	3.0^{b}	3.0^{c}
20	1.0	2.0	3.0	3.7^{a}	5.3^{b}
40	1.0	2.0	3.0	4.0^{a}	6.7^{ab}
60	1.0	2.0	3.0	4.0^{a}	7.0^{a}
80	1.0	2.0	3.0	4.0^{a}	7.3^{a}
100	1.0	2.0	2.7	4.0^{a}	7.0^{a}
200	1.0	2.0	3.0	4.0^{a}	7.7^{a}
F-test	ns	ns	ns	***	***
$HSD_{0.05}$	-	-	-	0.6	1.6
CV (%)	-	-	10.8	5.7	9.2

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

ตารางที่ 26 จำนวนต้นต่อกอของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 – 30 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	จำนวนต้นต่อกอ				
P (μM)	18 วัน	21 วัน	24 วัน	27 วัน	30 วัน
0	1.0^{b}	1.0^{c}	1.0^{b}	1.0^{d}	1.0^{c}
20	2.7^{a}	3.0^{b}	5.0^{a}	5.0^{c}	5.7^{b}
40	3.0^{a}	4.0^{ab}	6.7^{a}	6.3^{bc}	7.3^{b}
60	3.0^{a}	4.0^{ab}	7.0^{a}	8.7^{a}	10.3^{a}
80	3.0^{a}	4.0^{ab}	7.0^{a}	8.3^{ab}	10.0^{a}
100	3.0^{a}	4.0^{ab}	6.0^{a}	7.3^{ab}	12.0^{a}
200	3.0^{a}	5.0^{a}	6.7^{a}	7.3^{ab}	12.0^{a}
F-test	***	***	***	***	***
$HSD_{0.05}$	0.6	1.5	2.9	2.0	2.6
CV (%)	8.2	15.0	18.6	11.5	11.1

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

6. การสะสมน้ำหนักแห้งต้น

การสะสมน้ำหนักแห้งต้นเป็นลักษณะที่แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของการเจริญเติบโตของข้าว เมื่อข้าวได้รับฟอสฟอรัสในระดับที่พอเพียงต่อความต้องการจะสามารถสะสมน้ำหนักแห้งได้สูง แต่เมื่อข้าวเจอสภาวะขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติจะสามารถสะสมน้ำหนักแห้งได้ลดลง ซึ่งเป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงความเครียดเนื่องจากการขาดฟอสฟอรัส สำหรับการสะสมน้ำหนักแห้งต้นมีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันเมื่อข้าวมีอายุ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป ซึ่งได้รับอิทธิพลมาลักษณะการสร้างจำนวนใบต่อต้น การไม่ได้รับฟอสฟอรัสเลยส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อการเจริญเติบโตของข้าวโดยต้นข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นน้อยกว่าระดับอื่นๆ สำหรับต้นข้าวในระดับ 20 – 200 μM ยังสามารถสะสมน้ำหนักแห้งต้นได้ดี การตอบสนองของลักษณะการสะสมสมน้ำหนักแห้งรากดังกล่าวยังคงให้ผลต่อเนื่องจนข้าวมีอายุ 24 วันหลังงอก แต่เมื่อข้าวมีอายุ 27 วันหลังงอกเป็นต้นไป การได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้นต่ำเป็นเวลานานๆ ย่อมส่งผลกระทบถึงการ

สะสมน้ำหนักแห้งต้น ต้นข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับ 20 และ 40 μM เริ่มมีการสะสมน้ำหนักแห้งต้นได้ลดลงตามลำดับ และปรากฏผลชัดเจนมากยิ่งขึ้นเมื่อเข้าสู่ระยะ 30 วันหลังงอก โดยต้นข้าวในระดับ 20 และ 40 μM มีน้ำหนักแห้งต้นน้อยกว่าต้นข้าวที่ปลูกในระดับ 200 μM ถึง 52 – 63 % ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าการได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้นเพียง 40 μM มีผลทำให้ต้นข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นลดลงจากระดับ 60 μM อย่างมาก (ตารางที่ 27 และ 28)

ตารางที่ 27 การสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 – 15 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	การสะสมน้ำหนักแห้งต้น (มิลลิกรัม/ต้น)				
P (μM)	3 วัน	6 วัน	9 วัน	12 วัน	15 วัน
0	1.7	8.3	18.6	22.5^{c}	34.4^{b}
20	1.8	8.2	18.6	37.3^{bc}	112.6^{a}
40	1.8	8.2	20.0	51.4^{ab}	137.2^{a}
60	1.8	8.4	20.0	49.4^{ab}	138.7^{a}
80	1.7	8.2	18.9	59.3^{ab}	150.6^{a}
100	1.7	8.7	16.6	58.8^{ab}	124.5^{a}
200	1.7	9.0	19.0	66.6^{a}	154.3^{a}
F-test	ns	ns	ns	***	***
$HSD_{0.05}$	-	-	-	22.5	52.3
CV (%)	14.6	8.3	9.5	16.4	15.4

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

ตารางที่ 28 การสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 - 30 วันหลังงอก

ความเข้มข้น	การสะสมน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น)				
P (μM)	18 วัน	21 วัน	24 วัน	27 วัน	30 วัน
0	0.036[b]	0.038[c]	0.059[b]	0.066[c]	0.060[d]
20	0.288[a]	0.408[b]	1.276[a]	1.670[b]	2.339[c]
40	0.308[a]	0.504[ab]	1.386[a]	2.110[ab]	2.808[bc]
60	0.315[a]	0.496[ab]	1.493[a]	2.159[ab]	4.276[ab]
80	0.324[a]	0.631[ab]	1.513[a]	2.109[ab]	4.305[ab]
100	0.320[a]	0.507[ab]	1.497[a]	2.128[ab]	4.425[a]
200	0.341[a]	0.679[a]	1.442[a]	2.180[a]	4.414[a]
F-test	***	***	***	***	***
$HSD_{0.05}$	0.083	0.257	0.765	0.500	1.550
CV (%)	10.8	19.8	22.2	10.1	17.2

หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P value ≤ 0.05

7. การประเมินหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อและการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสในต้นและราก

สำหรับการประเมินหาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อและการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสในต้นและราก เพื่อหาระดับความเข้มข้นวิกฤติการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในระยะกล้า ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการของ Murphy and Riley (1962) ผลการวิเคราะห์พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อและการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสในต้นและราก มีความแปรผันตามระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ข้าวได้รับ ตั้งแต่ 0 – 200 μM โดยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อส่วนของต้นมีค่าตั้งแต่ 0, 0.08, 0.12, 0.17, 0.25, 0.32 และ 0.49 % ตามลำดับ ในเนื้อเยื่อส่วนของรากมีค่าตั้งแต่ 0, 0.08, 0.11, 0.15, 0.16, 0.21 และ 0.29 % ตามลำดับ และรวมทั้งต้นมีค่าตั้งแต่ 0, 0.17, 0.23, 0.33, 0.40, 0.53 และ 0.78 % ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่าว่าที่ระดับ 60 - 200 μM นั้น ต้นข้าวมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสใน

เนื้อเยื่อต้นมากกว่าในเนื้อเยื่อราก แต่ในขณะที่ระดับความเข้มข้น 0 – 40 μM มีความเข้มข้นทั้งสองส่วนที่ใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 29)

ตารางที่ 29 ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อและการสะสมปริมาณฟอสฟอรัสของข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วันหลังงอก

ส่วนของพืช	ความเข้มข้น P (μM)	ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อ (%)	การสะสมสมปริมาณฟอสฟอรัส (มิลลิกรัม/ต้น)
ต้น	0	0	0
	20	0.08	0.20
	40	0.12	0.34
	60	0.17	0.74
	80	0.25	1.03
	100	0.32	1.43
	200	0.50	2.18
ราก	0	0	0
	20	0.09	0.07
	40	0.11	0.09
	60	0.15	0.13
	80	0.16	0.15
	100	0.21	0.17
	200	0.29	0.23
รวมทั้งต้น	0	0	0
	20	0.17	0.27
	40	0.23	0.43
	60	0.33	0.90
	80	0.40	1.26
	100	0.53	1.69
	200	0.78	2.57

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2

จากการศึกษาการตอบสนองของข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน เพื่อหาระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวในระยะกล้า ผลการศึกษาพบว่าระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองของระบบรากและลำต้น อยู่ที่ระดับ 60 μM เช่นกัน แต่มีการตอบสนองในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน โดยระบบรากมีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 15 วันหลังงอกเป็นต้นไป ในขณะที่ส่วนของลำต้นมีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 27 วันหลังงอกเป็นต้นไป โดยในแต่ละลักษณะมีการตอบสนอง ดังนี้

ลักษณะที่มีการตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็วที่สุด คือ การยืดขยายความยาวราก ซึ่งมีการตอบสนองในลักษณะแปรผกผันกับระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ได้รับตั้งแต่ 9 วันแรกหลังงอก ในช่วงแรกมีเพียงระดับ 0 μM เท่านั้นที่มีผลทำให้ความยาวรากเพิ่มขึ้น แต่เมื่อข้าวมีอายุ 15 วันหลังงอกเป็นต้นไป ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 60 μM มีการยืดขยายความยาวรากมากยิ่งขึ้น ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อข้าวขาดฟอสฟอรัส ระบบรากต้องมีการปรับตัวเพื่อให้สามารถหาฟอสฟอรัสให้ได้มากขึ้นและไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตในส่วนของลำต้น การยืดขยายความรากให้มากขึ้นจึงเป็นการปรับตัวอย่างว่องไว เนื่องจากใช้ทรัพยากรหรือฟอสฟอรัส (ATP) ในปริมาณที่น้อยกว่าการสร้างรากใหม่ ทำให้เกิดการปรับตัวได้เร็วกว่าการเพิ่มจำนวนราก (Kirk and Du, 1997) อย่างไรก็ตามในช่วง 27 – 30 วันหลังงอก ข้าวที่ปลูกในทุกระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสมีความยาวรากที่ไม่แตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากการได้รับฟอสฟอรัสในระดับต่ำเป็นเวลานานๆ ลักษณะการยืดขยายความยาวรากเพียงอย่างเดียวอาจทำให้ระบบรากหาฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ข้าวจึงต้องมีการพัฒนาลักษณะอื่นๆ ขึ้นมาชดเชยและช่วยส่งเสริมให้สามารถดูดหาฟอสฟอรัสในปริมาณที่มากขึ้น สำหรับลักษณะที่มีการสร้างมาเพื่อชดเชยและส่งเสริมให้สามารถดูดหาฟอสฟอรัสได้มากขึ้นก็คือ การสร้างจำนวนรากต่อต้นให้เพิ่มขึ้นร่วมกับการยืดขยายความยาวราก ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของรากต่อพื้นที่ให้มากขึ้น และสามารถดูดหาฟอสฟอรัสได้ในปริมาณที่มากขึ้น (Fohse et al., 1988; Gahoonia and Nielsan, 2004) ในทางตรงกันข้าม หากข้าวเผชิญสภาวะขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤตินานๆ มักมีจำนวนรากต่อต้นที่ลดลงเช่นกัน เนื่องจากต้นข้าวมีปริมาณฟอสฟอรัสที่ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต จากการทดลองนี้พบว่าเมื่อข้าวได้รับฟอสฟอรัสในระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 60 μM ส่งผลให้จำนวนรากต่อต้นลดลงตามลำดับ ในขณะที่ระดับ 60 และ 80 μM มีการสร้างจำนวนรากต่อต้นสูงที่สุด และมีจำนวนรากต่อต้นมากกว่าข้าวที่ปลูกในระดับ 100 และ 200 μM ความแตกต่างที่ปรากฏให้เห็นนี้ทำให้สามารถประเมินเบื้องต้นได้ว่า ที่ระดับ 60 และ 80 μM ยังเป็นระดับความเข้มข้นที่ไม่วิกฤติ ระบบรากยังมีการเจริญเติบโตได้ดี ในขณะที่ระดับความเข้มข้นที่ต่ำกว่า 60 μM เป็นระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อขาดฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ข้าวดอกมะลิ 105 จึงทำให้ระบบรากสามารถ

สร้างจำนวนรากได้ลดลง โดยลักษณะนี้ปรากฏผลความแตกต่างเมื่อปลูกข้าวนาน 15 วันหลังงอกเป็นต้นไป และปรากฏผลความแตกต่างมากยิ่งขึ้นเมื่อเวลาในการปลูกข้าวนานขึ้นอีกด้วย

สำหรับข้าวที่ขาดฟอสฟอรัสมักสามารถสะสมน้ำหนักแห้งได้ลดลง (Dobermann and Fairhurst, 2000) จากการทดลองนี้ จะเห็นได้ว่าการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 เริ่มตอบสนองต่อระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสอย่างชัดเจนเมื่อมีอายุ 15 วันหลังงอกเป็นต้นไป เช่นเดียวกับการสร้างจำนวนรากต่อต้น โดยต้นข้าวที่ปลูกในระดับ 60 – 200 μM มีการสะสมน้ำหนักแห้งรากได้สูง ในขณะที่ระดับ 0 – 40 μM มีการสะสมน้ำหนักแห้งได้ลดลงตามลำดับ และยังสังเกตได้ว่าที่ระดับ 60 และ 80 μM เป็นระดับความเข้มข้นที่มีน้ำหนักแห้งรากสูงที่สุด ทั้งนี้ในระดับความเข้มข้นดังกล่าวอาจยังไม่ถึงความเข้มข้นระดับวิกฤติ จึงทำให้ต้นข้าวมีการพัฒนาระบบรากให้ใหญ่ขึ้นเพื่อให้สามารถดูดหาฟอสฟอรัสได้เพียงพอต่อความต้องการ ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะการสร้างจำนวนรากต่อต้น

การปรับตัวของระบบรากโดยการยืดขยายความยาวรากและเพิ่มจำนวนรากต่อต้นให้มากขึ้นดังกล่าว มีสาเหตุเนื่องจากฟอสฟอรัสนั้นเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายหรือมีการเคลื่อนย้ายต่ำ ข้าวจึงต้องมีการพัฒนาระบบรากให้มีขนาดใหญ่ เพื่อให้สามารถแผ่กระจายรากออกไปหาฟอสฟอรัสในบริเวณที่อยู่ไกลจากต้นได้มากขึ้น (Jungk, 2001) นอกจากนี้ Gaume et al. (2001) พบว่าพืชที่เจอสภาวะขาดฟอสฟอรัสมักมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงกว่าพืชที่ได้รับฟอสฟอรัสอย่างพอเพียง ซึ่งเป็นผลมากจากการลดการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและใบ อาหารที่ได้จากกระบวนสังเคราะห์ด้วยแสงถูกส่งมาพัฒนาระบบรากมากขึ้น (Cakmak et al., 1994) ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อข้าวขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติ มักมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่สูงขึ้น และปรากฏผลความแตกต่างตั้งแต่ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป และเริ่มมีความชัดเจนของการตอบสนองเมื่ออายุ 21 วันหลังงอกเป็นต้นไป โดยมีการตอบสนองแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินสูงที่สุด (ระดับ 0 – 40 μM) กลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินปานกลาง (ระดับ 60 และ 80 μM) และกลุ่มที่สามเป็นกลุ่มที่มีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินต่ำที่สุด (ระดับ 100 และ 200 μM) ซึ่งเป็นแสดงให้เห็นว่าระดับ 0 – 40 μM เป็นความเข้มข้นในระดับวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบจากการได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่แตกต่างกันต่อการเจริญเติบโตในส่วนของต้นข้าว พบว่าการสร้างจำนวนใบและการสะสมน้ำหนักแห้งต้นปรากฏผลความแตกต่างในระดับ 0 μM ตั้งแต่ 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป ในขณะที่ระดับฟอสฟอรัสอื่นๆ ยังมีจำนวนใบและน้ำหนักแห้งต้นที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม การได้รับฟอสฟอรัสในระดับต่ำเป็นเวลานานๆ ย่อมส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต ที่ระยะ 27 วันหลังงอก ต้นข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ต่ำกว่า 60 μM (0 – 40 μM) มีจำนวนต้นต่อกอและน้ำหนักแห้งต้นลดลง ในขณะ

ที่ระดับ 60 – 200 μM มีการแตกกอและน้ำหนักแห้งต้นสูง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองด้านการเจริญเติบโตในส่วนเหนือดินของข้าว คือที่ระดับ 60 μM เช่นเดียวกับการตอบสนองของระบบราก

ผลจากการนำต้นข้าวที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสต่างๆ ที่ระยะ 30 วันหลังงอก ไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อ เพื่อใช้ประเมินหาระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อส่วนของต้นและราก มีความผันแปรตามระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่ข้าวได้รับ โดยความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อรวมทั้งต้นมีค่าเฉลี่ยตั้งแต่ 0 % (0 μM), 0.17 % (20 μM), 0.23 % (40 μM), 0.32 % (60 μM), 0.40 % (80 μM), 0.53 % (100 μM) และ 0.78 % (200 μM) ตามลำดับ สำหรับระดับวิกฤติของการขาดแคลนฟอสฟอรัสของข้าวในช่วงอายุ 30 – 35 วันหลังงอก Reuter et al. (1997) ได้รายงานว่าระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่พอเพียงกับการเจริญเติบโตของข้าวในช่วงอายุดังกล่าวอยู่ที่ 0.37 - 0.55 % และความเข้มข้นของการขาดฟอสฟอรัสในระดับวิกฤติอยู่ที่ 0.25 % เมื่อพิจารณาจากผลการวิเคราะห์แล้วจะเห็นได้ว่าระดับความเข้มข้นวิกฤติของปริมาณฟอสฟอรัสขั้นต่ำที่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 ต้องการในระยะกล้า (30 วันหลังงอก) อยู่ที่ระดับ 60 μM หากข้าวได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 60 μM จะส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตที่ลดลง ซึ่งให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกับการตอบสนองในส่วนของต้นและระบบรากที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับ 60 – 100 μM ยังมีการเจริญเติบโตที่ปกติ ทั้งนี้ข้าวที่ปลูกในความเข้มข้นระดับดังกล่าว อาจมีการเตรียมความพร้อมสำหรับเจอกับสภาวะการขาดฟอสฟอรัสตั้งแต่อายุยังน้อย โดยมีการเก็บรักษาฟอสฟอรัสที่หาได้สะสมไว้ภายในเซลล์ หรืออาจมีการรักษาปริมาณฟอสฟอรัสภายในเซลล์ให้สมดุล เคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสที่สะสมอยู่ในใบเก่าไปยังใบที่เกิดใหม่ ลดปริมาณความเข้มข้นในแวคิวโอลแล้วกระจายไปยังส่วนของไซโตพลาสซึม เพื่อให้กิจกรรมต่างๆ ในส่วนของไซโตพลาสซึมดำเนินต่อไปได้อย่างปกติ (Lauer et al., 1988; Raghothama, 1999)

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

1. การตอบสนองด้านสัณฐานวิทยาของระบบราก

ลักษณะด้านสัณฐานวิทยาของระบบรากมีการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสอย่างรวดเร็ว และแสดงการตอบสนองเมื่อได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM โดยมีการยืดขยายความยาวรากมากขึ้นตั้งแต่ 7 – 9 วันหลังงอก แต่การยืดขยายความยาวรากมักมีการตอบสนองในช่วงสั้นๆ เนื่องจากเมื่อข้าวมีอายุมากขึ้นมักต้องการปริมาณฟอสฟอรัสในระดับที่สูงขึ้นตามไปด้วย การยืดขยายความยาวรากอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการหาฟอสฟอรัส ระบบรากจึงต้องสร้างลักษณะอื่นขึ้นมาชดเชยและส่งเสริมการดูดฟอสฟอรัสกัน นั่นก็คือการสร้างจำนวนรากต่อต้นให้สูงขึ้น สำหรับลักษณะการสร้างจำนวนรากต่อต้น การสะสมน้ำหนักแห้งราก และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดิน เริ่มมีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 9 – 12 วันหลังงอกเป็นต้นไป โดยทั้งสามลักษณะมีความผันแปรตามระดับฟอสฟอรัสเช่นกัน ต้นข้าวที่ได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 100 μM มีจำนวนรากต่อต้นและน้ำหนักแห้งรากที่ลดลง ซึ่งส่งผลให้อัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ต้นข้าวที่ได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับ 100 – 200 μM ยังมีการพัฒนาระบบรากที่สมบูรณ์ โดยมีจำนวนรากต่อต้นสูง สามารถสะสมน้ำหนักแห้งรากได้มากและมีอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินต่ำ

2. การตอบสนองด้านพันธุ์ข้าว

สำหรับพันธุ์ข้าวที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ เป็นพันธุ์ข้าวที่มาจากระบบนิเวศหรือสภาพแวดล้อมการปลูกที่แตกต่างกัน 4 พันธุ์ ได้แก่ กลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวน (ขาวดอกมะลิ 105 และ กข 49) และกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่ (อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน) จากการศึกษาพบว่ากลุ่มพันธุ์ทั้งสองมีการตอบสนองที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มพันธุ์ข้าวไร่มีการยืดขยายความยาวราก การสะสมน้ำหนักแห้งราก และอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินที่มากกว่ากลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวนอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่กลุ่มพันธุ์ข้าวนาสวนมีการสร้างจำนวนรากต่อต้นได้ดีกว่า นอกจากนี้ยังพบลักษณะพิเศษของข้าวพันธุ์ อาร์ 258 และ ซิวแม่จัน เมื่อเจอสภาวะขาดฟอสฟอรัส โดยสามารถสร้างรากกลุ่ม (cluster root) ขึ้นมาเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของรากต่อพื้นที่และสามารถดูดหาฟอสฟอรัสได้มากขึ้น

3. การประเมินหาระดับความเข้มข้นวิกฤติของการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ในระยะกล้า

ระดับความเข้มข้นวิกฤติที่ข้าวขาวดอกมะลิ 105 จะตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส คือที่ระดับความเข้มข้น 60 μM หากกล้าข้าวได้รับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในระดับที่ต่ำกว่า 60 μM จะส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตที่ลดลง โดยส่วนของระบบรากมีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 15 วันหลังงอก และส่วนของลำต้นมีการตอบสนองเมื่อข้าวมีอายุ 27 วันหลังงอก โดยเฉพาะการลดลงของจำนวนต้นต่อกอ ซึ่งเป็นลักษณะสำคัญที่ส่งผลต่อการสร้างผลผลิตของข้าว ดังนั้นในช่วงระยะกล้าของข้าวขาวดอกมะลิ 105 จึงจำเป็นต้องได้รับฟอสฟอรัสอย่างน้อย 60 μM เพื่อให้กล้าข้าวสามารถเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์

บรรณานุกรม

กองวิจัยและพัฒนาข้าว. 2559. **องค์ความรู้เรื่องข้าว.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.ricethailand.go.th/rkb3/ (25 สิงหาคม 2561).

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2546. **ธาตุอาหารพืช.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

_____. 2552. **ธาตุอาหารพืช ฉบับปรับปรุงใหม่.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อรวรรณ ฉัตรสีรุ้ง. 2551. **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน (Soil Fertility).** เชียงใหม่: หน่วยพิมพ์และผลิตเอกสาร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Akhtar, M. S., Oki, Y. & Adachi, T. 2008. Genetic variability in phosphorus acquisition and utilization efficiency from sparingly soluble P-sources by Brassica cultivars under P-stress environment. **Journal of Agronomy and Crop Science**, 194(5), 380-392.

Barber, S. A. 1995. **Soil Nutrient Bioavailability: A mechanistic approach**. 2nd edition. New York: John Wiley and Sons Inc.

Benjamin, P., Thierry, D., Ricarda, J, Satomi, K., Oliver, B. & Laurent, N. 2014. Root Architecture Responses: In Search of Phosphate. **Plant Physiology**, 166, 1713-1723.

Cakmak, I., Hengeler, C. & arschner, H. 1994. Partitioning of shoot and root dry matter and carbohydrates in bean plants suffering from phosphorus, potassium and magnesium deficiency. **Journal of Experimental Botany**, 45(1), 1245-1250.

Dechassa, N. & Schenk, M. K. 2004. Exudation of organic anions by roots of cabbage carrot and potato as influenced by environmental factors and plant age. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 167, 623-629.

Dobermann, A. & Fairhurst, T. 2000. **Rice: Nutrient disorders and nutrient management**. Manila: Oxford Graphic Printers.

Fageria, V. D. 2001. Nutrient interaction in crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, 24, 1,269-1,290.

Fohse, D., Claassen, N. & Jungk, A. 1988. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, 110, 101-109.

Gahoonia, T. S. & Nielsen, N. E. 2004. Root traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties. **Plant and Soil,** 260, 47-57.

Gaume, A., Machler, F., De Leon, C., Narro, L. & Frossard, E. 2001. Low-P tolerance by maize (*Zea mays* L.) genotypes: Significance of root growth, and organic acids and acid phosphatase root exudation. **Plant and Soil**, 228, 253-264.

Hammond, J. P. & White, P. J. 2008. Sucrose transport in phloem: Integrating root responses to phosphorus starvation. **Journal of Experimental Botany**, 59, 93-109.

Jeschke M. 2017 **Phosphorus Behavior in Soil.** [Online]. Available https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/phosphorus-behavior-in-soil/ (17 June 2018).

Jungk, A. 2001. Root hairs and acquisition of plant nutrients from soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 164, 121-129.

Khamis, S., Chaillou, S. & Lamare, T. 1990. CO_2 assimilation and partitioning of carbon in maize plants deprived of otheophosphate. **Journal of Experimental Botany**, 41, 1,619-1,625.

Kirk, G. J. D., & Du, L. V. 1997. Changes in rice root architecture, porosity and oxygen and proton release under phosphorus deficiency. **New Phytol,** 135, 191-200.

Lambers, H., Shane, M. W., Cramer, M. D., Pearse, S. J. & Veneklaas, E. J. 2006. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits. **Annals of Botany**, 98, 693-713.

Lauer, M.J., Blevins, D.G. & Sierputowska-Gracz, H. 1989. ^{31}P-nuclear magnetic resonance determination of phosphate compartmentation in leaves of reproductive soybeans (*Glycine max* L.) as affected by phosphate nutrition. **Plant Physiology,** 89, 1331-1336.

Lynch, J. P. & Brown, K. M. 2001. Topsoil foraging–an architectural adaptation of plants to low phosphorus. **Plant and Soil**, 237, 225-237.

Ma, J. F. 2000. Role of organic acids in detoxification of aluminium in higher plants. **Plant Cell Physiology**, 41, 383-390.

Marshner, H. 1995. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2nd edition. New York: Academic Press.

Mimura, T., Sakano, K. & Shimmen, T. 1996. Studies on the distribution, re-translocation and homeostasis of inorganic phosphate in barley leaves. **Plant: Cell and Environment**, 19, 311-320.

Murphy, J. & Riley, J. P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, 27, 31-36.

Natr, L. 1992. Mineral nutrients-a ubiquitous stress factor for photosynthesis. **Photosynthetica,** 27, 271 - 294.

Neumann, G. & Römheld, V. 1999. Root excretion of carboxylic acids and protons in phosphorus-deficient plants. **Plant and Soil**, 211, 121-130.

Ohwaki, Y. & Hirata, H. 1992. Differences in carboxylic acid exudation among P-starved leguminous crops in relation to carboxylic acid content in plant tissues and phospholipids levels in roots. **Soil Science and Plant Nutrition**, 38, 235-243.

Plaxton, W.C. & Carswell, M.C. 1999. Metabolic aspects of the phosphate starvation response in plants. In: Lerner HR (ed.) **Plant response to environmental stress: from phytohormones to genome reorganization** (pp 350-372). New York: Marcel-Dekker.

Playsted, C. W. S., Johnston, M. E., Ramage, C. M., Edwards, D. G., Cawthray, G. R. & Lambers, H. 2006. Functional significance of dauciform roots: exudation of carboxylates and acid phosphatase under phosphorus deficiency in *Caustis blakei* (Cyperaceae). **New Phytologist**, 170, 491-500.

Raghothama, K. G. 1999. Phosphate acquisition. **Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology**, 50, 665-693.

Raghothama, K. G. & Karthikeyan, A. S. 2005. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, 274, 37-49.

Reuter, D.J., Robinson, J.B. & Dutkiewicz C. 1997. **Guidelines for Collecting Plant Anaiysis an Interpretation Manual.** Collingwood: CSIRO Publishing.

Richardson, A. E., Lynch, J. P., Ryan, P. R., Delhaize, E., Smith, F. A., Smith, S. E., Harvey P.R., Ryan, M. H., Veneklaas, E. J., Lambers, H., Oberson, A., Culvenor R. A. & Simpson, R. J. 2011. Plant and microbial strategies to improve the phosphorus efficiency of agriculture. **Plant and soil**, 349, 121-156.

Schachman, D. P. & Shin, R. 2007. Nutrient sensing and signaling: NPKS. **Annual Review of Plant Biology**, 58, 47-69.

Shane, M. W. & Lambers, H. 2005. Cluster roots: curiosity in context. **Plant and Soil**, 274, 99-123.

Smith, F. W. 2001. Plant response to nutritional stresses. In: Hawkesford MJ, Buchner P (eds.). **Molecular analysis of plant adaptation to the environment** (pp. 249-269) The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Smith, F. W., Jackson, P. J. & Van den Berg. 1990. Internal phosphorus flows during development of phosphorus stress in *Stylosanthes hamate* Aust. **Plant Physiol**, 17, 451-464.

Tarafdar, J. C. & Claassen, N. 1988. Organic phosphorus compounds as a phosphorus source for higher plants through the activity of phosphatases produced by plant roots and microorganisms. **Biology and Fertility of Soils**, 5, 308-312.

Tarafdar, J. C. & Claassen, N. 2001. Comparative efficiency of acid phosphatase originated from plant and fungal sources. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 164, 279-282.

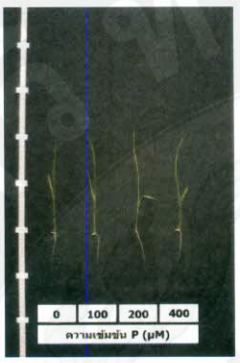
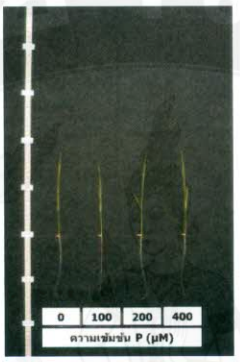
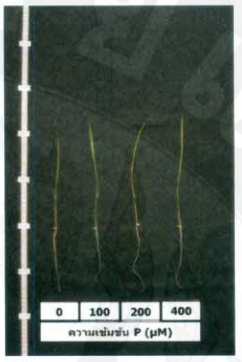
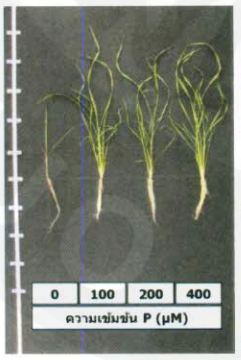
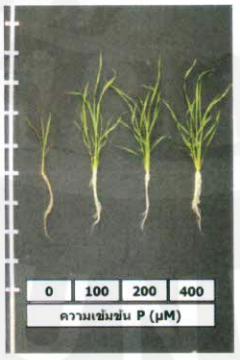
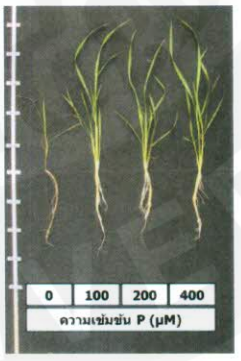
Vance, C. P., Uhde-Stone, C. & Allan, D. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptation by plants for securing non-renewable resources. **New Phytologist**, 15, 423-447.

Yan, X., Liao, H., Trull, M. C., Beebe, S. E. & Lynch, J. P. 2001. Induction of a major leaf acid phosphatase does not confer adaption to low phosphorus availability in common bean. **Plant Physiology**, 125, 1901-1911.

Yoshida, S., Forno, D. A., Cock, J. H. & Gomez, K. A. 1976. **Laboratory manual for physiological studies of rice**. Los banos: The International Rice Research Institute.

ภาคผนวก

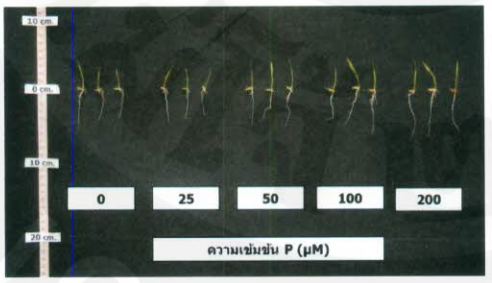
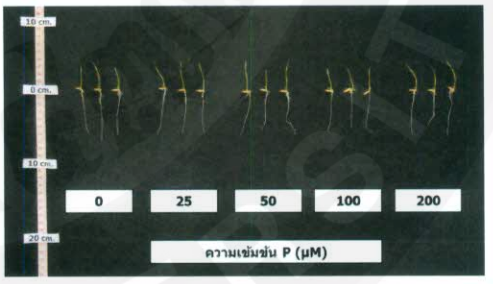
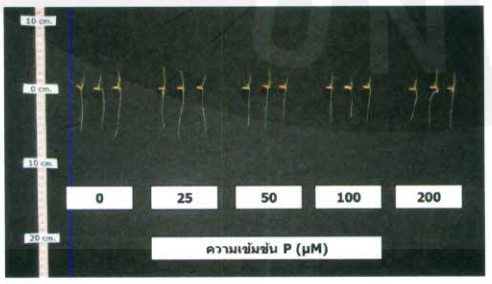
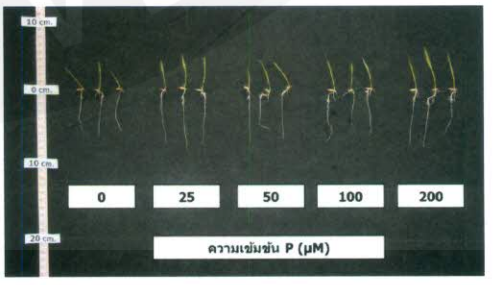
ตารางผนวกที่ 1 ต้นข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับเมื่ออายุ 7 - 28 วันหลังงอก (การทดลองที่ 1.1)

อายุ	พันธุ์ข้าว			
	ขาวดอกมะลิ 105	กข 49	อาร์ 258	ซิวแม่จัน
7 วัน				
14 วัน				
21 วัน				

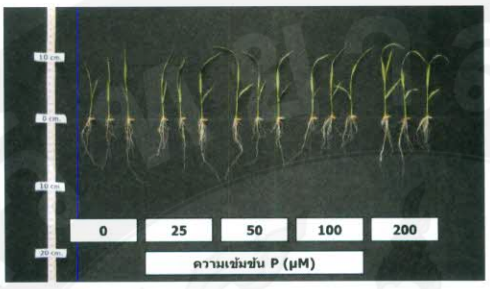
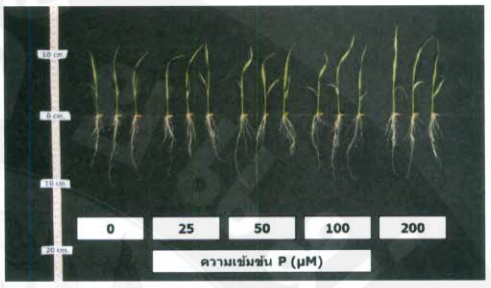
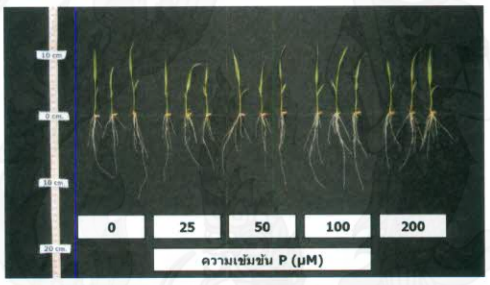
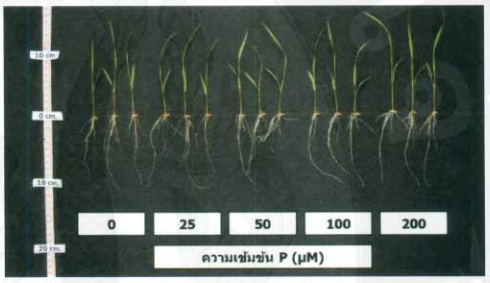
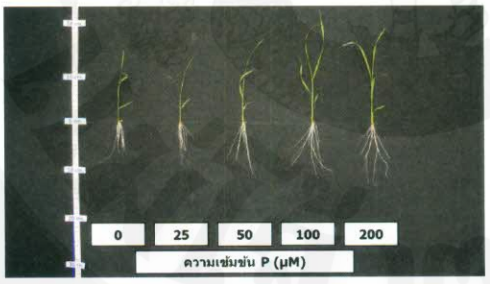
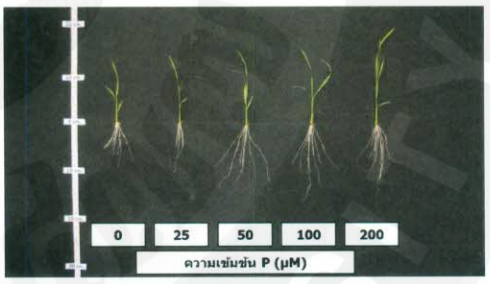
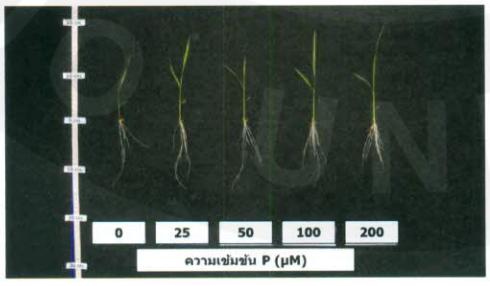
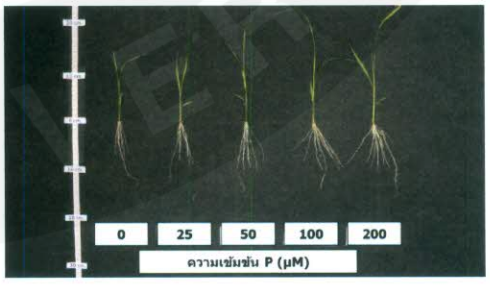
ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

อายุ	พันธุ์ข้าว			
	ขาวดอกมะลิ 105	กข 49	อาร์ 258	ซิวแม่จัน
28 วัน				

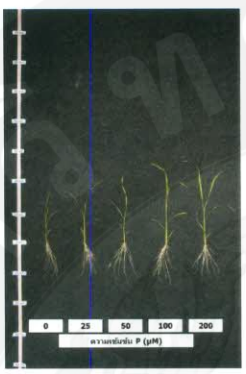
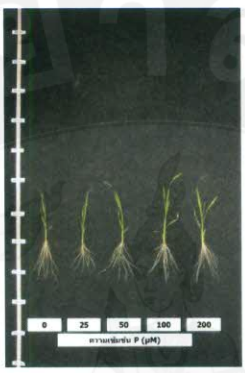
ตารางผนวกที่ 2 ต้นข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับเมื่ออายุ 3 - 15 วันหลังงอก (การทดลองที่ 1.2)

อายุ	พันธุ์ข้าว	
3 วัน	ขาวดอกมะลิ 105	กข 49
		
	อาร์ 258	ซิวแม่จัน
		

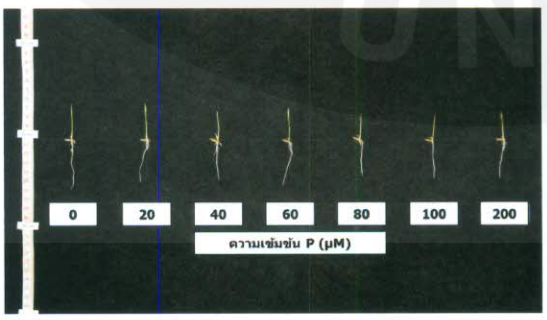
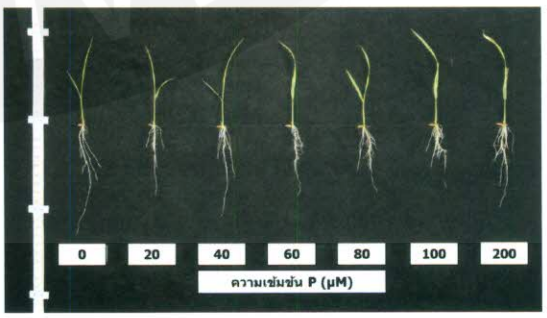
ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

อายุ	พันธุ์ข้าว	
6 วัน	ขาวดอกมะลิ 105	กข 49
		
	อาร์ 258	ซิวแม่จัน
		
9 วัน	ขาวดอกมะลิ 105	กข 49
		
	อาร์ 258	ซิวแม่จัน
		

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

อายุ	พันธุ์ข้าว			
	ขาวดอกมะลิ 105	กข 49	อาร์ 258	ซิวแม่จัน
12 วัน				
15 วัน				

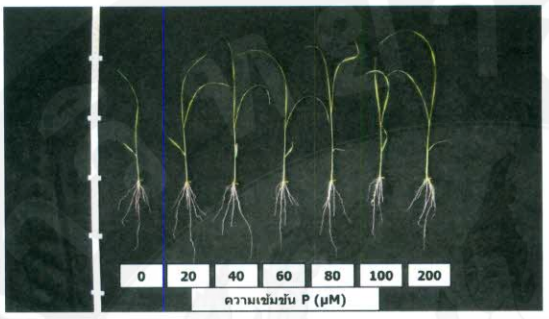
ตารางผนวกที่ 3 ต้นข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 - 30 วันหลังงอก (การทดลองที่ 2)

อายุข้าว	
3 วัน	6 วัน
	

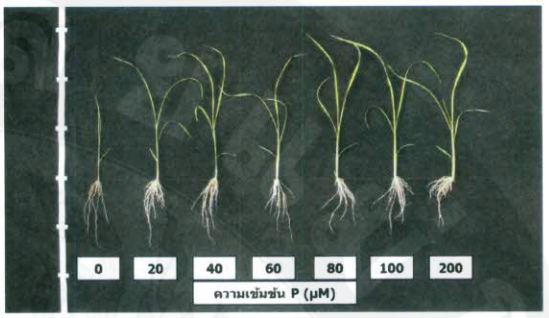
ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

อายุข้าว

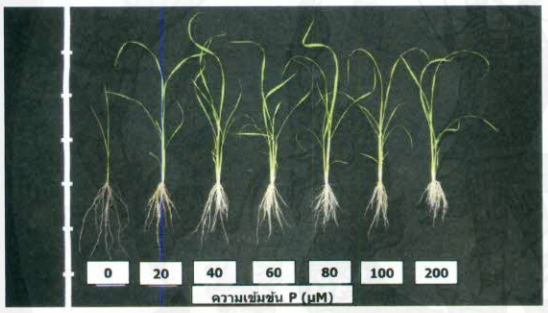
9 วัน



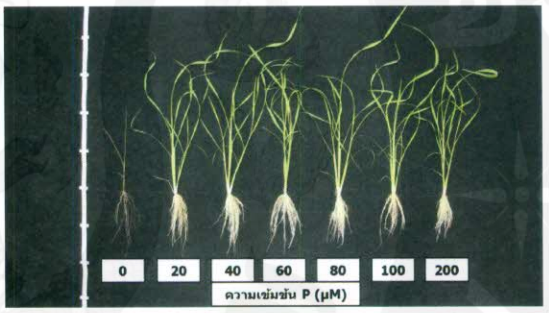
12 วัน



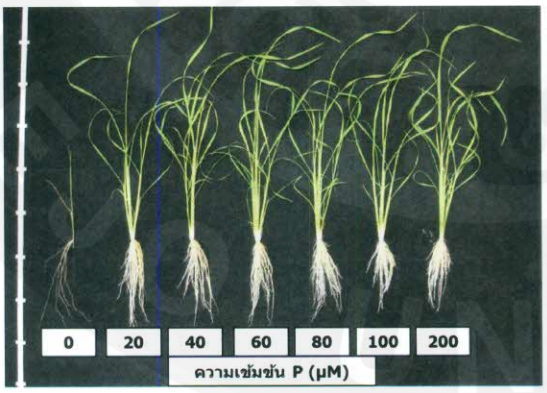
15 วัน



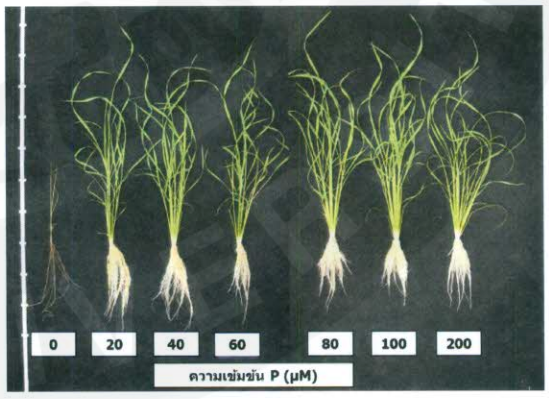
18 วัน



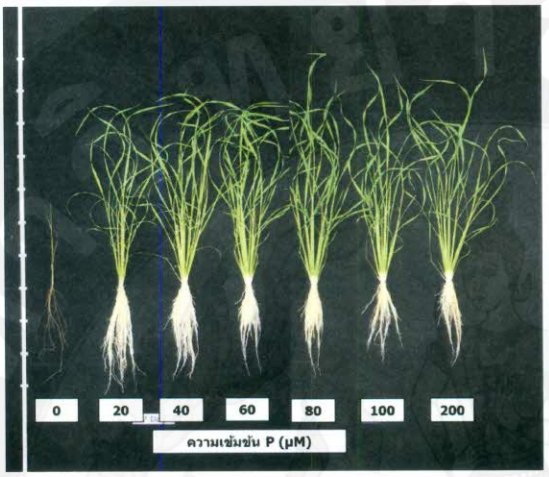
21 วัน



24 วัน



ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

อายุข้าว	
27 วัน	30 วัน
	

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองที่ 1.1

ตารางผนวกที่ 4 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	12.47	4.16	4.386	1.08e-02	*
พันธุ์ข้าว	3	176.26	58.75	62.011	1.99e-13	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	18.23	2.03	2.137	0.0553	.
Residuals	32	30.32	0.95			

ตารางผนวกที่ 5 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 14 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	70.2	23.41	18.269	4.34e-07	***
พันธุ์ข้าว	3	518.4	172.81	134.882	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	35.3	3.93	3.064	0.00922	**
Residuals	32	41	1.28			

ตารางผนวกที่ 6 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	132.8	44.26	14.446	4.02e-06	***
พันธุ์ข้าว	3	500.9	166.98	54.5	1.13e-12	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	109.1	12.12	3.955	0.00181	**
Residuals	32	98	3.06			

ตารางผนวกที่ 7 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	207.2	69.08	14.213	4.65e-06	***
พันธุ์ข้าว	3	404	134.65	27.704	5.05e-09	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	151.7	16.86	3.468	0.00434	**
Residuals	32	155.5	4.86			

ตารางผนวกที่ 8 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	3	1.833	0.6111	1.048	0.385
พันธุ์ข้าว	3	2.667	0.8889	1.524	0.227
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	2.833	0.3148	0.54	0.834
Residuals	32	18.667	0.5833		

ตารางผนวกที่ 9 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 14 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	22.83	7.61	19.125	2.74e-07	***
พันธุ์ข้าว	3	31.53	10.509	26.41	8.69e-09	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	4.97	0.552	1.388	0.235	
Residuals	32	12.73	0.398			

ตารางผนวกที่ 10 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	2691	897	111.679	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	848.3	282.8	35.206	2.98e-10	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	202.9	22.5	2.807	0.015	*
Residuals	32	257	8			

ตารางผนวกที่ 11 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	34686	11562	668.44	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	9123	3041	175.81	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	2370	263	15.22	3.05e-09	***
Residuals	32	554	17			

ตารางผนวกที่ 12 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	0.027	0.0091	0.14	0.935	
พันธุ์ข้าว	3	7.379	2.4597	37.841	1.23e-10	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	0.437	0.0485	0.747	0.664	
Residuals	32	2.08	0.065			

ตารางผนวกที่ 13 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 14 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	18.5	6.2	0.365	0.779	
พันธุ์ข้าว	3	1252	417.3	24.682	1.85e-08	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	114.6	12.7	0.753	0.659	
Residuals	32	541.1	16.9			

ตารางผนวกที่ 14 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	42517	14172	47.72	6.47e-12	***
พันธุ์ข้าว	3	12529	4176	14.062	5.11e-06	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	5219	580	1.953	0.0795	.
Residuals	32	9504	297			

ตารางผนวกที่ 15 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	1957725	652575	118.268	<2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	19089	6363	1.153	30.343	
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	39302	4367	0.791	0.626	
Residuals	32	176569	5518			

ตารางผนวกที่ 16 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 7 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	0.002717	0.000906	1.940	0.1429	
พันธุ์ข้าว	3	0.0146	0.004867	10.429	6.10e-05	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	0.017317	0.001924	4.123	0.00135	**
Residuals	32	0.014933	0.000467			

ตารางผนวกที่ 17 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 14 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	0.3988	0.13292	125.344	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	0.0564	0.01879	17.724	5.85e-07	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	0.0122	0.00136	1.278	0.286	
Residuals	32	0.0339	0.00106			

ตารางผนวกที่ 18 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	0.8112	0.27042	284.649	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	0.0715	0.02384	25.094	1.54e-08	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	0.0245	0.00272	2.865	0.0134	*
Residuals	32	0.0304	0.00095			

ตารางผนวกที่ 19 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 4 ระดับ เมื่ออายุ 28 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	3	0.731	0.24368	395.16	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	0.0621	0.0207	33.57	5.30e-10	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	9	0.0968	0.01076	17.45	5.50e-10	***
Residuals	32	0.0197	0.00062			

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองที่ 1.2

ตารางผนวกที่ 20 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	3.68	0.921	1.126	0.357795	
พันธุ์ข้าว	3	20.27	6.757	8.267	0.000213	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	11	0.917	1.122	0.370492	
Residuals	40	32.69	0.817			

ตารางผนวกที่ 21 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	8.09	2.023	0.717	0.585468	
พันธุ์ข้าว	3	58.74	19.579	6.937	0.000722	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	10.18	0.848	0.301	0.985654	
Residuals	40	112.9	2.822			

ตารางผนวกที่ 22 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	55.85	13.962	5.614	0.001105	**
พันธุ์ข้าว	3	63.28	21.092	8.48	0.000176	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	92.61	7.717	3.103	0.003503	**
Residuals	40	99.49	2.487			

ตารางผนวกที่ 23 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	97.57	24.39	11.619	2.36e-06	***
พันธุ์ข้าว	3	99.02	33.01	15.722	6.61e-07	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	30.72	2.56	1.219	0.304	
Residuals	40	83.98	2.1			

ตารางผนวกที่ 24 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	54.07	13.52	7.683	0.000108	***
พันธุ์ข้าว	3	113.75	37.92	21.551	1.81e-08	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	23.05	1.92	1.092	0.392705	
Residuals	40	70.37	1.76			

ตารางผนวกที่ 25 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	0.933	0.233	0.56	0.693	
พันธุ์ข้าว	3	19.933	6.644	15.947	5.69e-07	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	7.067	0.589	1.413	0.2	
Residuals	40	16.667	0.417			

ตารางผนวกที่ 26 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	3.57	0.892	0.418	0.795	
พันธุ์ข้าว	3	67.65	22.55	10.57	2.99e-05	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	7.1	0.592	0.277	0.99	
Residuals	40	85.33	2.133			

ตารางผนวกที่ 27 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	39.43	9.86	6.226	0.000542	***
พันธุ์ข้าว	3	142.18	47.39	29.933	2.58e-10	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	51.23	4.27	2.696	0.009263	**
Residuals	40	63.33	1.58			

ตารางผนวกที่ 28 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	144.36	36.09	16.312	5.30e-08	***
พันธุ์ข้าว	3	261.02	87.01	39.325	5.25e-12	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	59.27	4.94	2.233	0.0286	*
Residuals	40	88.5	2.21			

ตารางผนวกที่ 29 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	617.9	154.47	34.264	1.98e-12	***
พันธุ์ข้าว	3	621.1	207.04	45.924	5.04e-13	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	101.8	8.49	1.882	0.067	.
Residuals	40	180.3	4.51			

ตารางผนวกที่ 30 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	0.452	0.1131	1.037	0.4	
พันธุ์ข้าว	3	4.594	1.5313	14.048	2.11e-06	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	0.31	0.0259	0.237	0.995	
Residuals	40	4.36	0.109			

ตารางผนวกที่ 31 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	141.71	35.43	16.691	4.01e-08	***
พันธุ์ข้าว	3	176.25	58.75	27.677	7.44e-10	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	43.84	3.65	1.721	0.0985	.
Residuals	40	84.91	2.12			

ตารางผนวกที่ 32 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	4	4186	1046.6	1.829	0.142
พันธุ์ข้าว	3	1828	609.5	1.065	0.375
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	6862	571.8	0.999	0.467
Residuals	40	22891	572.3		

ตารางผนวกที่ 33 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 พันธุ์ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	1229	307.24	32.536	4.34e-12	***
พันธุ์ข้าว	3	888.4	296.13	31.36	1.36e-10	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	148.3	12.36	1.309	0.252	
Residuals	40	377.7	9.44			

ตารางผนวกที่ 34 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	4	0.02362	0.005904	1.726	0.163
พันธุ์ข้าว	3	0.02099	0.006997	2.045	0.123
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	0.01818	0.001515	0.443	0.935
Residuals	40	0.13687	0.003422		

ตารางผนวกที่ 35 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	0.10052	0.025129	5.664	0.00104	**
พันธุ์ข้าว	3	0.08162	0.027206	6.132	0.00157	**
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	0.10792	0.008994	2.027	0.04721	*
Residuals	40	0.17747	0.004437			

ตารางผนวกที่ 36 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	4	0.393	0.09815	0.658	0.625
พันธุ์ข้าว	3	0.589	0.19637	1.317	0.282
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	1.851	0.15422	1.034	0.438
Residuals	40	5.964	0.1491		

ตารางผนวกที่ 37 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าว 4 พันธุ์ ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 5 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	4	0.651	0.16274	94.579	< 2e-16	***
พันธุ์ข้าว	3	0.1731	0.05771	33.536	5.29e-11	***
พันธุ์ข้าว x ระดับความเข้มข้น P	12	0.1191	0.00992	5.767	0.205	
Residuals	40	0.0688	0.00172			

ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการทดลองที่ 2

ตารางผนวกที่ 38 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	0.3114	0.0519	0.626	0.707
Residuals	14	1.16	0.08286		

ตารางผนวกที่ 39 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	3.345	0.5575	0.705	0.651
Residuals	14	11.067	0.7905		

ตารางผนวกที่ 40 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	18.299	3.0498	4.675	0.00822	**
Residuals	14	9.133	0.6524			

ตารางผนวกที่ 41 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	35.68	5.947	3.755	0.0194	*
Residuals	14	22.17	1.584			

ตารางผนวกที่ 42 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	79.16	13.194	4.43	0.0102	*
Residuals	14	41.69	2.978			

ตารางผนวกที่ 43 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	133.37	22.228	13.14	4.80e-05	***
Residuals	14	23.67	1.691			

ตารางผนวกที่ 44 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 21 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	83.65	13.942	8.474	0.000518	***
Residuals	14	23.03	1.645			

ตารางผนวกที่ 45 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 24 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	112.19	18.698	3.751	0.0195	*
Residuals	14	69.78	4.984			

ตารางผนวกที่ 46 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 27 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	149.5	24.921	2.691	0.0596	.
Residuals	14	129.7	9.261			

ตารางผนวกที่ 47 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนความยาวรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	108.1	18.02	2.51	0.0732	.
Residuals	14	100.5	7.18			

ตารางผนวกที่ 48 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	1.07e-29	1.78e-30	1	0.463
Residuals	14	2.49e-29	1.78e-30		

ตารางผนวกที่ 49 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	10.95	1.8254	2.556	0.0694	.
Residuals	14	10	0.7143			

ตารางผนวกที่ 50 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	13.62	2.27	2.072	0.123
Residuals	14	15.33	1.095		

ตารางผนวกที่ 51 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	111.62	18.603	7.371	0.00104	**
Residuals	14	35.33	2.524			

ตารางผนวกที่ 52 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 15 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	449.1	74.86	37.43	7.76e-08	***
Residuals	14	28	2			

ตารางผนวกที่ 53 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	1319.9	219.98	17.17	1.01e-05	***
Residuals	14	179.3	12.81			

ตารางผนวกที่ 54 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 21 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	4814	802.3	31.2	2.51e-07	***
Residuals	14	360	25.7			

ตารางผนวกที่ 55 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 24 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	15413	2568.9	16.94	0.000011	***
Residuals	14	2123	151.7			

ตารางผนวกที่ 56 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 27 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	23552	3925	78.13	5.89e-10	***
Residuals	14	703	50			

ตารางผนวกที่ 57 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนรากต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	73943	12324	88.51	2.54e-10	***
Residuals	14	1949	139			

ตารางผนวกที่ 58 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	2.51e-01	4.19e-02	2.588	0.0669	.
Residuals	14	2.27e-01	1.62e-02			

ตารางผนวกที่ 59 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.9295	0.1549	0.877	0.536	.
Residuals	14	2.4733	0.1767			

ตารางผนวกที่ 60 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	2.696	0.4494	0.958	0.487
Residuals	14	6.567	0.469		

ตารางผนวกที่ 61 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	67.55	11.259	4.631	0.00855	**
Residuals	14	34.04	2.431			

ตารางผนวกที่ 62 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	272.1	45.36	4.215	0.0125	*
Residuals	14	150.7	10.76			

ตารางผนวกที่ 63 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	5027	837.8	18.65	6.17e-06	***
Residuals	14	629	44.9			

ตารางผนวกที่ 64 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	17652	2942	12.13	7.55e-05	***
Residuals	14	3395	242.5			

ตารางผนวกที่ 65 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 24 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	145885	24314	12.11	7.64e-05	***
Residuals	14	28116	2008			

ตารางผนวกที่ 66 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 27 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	484435	80739	27.78	5.25e-07	***
Residuals	14	40694	2907			

ตารางผนวกที่ 67 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งรากของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	2.1599	0.36	23.14	1.65e-06	***
Residuals	14	0.2178	0.0156			

ตารางผนวกที่ 68 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	1.84e-02	3.06e-03	0.813	0.577
Residuals	14	5.27e-02	3.77e-03		

ตารางผนวกที่ 69 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	0.02056	0.003426	0.98	0.474
Residuals	14	0.04895	0.003496		

ตารางผนวกที่ 70 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	0.01035	0.001725	1.995	0.135
Residuals	14	0.0121	0.000865		

ตารางผนวกที่ 71 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.03334	0.005557	6.948	0.00139	**
Residuals	14	0.0112	0.0008			

ตารางผนวกที่ 72 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.15499	0.02583	40.35	4.76e-08	***
Residuals	14	0.00896	0.00064			

ตารางผนวกที่ 73 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.10345	0.017242	66.58	1.73e-09	***
Residuals	14	0.00363	0.000259			

ตารางผนวกที่ 74 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.11718	0.01953	146.9	7.99e-12	***
Residuals	14	0.00186	0.000133			

ตารางผนวกที่ 75 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 24 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.13194	0.02199	118	3.58e-11	***
Residuals	14	0.00261	0.000186			

ตารางผนวกที่ 76 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 27 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.13559	0.022598	27.41	5.7e-07	***
Residuals	14	0.01154	0.000824			

ตารางผนวกที่ 77 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนอัตราส่วนของรากต่อส่วนเหนือดินของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	0.11929	0.019882	37.77	7.33e-08	***
Residuals	14	0.00737	0.000526			

ตารางผนวกที่ 78 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	2.662e-30	4.437e-31	1	0.463
Residuals	14	6.212e-30	4.437e-31		

ตารางผนวกที่ 79 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	1.065e-29	1.775e-30	1	0.463
Residuals	14	2.485e-29	1.775e-30		

ตารางผนวกที่ 80 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	1.238	0.20635	2.167	0.109
Residuals	14	1.333	0.09524		

ตารางผนวกที่ 81 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	2.5714	0.4286	9	0.00038	***
Residuals	14	0.6667	0.0476			

ตารางผนวกที่ 82 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนใบต่อต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	47.62	7.937	23.81	1.38e-06	***
Residuals	14	4.67	0.333			

ตารางผนวกที่ 83 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนต้นต่อกอของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	10	1.6667	35	1.20e-07	***
Residuals	14	0.667	0.0476			

ตารางผนวกที่ 84 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนต้นต่อกอของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 21 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	29.14	4.857	17	1.07e-05	***
Residuals	14	4	0.286			

ตารางผนวกที่ 85 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนต้นต่อกอของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 24 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	83.62	13.937	12.72	5.77e-05	***
Residuals	14	15.33	1.095			

ตารางผนวกที่ 86 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนต้นต่อกอของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 27 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	124.95	20.825	39.76	5.24e-08	***
Residuals	14	7.33	0.524			

ตารางผนวกที่ 87 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนจำนวนต้นต่อกอของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วัน หลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	286.7	47.78	55.74	5.66e-09	***
Residuals	14	12	0.86			

ตารางผนวกที่ 88 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 3 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	0.0762	0.0127	0.201	0.971
Residuals	14	0.8867	0.06333		

ตารางผนวกที่ 89 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 6 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	1.878	0.313	0.643	0.695
Residuals	14	6.813	0.4867		

ตารางผนวกที่ 90 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 9 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
ระดับความเข้มข้น P	6	22.98	3.83	1.19	3.67e-01
Residuals	14	45.07	3.22		

ตารางผนวกที่ 91 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 12 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	4059	676.5	10.36	1.80e-04	***
Residuals	14	914	65.3			

ตารางผนวกที่ 92 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 15 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	30411	5068	14.39	2.86e-05	***
Residuals	14	4931	352			

ตารางผนวกที่ 93 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 18 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	206905	34484	38.95	5.99e-08	***
Residuals	14	12395	885			

ตารางผนวกที่ 94 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 21 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	791044	131841	15.43	1.91e-05	***
Residuals	14	119662	8547			

ตารางผนวกที่ 95 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 24 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	4987216	831203	11.04	1.27e-04	***
Residuals	14	1054376	75313			

ตารางผนวกที่ 96 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 27 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	10776499	1796083	55.81	5.62e-09	***
Residuals	14	450541	32182			

ตารางผนวกที่ 97 ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนการสะสมน้ำหนักแห้งต้นของข้าวพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 ที่ปลูกในระดับความเข้มข้นฟอสฟอรัสที่แตกต่างกัน 7 ระดับ เมื่ออายุ 30 วันหลังงอก

แหล่งของความแปรปรวน	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
ระดับความเข้มข้น P	6	48393845	8065641	26.09	7.80e-07	***
Residuals	14	4328631	309188			

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล นายทศพร บ่อบัวทอง

เกิดเมื่อ 6 มีนาคม 2537

ประวัติการศึกษา 2559 ปริญญาโท สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2557 ปริญญาตรี สาขาวิชาพืชไร่ (ต่อเนื่อง 2 ปี) คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

2555 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาวิชาพืชศาสตร์ สาขางานพืชสวน วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี

2552 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ วิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีกาญจนบุรี