การประเมินประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ต่างๆ

ปรียาภรณ์ แสงเรือน

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2561

การประเมินประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ต่างๆ

ปรียาภรณ์ แสงเรือน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การประเมินประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ต่างๆ

ปรียาภรณ์ แสงเรือน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาพืชไร่

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

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

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

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

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

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

ชื่อเรื่อง การประเมินประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ต่างๆ
ชื่อผู้เขียน นางสาวปรียาภรณ์ แสงเรือน
ชื่อปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพืชไร่
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภา อินสลุด

บทคัดย่อ

ฟอสฟอรัส (P) เป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืชโดยเฉพาะในข้าว ฟอสฟอรัสช่วยเพิ่มความยาวรากและช่วยให้รากแตกแขนงได้ดี แต่อย่างไรก็ตามฟอสฟอรัสมักถูกตรึงและอยู่ในรูปที่พืชไม่สามารถดูดใช้ได้ โดยในดินกรดฟอสฟอรัสมักถูกตรึงด้วย Al และ Fe ในขณะที่ดินด่างฟอสฟอรัสถูกตรึงไว้ด้วย Ca ซึ่งพื้นที่สูงมักประสบปัญหาด้านฟอสฟอรัสต่ำ ส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตข้าวลดลง การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสในข้าวพันธุ์ต่างๆ ในรูปแบบที่เป็นประโยชน์และไม่เป็นประโยชน์ และเพื่อทดสอบผลผลิตและการตอบสนองของข้าวต่อระดับของปุ๋ยฟอสฟอรัสในแปลงข้าว โดยปลูกคัดเลือกสายพันธุ์ข้าวไทย 147 สายพันธุ์ ที่มาจากระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) จากการศึกษาพบว่า ข้าวแต่ละสายพันธุ์เจริญเติบโตในสารละลายที่มี K-P และ Ca-P ได้แตกต่างกัน พันธุ์ที่เจริญเติบโตในสารละลายที่มี K-P มีจำนวนต้นต่อกอและความสูงที่มากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ซึ่งทั้งสองลักษณะเป็นผลให้น้ำหนักแห้งต้นของของข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P มากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P เช่นเดียวกัน แต่ลักษณะของความยาวราก มีผลตรงกันข้ามกัน คือ พันธุ์ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีจำนวนรากลดลงและมีความยาวรากเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นลักษณะที่ตอบสนองต่อสภาพฟอสฟอรัสต่ำ หลังจากนั้นคัดเลือกพันธุ์ข้าวให้เหลือ 22 สายพันธุ์ ด้วยวิธีการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งปลูกในสารละลายธาตุอาหารโดยอยู่ในรูปของฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ KH_2PO_4 : K-P และฟอสฟอรัสรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P, FeO_4P : Fe-P จากการศึกษาพบว่า ข้าวที่ปลูกในฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป Ca-P มีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับข้าวที่ปลูกใน K-P บ่งชี้ถึงปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ คือ จำนวนรากและน้ำหนักแห้งรากที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในฟอสฟอรัสรูป Al-P และ Fe-P มีความยาวรากเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับต้นที่ปลูกในฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ บ่งชี้ถึงฟอสฟอรัสที่ยังถูกตรึงไว้สูง ทำให้ฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์มีปริมาณต่ำ โดยเห็นได้ว่าฟอสฟอรัสที่ตรึงอยู่กับ Ca ปลดปล่อยออกมาได้มากกว่าการตรึงอยู่กับ Al หรือ Fe ดังนั้นข้าวที่ปลูกในดินด่างอาจแสดงอาการขาด

ฟอสฟอรัสน้อยกว่าดินกรด หลังจากนั้นคัดเลือกพันธุ์ข้าวให้เหลือ 4 สายพันธุ์ โดยปลูกในสภาพไร่ภายใต้โรงเรือน จากการศึกษาพบว่า การเจริญเติบโตของข้าวทั้งในระยะ vegetative และ reproductive ได้รับอิทธิพลจากปริมาณฟอสฟอรัส โดยการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส ส่งผลให้ข้าวเจริญเติบโตสูงขึ้น นอกจากนี้ข้าวแต่ละพันธุ์มีศักยภาพในการเจริญเติบโตที่แตกต่างกันในแต่ละระดับฟอสฟอรัส โดยพันธุ์บือขอแผ่ให้ผลผลิตสูงแม้ว่าจะปลูกในสภาพฟอสฟอรัสต่ำ ซึ่งอาจเป็นพันธุ์ที่เหมาะสมสำหรับปลูกในพื้นที่ที่มีฟอสฟอรัสต่ำต่อไป

คำสำคัญ : ข้าว, ฟอสฟอรัส, การเจริญเติบโต

Title EVALUATION OF PHOSPHORUS UPTAKE EFFICIENCY IN DIFFERENT RICE VARIETIES

Author Miss Preeyaporn Sangruan

Degree Master of Science in Agronomy

Advisory Committee Chairperson Assistant Professor Dr. Nednapa Insalud

ABSTRACT

Phosphorus (P) is an essential nutrient required for plant structure and growth. Especially in rice, P plays an important characteristic roles for root increasing, root length and root branching. However, P is often fixed by soil particles becomes unavailable forms for plant use. In acidic soil, P is fixed by Al and Fe, while in alkaline soil, it is fixed by Ca. Furthermore, the problem can always be observed in high planting areas which effect a decreasing in plant growth and yield loss. The objectives of this study were to select P uptake efficiency varieties of rice in P available and unavailable P condition and to investigate growth and yield of rice in different phosphorus fertilization conditions. One hundred forty seven rice varieties from different original ecotype systems were planted in available (KH_2PO_4 : K-P) and unavailable ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) forms of P. The result showed the different response between rice varieties for K-P and Ca-P. Almost all varieties grown in K-P solution had higher tiller number per plant, shoot length and shoot dry weight than grown in the Ca-P solution. In contrast, the decrease in root number and longer root length was shown in the Ca-P solution. After that, the twenty-two varieties were selected by using correlation coefficient analysis. The selected varieties were brought to plant in four kinds of available and unavailable of P ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P, FeO_4P : Fe-P). The result showed that rices grown in Ca-P form of P had similar growth pattern to rice grown in K-P form. This indicating that characteristic of quantity of available P being released were increasing root number and root dry weight. On the other hand, rice grown in Al-P and Fe-P forms of P displayed an increase in root length compared to rice grown under available P

form, which indicated that most P was still in fixed form resulting in low level of available P. This study suggested that P that was fixed by Ca could be released more easily than that of P that was fixed by Al or Fe, which implied that rice grown in alkaline soil might exhibit milder P deficiency symptoms than rice grown under acidic soil. Then, the 4 rice varieties were selected to plant in the green house condition. It was found that, rice growth at both vegetative and reproductive stages was affected by P availability, in that increasing P availability resulted in increasing growth. In addition, each rice cultivar processed different growth potential regardless of P levels. Among the tested varieties, Beukorpae gave the highest yield at the low P which can be suggested as a suitable for cultivation in low P areas.

Keyword : Rice, Phosphorus, Growth

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนตรนภา อินสลุด อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชญ์ภาส สังพาลี และอาจารย์ ดร.จุฑามาศ อาจนาเสียว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่สละเวลาให้คำแนะนำ ตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ สาขาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา แลกเปลี่ยนความคิดเห็นและให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์โดยเสมอมา

คุณประโยชน์ของการค้นคว้าวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยขอน้อมระลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดาที่ได้ให้ชีวิต ความรัก การอบรม การศึกษาและเป็นกำลังใจให้เสมอมา จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์และบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้

ปรียาภรณ์ แสงเรือน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ช

สารบัญ ..... ซ

สารบัญตาราง ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

ความสำคัญของปัญหา 1

วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

ขอบเขตการศึกษา 3

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 การตรวจเอกสาร 4

1. สารประกอบของฟอสฟอรัส 4

2. ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน 6

3. ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดิน 7

4. การขาดธาตุฟอสฟอรัสในพืช 10

5. การตอบสนองของพืชเมื่อขาดฟอสฟอรัส 10

6. ฟอสฟอรัสกับการผลิตข้าว 14

7. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดใช้ฟอสฟอรัสของข้าว 15

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย 20

สถานที่ทดลอง 20

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง 20

วิธีการศึกษา 20
การทดลองที่ 1 20
การทดลองที่ 2 26
การทดลองที่ 3 27
การเก็บข้อมูล 29
สถานที่ดำเนินงาน 29
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ 30
ผลการทดลองที่ 1 ปลูกคัดเลือกข้าว 147 สายพันธุ์ ที่มีระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) 30
การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 32
การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 34
การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 36
การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 38
วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1 43
ผลการทดลองที่ 2 ปลูกคัดเลือกข้าว 22 สายพันธุ์ ในสารละลายธาตุอาหาร 4 รูป โดยเป็นรูปฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงไว้ด้วยธาตุต่างชนิดตามวัตถุต้นกำเนิดดิน 45
จำนวนต้นต่อกอ 45

ความสูงต้น 47
จำนวนรากต่อต้น 49
ความยาวราก 51
ความเขียวใบ 53
น้ำหนักแห้งต้น 55
น้ำหนักแห้งราก 57
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น 59
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก 61
วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2 63
ผลการทดลองที่ 3 ปลูกทดสอบการตอบสนองข้าว 4 สายพันธุ์ เพื่อประเมินการตอบสนองต่อปุ๋ย
ฟอสฟอรัส (P) ในสภาพแปลง 64
ระยะ 60 วัน 64
จำนวนต้นต่อกอ 64
ความสูงต้น 65
ความยาวราก 66
ความเขียวใบ 67
น้ำหนักแห้งต้น 68
น้ำหนักแห้งราก 69
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น 70
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก 71
ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส 72
ระยะแตกกอสูงสุด 73
จำนวนต้นต่อกอ 73
ความสูงต้น 74

ความยาวราก 75
ความเขียวใบ 76
น้ำหนักแห้งต้น 77
น้ำหนักแห้งราก 78
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น 79
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก 80
ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส 81
ระยะเก็บเกี่ยว 82
จำนวนต้นต่อกอ 82
น้ำหนักแห้งต้น 83
น้ำหนักแห้งราก 84
ความยาวรวง 86
จำนวนเมล็ดดี 87
จำนวนเมล็ดลีบ 88
น้ำหนัก 100 เมล็ด 89
ผลผลิตต่อต้น 90
วิจารณ์ผลการทดลองที่ 3 92
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 94
บรรณานุกรม 96
ภาคผนวก 102
ประวัติผู้วิจัย 146

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ 8

ตารางที่ 2 พันธุ์ข้าว 147 สายพันธุ์ 21

ตารางที่ 3 พันธุ์ข้าว 22 สายพันธุ์ 27

ตารางที่ 4 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าว ซึ่งดัดแปลงจาก (Yoshida et al., 1976).... 28

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นและรากของข้าวในระบบนิเวศต่างๆ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) 31

ตารางที่ 6 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 33

ตารางที่ 7 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 35

ตารางที่ 8 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)..... 37

ตารางที่ 9 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) 39

ตารางที่ 10 ค่าสูงสุด (Max), ค่าต่ำสุด (Min) และค่าเฉลี่ย (Mean) ของการเจริญเติบโตข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) 41

ตารางที่ 11 ค่าสูงสุด (Max), ค่าต่ำสุด (Min) และค่าเฉลี่ย (Mean) ของการเจริญเติบโตข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) 42

ตารางที่ 12 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 46

ตารางที่ 13 ความสูงต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 48

ตารางที่ 14 จำนวนรากต่อต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 50

ตารางที่ 15 ความยาวรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 52

ตารางที่ 16 ความเขียวใบของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 54

ตารางที่ 17 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 56

ตารางที่ 18 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 58

ตารางที่ 19 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 60

ตารางที่ 20 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์ 62

ตารางที่ 21 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60 และ 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 65

ตารางที่ 22 ความสูงต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 66

ตารางที่ 23 ความยาวรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 67

ตารางที่ 24 ความเขียวใบของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 68

ตารางที่ 25 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กรัม/กระถาง ที่ระยะ 60 วัน 69

ตารางที่ 26 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 70

ตารางที่ 27 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 71

ตารางที่ 28 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 72

ตารางที่ 29 ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน 73

ตารางที่ 30 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 74

ตารางที่ 31 ความสูงต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 75

ตารางที่ 32 ความยาวรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 76

ตารางที่ 33 ความเขียวใบของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 77

ตารางที่ 34 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 78

ตารางที่ 35 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 79

ตารางที่ 36 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 80

ตารางที่ 37 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 81

ตารางที่ 38 ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด 82

ตารางที่ 39 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว..... 83

ตารางที่ 40 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว..... 84

ตารางที่ 41 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว..... 85

ตารางที่ 42 จำนวนรวงต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว..... 86

ตารางที่ 43 ความยาวรวงของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว 87

ตารางที่ 44 จำนวนเมล็ดดีต่อรวงของข้าว 4 สายเมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว..... 88

ตารางที่ 45 จำนวนเมล็ดลีบต่อรวงของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว 89

ตารางที่ 46 น้ำหนัก 100 เมล็ด ของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว 90

ตารางที่ 47 ผลผลิตต่อต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว 91

บทที่ 1
บทนำ

ความสำคัญของปัญหา

ระบบนิเวศในการปลูกข้าวโดยทั่วไปมีหลายแบบ จำแนกได้เป็นข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวน้ำลึก และข้าวขึ้นน้ำ (สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว, 2559) การปลูกข้าวไร่เป็นการปลูกที่แตกต่างจากสภาพอื่น คือ เป็นการปลูกบนที่ดอนและไม่มีน้ำขังในพื้นที่เพาะปลูก (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 3, 2520) การปลูกข้าวไร่มักประสบปัญหาในเรื่องของดินขาดความอุดมสมบูรณ์มีปริมาณธาตุอาหารต่ำ เนื่องจากธาตุอาหารที่มักมีปัญหาในการปลูกข้าวไร่ คือ ฟอสฟอรัส (P) ข้าวที่ปลูกในสภาพน้ำขังมักไม่พบปัญหา ฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินน้ำขังสามารถละลายน้ำอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ให้พืชดูดใช้ได้ง่าย แต่ข้าวไร่เป็นข้าวที่ปลูกในสภาพไม่มีน้ำขังฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์หรือพืชดูดใช้ได้น้อย และในดินน้ำไม่ขังพบว่า 80 % ของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่ลงในดินเป็นฟอสฟอรัสที่ไม่เคลื่อนย้ายและไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพราะถูกดูดซับ ตกตะกอนหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นอินทรีย์สาร (Schachtman et al., 1998) อีกทั้งสภาพพื้นที่ปลูกข้าวไร่มักเป็นที่ลาดชัน ดินจึงขาดความอุดมสมบูรณ์ซึ่งเกิดได้จากหลายสาเหตุ ทั้งเนื่องจากการชะล้างทำให้ธาตุอาหารหรือปริมาณฟอสฟอรัสมีน้อย นอกจากนี้วัตถุต้นกำเนิดดินที่มีความแตกต่างกันรวมถึงการสะสมอินทรียวัตถุที่แตกต่างกันมีผลต่อสภาพ pH ของดิน โดยเฉพาะพื้นที่สูงที่ปลูกข้าวไร่มักประสบปัญหาดินกรด ในสภาพดินกรด Fe และ Al ละลายออกมาและจับกับฟอสฟอรัสทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ในขณะที่วัตถุต้นกำเนิดดินที่เป็นดินด่างหรือหินปูน ดินมักมี pH สูง ฟอสฟอรัสถูกตรึงด้วย Ca ได้ง่ายทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลงซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่นั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุ (Williams, 1975) ในขณะที่ดินที่เกิดขึ้นใหม่ปริมาณฟอสฟอรัสในดินขึ้นอยู่กับอายุของการเกิดดิน ดังนั้นเมื่อดินมีอายุที่มากขึ้นปริมาณฟอสฟอรัสในดินมักลดลง ทั้งเนื่องจากการย่อยสลายของวัตถุต้นกำเนิดดินที่มีฟอสฟอรัสสูงนั้นคือ apatites เมื่อมีการสลายและปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาอาจละลายอยู่ในสารละลายดินซึ่งส่วนหนึ่งถูกชะล้างสูญเสียไปทำให้ดินขาดความอุดมสมบูรณ์

การขาดฟอสฟอรัสในดินเป็นปัญหาหลักสำหรับการให้ผลผลิตของข้าว (Aluwihare et al., 2016) โดยฟอสฟอรัสมีบทบาทสำคัญต่อพืช คือ เป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมาก (Marschner, 2012) และมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (ณฐมณ และศุภธิดา, 2557) ฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบสำคัญของแหล่งพลังงาน (Adenosine triphosphate: ATP) รวมถึงเป็นโครงสร้างสำคัญของส่วนต่างๆ ในเซลล์และเนื้อเยื่อพืช การเพิ่มความยาวรากรวมถึงการเพิ่มจำนวนรากต่อต้นและการแตกแขนงรากให้มากขึ้น (Owen, 2006) เป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัส ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} โดยพืชต้องการฟอสฟอรัส

0.3-0.5 % โดยน้ำหนักแห้งเพื่อให้การเจริญเติบโตในระยะวัฒนภาค (vegetative stage) เป็นไปตามปกติและปริมาณฟอสฟอรัสที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของข้าวมีระดับค่าวิกฤติ 10-17 ppm. (สมเกียรติ, 2552) หากพืชขาดฟอสฟอรัส รากเจริญช้า ลำต้นแคระแกร็น แตกกอน้อย (Dobermann and Fairhurst, 2000) สีเขียวของพืชเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้ม สีเขียวเข้มแกมน้ำเงิน ในข้าวโพดและหญ้าชนิดอื่นๆ มักพบว่าใบเปลี่ยนเป็นสีม่วงเนื่องจากการสะสมน้ำตาลซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์แอนโทไซยานินในใบ (Havlin et al., 2005) หากเกิดการขาดฟอสฟอรัสในข้าวมีผลให้ข้าวเจริญสู่ระยะสุกแก่ช้า อาจช้าไปประมาณ 1 สัปดาห์หรือมากกว่านั้นและในกรณีที่ขาดฟอสฟอรัสในระดับรุนแรง ข้าวอาจไม่ออกดอก เมล็ดลีบ ไม่มีการสร้างตัวของเมล็ด ผลผลิตต่ำรวมถึงเมล็ดมีคุณภาพต่ำ (Barry and Miller, 1989)

สำหรับประเทศไทยมีพันธุ์ข้าวที่มีความหลากหลายทั้งทางด้านระบบนิเวศในการเพาะปลูก ความหลายหลากของเชื้อพันธุ์ข้าวพื้นเมืองโดยเฉพาะข้าวบนพื้นที่สูงในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศที่มักเป็นการปลูกแบบสภาพไร่ รวมถึงความหลากหลายของพื้นที่ที่ปลูกข้าวทั่วประเทศ ดังนั้นความสามารถของพันธุ์ข้าวที่สามารถปรับตัวหรือมีกลไกที่สามารถอยู่รอดในสภาพที่มีข้อจำกัดด้านความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน โดยเฉพาะฟอสฟอรัสที่มีแตกต่างกันและอาจมีพันธุ์ที่มีลักษณะดีเด่นในด้านของการมีกลไกที่ส่งเสริมการดูดใช้ฟอสฟอรัสในดินสูงซึ่งอาจมีความแตกต่างกันด้านกลไก เช่น ความสามารถในการสร้างหรือพัฒนาระบบรากให้มีความสามารถในการดูดหาฟอสฟอรัสในดินมากขึ้นซึ่งอาจทำได้โดยการยืดขยายความยาวรากเพื่อการดูดหาฟอสฟอรัสที่อยู่ห่างออกไปจากบริเวณรากเดิมเจริญอยู่หรือการสร้างจำนวนรากเพิ่มขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส (Root surface) กับฟอสฟอรัสในดินเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการสร้างขนรากเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดหาฟอสฟอรัสในดินให้มากขึ้นซึ่งการทดลองนี้จะปลูกศึกษาเพื่อหาพันธุ์ดีเด่นในลักษณะดังกล่าวว่ามีความสัมพันธ์กับการดูดใช้ธาตุอาหารในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ได้มากขึ้นหรือไม่ซึ่งการศึกษาดำเนินการศึกษาทั้งในระดับโรงเรือนและห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและชัดเจนขึ้น

ดังนั้นการพัฒนาพันธุ์ข้าวที่สามารถดูดใช้ฟอสฟอรัสได้อย่างมีประสิทธิภาพนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากพันธุ์ดังกล่าวสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตได้โดยเฉพาะในการผลิตในพื้นที่ที่ไม่เหมาะสมและพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ นอกจากนี้ข้าวที่สามารถดูดใช้ฟอสฟอรัสได้ดีสามารถช่วยลดปัจจัยการผลิต (หรือปุ๋ยฟอสฟอรัส) ซึ่งนอกจากสามารถช่วยเกษตรกรลดต้นทุนการผลิตแล้ว ยังช่วยเกษตรกรลดการพึ่งพาการใช้ปุ๋ยเคมีและสามารถช่วยส่งเสริมกระบวนการผลิตข้าวอินทรีย์ซึ่งถ้าใช้พันธุ์ข้าวที่มีศักยภาพที่ดูดใช้ฟอสฟอรัสสูงหรือพันธุ์ที่มีความสามารถในการเปลี่ยนฟอสฟอรัสในดินที่อาจอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ให้เป็นประโยชน์และดูดใช้ได้เป็นการลดการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสสำหรับเกษตรกรได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ข้าวที่มีความสามารถในการดูดใช้ฟอสฟอรัสในรูปแบบที่เป็นประโยชน์และไม่เป็นประโยชน์
2. เพื่อทดสอบผลผลิตและการตอบสนองของข้าวต่อระดับของปุ๋ยฟอสฟอรัสในกระถางดินภายใต้สภาพโรงเรือน

ขอบเขตการศึกษา

1. พันธุ์ข้าวของระบบนิเวศข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวน้ำลึกและข้าวขึ้นน้ำ จากแหล่งต่างๆ ในประเทศไทย จำนวน 147 สายพันธุ์
2. ศึกษาระยะต้นกล้าของข้าวโดยปลูกในสารละลายธาตุอาหารซึ่งดัดแปลงจาก Yoshida et al. (1976) ภายใต้สภาพโรงเรือน
3. ศึกษาระยะการเก็บเกี่ยวของข้าวโดยปลูกในกระถางดินภายใต้สภาพโรงเรือน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้พันธุ์ที่เหมาะสมต่อการเพาะปลูกในสภาพดินที่มีฟอสฟอรัสต่ำ
2. สามารถลดต้นทุนในการผลิต (ลดการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส) รวมทั้งเป็นการส่งเสริมการผลิตข้าวแบบอินทรีย์
3. เพิ่มผลผลิตข้าวในแปลงเพาะปลูกที่มีสภาพไม่เหมาะสม

บทที่ 2
การตรวจเอกสาร

1. สารประกอบของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสในดินเกือบทั้งหมด ปรากฏอยู่ในรูปของออร์โทฟอสเฟตหรือพวกที่แปลงมาจากกรดออร์โทฟอสฟอริค (H_2PO_4) เกือบทั้งสิ้น ฟอสเฟตในดินแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ อินทรีย์ฟอสเฟตกับอนินทรีย์ฟอสเฟต ในดินทั่วไปมีฟอสเฟตทั้งสองส่วนนี้ต่างกัน พวกอินทรีย์ฟอสเฟตมีแนวโน้มที่มีมากหรือน้อยตามปริมาณของอินทรียวัตถุในดิน ดังนั้นในชั้นดินล่างจึงมีอินทรีย์ฟอสเฟตน้อยและมีมากในดินชั้นบน จากผลการวิเคราะห์ดินทั่วไป พบว่าดินบนมีอินทรีย์ฟอสเฟตอยู่ระหว่าง 0.3-95 % ของฟอสเฟตทั้งหมดในดิน แต่ในดินที่ใช้ในการเขตกรรมมีอนินทรีย์ฟอสเฟตมากกว่า 90 % ของฟอสเฟตในดิน (ดินลึก 1 เมตร) (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1.1 ฟอสเฟตอินทรีย์

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

1.2 ฟอสเฟตอนินทรีย์

ฟอสเฟตอนินทรีย์ในดินมีทั้งพวกที่เป็นไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินและพวกที่เป็นสารประกอบหรือแร่ที่เป็นของแข็งอยู่ในดิน สารที่เป็นของแข็งของฟอสเฟตในดินมีมากมายซึ่งพอแบ่งออกได้เป็น 3 พวกใหญ่ๆ คือ

1.2.1 พวกแร่ (mineral form) ในดินมีทั้งที่เป็นแร่ปฐมภูมิ (primary mineral) ของดิน เช่น flurapatite, $3Ca_3(PO_4)_2.CaF_2$ และ Chlorapatite, $3Ca_3(PO_4)_2.CaCl_2$ ซึ่งอยู่ในหินอัคนี และแร่ทุติยภูมิ (secondary mineral) ซึ่งมีมากมายเพราะไอออนฟอสเฟตว่องไวในการทำปฏิกิริยามาก ตัวอย่างของแร่ได้แก่

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	$(Al.Fe)PO_4.2H_2O$

แร่	**สูตรเคมี**
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)

แร่ใหม่เหล่านี้เกิดจากการที่แร่ดั้งเดิมผุพังให้ไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินแล้วทำปฏิกิริยากับแคตไอออนต่างๆ เช่น Ca^{+2}, Fe^{+2}, Fe^{+3}, Al^{+3}, NH_4^+, K^+ และ Mg^{+2} เกิดเป็นสารประกอบในรูปแร่ต่างๆ แต่จะเป็นสารประกอบชนิดใดสุดแต่ความมากน้อยของการผุพัง (weathering) ของแร่ชนิดต่างๆ ชนิดและปริมาณของแคตไอออนและแอนไอออน ความเป็นกรดเป็นด่างของดินและสภาพแวดล้อมอื่นๆ เช่น ในดินเกิดใหม่มักมีพวกแร่แคลเซียมฟอสเฟตมากกว่า 80 % และมีอะลูมินัมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟตเพียงเล็กน้อยเท่านั้นหรือในดินที่มีการผุพังมากและเป็นเวลานาน เช่น ดินของฮาวายมี occluded phosphate มากกว่า 60 % อะลูมินัมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟตมากกว่า 20 % และเกือบไม่มีแคลเซียมฟอสเฟตเหลืออยู่เลย ในดินที่มีการผุพังในปริมาณที่เท่าๆ กันนั้น ดินที่มีปฏิกิริยาเป็นด่าง แคลเซียมฟอสเฟตมากกว่าเหล็กฟอสเฟต อะลูมินัมฟอสเฟตและ occluded phosphate แต่ถ้าเป็นดินที่มีปฏิกิริยาเป็นกรด มีเหล็กฟอสเฟตเป็นปริมาณมากกว่าแคลเซียมฟอสเฟต อะลูมินัมฟอสเฟตและ occluded phosphate อย่างไรก็ตามแร่ฟอสเฟตมีความสามารถในการละลายในน้ำได้น้อยมาก ถ้าเป็นแร่ที่เกิดใหม่ละลายได้ดีกว่าแร่ที่เกิดนานแล้ว หรือแร่ที่มีโครงสร้างโมเลกุลสลับซับซ้อนมากๆ ละลายได้ยากกว่าแร่ที่มีโครงสร้างโมเลกุลง่ายๆ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1.2.2 สารประกอบฟอสเฟตที่เกิดจากการใส่ปุ๋ยลงไปในดิน เมื่อปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ดี เช่น $Ca(H_2PO_4)_2.H_2O$, $NH_4H_2PO_4$ และ $(NH_4)_2HPO_4$ ลงไปในดินที่มีแคลเซียมหรือแมกนีเซียมสูง เกิดเป็นสารฟอสเฟตชนิดต่างๆ ที่ละลายน้ำได้น้อยกว่าเดิมเสมอ เช่น อาจเปลี่ยนเป็น 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 ละลายน้ำได้บ้างเล็กน้อยและในที่สุด

อาจเปลี่ยนไปเป็น hydroxyl apatite, $Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6$ และ fluorapatite, $Ca_{10}F_2(PO_4)_6$ ซึ่งละลายยากในที่สุด (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

แต่เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายได้ดีในดินที่มีเหล็กมากหรือดินที่ผ่านการผุพังมานานมักเกิดเป็นเหล็กฟอสเฟตที่มีโมเลกุลใหญ่และมีโครงสร้างที่ซับซ้อนและละลายยากยิ่งขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

1.2.3 Adsorbed phosphate ไอออนฟอสเฟตที่ถูกดูดซับอยู่ตามผิวของ hydrous oxide ของเหล็กอะลูมินัมและแร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay) ฟอสเฟตเหล่านี้ถูกตรึง (fixed) และยากแก่การปลดปล่อยกลบออกไปสารละลายดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

2. ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน

การตอบสนองของข้าวต่อประสิทธิภาพการดูดใช้ธาตุฟอสฟอรัสจะลดลงหรือเพิ่มขึ้น ขึ้นอยู่กับระดับฟอสฟอรัสที่อยู่ในดิน (Fageria et al., 1988) โดยฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของ orthophosphate ซึ่งมีปริมาณอยู่ในช่วง 0.02-0.15 % ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่นั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุ (Williams, 1975) ในขณะที่ดินที่เกิดขึ้นใหม่ปริมาณฟอสฟอรัสในดินขึ้นอยู่กับอายุของการเกิดดิน ดังนั้นเมื่อดินมีอายุที่มากขึ้นปริมาณฟอสฟอรัสในดินมักลดลง ทั้งเนื่องจากการย่อยสลายของวัตถุต้นกำเนิดดินที่มีฟอสฟอรัสสูงนั้น คือ apatites เมื่อมีการสลายและปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาอาจจะลายอยู่ในสารละลายดินซึ่งส่วนหนึ่งถูกชะล้างสูญเสียไป ทำให้ดินขาดความอุดมสมบูรณ์และในดินน้ำไม่ขังพบว่า 80 % ของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ใส่ลงในดินเป็นฟอสฟอรัสที่ไม่เคลื่อนย้ายและไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพราะถูกดูดซับ ตกตะกอนหรือเปลี่ยนรูปไปเป็นอินทรีย์สาร (Schachtman et al., 1998) โดยส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหล็ก (III) ฟอสเฟตและอะลูมินัมฟอสเฟต แต่เมื่อมีการขังน้ำ เหล็ก (III) ฟอสเฟตถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นเหล็ก (II) ฟอสเฟต ซึ่งละลายน้ำได้ง่าย ส่วนอะลูมินัมฟอสเฟตละลายได้ดีขึ้นเมื่อ pH ดินสูงขึ้นเมื่อดินถูกน้ำขัง (Ponnamperuma, 1972; Patrick and Reddy, 1978) นอกจากนั้นในดินที่เป็นด่าง ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแคลเซียมฟอสเฟต ฟอสฟอรัสรูปนี้ละลายได้ดีขึ้นเมื่อดินอยู่ในสภาพน้ำขัง อันเนื่องจากการลดลงของ pH ภายใต้อิทธิพลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น (Ponnamperuma, 1972)

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวเคมีของดินโดยเฉพาะเมื่อดินอยู่ในสภาพน้ำขังมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในช่วง 1-2 เดือนแรกหลังจากการขังน้ำซึ่งฟอสฟอรัสอยู่ในรูป $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ที่พืชสามารถดูดใช้ได้ง่าย หลังจากนั้นปริมาณจะลดลงเนื่องจากปฏิกิริยาตกตะกอนกับเหล็กและแคทไอออนอื่นๆ เมื่อดินมี pH ใกล้เป็นกลาง อัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของฟอสฟอรัสนี้มักขึ้นอยู่กับสมบัติของดินแต่ละชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณอินทรียวัตถุและเหล็กในดิน (Ponnamperuma, 1972) ได้ศึกษาความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินชนิดต่างๆ

หลังจากที่มีการขังน้ำ พบว่าความเป็นประโยชน์และการละลายน้ำได้ของฟอสฟอรัสมีมากที่สุดในดินทรายแคลคาเรียสที่มีปริมาณเหล็กต่ำ ส่วนในดินทรายที่เป็นกรดและมีเหล็กต่ำ ฟอสฟอรัสละลายได้ปานกลาง การละลายของฟอสฟอรัสต่ำที่สุดในดินเหนียวที่มีสภาพเป็นกรดและมีเหล็กสูง

3. ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดิน

3.1 ชนิดของสารฟอสเฟต

3.1.1 Solution P เป็น P ที่ละลายในสารละลายดิน (soil solution) ในรูปของ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ซึ่งสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทันที

3.1.2 Labile P เป็นกลุ่ม P ที่ถูกดูดซับหรือเกาะยึดบนผิวอนุภาคดิน (adsorbed P) Labile P ยังรวมถึงส่วนที่เป็นอินทรียวัตถุในดิน (soil organic matter) และ P ที่อยู่ในเซลล์จุลินทรีย์ที่กำลังสลายตัวซึ่งสามารถเติม P ให้กับสารละลายดินได้ทันที

3.1.3 Non-labile P เป็นกลุ่มฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble phosphate) ซึ่งอยู่ในส่วนของแร่ปฐมภูมิซึ่งจะปลดปล่อย P ในอัตราที่ช้ามาก ในส่วนของ non-labile P นี้ยังรวมถึงอินทรีย์ฟอสฟอรัส (organic P) ที่อยู่ในอินทรียวัตถุและในเซลล์จุลินทรีย์กลุ่มที่สลายตัวยากและยังไม่สลายตัวด้วย (อรวรรณ, 2551)

3.2 ปฏิกิริยาดิน

การละลายได้ของเหล็กฟอสเฟตและอะลูมินัมฟอสเฟตร่วมกับ hydrous oxide ของเหล็กและอะลูมินัม เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาดิน สามารถอธิบายด้วยสมการ ดังนี้

$$Al(H_2PO_4)_3 + 3OH^- \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3H_2PO^{4-}$$

เมื่อเพิ่ม pH หรือเพิ่มความเป็นด่างขึ้น เหล็กฟอสเฟตหรืออะลูมินัมฟอสเฟต สามารถปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตออกมาสู่สารละลายดินได้ ในขณะที่เหล็กหรืออะลูมินัมยังคงสภาพเป็นสารที่ไม่ละลายในรูปไฮดรอกไซด์ (hydroxide) และในทางผันกลับ ถ้าลด pH หรือเพิ่มความเป็นกรดหรือถ้ามีไอออนฟอสเฟตมากเกินไปจะเกิดปฏิกิริยาผันกลับ คือ เหล็กไฮดรอกไซด์หรืออะลูมินัมไฮดรอกไซด์ ทำปฏิกิริยาจับกับไอออนฟอสเฟต เกิดเป็นเหล็กฟอสเฟตหรืออะลูมินัมฟอสเฟตที่ละลายยากขึ้น

ในกรณีของดินที่น้ำท่วม (ดินนา) ความเป็นกรดของดินมักลดลง (pH สูงขึ้น) ทำให้ฟอสเฟตละลายออกมามากยิ่งขึ้น คือ ด้วยการเพิ่มความเป็นด่างและด้วยการเปลี่ยนสภาวะของสารจาก oxidized form มาเป็น reduced form เช่น จาก ferric phosphate เป็น ferrous phosphate ซึ่งมีผลให้มีไอออนฟอสเฟตละลายออกมาได้มากขึ้น การละลายได้ของพวกแคลเซียมฟอสเฟต เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาดิน แสดงได้ดังนี้

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

(hydroxyl apatite)

พวกแคลเซียมฟอสเฟตละลายได้เพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดเพิ่มขึ้น (pH ลดลง) เพราะว่าไอออนไฮโดรเจนมีแนวโน้มที่จับกับไอออนฟอสเฟตและยิ่งในกรณีของ hydroxyl apatite จะยิ่งละลายได้ดีเพราะไอออนไฮดรอกซิล (OH^-) ชอบรวมตัวกับไอออนไฮโดรเจนและเกิดเป็นน้ำ ยิ่งส่งเสริมการละลายยิ่งขึ้นในสภาพที่เป็นกรดเพิ่มขึ้น

โดยทั่วไปพวกอินทรีย์ฟอสเฟตเมื่ออยู่ในดินกรดอ่อนถึงด่างเล็กน้อย ถูกจุลินทรีย์เข้าย่อยสลาย (mineralization) ให้เป็นไอออนฟอสเฟตได้ง่ายกว่าช่วงความเป็นกรด-ด่างอื่นๆ ความเป็นกรด-ด่างของดิน ยังมีความสำคัญต่อชนิดหรือรูปของไอออนออร์โทฟอสเฟตด้วย เช่น ในสารละลายของกรด H_3PO_4 จะมีรูปของสิ่งต่างๆ ดังนี้ คือ H_3PO_4, $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, PO_4^{3-} ในกรณีที่สารละลายนี้เป็นกรดจัดหรือ pH ต่ำกว่า 5 ส่วนใหญ่เป็น $H_2PO_4^-$, H_3PO_4 และในกรณีที่สารละลายดินนี้เป็นด่างมากหรือ pH สูงกว่า 9 ส่วนใหญ่เป็น HPO_4^{2-}, PO_4^{3-} แต่ถ้าในช่วง pH 5-9 มักไม่ค่อยมี H_3PO_4 และ PO_4^{3-} มีแต่ $H_2PO_4^-$ และ HPO_4^{2-} ในสัดส่วน ดังตารางที่ 1 (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

ตารางที่ 1 เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ

pH ของสารละลาย	เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการละลายของฟอสฟอรัสในรูปต่างๆ		
H_3PO_4	$H_2PO_4^-$	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)

3.3 ปริมาณของแคตไอออนต่างๆ และสารประกอบต่างๆ ที่ชอบทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต

3.3.1 ไอออนเหล็กและอะลูมินัมที่ละลายในดิน ไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินทำปฏิกิริยาได้ง่ายและรวดเร็วมากกับ Fe^{+2}, Fe^{+3} และ Al^{+3} สารประกอบที่เกิดขึ้นส่วนมากมักละลายน้ำได้ยากและมีผลทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดินลดต่ำลง สารประกอบต่างๆ ของเหล็กและอะลูมินัมที่สะสมอยู่ในดินละลายให้แคตไอออน Fe^{+2}, Fe^{+3} และ Al^{+3} มากขึ้นเมื่อดินเป็นกรดจัดขึ้น แต่มักลดปริมาณการละลายได้ลงเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น ดังนั้นดินเป็นกรดจัดมาก การตรึงฟอสเฟตยิ่งมากขึ้นจึงทำให้ปริมาณของไอออนฟอสเฟตในสารละลายดินลดลงตามลำดับ เนื่องจากไอออนฟอสเฟตถูกเปลี่ยนให้เป็นสารอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายยากมากขึ้นซึ่งพืชดูดใช้ประโยชน์ได้น้อย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3.3.2 Hydrous oxides สำหรับ Hydrous oxides ของเหล็ก อะลูมินัม แมงกานีส มีอยู่ในดินทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแถบร้อนและชุ่มชื้น Hydrous oxides ของเหล็ก อะลูมินัมและแมงกานีส สามารถดูดซับไอออนฟอสเฟตได้ปริมาณมาก กระบวนการนี้เรียกว่า polar adsorption นอกจากนี้พวก Hydrous oxides เหล่านี้ยังอาจจะทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟตเกิดเป็นสารที่ละลายได้ยากอีกด้วย ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกตรึงด้วย Hydrous oxides ของเหล็ก อะลูมินัม และแมงกานีสลดลงเมื่อ pH ของดินสูง (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

3.3.3 แร่ดินเหนียวซิลิเกต (silicate clay mineral) แร่ดินเหนียวพวก kaolinite, montmorillonite และ illite สามารถตรึงฟอสเฟตได้โดยที่แร่ประเภทนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนฟอสเฟต โดยกระบวนการ surface reaction คือ ไอออนฟอสเฟตเข้าแทนที่ hydroxyl group ที่อยู่รอบๆ ผิวผลึกของแร่ดินเหนียวซิลิเกตและทำปฏิกิริยากับอะตอมของอะลูมินัมหรืออะตอมของเหล็กที่อยู่ในโครงสร้างของแร่ซิลิเกต ไอออนฟอสเฟตจึงกลายเป็นองค์ประกอบของแร่ดินเหนียวไป (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ดังสมการ

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

(silicate crystal) แร่ฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยาก

3.3.4 แคลเซียมและแมกนีเซียมคาร์บอเนต (carbonates of calcium and magnesium) ดินที่มี pH สูงมัก มี $CaCO_3$ หรือ $MgCO_3$ สะสมอยู่ และมี Ca^{+2} และ Mg^{+2} มากด้วย (เรียกว่า calcareous soil) ไอออนฟอสเฟตทำปฏิกิริยาได้ดีและรวดเร็วกับ Ca^{+2} และ Mg^{+2} และบางกรณีอาจทำปฏิกิริยาได้กับ $CaCO_3$ แล้วเกิดเป็นสารแคลเซียมหรือแมกนีเซียมฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ยากและพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ดังสมการ

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

ละลาย ไม่ละลาย

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

ละลาย ไม่ละลาย

3.3.5 พื้นที่ผิวของสารที่จะปลดปล่อยไอออนฟอสเฟต ถ้าเป็นกรณีของสารฟอสเฟตที่ละลายได้ยาก เมื่อปลดปล่อยไอออนฟอสเฟตสู่สารละลายดิน ถ้าสารนั้นมีพื้นที่ผิวมาก (อนุภาคเล็ก) ย่อมละลายได้ดี แต่ถ้าเป็นกรณีของสารที่ละลายได้ดีอยู่แล้ว เช่น ปุ๋ยซูเปอร์ฟอสเฟต (super phosphate) การมีพื้นที่ผิวมากย่อมทำให้ไอออนฟอสเฟตละลายได้ดียิ่งขึ้นจึงลดปริมาณไอออนฟอสเฟตอย่างรวดเร็วเพราะถูกปลดปล่อยออกมาให้ทำปฏิกิริยากับสารอื่นในดินได้รวดเร็วขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

4. การขาดธาตุฟอสฟอรัสในพืช

แม้ว่าฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายในดินแต่สามารถเคลื่อนย้ายได้ดีในพืช ฟอสฟอรัสจึงสามารถเคลื่อนย้ายจากเนื้อเยื่อที่เจริญเต็มที่แล้วไปยังเนื้อเยื่อที่ใหม่และกำลังเจริญเติบโต พืชจึงตอบสนองต่อการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ระยะแรกของการเจริญเติบโต (early growth stage) ส่วนในช่วงของการสืบพันธุ์ (reproductive stage) ฟอสฟอรัสจะเคลื่อนย้ายไปยังผลและเมล็ดของพืช ดังนั้นการขาดฟอสฟอรัสในช่วงนี้จึงมีผลกระทบต่อการพัฒนาเมล็ด (seed development) และการเจริญเข้าสู่ช่วงเต็มวัยของพืช (crop maturity) (อรวรรณ, 2551) ทำให้พืชออกดอกช้า จำนวนดอกผลและเมล็ดน้อยลง การที่ใบพืชวาย (senescence) และร่วงหล่นเร็วกว่าปกติ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ผลผลิตต่ำ (Barry and Miller, 1989)

ยงยุทธ (2552) รายงานว่า พืชที่ขาดฟอสฟอรัสมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ 2 ประการคือ 1) ใบขยายขนาดช้า เล็ก และ 2) จำนวนใบน้อย สาเหตุที่แผ่นใบมีการขยายช้าเนื่องจากเซลล์เนื้อเยื่อชั้นผิวไม่ค่อยขยายตัว อันเนื่องมาจาก 1) เซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวมีฟอสฟอรัสต่ำ และ 2) สภาพนำน้ำของราก (root hydraulic conductivity) ลดลง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการขยายขนาดของใบลดลงมาก แต่ปริมาณโปรตีนและคลอโรฟิลล์ต่อหน่วยพื้นที่ใบลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ขนาดใบที่ลดลงมากแต่ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงเพียงเล็กน้อยนี้ส่งผลให้ใบพืชที่ขาดฟอสฟอรัสในระยะแรกมีสีเขียวเข้มขึ้น แต่อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงต่อหน่วยคลอโรฟิลล์ลดลง

เมื่อการเจริญเติบโตส่วนเหนือดินลดลงมาก แต่มีผลกระทบต่อรากน้อย ดังนั้นพืชที่ขาดฟอสฟอรัสจึงมีค่าสัดส่วนระหว่างส่วนเหนือดินกับราก (shoot-root ratio) ลดลงด้วย ตัวอย่างเช่น ถั่วบีน (*Phaseolus vulgaris*) ที่ได้รับฟอสฟอรัสในระดับเพียงพอมีค่า shoot-root ratio เท่ากับ 5 แต่เมื่อขาดฟอสฟอรัสจะเหลือเพียง 1.9 ซึ่งตรงกับข้ามกับขาดแมกนีเซียมที่มีค่าเพิ่มเป็น 10 แสดงให้เห็นว่าการขาดแมกนีเซียมส่งผลให้น้ำหนักรากลดลงมาก แต่ส่วนเหนือดินลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (Khamis et al., 1990) การขาดฟอสฟอรัสยังเป็นสาเหตุที่ทำให้การกระจายของคาร์โบไฮเดรตจากลงมาอยู่ที่รากมากขึ้น สำหรับถั่วที่ขาดฟอสฟอรัสมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตในราก 27 % จากปริมาณทั้งหมดในต้น ในขณะที่พืชปกติมี 15.7 % ด้วยเหตุนี้รากพืชที่ขาดฟอสฟอรัสยังสามารถยืดตัวได้ในขณะที่ส่วนเหนือดินหยุดการเจริญเติบโตแล้ว การขาดฟอสฟอรัสของถั่วฮามาต้า (*Stylosanthes hamata*) มีผลทำให้มีการสะสมฟอสฟอรัสในรากมากและยังได้รับอีกส่วนหนึ่งซึ่งเคลื่อนย้ายมาจากส่วนเหนือดินอีกด้วยจึงทำให้รากสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ พฤติกรรมดังกล่าว คือ ความพยายามในการรักษาสภาพรากให้มีความสามารถหาธาตุอาหารที่ขาดแคลนมาเพิ่มเติม (Smith et al., 1990)

5. การตอบสนองของพืชเมื่อขาดฟอสฟอรัส

เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัสมักมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (ยงยุทธ, 2552) ได้รายงานว่า พืชมีการตอบสนองอย่างรวดเร็วเมื่อขาดฟอสฟอรัส เริ่มตั้งแต่การถอดรหัส (transcription) หรือการสร้าง

RNA ต่อจากนั้นจึงมีการปรับตัวทางชีวเคมีและทางสรีรวิทยา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการแสวงหาฟอสฟอรัสจากดินหรือปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสภายในพืช เนื่องจากพืชสามารถตรวจพบข้อมูล 2 ประการ คือ 1) สถานภาพของฟอสฟอรัสภายในพืชทั้งต้น จึงปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ภายในพืชได้ 2) สภาพความแปรปรวนในระดับความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินซึ่งนำมาสู่ความขาดแคลนจึงสามารถเจาะจงเพิ่มปริมาณรากเฉพาะส่วนของดินที่มีฟอสฟอรัสมาก (P-rich patches) การตอบสนองของพืชต่อการขาดฟอสฟอรัสสามารถอธิบายได้เป็น 4 ด้าน คือ การตอบสนองเชิงโมกุล ด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา สรีรวิทยาและชีวเคมี ดังนี้ (Raghothama, 1999; Schachman and Shin, 2007)

5.1 การตอบสนองเชิงโมเลกุล (molecular responses)

การตอบสนองเชิงโมเลกุล ได้แก่ การกระตุ้นการทำงานของยีนที่ควบคุมการสร้างเอนไซม์ เช่น ฟอสฟาเทส เอนไซม์ไรโบนิวคลีอิคเอส และพาหะขนส่งฟอสเฟต กล่าวคือ เมื่อพืชรับรู้ถึงภาวะการขาดฟอสฟอรัสก็ส่งสัญญาณซึ่งมีลักษณะต่อเนื่อง (signaling cascades) และหลากหลายเพื่อให้ส่วนต่างๆ รับรู้และตอบสนองได้ถูกต้อง กิจกรรมนี้ประกอบด้วย 1) การทำงานของ transcription factor หลายชนิด สำหรับตัวแรกที่มีบทบาทกระตุ้นให้พืชตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัส คือ โปรตีน phosphate starvation response 1 (PHR 1) ซึ่งมีบทบาทเหนี่ยวนำการทำงานของยีนในกลุ่ม P starvation induced genes และ 2) ปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีบทบาทในวิถีการถ่ายโอนสัญญาณ (signal transduction pathways) ในพืช คือ phospholipase D (PLD) ซึ่งช่วยกระตุ้นให้พืชที่ขาดฟอสฟอรัสมีการพัฒนาราก นอกจากนี้เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัส ความเข้มข้นของไซโทไคนินในพืชลดลงและการที่ฮอร์โมนพืชชนิดนี้เคลื่อนย้ายไปยังใบน้อยลง มีบทบาทที่สำคัญที่ทำให้มีการปรับเปลี่ยนระบบการเคลื่อนย้ายสารอาหารในพืช ในแนวทางที่เอื้อต่อการเจริญของราก นอกจากนี้ยังมี transcription factor อื่นๆ ที่มีบทบาทที่สำคัญ ในที่สุดยีนเหล่านี้ถูกเหนี่ยวนำให้ควบคุมการสร้าง 1) โปรตีน ซึ่งทำหน้าที่เป็นพาหะสำหรับขนส่งฟอสเฟตไอออน และ 2) เอนไซม์ต่างๆ และกรดอินทรีย์ รวมทั้งควบคุมการเปลี่ยนแปลงด้านสัณฐานลักษณะ สรีรวิทยาและชีวเคมี

การปรับตัวที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของรากพืชที่ขาดฟอสฟอรัส คือ การเพิ่มโปรตีนพาหะสำหรับดูดฟอสเฟตไอออน (Pi transporter) ในเยื่อ ให้เพียงพอสำหรับการดูดธาตุนี้จากดิน ซึ่งละลายได้มากขึ้นจากกิจกรรมของราก รวมทั้งเพื่อกระจายส่วนที่รากดูดได้ไปยังอวัยวะต่างๆ โดยปกติโปรตีนพาหะสำหรับฟอสเฟตไอออนมี 3 วงศ์ย่อย คือ PHT1, PHT2 และ PHT3 สำหรับ PHT1 นั้นมีบทบาทสำคัญในการดูดฟอสเฟตไอออนจากสารละลายดิน พบว่ามีการเพิ่มจำนวนมากขึ้นในราก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณปลายรากเมื่อพืชขาดฟอสฟอรัส (Hammond and White, 2008)

5.2 การตอบสนองด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา (morphological responses)

การตอบสนองในด้านนี้ ได้แก่ การเพิ่มสัดส่วน ราก:ส่วนเหนือดิน โดยเคลื่อนย้ายสารประกอบคาร์บอนมาสะสมในราก เร่งการเพิ่มพื้นที่ผิวรากเพื่อการดูดฟอสฟอรัสจากดิน โดยเพิ่มจำนวนและความยาวของรากแขนง เพิ่มจำนวนและความยาวของขนราก สร้างรากโปตีออยด์ (proteoid root) หรือรากคลัสเตอร์ (cluster root)

5.2.1 ขนรากและรากแขนง สำหรับการเพิ่มจำนวนขนรากและความยาวของขนรากมีความสำคัญมาก เนื่องจากรากพืชที่อยู่ในสภาวะขาดฟอสฟอรัสนั้นประมาณ 90 % ของฟอสฟอรัสที่ดูดได้มาจากการดูดของขนราก นอกจากนั้นพืชที่ขาดฟอสฟอรัสยังมีความยืดหยุ่น (fiexibility) ในการปรับระบบรากให้เข้ากับสภาพดินซึ่งโดยทั่วไปมีฟอสฟอรัสต่ำซึ่งรากส่วนใหญ่ดูดฟอสฟอรัสได้น้อย แต่ยังมีบางบริเวณที่มีฟอสฟอรัสสูงกว่าส่วนอื่น (P enriched soil patches) จึงแตกแขนงมากและมีขนรากมากเป็นพิเศษในบริเวณดังกล่าวซึ่งช่วยให้ดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้นถึง 80 %

การเพิ่มความหนาแน่นของขนรากเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญมาก เนื่องจากช่วยเพิ่มผิวสัมผัสของรากกับผิวอนุภาคดินและดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้น ส่งเสริมการพัฒนาขนรากให้ได้ตามเป้าหมาย ส่วนเหนือดินจึงลำเลียงซูโครสทางโฟลเอ็มมาสู่รากซึ่งช่วยให้มีขนรากเพิ่มจากเดิมหลายเท่า ในส่วนของการพัฒนารากแขนงมีแนวทาง ดังนี้ 1) เปลี่ยนการพัฒนารากแบบยืดตัวยาวไปเรื่อยๆ (indeterminate root development) มาเป็นการยืดตัวของรากแบบจำกัดความยาว (determinate root development) แล้วส่งเสริมการเพิ่มจำนวนของรากแขนง และ 2) รากเกิดใหม่ในดินบนจะยืดขยายออกในทิศทางที่ขนานกับผิวดิน จึงเป็นรากที่อยู่ตื้นเพื่อเน้นการหาฟอสฟอรัสในดินบน

5.2.2 รากโปรตีออยด์ (proteoil root) ไวท์ลูพีน (white lupine, *Lupinus alb*us) เป็นพืชในวงศ์ Proteaceae เมื่ออยู่ในสภาวะขาดฟอสฟอรัสหรือมีฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อต่ำกว่าปกติ พืชมักตอบสนองโดยพัฒนารากซึ่งมีลักษณะพิเศษเพื่อให้สามารถดูดฟอสฟอรัสจากดินได้มากขึ้น เรียกรากที่มีลักษณะเช่นนี้เรียกว่ารากโปตีออยด์ หรือรากคลัสเตอร์ (cluster root) ลักษณะของรากโปรตีออยด์มี 2 ประการ คือประการแรกมีรากแขนงแตกออกมาเป็นกระจุกคล้ายขนแปรง (bottlebrush-like cluster rootlets) รากแขนงแต่ละรากมีขนรากหนาแน่นและประการที่สองรากเหล่านี้สังเคราะห์กรดอินทรีย์ได้มากและมีการขับ (exudation) กรดดังกล่าวออกมาสู่ไรโซเฟียร์ (rhizosphere) หรือดินรอบผิวรากเพื่อเพิ่มการละลายของสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยาก เช่น แคลเซียมฟอสเฟต เหล็กฟอสเฟตและอะลูมินัมฟอสเฟต เมื่อละลายแล้วกรดอินทรีย์มักทำปฏิกิริยาคีเลชัน (chelation) กับแคลเซียม เหล็กและอะลูมินัม รากพืชจึงดูดฟอสเฟตจากดินได้มากขึ้น พืชที่หลั่งกรดอินทรีย์ออกมาทางระบบรากมักมีกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรด

อินทรีย์ในรากเพิ่มขึ้น เช่น ฟอสโฟอีนอลไพรูเวตคาร์บอกซิเลส (phosphoenolpyvate caeboxylase, PEPC) ซิเทรตซินเทส (citrate aynthase, CS) และมาเลตดีไฮโดรจีเนส (malate dehydrogenase, MDH) นอกจากนี้รากโปรตีออยด์ของไวท์ลูพีนในสภาวะขาดฟอสฟอรัสยังสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ฟอสฟาเทสได้มากกว่ารากปกติประมาณ 20 เท่า จึงดูดฟอสฟอรัสจากดินได้เพิ่มขึ้น (Raghothama, 1999; Watt and Evane, 1999; Shane et al., 2003; Penaloza et al., 2005)

เมื่อไวท์ลูพีนขาดฟอสฟอรัส เอนไซม์ฟอสฟาเทสจากรากโปรตีออยด์ สังเคราะห์จากเซลล์ในเนื้อเยื่อชั้นผิวของรากเดิม รากแขนงและขนรากโปตีออยด์ เอนไซม์ฟอสฟาเทสมีบทบาทในการปลดปล่อยฟอสเฟสไอออนจากสารอินทรีย์ สมบัติสำคัญของเอนไซม์นี้ คือโครงสร้างประกอบด้วย 2 หน่วย แต่ละหน่วยมีน้ำหนักโมเลกุล 72 กิโลคาลตัน สามารถย่อยสารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตได้หลายชนิด มีเสถียรภาพในช่วง pH 4.0-9.0 เนื่องจากเป็นเอนไซม์ที่ถูกขับออกมานอกเซลล์ จึงมีสมบัติทนทานไม่ถูกย่อยโดยเอนไซม์ย่อยโปรตีน (proteolytic enzymes) ช่วงครึ่งชีวิตของเอนไซม์นี้ประมาณ 2 สัปดาห์ (Wasaki et al., 2008)

สำหรับกรดอินทรีย์ เช่น กรดมาลิกและกรดซิทริก อยู่ในไซโทโซลซึ่งมี pH 7.0-7.5 ในรูปแอนไอออนเวเลนซี 2 และ 3 และเคลื่อนย้ายออกมาจากเซลล์พืชด้วยกลไกแบบ passive ผ่านช่องแอนไอออนซึ่งยอมให้มาเลตและซิเทรตผ่านได้สะดวก ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นของแอนไอออนทั้งสองในเซลล์สูงมากทำให้ศักย์ทางเคมีสูงกว่าภายนอกเซลล์ เมื่อไวท์ลูพีนขาดฟอสฟอรัสมักตอบสนองโดยการขับมาเลตและซิเทรตออกมาจากรากที่ได้กล่าวแล้ว การขับแอนไอออนจากระบบรากนั้นเกิดขึ้นเมื่อพืชอายุประมาณ 30 วัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่พืชได้พัฒนารากโปรตีออยด์แล้วและขับออกมาจากรากเหล่านี้เท่านั้น โดยรากคลัสเตอร์พัฒนาเต็มที่สามารถขับแอนไอออนทั้งสองออกมาได้มากกว่ารากที่มีอายุน้อย (Wang et al., 2007)

นอกจากไวท์ลูพีนแล้ว พืชอื่นๆ ที่อยู่ในภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัส มักขับกรดอินทรีย์ออกมาจากรากเช่นเดียวกันซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดซิทริกและกรดมาลิก เฉพาะราก Alfalfa สามารถขับกรดซิทริกได้มากกว่าปกติถึง 20 เท่า และเป็นการขับออกทางช่องผ่านที่มีจำนวนมากขึ้น หากมีการใส่หินฟอสเฟตเป็นบางจุด รากซึ่งอยู่ติดฟอสเฟตมักขับออกมาตรงบริเวณที่มีปุ๋ย นอกจากนั้นเพื่อให้การดูดฟอสเฟตไอออนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมีการเพิ่มโปรตีนพาหะสำหรับแอนไอออนอีกด้วยซึ่งเป็นการตอบสนองเชิงโมกุล (Raghothama, 1999)

5.3 การตอบสนองด้านสรีรวิทยา (physiological responses)

การตอบสนองด้านสรีรวิทยาแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นการปรับกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับฟอสฟอรัสในพืช เช่น เร่งการดูด ลดการผ่านออก (efflux) เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ เคลื่อนย้ายจากแวคคิวโอลมายังไซโทโซล เคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสระหว่างอวัยวะและกักเก็บฟอสฟอรัสไว้ในราก กลุ่มที่ 2 เป็นกระบวนการที่ช่วยเพิ่มเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินและส่งเสริมให้ดูดได้มากขึ้น

เช่น การขับกรดอินทรีย์ โปรตอนและสารคีเลต (chelates) ตลอดจนการขับเอนไซม์ฟอสฟาเทสออกจากรากด้วย ส่วนกลุ่มที่ 3 คือการปรับเมแทบอลิซึม เช่น การหายใจ การสังเคราะห์แสงและเมแทบอลิซึมของคาร์บอน (Raghothama, 1999)

การปรับตัวด้านสรีรวิทยาของรากโปรตีออยด์เพื่อเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอฟอรัสในดิน ทำให้รากดูดฟอสเฟตไอออนได้มากขึ้นมีดังนี้ คือ ขับโปรตอนด้วยตัวสูบโปรตอน ขับมาเลตและซิเทรตทางช่องแอนไอออนจากขนรากสู่ไรโซเฟียร์เพื่อละลายสารประกอบอนินทรีย์ฟอสเฟตที่ละลายยาก ขับเอนไซม์ฟอสฟาเทสและไฟเทส (phytases) จากขนรากเพื่อละลายฟอสฟอรัสที่เป็นองค์ประกอบในสารอินทรีย์พวกเอสเทอร์ สำหรับมาเลตและซิเทรตนั้นช่วยละลายฟอสฟอรัสในอินทรีย์บางส่วนและช่วยให้สารนี้ถูกเอนไซม์ฟอสฟาเทสย่อยได้ง่ายขึ้นต่อจากนั้นรากสามารถดูดฟอสเฟตไอออนโดยใช้พาหะในเยื่อหุ้มเซลล์

ความแตกต่างระหว่างรากโปรตีออยด์กับรากธรรมดา 2 ประการ คือ รากโปรตีออยด์มี 1) กลไกที่เพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดินอย่างมีประสิทธิภาพ และ 2) พาหะที่สัมพรรคภาพต่อฟอสเฟตไอออนสูงกว่า (Smith et al., 2003)

5.4 การตอบสนองสนองด้านชีวเคมี (biochemical responses)

การตอบสนองด้านชีวเคมีของพืชที่ขาดฟอสฟอรัส ได้แก่ 1) การกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์เร่งการสังเคราะห์กรดอินทรีย์ เอนไซม์ฟอสฟาเทสและเอนไซม์ไรโบนิวคลีเอส 2) ปรับกระบวนการฟอสฟอรีเลชัน (phosphorelation) ของโปรตีน กระตุ้นให้กระบวนการไกลโคไลซีสเป็นแบบบายพาส (glycolytic bypass pathway) เพื่อลดขั้นตอนที่ใช้ฟอสเฟตไอออนหรือ ATP เนื่องจากอยู่ในภาวะขาดแคลนฟอสฟอรัส จึงมี ATP จำกัด เช่น หันมาใช้สารประกอบไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate, PP_i) เป็นแหล่งพลังงานทดแทน และ 3) เพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่มีการใช้ฟอสฟอรัสน้อยลง เช่น ใช้ซัลโฟลิพิดและกาแลกโทลิพิดแทนฟอสโฟลิพิดในเมแทบอลิซึม (Raghothama, 1999; Vance et al., 2003)

6. ฟอสฟอรัสกับการผลิตข้าว

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารมหัพภาค (Macronutrient) ที่พบในพืชส่วนใหญ่ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับไนโตรเจนและโพแทสเซียม (Tisdale and Nelson, 1975) แต่มีความสำคัญต่อพืชเป็นอันดับสองรองจากไนโตรเจน (Brady, 1974) เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของอินทรียสารที่สำคัญมากมายหลายชนิด เช่น กรดนิวคลีอิก ฟอสโฟลิพิด ATP และโคเอนไซม์ ซึ่งเกี่ยวข้องในกระบวนการเมทาบอลิซึมของพืช โดยพืชต้องการฟอสฟอรัส 0.3-0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้งเพื่อให้การเจริญเติบโตในระยะวัฒนภาค (vegetative stage) เป็นไปตามปกติ เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัส สีเขียวของพืชมักเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้ม สีเขียวเข้มแกมน้ำเงิน ในข้าวโพดและหญ้าชนิดอื่นๆ มักพบว่าใบเปลี่ยนเป็นสีม่วงเนื่องจากการสะสมน้ำตาลซึ่งเป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการสังเคราะห์แอนโทไซยานิน

ในใบ (Havlin et al., 2005) การขาดฟอสฟอรัสในดินเป็นปัญหาหลักสำหรับการให้ผลผลิตของข้าว (Aluwihare et al., 2016) ซึ่งฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการปริมาณมากและมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (ณฐมณ และศุภธิดา, 2557) รวมถึงฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของสารที่ให้พลังงานในการเจริญเติบโตของต้นข้าว ช่วยทำให้ต้นข้าวออกดอกติดเมล็ดตามปกติและช่วยให้รากเจริญเติบโตข้าวแตกกอมากขึ้น การขาดฟอสฟอรัสเป็นปัจจัยสำคัญที่จำกัดการเจริญเติบโตของพืช พบมากที่สุดในดินกรด (Fageria et al., 1988) ธาตุฟอสฟอรัสถูกตรึงได้ง่ายโดยอนุภาคของดิน โดยเฉพาะในดินที่มีความเป็นกรด (pH ต่ำกว่า 5.5) แหล่งของธาตุฟอสฟอรัสได้จากเศษซากพืช กระดูกสัตว์ชนิดต่างๆ เป็นต้น หากเกิดการขาดฟอสฟอรัสในข้าว มีผลให้ข้าวเจริญสู่ขั้น maturity ช้าอาจช้าไปประมาณ 1 สัปดาห์หรือมากกว่านั้น ในกรณีที่ขาดฟอสฟอรัสในระดับที่รุนแรง ข้าวอาจไม่ออกดอก เมล็ดลีบ ไม่มีการสร้างตัวของเมล็ด ผลผลิตต่ำรวมถึงเมล็ดมีคุณภาพต่ำ (Barry and Miller, 1989)

7. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการดูดใช้ฟอสฟอรัสของข้าว

เนื่องจากฟอสฟอรัสที่มีอยู่ถูกตรึงไว้ในดินจึงทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสมีค่อนข้างต่ำซึ่งการเพิ่มความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสต้องคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการดูดใช้ฟอสฟอรัสของพืชและกลไกที่อาจเกี่ยวข้องในการดูดใช้ฟอสฟอรัสของข้าว ได้แก่ ปัจจัยกลไกของต้นพืช เช่น การปลดปล่อยเอนไซม์ การเคลื่อนที่ของสาร สัณฐานวิทยา กรดอินทรีย์และกลุ่มฮอร์โมนที่อยู่ในต้นพืช ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น ความเป็นกรด-ด่างของดิน องค์ประกอบเคมีของดิน ธาตุอาหารอื่นๆ อากาศ น้ำ อุณหภูมิ และอินทรียวัตถุ จุลินทรีย์และแบคทีเรีย และปัจจัยด้านการจัดการเขตกรรม เช่น การขังน้ำ การใส่ปุ๋ย

7.1 กลไกของต้นพืช

7.1.1 พันธุกรรมของต้นพืช ความแตกต่างของพืช ไม่ว่าจะเป็น ลักษณะ ขนาด รูปร่างต่างๆ ของพืชถูกควบคุมโดยยีนที่อยู่บนโครโมโซมและยังเป็นตัวกำหนดว่าพืชนั้น มีขนาด รูปร่างและลักษณะอาการอย่างไร ภายใต้สภาพแวดล้อมเป็นที่เหมาะสมซึ่งยีนเป็นตัวสำคัญที่สุดในการกำหนดลักษณะต่างๆ ของพืช

จากการศึกษา การสร้างแผนที่พันธุกรรมของพืชสามารถนำมาใช้เพื่อศึกษาหาตำแหน่งยีน (Quantitative trait loci: QTL) ที่เกี่ยวข้องกับการดูดใช้ฟอสฟอรัส ซึ่งพบว่า QTL ที่เด่น คือ *PUP1* หรือ Phosphorus uptake1 ซึ่งเป็น quantitative trait loci (QTL) ของข้าว *(Oryza sativa)* อยู่โครโมโซมที่ 12 ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสร้างความต้านทานของการขาดของฟอสฟอรัสในดินให้แก่ข้าว (Wissuwa et al., 2002)

7.1.2 การดูดใช้ธาตุอาหารของพืช ธาตุอาหารที่พืชสามารถใช้ได้อยู่ในดิน 2 พวก คือ อยู่ในรูปของ ion ใน soil solution และอยู่ในรูปของ adsorbed ions ซึ่งถูกสารคอลลอยด์ดูด

ยึดเอาไว้ adsorbed ions นี้บางส่วนเท่านั้นที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ เมื่อเกิดแลกเปลี่ยนธาตุอาหารจะหลุดออกมาอยู่ใน soil solution และอีกประการหนึ่งทั้งสองรูปนี้อยู่ในสภาพที่สมดุลกันในธรรมชาติ คือ ถ้าใน adsorbed มี ion มากจะถูกเปลี่ยนมาเป็น ion ใน soil solution และในทางตรงกันข้าม ถ้าปริมาณของ adsorbed ion เหลืออยู่น้อย ปริมาณของ ion ใน soil solution ถูกดูดยึดกลับไปใหม่โดยอนุภาคคอลลอยด์ โดยพืชดูดใช้ ion ต่างๆ ทางรากขนอ่อน สำหรับพวก cation นั้นเข้ารากพืชโดยอิสระพืชไม่ต้องใช้พลังงานในการดูดใช้ (active absorption)

7.2 ปัจจัยทางสภาพแวดล้อม

7.2.1 ปฏิกิริยาดิน (pH) ฟอสฟอรัสในสารละลายดินเป็นประจุลบของกรดออโทฟอสฟอริก (H_3PO_4) รูปของประจุลบจึงมีได้สามแบบขึ้นอยู่กับ pH ของสารละลายดิน เมื่อ pH ของดินต่ำกว่า 6.8 รูปที่เป็นประโยชน์และมีอยู่มาก คือ $H_2PO_4^-$ ซึ่งเป็นรูปที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ง่ายที่สุด ที่ pH ระหว่าง 6.8-7.2 ฟอสฟอรัสอยู่ในรูป HPO_4^{2-} มากซึ่งพืชดูดได้ช้ากว่ารูปแรก หาก pH สูงกว่า 7.2 ฟอสฟอรัสอยู่ในรูป PO_4^{3-} เป็นส่วนใหญ่ซึ่งพืชดูดใช้ได้ยาก ฟอสฟอรัสในดินส่วนใหญ่เป็นประโยชน์ที่สุดที่ pH ประมาณ 6.5 ที่ pH ต่ำกว่านี้ ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่ถูกดูดซับโดย Fe/Al oxides เกิดการตกตะกอนเป็น $AlPO_4$ และ $FePO_4$ แต่หาก pH สูงกว่า 7 ฟอสฟอรัสมักตกตะกอนกับ Ca^{2+} เกิดเป็นแร่ที่มีแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ (Ca-P mineral) (Havlin et al., 2005)

7.2.2 ปริมาณเหล็ก อะลูมินัม แคลเซียม และไอออนประจุบวกในดิน ในดินกรดเหล็กและอะลูมินัมที่ละลายได้จะทำปฏิกิริยากับ $H_2PO^-_4$ เกิดเป็นสารประกอบ hydroxy phosphate ที่ไม่ละลายน้ำ (Havlin et al., 2005) รายงานว่า อะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (Exchangeable Al) เป็นปัจจัยสำคัญในการดูดซับฟอสฟอรัส เนื่องจาก 1 mq ของอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ต่อดิน 100 กรัม สามารถตกตะกอนกับฟอสฟอรัสได้มากถึง 100 mg P L-1 ในสารละลาย ในดินด่างฟอสฟอรัสจะทำปฏิกิริยากับแคลเซียม (Ca^{2+}) และแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) เกิดเป็นสารประกอบ $Ca_3(PO_4)_2$ ที่ไม่ละลายน้ำ (Brady, 1974) แม้ว่าสารประกอบฟอสเฟตแต่ละรูปสามารถเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ทั้งสิ้น แต่ในการปลูกข้าวนาน้ำขังรูปที่เป็นประโยชน์ได้เร็วที่สุดแก่ข้าว คือ รูปสารประกอบฟอสเฟตของเหล็ก (Fe-P) ซึ่งเป็นแหล่งสำคัญที่ให้ฟอสฟอรัสแก่ข้าว ส่วนรูปสารประกอบฟอสเฟตของอะลูมินัม (Al-P) มักพบในดินที่สลายตัวมาจากเถ้าภูเขาไฟ รูปสารประกอบฟอสเฟตของแคลเซียม (Ca-P) มักพบในดินด่าง Bohn et al. (2001) กล่าวว่า เมื่อดินนามีการระบายน้ำออก ฟอสเฟตมักถูกตรึงและตกตะกอนกับ Fe^{3+} เมื่อมีการขังน้ำ สารประกอบฟอสเฟตของ Fe^{3+} จะเปลี่ยนเป็นสารประกอบฟอสเฟตของ Fe^{2+} ซึ่งละลายน้ำได้มากกว่า

7.2.3 ชนิดและปริมาณแร่ดินเหนียว ชนิดของแร่ดินเหนียวในดินมีอิทธิพลต่อการดูดซับฟอสฟอรัส ดินที่มีแร่ kaolinite เพียงอย่างเดียว มักตรึงฟอสฟอรัสได้มากกว่าดินที่มีแร่ kaolinite ผสมกับ vermiculite (Ramulu et al., 1967) ในทำนองเดียวกัน Havlin et al. (2005)

กล่าวว่า ดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิด 1:1 เช่น kaolinite สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่าดินที่มีแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 เช่น montmorillonite เนื่องจากแร่ kaolinite มีหมู่ OH ในชั้น Al interlayer มากจึงสามารถแลกเปลี่ยนกับฟอสฟอรัสได้ แร่ชนิดนี้พบมากในดินที่มีการผุพังสลายตัวสูง นอกจากนี้แร่ kaolinite ยังมีประจุที่ขอบผิวของแร่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าปฏิกิริยาดิน (pH dependent charge) ทำให้สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้ วิศิษฐ์ และคณะ (2518) รายงานว่า ดินที่มีแร่ดินเหนียวมากกว่าร้อยละ 25 มักดูดซับฟอสฟอรัสจากสารละลายได้เกือบหมดภายใน 2 สัปดาห์ ส่วนดินที่มีแร่ดินเหนียวต่ำกว่าร้อยละ 25 ไม่สามารถดูดซับฟอสฟอรัสได้หมด แม้ดินมีการขังน้ำนานเกือบ 30 วัน

7.2.4 อินทรียวัตถุในดิน การใส่อินทรียวัตถุในดินไร่ช่วยลดการดูดซับฟอสฟอรัสได้ (Reddy et al., 1980) เนื่องจากผลิตผลที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์และฮิวมัสสามารถลดการดูดซับฟอสฟอรัสได้โดยไปเคลือบ Fe/Al oxides ป้องกันมิให้เกิดการดูดซับฟอสฟอรัสโดย Fe/Al oxides (Havlin et al., 2005) อินทรียวัตถุเป็นสิ่งสำคัญที่ช่วยให้ฟอสฟอรัสเป็นประโยชน์แก่พืชมากขึ้น อย่างไรก็ตามในกรณีของดินนา การเพิ่มอินทรียวัตถุกลับทำให้เกิดการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดภายหลังจากการขังน้ำเพียง 2 วัน เนื่องจากอินทรียวัตถุมีผลช่วยเร่งการเปลี่ยนแปลงค่า redox potential และการแปรสภาพของเหล็ก โดยทำให้ความเข้มข้นของเหล็กรูปอสัณฐานเพิ่มขึ้น (Sah and Mikkelsen, 1989)

7.2.5 อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมการดูดซับฟอสฟอรัสในดิน Sah and Mikkelsen (1989) พบว่าภายใต้สภาพรีดักชัน ดินที่มีการใส่อินทรียวัตถุที่อุณหภูมิสูงขึ้นการดูดซับฟอสฟอรัสสูงสุดมักเกิดขึ้นหลังการขังน้ำเพียงไม่กี่วัน (Tisdale and Nelson, 1975) กล่าวว่า โดยทั่วไปดินในเขตร้อนมีการดูดซับฟอสฟอรัสได้มากกว่าดินในเขตอบอุ่นเนื่องจากอุณหภูมิในเขตร้อนทำให้ดินมีปริมาณไฮดรัสออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมเพิ่มขึ้น

จากการศึกษาของ Kucey et al. (1989) รายงานว่า จุลินทรีย์เป็นสิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดกระบวนการหรือกิจกรรมที่มีอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตของพืชมากที่สุด จุลินทรีย์มีความสามารถในการย่อยสลายหินฟอสเฟต เชื้อราไมคอร์ไรซา (mycorrhiza fungi) เป็นราที่อาศัยอยู่กับรากพืชและช่วยให้พืชดูดซับธาตุฟอสฟอรัสจากดินให้กับพืชอาศัยได้มากกว่าเดิม จากการศึกษา Murdoch et al. (1967) พบว่าการใส่เชื้อราไมคอร์ไรซ่าสามารถช่วยยืดขยายความยาวรากของพืชได้มากกว่าการไม่ใส่เชื้อราไมคอร์ไรซ่า นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการย่อยหินฟอสเฟต (Phosphate solubilizing microorganism) โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถสร้างเอนไซม์หรือกรดอินทรีย์บางชนิดแล้วปลดปล่อยออกมาย่อยหินฟอสเฟตที่ตกตะกอนในดิน กรดอินทรีย์เหล่านี้ ได้แก่ lactic acid, citric acid, ketogluconic acid, malic acid, oxalic acid, malic acid, tartaric acid และ succinic acid หรือในรูปหินฟอสเฟตอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ เช่น *Aspergillus, Bacillus, Pseudomonas, Bacteria, Actinomycetes* และเชื้อรา เป็นต้น

จากการศึกษาของ เกตน์ณนิภา และสมาพร (2557) พบว่า เชื้อแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการละลายฟอสเฟตจากดินนาข้าว ได้แก่ *Burkhoderia* sp. และ *Pantoea dispersa* ซึ่งเป็นเชื้อที่มีการตรึงฟอสเฟตบนขี้เถ้าแกลบ ช่วยให้ส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวทั้งในด้านความสูง จำนวนใบ ความยาวรากและน้ำหนักแห้งต้น เช่นเดียวกับ สุภาพร และคณะ (2553) ซึ่งทำการทดสอบการละลายฟอสเฟตของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตและพบว่าแบคทีเรีย *Burkhoderia* sp. มีประสิทธิภาพในการละลายฟอสเฟตและส่งผลให้การเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานสูงมากกว่ากรรมวิธีควบคุมถึง 15 %

7.3 ด้านการจัดการเขตกรรม

7.3.1 การขังน้ำ (Holford and Patrick, 1979) พบว่าที่ pH ใดๆ ก็ตาม การขังน้ำสามารถช่วยเพิ่มความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในสารละลายดินได้ในระยะแรก หลังจากนั้นฟอสฟอรัสจะลดลงเนื่องจากถูกตรึงด้วยอนุภาคของ clay หรือ Al oxides อีก หรืออาจเกิดปฏิกิริยาตกตะกอน ทัศนีย์ และจงรักษ์ (2543) รายงานว่า เคมีของฟอสเฟตในดินน้ำขังเกี่ยวข้องกับเคมีของเหล็กโดยทั่วไปแล้วภายใต้สภาพน้ำขังปราศจากออกซิเจนมักพบเหล็กในรูปอสัณฐาน (Sah and Mikkelsen, 1989) ซึ่งเหล็กรูปนี้สามารถวิเคราะห์ได้โดยการสกัดด้วย ammonium oxalate และจากการศึกษา Khaild (1977) ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเหล็กที่สกัดได้ด้วยวิธีดังกล่าวกับปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับภายใต้สภาพน้ำขัง พบว่าเมื่อปริมาณเหล็กเพิ่มมากขึ้น ฟอสเฟตถูกดูดซับได้มากขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งที่การดูดซับฟอสเฟตไม่เพิ่มขึ้น แม้ปริมาณเหล็กสูงขึ้น การที่ฟอสเฟตถูกดูดซับได้เพิ่มขึ้นนั้นเกิดจากการแปรสภาพของสารประกอบ Fe และ Al ในรูปผลึกไปเป็นรูปอสัณฐานซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงกว่าทำให้ดูดซับฟอสเฟตได้มากขึ้น จากการศึกษาของ ณฐมณ และศุภธิดา (2557) ถึงการปลูกข้าวแบบเปียกสลับแห้ง พบว่ามีปริมาณ P-fractions ในส่วน P-solution Fe-P และ Ca-P ปริมาณที่สูงกว่าการจัดการน้ำแบบน้ำขัง เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของเหล็กในดิน สำหรับปฏิสัมพันธ์ของ P-fractions กับค่า pH พบว่ามีความผันแปรตามกัน กล่าวคือ เมื่อ pH สูงขึ้น P-solution และ Al-P ในดินจะปริมาณสูงด้วย

7.3.2 การใส่ปุ๋ย ธาตุฟอสฟอรัสในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ต้องอยู่ในรูปของอนุมูลของสารประกอบที่เรียกว่า ฟอสเฟตไอออน ซึ่งต้องละลายอยู่ในน้ำในดิน สารประกอบของฟอสฟอรัสในดินมีอยู่เป็นจำนวนมาก แต่ส่วนใหญ่ละลายน้ำยาก ดังนั้นส่วนใหญ่มักมีปัญหาถึงแม้มีฟอสฟอรัสมากแต่พืชยังแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสเพราะส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ นอกจากนั้นแร่ธาตุต่างๆ ในดินมักทำปฏิกิริยากับอนุมูลฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นปุ๋ยฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้เมื่อใส่ลงไปดิน ประมาณ 80-90 % มักทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุในดินกลายเป็น

สารประกอบที่ละลายน้ำยากไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชได้ ดังนั้นการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตจึงไม่ควรคลุกเคล้าให้เข้ากับดินเพราะทำให้ปุ๋ยทำปฏิกิริยากับธาตุต่างๆ ในดินได้เร็วยิ่งขึ้นและควรใส่ปุ๋ยฟอสเฟตแบบเป็นจุดหรือโรยเป็นแถบให้ลึกลงไปในดินบริเวณรากของพืช ปุ๋ยฟอสเฟตที่อยู่ชิดกับราก ไม่ก่ออันตรายแก่ราก อีกทั้งการใส่ปุ๋ยคอกร่วมด้วยสามารถป้องกันไม่ให้ปุ๋ยฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับแร่ธาตุในดินและสูญเสียความเป็นประโยชน์ต่อพืชเร็วจนเกินไป

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

สถานที่ทดลอง

ศึกษาการเจริญเติบโตของข้าวภายใต้สภาพโรงเรือน ณ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และวิเคราะห์ฟอสฟอรัส (P) ที่สะสมในต้นและรากข้าว ในห้องปฏิบัติการทางดินและปุ๋ยขั้นสูง คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง
    1.1 พันธุ์ข้าว 147 สายพันธุ์
    1.2 สารเคมีสำหรับเตรียมสารละลายธาตุอาหารพืช (ตารางที่ 4)
2. เครื่องวัดค่า pH (Waterproof pHTestr 30) ยี่ห้อ Oakton Instruments
3. เครื่องวัดความเขียวใบ Chlorophyll meter รุ่น SPAD-502Plus
4. ตู้อบความร้อน ความจุ 108 ลิตร ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNB 500
5. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler-Toledo รุ่น ML 204
6. อุปกรณ์การทดลองปลูกในสารละลาย

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง คือ

การทดลองที่ 1 ปลูกคัดเลือกข้าว 147 สายพันธุ์ ที่มาจากระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

การทดลองที่ 2 ปลูกคัดเลือกข้าว 22 สายพันธุ์ ที่มีกลไกในการส่งเสริมการดูดใช้ฟอสฟอรัส (P) ที่ถูกตรึงไว้ด้วยธาตุต่างชนิดตามวัตถุต้นกำเนิดดินในสารละลายธาตุอาหาร

การทดลองที่ 3 ปลูกทดสอบการตอบสนองข้าว 4 สายพันธุ์ เพื่อประเมินการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัส (P) ในสภาพแปลง

การทดลองที่ 1

ปลูกคัดเลือกข้าว 147 สายพันธุ์ (ตารางที่ 2) ที่มีระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวทุกๆ สัปดาห์ จนถึงอายุ 1 เดือนหลังย้ายปลูก โดยบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น ความเขียวใบ จำนวนราก ความยาวราก น้ำหนักแห้งต้นและราก และวิเคราะห์ฟอสฟอรัส (P) ที่สะสมในต้นและราก

วิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยลักษณะการเจริญเติบโต และวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตของข้าว 147 สายพันธุ์ โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

ตารางที่ 2 พันธุ์ข้าว 147 สายพันธุ์

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ระบบนิเวศ
1	อรามาชิมาจา (PMPC00156)	ข้าวไร่
2	ดยาธิเธียะ (PMPC96017)	ข้าวไร่
3	บือจิวา (PMPC96046)	ข้าวไร่
4	ข้าวปางคามน้อย	ข้าวไร่
5	บือพอปรี (PMPC00008)	ข้าวไร่
6	ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	ข้าวไร่
7	จะพูมา (PMPC00131)	ข้าวไร่
8	เหลืองลีซอ (PMPC00145)	ข้าวไร่
9	บือบอพอ (PMPC00073)	ข้าวไร่
10	เฮงาะเซ (PMPC02008)	ข้าวไร่
11	เฮงาะระนง	ข้าวไร่
12	ลายนกคุ่ม (MSNC04002)	ข้าวไร่
13	บือปะแหมะ (MSNC04035)	ข้าวไร่
14	บือโซ (MSNC04036)	ข้าวไร่
15	ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	ข้าวไร่
16	เบล้ละ (MSNC05002)	ข้าวไร่
17	บือหมื่อแม่ละ (MSNC05022)	ข้าวไร่
18	บือเจ๊ะเปรี๊ะแม่ริดป่าแก่ (MSNC05030)	ข้าวไร่
19	บือบ้านดอยงาม (MSNC05038)	ข้าวไร่
20	บือปอลอเลโค๊ะ (MSNC05040)	ข้าวไร่
21	บือข่าโซหนองเขียว (MSNC06018)	ข้าวไร่

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ระบบนิเวศ
22	ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	ข้าวไร่
23	บือหมื่อโพแม่กวางเหนือ (MSNC06027)	ข้าวไร่
24	ข้าวลายซาน	ข้าวไร่
25	บือพอปรี	ข้าวไร่
26	ข้าวมูเซอ	ข้าวไร่
27	ข้าวเฟืองคำ	ข้าวไร่
28	จะเบ๊ะเบ๊ะ	ข้าวไร่
29	ดนุสีสี	ข้าวไร่
30	บือพะทอหนองเขียว (MSNC06059)	ข้าวไร่
31	บือทอหล่าหนองเขียว (MSNC07005)	ข้าวไร่
32	บือทอละโซสบโขง (MSNC07007)	ข้าวไร่
33	บืออิแกรสบโขง (MSNC07010)	ข้าวไร่
34	จะเตปุยห้วยส้านใน (MHSC08002)	ข้าวไร่
35	จะชีกุยห้วยส้านใน (MHSC08003)	ข้าวไร่
36	ข้าวมันห้วยส้านใน (MHSC08004)	ข้าวไร่
37	ลายซานปุงยาม (MHSC08012)	ข้าวไร่
38	ข้าวเฟืองหัวคำลาง (MHSC08028)	ข้าวไร่
39	ข้าวลายดำหัวลาง (MHSC08035)	ข้าวไร่
40	บือพละไม้หลู่ (MHSC08039)	ข้าวไร่
41	บือกิวาพะโท (MHSC08049)	ข้าวไร่
42	มะลิน้ำหนาว (MHSC08051)	ข้าวไร่
43	ดอกมะขามน้ำหนาว (MHSC08052)	ข้าวไร่
44	บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	ข้าวไร่
45	ลายมูเซอ (MHSC09006)	ข้าวไร่
46	แดงมูเซอ (MHSC09007)	ข้าวไร่
47	ข้าวเจ้าแดง (MHSC09011)	ข้าวไร่
48	ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	ข้าวไร่
49	ข้าวหม่น (MHSC09018)	ข้าวไร่

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ระบบนิเวศ
50	แบล้หล้า	ข้าวไร่
51	เปร้เป่าฉาง	ข้าวไร่
52	เปร้ฉาง	ข้าวไร่
53	เปร้กังหมอ	ข้าวไร่
54	ลาคือตะ	ข้าวไร่
55	จาหน่อฟู	ข้าวไร่
56	จะหน่อนะ	ข้าวไร่
57	จะนะ	ข้าวไร่
58	ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	ข้าวไร่
59	จะแปกุยปายสองแง่	ข้าวไร่
60	บือโปะโละหนองขาวกลาง	ข้าวไร่
61	ปีอิคอแคะ (PMPC00155)	ข้าวไร่
62	ข้าวซิว (PMPC00157)	ข้าวไร่
63	จะนอสี (PMPC00047)	ข้าวไร่
64	ดนุสีสี GW (PMPC00054)	ข้าวไร่
65	ข้าวเหลือง (MSNC04048)	ข้าวไร่
66	จะนอสี (PMPC00047)	ข้าวไร่
67	ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	ข้าวไร่
68	จะนอเหมยป่าโหล (MHSC08017)	ข้าวไร่
69	จะนอเหมยแอโก๋ (MHSC08020)	ข้าวไร่
70	เบล้เปล้ากลั้งห้วยฮะ (MHSC11010)	ข้าวไร่
71	ดยานุ (PMPC96034)	ข้าวไร่
72	แสงกับ (PMPC00004)	ข้าวไร่
73	ปีอิจอวะ (PMPC00105)	ข้าวไร่
74	อ้ายคูแผ่ (PMPC00107)	ข้าวไร่
75	ลายซานเล็ก (PMPC00110)	ข้าวไร่
76	บือคา (MSNC04009)	ข้าวไร่
77	ปีอิกอ (MSNC04015)	ข้าวไร่

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ระบบนิเวศ
78	ดนุสีสี GR (PMPC00054)	ข้าวไร่
79	โบอิคระห้วยโป่งอ่อน (MSNC06024)	ข้าวไร่
80	ปีอิพอปรีห้วยไม้ดำ	ข้าวไร่
81	ข้าวลายเมืองฝางหัวลาง (MHSC08029)	ข้าวไร่
82	จะนอไหน่ (PMPC04010)	ข้าวไร่
83	ดนุสีสี (PMPC00062)	ข้าวไร่
84	ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	ข้าวไร่
85	ก่ำดอ	ข้าวไร่
86	จะนอนะป่าโหล (MHSC08019)	ข้าวไร่
87	ข้าวเหนียวดำ	ข้าวไร่
88	ข้าวแสงปุงยาม	ข้าวไร่
89	เบล้เปล้ากรุ๊ห้วยฮะ (MHSC11012)	ข้าวไร่
90	ข้าวแสงป้อม (MHSLDC1104)	ข้าวไร่
91	หอมนางนวล SKNC04073	ข้าวนาสวน
92	หอมทุ่ง GS.NO.5670	ข้าวนาสวน
93	PT 21/กข. 25	ข้าวนาสวน
94	PT 33/อีเตี้ย	ข้าวนาสวน
95	PT 44/กระแสน	ข้าวนาสวน
96	PT 52/กข. 14/ข้าวเหนียว	ข้าวนาสวน
97	PT 66/ลีโอ	ข้าวนาสวน
98	PT 78/หางยี	ข้าวนาสวน
99	ข้าวหอมภูพาน	ข้าวนาสวน
100	จงกลช่อ NSRC06-015-1-2-1	ข้าวนาสวน
101	สีรักษ์ NSRC06-026-1-18-1	ข้าวนาสวน
102	ช้างอุ้ม GS.NO.10273	ข้าวนาสวน
103	เล็บนกปัตตานี	ข้าวนาสวน
104	ไร่มดริ้น 3	ข้าวนาสวน
105	PTL87002-3-1-3-3	ข้าวนาสวน

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ระบบนิเวศ
106	PTL87031-4-1	ข้าวนาสวน
107	PTL91020-201-2-1	ข้าวนาสวน
108	PTL97048-3-1-2-1	ข้าวนาสวน
109	หัวนาหนัก GS.NO.15579	ข้าวนาสวน
110	กระดังงา 9349-1	ข้าวนาสวน
111	เล็กนก PTLC06001-1	ข้าวนาสวน
112	ยาโค NSRC06-016-1-8-1	ข้าวนาสวน
113	ปทุมธานี 1	ข้าวนาสวน
114	ชัยนาท 1	ข้าวนาสวน
115	No.4 PSL00343-CNT-122-2-2-1	ข้าวนาสวน
116	No.1 ขาวเจ๊ก (CNTC04001)	ข้าวนาสวน
117	No.2 หอมใบเตย (CNTC05001)	ข้าวนาสวน
118	No.3 เล็บมือนาง	ข้าวขึ้นน้ำ
119	No.4 ขาวมะลิ	ข้าวนาสวน
120	No.5 ดอกตะแบก	ข้าวนาสวน
121	No.6 เหลืองอ่อน	ข้าวนาสวน
122	No.7 พระเวช	ข้าวนาสวน
123	No.8 เกวียนหัก	ข้าวขึ้นน้ำ
124	No.9 ขาวตำบล	ข้าวนาสวน
125	No.10 หอมพม่า	ข้าวนาสวน
126	No.11 พวงทอง	ข้าวนาสวน
127	No.12 ข้าวเหลือง	ข้าวนาสวน
128	No.13 เม็ดเล็ก	ข้าวนาสวน
129	No.14 รวงยาว	ข้าวนาสวน
130	No.15 หอมสุรินทร์	ข้าวนาสวน
131	No.16 ขาวอากาศ	ข้าวนาสวน
132	No.17 หอมมะลิแดง	ข้าวนาสวน
133	No.18 กอเดียวกลาง	ข้าวขึ้นน้ำ

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ระบบนิเวศ
134	No.19 ข้าวเจ้านึ่ง	ข้าวนาสวน
135	No.20 หอมนิล	ข้าวนาสวน
136	เหลืองทอง	ข้าวนาสวน
137	ก้อนแก้ว	ข้าวนาสวน
138	ขาวบ้านนา 432	ข้าวขึ้นน้ำ
139	พลายงามปราจีนบุรี	ข้าวขึ้นน้ำ
140	ขาวหลวง	ข้าวนาสวน
141	กข. 45	ข้าวน้ำลึก
142	อยุธยา 1	ข้าวน้ำลึก
143	ปราจีนบุรี 2	ข้าวน้ำลึก
144	RD 47	ข้าวนาสวน
145	RD 49	ข้าวนาสวน
146	PSL 2	ข้าวนาสวน
147	Kasalath	ข้าวไร่

การทดลองที่ 2

ปลูกคัดเลือกข้าว 22 สายพันธุ์ (ตารางที่ 3) ที่มีกลไกในการส่งเสริมการดูดใช้ฟอสฟอรัส (P) ที่ถูกตรึงไว้ด้วยธาตุต่างชนิดตามวัตถุต้นกำเนิดดินในสารละลายธาตุอาหารโดยอยู่ในรูปของ KH_2PO_4: K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P: Al-P และ FeO_4P: Fe-P

วางแผนการทดลองแบบ 22 × 4 Factorial in RCBD ปัจจัยที่ 1 คือ พันธุ์ข้าว (22 พันธุ์) ปัจจัยที่ 2 คือ ฟอสฟอรัส 4 รูป (ฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์: KH_2PO_4: K-P และฟอสฟอรัสรูปที่ไม่เป็นประโยชน์: $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P: Al-P และ FeO_4P: Fe-P)

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวทุกๆ สัปดาห์ จนถึงอายุ 1 เดือนหลังย้ายปลูก โดยบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น ความเขียวใบ จำนวนราก ความยาวราก น้ำหนักแห้งต้นและราก และวิเคราะห์ฟอสฟอรัส (P) ที่สะสมในต้นและราก

วิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนของค่าลักษณะการเจริญเติบโตพร้อมเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม R

ตารางที่ 3 พันธุ์ข้าว 22 สายพันธุ์

ลำดับ	พันธุ์ข้าว
1	ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)
2	บือโซ (MSNC04036)
3	ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)
4	ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)
5	ข้าวลายซาน
6	บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)
7	ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)
8	เปร้เป่าฉาง
9	เปร้กังหมอ
10	ลาคือตะ
11	ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)
12	ข้าวชิว (PMPC00157)
13	ข้าวแดง
14	ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)
15	แสงกับ (PMPC00004)
16	ปีอิกอ (MSNC04015)
17	ปีอิซูแมริดน้อย (MSNC05017)
18	PT 21, กข. 25
19	ข้าวแดง (PMPC00112)
20	KDML 105
21	Nipponbare
22	Kasalath

การทดลองที่ 3

ปลูกทดสอบการตอบสนองข้าว 4 สายพันธุ์ คือ บือขอแผ่ ข้าวแดง เฟืองคำ และชิวแม่จัน ที่มีการพัฒนาระบบรากที่ดี เพื่อประเมินการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัส (P) ในสภาพแปลง เพื่อคัดเลือกพันธุ์ข้าวไปปลูกในพื้นที่ที่มีปัญหาด้านธาตุฟอสฟอรัสต่ำในดินที่แตกต่างกัน โดยประเมินการเจริญเติบโต ผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตของข้าว

วางแผนการทดลองแบบ 4 × 4 Factorial in RCBD ปัจจัยที่ 1 คือ พันธุ์ข้าว (4 พันธุ์) ปัจจัยที่ 2 คือ ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ (0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่) โดยในการศึกษานี้ใช้ปุ๋ย (0, 0.75, 1.50, 3.00 กรัม/กระถาง) และข้าวที่ระยะ 60 วัน ใช้กระถางขนาด 8 นิ้ว ระยะแตกกอสูงสุดใช้กระถางขนาด 12 นิ้ว และระยะเก็บเกี่ยวใช้กระถางขนาด 15 นิ้ว

บันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตของข้าวที่ระยะ 60 วัน ระยะแตกกอสูงสุด และระยะเก็บเกี่ยว โดยบันทึกข้อมูลการเจริญเติบโตด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น ความเขียวใบ ความยาวราก น้ำหนักแห้งต้นและราก และในระยะเก็บเกี่ยวเก็บข้อมูลองค์ประกอบผลผลิต

วิเคราะห์ข้อมูลความแปรปรวนของค่าลักษณะการเจริญเติบโตพร้อมเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยโปรแกรม R

ตารางที่ 4 สูตรสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกข้าว ซึ่งดัดแปลงจาก (Yoshida et al., 1976)

Reagents	Nutrient concentration
	μmol/L
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
$CuSO_4.5\ H_2O$	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

1. ระยะกล้าของต้นข้าว

- จำนวนต้นต่อกอ	นับจำนวนต้นต่อกอ
- ความสูงต้น	วัดตั้งแต่โคนรากจนถึงปลายใบที่ยาวที่สุด
- ความเขียวใบ	วัดความเขียวใบ โดยใช้เครื่อง Chlorophyll meter (รุ่น SPAD-502Plus) วัดที่ใบข้าวใบที่ 2 ของข้าว นับจากใบที่อ่อนที่สุด (ใบที่คลี่แผ่นใบหมด) โดยวัดใบละ 3 ตำแหน่ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ย
- จำนวนราก	นับจำนวนรากต่อต้น โดยนับรากที่งอกออกมาจากโคนต้น
- ความยาวราก	วัดตั้งแต่โคนต้นจนถึงปลายรากที่ยาวที่สุด
- น้ำหนักแห้งต้น	ชั่งน้ำหนักแห้งต้น ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง และชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- น้ำหนักแห้งราก	ชั่งน้ำหนักแห้งราก ที่ผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง และชั่งด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

วิเคราะห์ฟอสฟอรัส (P) ที่สะสมในต้นและราก

นำตัวอย่างที่อบแห้งและชั่งน้ำหนักแห้งแล้วมาบดและนำตัวอย่างพืชไปเผาให้เป็นเถ้า ที่ 535°C นาน 8 ชั่วโมง จากนั้นนำมาละลายใน 0.1 N HCl และแบ่งสารละลายตัวอย่างพืชไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธี colorimetric assay (molybdovanado-phosphoric acid method) โดยใช้เครื่อง spectrophotometer (Murphy and Riley, 1962)

2. ระยะเก็บเกี่ยว

- ข้อมูลองค์ประกอบผลผลิต	จำนวนรวงต่อกอ ความยาวรวง จำนวนเมล็ดดี จำนวนเมล็ดลีบ น้ำหนัก 100 เมล็ด ผลผลิตต่อต้น

สถานที่ดำเนินงาน

สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองที่ 1 ปลูกคัดเลือกข้าว 147 สายพันธุ์ ที่มีระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกัน ในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

จากการปลูกคัดเลือกข้าว 147 สายพันธุ์ ที่มาจากระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกัน คือ ข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวน้ำลึกและข้าวขึ้นน้ำ ในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (K-P) และไม่เป็นประโยชน์ (Ca-P) โดยในการทดลองนี้มุ่งเน้นข้าวไร่เพราะข้าวไร่เป็นข้าวที่ปลูกในสภาพไม่มีน้ำขัง ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดธาตุฟอสฟอรัสในระบบการปลูกข้าวไร่เพราะฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์หรือพืชดูดใช้ได้น้อย แต่การปลูกข้าวในสภาพน้ำขังมักไม่พบปัญหาการขาดธาตุฟอสฟอรัส เนื่องจากฟอสฟอรัสที่อยู่ในดินน้ำขังสามารถละลายน้ำอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ให้พืชดูดใช้ได้ง่าย

จากการหาค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของข้าว ด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก ความยาวราก ความเขียวใบ น้ำหนักแห้งต้นและราก รวมถึงวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่สะสมในต้นและราก พบว่าข้าวที่มาจากระบบนิเวศข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวน้ำลึกและข้าวขึ้นน้ำ ซึ่งปลูกในสารละลาย K-P ส่งผลให้จำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก น้ำหนักแห้งต้นและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ในขณะที่ความยาวราก ความเขียวใบและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นและรากของข้าวในระบบนิเวศต่างๆ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

ระบบนิเวศ/ รูปของฟอสฟอรัส	จำนวน ต้นต่อกอ	ความสูงต้น (เซนติเมตร)	จำนวน รากต่อต้น	ความยาวราก (เซนติเมตร)	ความเขียวใบ	น้ำหนักแห้งต้น (กรัม/กอ)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัสในต้น (%)	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/กอ)	ความเข้มข้น ฟอสฟอรัสในราก (%)
ข้าวไร่ 91 สายพันธุ์	5.7±2.2	64.2±8.7	81.8±33.8	28.5±4.2	42.1±3.9	2.1±1.2	0.2±0.1	0.8±0.4	0.7±0.6
K-P	7.1±2.0	70.4±5.5	101.8±34.3	25.8±2.7	41.9±4.5	2.9±1.1	0.3±0.1	0.9±0.4	0.2±0.1
Ca-P	4.2±1.3	58.1±6.6	61.8±17.5	31.2±3.6	42.4±3.2	1.3±0.5	0.2±0.1	0.6±0.2	1.2±0.5
ข้าวนาสวน 48 สายพันธุ์	7.4±4.1	64.0±8.8	109.5±42.3	28.1±3.2	42.0±3.3	2.4±1.5	0.2±0.1	0.7±0.4	0.8±0.6
K-P	9.5±4.6	68.7±8.1	141.0±37.2	26.3±2.5	41.2±3.1	3.5±1.3	0.2±0.1	1.0±0.4	0.4±0.2
Ca-P	5.2±2.0	59.3±6.8	78.0±14.6	29.9±2.7	42.8±3.4	1.3±0.5	0.2±0.1	0.5±0.2	1.3±0.6
ข้าวน้ำลึก 3 สายพันธุ์	8.7±4.5	63.2±6.8	114.4±49.4	28.8±4.3	43.2±1.9	3.1±1.8	0.2±0.1	1.2±0.5	0.9±0.8
K-P	11.3±4.4	67.0±6.8	151.3±40.8	27.5±2.7	41.7±0.4	4.7±1.0	0.2±0.0	1.7±0.4	0.2±0.1
Ca-P	6.2±3.3	59.5±5.1	77.5±18.7	30.1±5.8	44.8±1.2	1.6±0.2	0.1±0.1	0.8±0.1	1.5±0.7
ข้าวขึ้นน้ำ 5 สายพันธุ์	6.1±2.1	64.5±12.5	89.4±23.1	29.5±3.7	42.8±6.0	1.9±1.4	0.2±0.1	0.6±0.3	1.0±0.7
K-P	7.6±1.5	67.4±16.9	107.0±17.6	26.7±1.8	40.9±2.5	2.9±1.2	0.3±0.1	0.8±0.2	0.4±0.2
Ca-P	4.6±1.2	61.6±6.6	71.7±10.6	32.4±2.6	44.6±8.2	0.9±0.4	0.1±0.0	0.5±0.2	1.6±0.4
รวม	6.3±3.1	64.1±8.8	91.8±39.0	28.4±3.8	42.1±3.8	2.2±1.3	0.2±0.1	0.8±0.4	0.8±0.6

การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้นมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนต้นต่อกอส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้น ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้นกับน้ำหนักแห้งต้นที่มีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) เช่นเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าความสูงต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้น

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้นกับน้ำหนักแห้งรากที่มีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) เช่นเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าน้ำหนักแห้งต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก

และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก

ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งรากกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก มีความผันแปรในทิศทางตรงกันข้าม (ในเชิงลบ) หมายความว่าน้ำหนักแห้งรากส่งผลต่อการลดลงของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 6 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

	จำนวนต้นต่อกอ	**ความสูงต้น**	**จำนวนรากต่อต้น**	**ความยาวราก**	**ความเขียวใบ**	**น้ำหนักแห้งต้น**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น**	**น้ำหนักแห้งราก**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก**
จำนวนต้นต่อกอ	1								
ความสูงต้น	-0.0086^{ns}	1							
จำนวนรากต่อต้น	0.6906***	0.1056^{ns}	1						
ความยาวราก	-0.0801^{ns}	-0.0107^{ns}	-0.0002^{ns}	1					
ความเขียวใบ	-0.0157^{ns}	-0.0554^{ns}	-0.2092*	-0.0699^{ns}	1				
น้ำหนักแห้งต้น	0.6979***	0.2295**	0.6598***	-0.0006^{ns}	-0.0913^{ns}	1			
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น	0.0811^{ns}	-0.0046^{ns}	-0.4176***	-0.0299^{ns}	0.1493^{ns}	-0.1559^{ns}	1		
น้ำหนักแห้งราก	0.4348***	0.2182**	0.6438***	-0.0085^{ns}	-0.1659*	0.7420***	-0.5199***	1	
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก	0.2735***	-0.0892^{ns}	-0.0313^{ns}	-0.0018^{ns}	0.0515^{ns}	0.0348^{ns}	0.6261***	-0.3024***	1

ตัวเลขในตาราง คือ ค่า r (Coefficient of correlation)

การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้นและจำนวนต้นต่อกอกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนต้อต่อกอส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้นและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น ซึ่งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้นกับน้ำหนักแห้งต้นที่มีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) เช่นเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าความสูงต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้น

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความยาวรากมีความผันแปรในทิศทางตรงกันข้าม (ในเชิงลบ) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการลดลงของความยาวราก

และความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้นกับน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าน้ำหนักแห้งต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

	จำนวนต้นต่อกอ	**ความสูงต้น**	**จำนวนรากต่อต้น**	**ความยาวราก**	**ความเขียวใบ**	**น้ำหนักแห้งต้น**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น**	**น้ำหนักแห้งราก**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก**
จำนวนต้นต่อกอ	1								
ความสูงต้น	0.0778^{ns}	1							
จำนวนรากต่อต้น	0.5522**	0.2875**	1						
ความยาวราก	-0.0728^{ns}	0.0413^{ns}	-0.3219***	1					
ความเขียวใบ	0.1522^{ns}	0.0728^{ns}	0.0691^{ns}	0.1330^{ns}	1				
น้ำหนักแห้งต้น	0.4698**	0.3258**	0.4254**	-0.0459^{ns}	0.1133^{ns}	1			
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น	0.2895**	0.0893^{ns}	-0.0908^{ns}	0.1683*	0.1589^{ns}	0.0036^{ns}	1		
น้ำหนักแห้งราก	0.1542^{ns}	0.1883*	0.3834**	0.0231^{ns}	0.0767^{ns}	0.6899**	-0.3545***	1	
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก	0.1147^{ns}	0.1121^{ns}	0.0590^{ns}	-0.0567^{ns}	0.0382^{ns}	-0.0403^{ns}	0.2434**	-0.1269^{ns}	1

ตัวเลขในตาราง คือ ค่า r (Coefficient of correlation)

การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้นมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนต้นต่อกอส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้น

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมีความผันแปรในทิศทางตรงกันข้าม (ในเชิงลบ) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการลดลงความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้นกับน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าน้ำหนักแห้งต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก

และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก

ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งรากกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมีความผันแปรในทิศทางตรงกันข้าม (ในเชิงลบ) หมายถึงน้ำหนักแห้งรากส่งผลต่อการลดลงของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

	จำนวนต้นต่อกอ	**ความสูงต้น**	**จำนวนรากต่อต้น**	**ความยาวราก**	**ความเขียวใบ**	**น้ำหนักแห้งต้น**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น**	**น้ำหนักแห้งราก**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก**
จำนวนต้นต่อกอ	1								
ความสูงต้น	0.0770^{ns}	1							
จำนวนรากต่อต้น	0.5699***	0.1531^{ns}	1						
ความยาวราก	-0.0852^{ns}	-0.0574^{ns}	-0.0579^{ns}	1					
ความเขียวใบ	-0.0858^{ns}	-0.0524^{ns}	-0.2785**	-0.0556^{ns}	1				
น้ำหนักแห้งต้น	0.6423***	0.1642 ^{ns}	0.5536***	-0.0629^{ns}	-0.1654^{ns}	1			
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น	-0.0465^{ns}	0.0517^{ns}	-0.6445***	0.0919^{ns}	0.1354^{ns}	-0.1972^{ns}	1		
น้ำหนักแห้งราก	0.4610***	0.1521^{ns}	0.7857***	-0.1272^{ns}	-0.2566*	0.7701***	-0.6139***	1	
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก	-0.2107*	-0.0724^{ns}	-0.5972***	0.1881^{ns}	0.1254^{ns}	-0.2734**	0.6605***	-0.5119***	1

ตัวเลขในตาราง คือ ค่า r (Coefficient of correlation)

การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

เมื่อวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้นและจำนวนต้นต่อกอกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนต้นต่อกอส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้นและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น สอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้นกับน้ำหนักแห้งต้นที่มีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) เช่นเดียวกัน ซึ่งหมายความว่าความสูงต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งต้น

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก ในขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความยาวรากมีความผันแปรในทิศทางตรงกันข้าม (ในเชิงลบ) หมายความว่าจำนวนรากส่งผลต่อการลดลงของความยาวราก

ด้านความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้นกับน้ำหนักแห้งรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าน้ำหนักแห้งต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งราก

และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมีความผันแปรในทิศทางเดียวกัน (ในเชิงบวก) หมายความว่าความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 การเจริญเติบโตและความเข้มข้นฟอสฟอรัสของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) วิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยใช้สูตรของเพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

	จำนวนต้นต่อกอ	**ความสูงต้น**	**จำนวนรากต่อต้น**	**ความยาวราก**	**ความเขียวใบ**	**น้ำหนักแห้งต้น**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น**	**น้ำหนักแห้งราก**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก**
จำนวนต้นต่อกอ	1								
ความสูงต้น	0.3345**	1							
จำนวนรากต่อต้น	0.4218***	0.4130***	1						
ความยาวราก	0.1745^{ns}	0.0645^{ns}	-0.2433*	1					
ความเขียวใบ	0.2020^{ns}	0.2976**	0.0916^{ns}	0.0792^{ns}	1				
น้ำหนักแห้งต้น	0.6190***	0.4052***	0.4947***	-0.0328^{ns}	0.1583^{ns}	1			
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น	0.3542***	0.1420^{ns}	-0.2020^{ns}	0.3821***	0.2251*	0.0890^{ns}	1		
น้ำหนักแห้งราก	0.3722***	0.2469*	0.6709***	-0.0879^{ns}	0.0748^{ns}	0.6610***	-0.3441***	1	
ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก	0.0171^{ns}	0.1452^{ns}	0.0320^{ns}	-0.0545^{ns}	0.2120*	0.0946^{ns}	0.2914**	-0.0027^{ns}	1

ตัวเลขในตาราง คือ ค่า r (Coefficient of correlation)

จากนั้นได้ศึกษาค่าสูงสุด (Max), ค่าต่ำสุด (Min) และค่าเฉลี่ย (Mean) ของการเจริญเติบโตของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) พบว่าลักษณะการเจริญเติบโตด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก ความยาวราก ความเขียวใบ น้ำหนักแห้งต้นและราก และวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่สะสมในต้นและรากของข้าวทั้ง 147 สายพันธุ์ มีค่าต่างๆ ที่ทำการศึกษา ดังนี้

ค่าสูงสุด (Max) พบว่าการเจริญเติบโตเกือบทุกลักษณะ ข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่เป็นประโยชน์ (K-P) มีค่าสูงสุดของการเจริญเติบโตมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ (Ca-P) ยกเว้นความยาวรากและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีค่าสูงสุดมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P

ค่าต่ำสุด (Min) พบว่าการเจริญเติบโตเกือบทุกลักษณะเช่นเดียวกัน ข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่เป็นประโยชน์ (K-P) มีค่าต่ำสุดของการเจริญเติบโตมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ (Ca-P) ยกเว้นความสูงต้น ความยาวรากและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีค่าสูงสุดมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P

และค่าเฉลี่ย (Mean) พบว่าการเจริญเติบโตเกือบทุกลักษณะ ข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่เป็นประโยชน์ (K-P) มีค่าสูงสุดของการเจริญเติบโตมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ (Ca-P) ยกเว้นความยาวราก ความเขียวใบและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีค่าสูงสุดมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P

ตารางที่ 10 ค่าสูงสุด (Max), ค่าต่ำสุด (Min) และค่าเฉลี่ย (Mean) ของการเจริญเติบโตข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)

	จำนวนต้นต่อกอ	**ความสูงต้น**	**จำนวนรากต่อต้น**	**ความยาวราก**	**ความเขียวใบ**	**น้ำหนักแห้งต้น**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น**	**น้ำหนักแห้งราก**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก**
Max	24.0	88.0	254.0	36.0	59.6	10.1	0.5	2.8	0.9
Min	3.5	38.1	40.0	19.4	31.0	0.8	0.1	0.1	0.1
Mean	8.0	69.7	115.8	26.0	41.6	3.1	0.3	1.0	0.3
SD	3.3	7.0	39.5	2.6	4.0	1.2	0.1	0.4	0.2
CV (%)	41.4	10.1	34.1	10.0	9.6	39.8	36.6	43.0	61.4

ตารางที่ 11 ค่าสูงสุด (Max), ค่าต่ำสุด (Min) และค่าเฉลี่ย (Mean) ของการเจริญเติบโตข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

	จำนวนต้นต่อกอ	**ความสูงต้น**	**จำนวนรากต่อต้น**	**ความยาวราก**	**ความเขียวใบ**	**น้ำหนักแห้งต้น**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น**	**น้ำหนักแห้งราก**	**ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก**
Max	13.0	75.9	134.0	40.5	57.9	2.8	0.3	1.1	3.7
Min	2.3	42.2	28.0	22.6	27.7	0.3	0.1	0.1	0.2
Mean	4.6	58.6	67.8	30.8	42.6	1.3	0.2	0.6	1.3
SD	1.7	6.6	18.0	3.4	3.5	0.5	0.1	0.2	0.5
CV (%)	36.2	11.3	26.6	11.0	8.2	37.8	37.6	32.7	41.3

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1

จากการหาค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของข้าว ด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก ความยาวราก ความเขียวใบ น้ำหนักแห้งต้นและราก รวมถึงวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่สะสมในต้นและราก พบว่าข้าวที่มาจากระบบนิเวศข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวน้ำลึกและข้าวขึ้นน้ำ ซึ่งปลูกในสารละลาย K-P ส่งผลให้จำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก น้ำหนักแห้งต้นและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P โดยข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P เป็นรูปฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และพืชดูดใช้ได้ง่าย (สมเกียรติ, 2552) ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก น้ำหนักแห้งต้นและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมากขึ้นตามไปด้วย ในขณะที่ความยาวราก ความเขียวใบและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ซึ่งการที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีความยาวรากมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P เป็นการตอบสนองของข้าวเมื่อขาดฟอสฟอรัส โดยเร่งการเพิ่มพื้นที่ผิวรากเพื่อการดูดฟอสฟอรัส เพิ่มความยาวของรากแขนง สำหรับการเพิ่มจำนวนขนรากและความยาวของขนรากมีความสำคัญมาก เนื่องจากรากพืชที่อยู่ในสภาวะขาดฟอสฟอรัสนั้นประมาณ 90 % ของฟอสฟอรัสที่ดูดได้มาจากการดูดของขนราก นอกจากนั้นพืชที่ขาดฟอสฟอรัสยังมีความยืดหยุ่น (fiexibility) ในการปรับระบบรากให้เข้ากับสภาพดินซึ่งโดยทั่วไปมีฟอสฟอรัสต่ำซึ่งรากส่วนใหญ่ดูดฟอสฟอรัสได้น้อย แต่ยังมีบางบริเวณที่มีฟอสฟอรัสสูงกว่าส่วนอื่น (P enriched soil patches) จึงแตกแขนงมากและมีขนรากมากเป็นพิเศษในบริเวณดังกล่าวซึ่งช่วยให้ดูดฟอสฟอรัสได้มากขึ้นถึง 80 % (Raghothama, 1999; Schachman and Shin, 2007) สอดคล้องกับรายงานของ Owen (2006) ที่พบว่าระบบรากมีการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสอย่างชัดเจนในด้านการลดลงของจำนวนรากต่อต้นและพืชบางชนิดหรือบางสายพันธุ์มีการเพิ่มความยาวรากของขนรากให้มากขึ้น เมื่ออยู่ในสภาวะที่ดินขาดฟอสฟอรัส (Gahoonia et al., 1999; Bates and Lynch, 2001; Eticha and Schenk, 2001) ซึ่งอาการขาดฟอสฟอรัสในรากนี้พืชมีการตอบสนองโดยเพิ่มความยาวรากและการแตกแขนงรากให้มากขึ้น (Fageria et al., 1988; Kirk and Du, 1997; Owen, 2006) ซึ่งลักษณะความยาวรากและจำนวนรากต่อต้นของข้าวนี้เป็นการตอบสนองที่ชัดเจนกว่าลักษณะการเจริญเติบโตด้านอื่นๆ

และการตอบสนองที่ชัดเจนอีกลักษณะหนึ่งของการขาดฟอสฟอรัส คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ (Ca-P) ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลายรูปที่เป็นประโยชน์ สอดคล้องกับการทดลองของ Smith et al. (1990) ที่รายงานว่าการขาดฟอสฟอรัสของถั่วฮามาต้า (*Stylosanthes hamata*) มีผลทำให้มีการสะสมฟอสฟอรัสในรากมากและยังได้รับอีกส่วนหนึ่งซึ่งเคลื่อนย้ายมาจากส่วนเหนือดินอีกด้วย จึงทำให้รากสามารถเจริญเติบโตต่อไปได้ พฤติกรรมดังกล่าว คือ ความพยายามในการรักษาสภาพรากให้มีความสามารถ

หาธาตุอาหารที่ขาดแคลนมาเพิ่มเติม พืชมีการปรับตัว โดยลดความต้องการฟอสฟอรัสที่จะใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมและการเจริญเติบโตให้น้อยลง แต่ยังมีการเจริญเติบโตที่ดีภายใต้สภาวะที่มีฟอสฟอรัสที่มีอยู่อย่างจำกัดส่งผลให้มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสที่ดีด้วยเช่นกัน (Duff et al., 1989; Plaxton and Carswell, 1999)

ผลการทดลองที่ 2 ปลูกคัดเลือกข้าว 22 สายพันธุ์ ในสารละลายธาตุอาหาร 4 รูป โดยเป็นรูปฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงไว้ด้วยธาตุต่างชนิดตามวัตถุต้นกำเนิดดิน

จากการปลูกศึกษาการตอบสนองด้านการเจริญเติบโตและความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในต้นและรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสต่างกัน 4 รูป คือ (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) นาน 4 สัปดาห์ พบว่าการเจริญเติบโตของข้าวด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก ความยาวราก ค่าความเขียวใบ น้ำหนักแห้งต้นและราก ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นและราก มีความแตกต่างทั้งเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว อิทธิพลของรูปฟอสฟอรัสและอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส ดังต่อไปนี้

จำนวนต้นต่อกอ

การแตกกอเป็นลักษณะหนึ่งที่ใช้ประเมินการเจริญเติบโตของข้าว โดยข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสที่เพียงพอต่อความต้องการนั้นจะสามารถแตกกอได้ดีและถ้าหากข้าวขาดฟอสฟอรัสอาจส่งผลให้มีการแตกกอที่น้อยลงได้ จากการทดลองเมื่อพิจารณาความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าวถึง 15 สายพันธุ์ คือ Nipponbare Kasalath บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) ข้าวแดง ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) บือโซ (MSNC04036) ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025) ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017) KDML 105 ข้าวชิว (PMPC00157) ปีอิกอ (MSNC04015) PT 21/กข 25 เปรี้เป่าฉาง ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032) และแสงกับ (PMPC00004) เป็นกลุ่มพันธุ์ที่มีจำนวนต้นต่อกอมากที่สุด ส่วนพันธุ์ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) เป็นพันธุ์ที่มีจำนวนต้นต่อกอน้อยที่สุด โดยมีจำนวนต้นต่อกอลดลงจากกลุ่มพันธุ์ที่มีจำนวนต้นต่อกอที่มากที่สุดถึง 25-44 % ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ส่งผลให้ข้าวทุกสายพันธุ์มีจำนวนต้นต่อกอมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P และข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P มีจำนวนต้นต่อกอน้อยที่สุด โดยมีจำนวนต้นต่อกอลดลงจากข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ถึง 82 % และ 87 % ตามลำดับ และความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P มีการแตกกอมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ยกเว้นข้าว 9 สายพันธุ์ คือ ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032) ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055) ข้าวลายซาน เปรี้กังหมอ ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025) ข้าวแดง CM ข้าวแดง (PMPC00112) และNipponbare ที่ปลูกในสารละลาย 2 รูป มีการแตกกอที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ส่งผลให้ข้าวมีการแตกกอน้อยและไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 12)

ตารางที่ 12 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	7.7	4.7	1.3	1.0
บือโซ (MSNC04036)	8.7	4.3	1.5	1.0
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	5.8	3.2	1.0	1.0
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	6.0	3.8	1.3	1.0
ข้าวลายซาน	6.8	3.8	1.3	1.0
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	10.0	4.7	1.3	1.0
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	7.7	4.0	1.3	1.0
เปร้เป่าฉาง	7.8	4.0	2.0	1.0
เปร้กังหมอ	6.7	3.8	1.8	1.0
ลาคือตะ	7.3	3.7	1.2	1.0
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	8.0	4.8	1.5	1.0
ข้าวซิว (PMPC00157)	8.2	4.0	1.7	1.0
ข้าวแดง CM	7.5	6.7	1.2	1.0
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	8.5	4.2	2.0	1.0
แสงกับ (PMPC00004)	8.0	4.0	1.7	1.0
ปีอิกอ (MSNC04015)	8.5	4.2	1.2	1.0
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	8.3	3.7	2.0	1.3
PT 21/กข. 25	8.3	4.5	1.0	1.0
ข้าวแดง (PMPC00112)	6.5	4.0	1.3	1.0
KDML 105	8.7	4.0	1.2	1.2
Nipponbare	9.3	7.3	2.0	1.2
Kasalath	10.3	6.3	1.0	1.2
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms**			
HSD (P<0.05)	1.4 0.4 3.4			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

ความสูงต้น

เมื่อพิจารณาความแตกต่างกันเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าวถึง 11 สายพันธุ์ คือ ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) ปีอิกอ (MSNC04015) บือโซ (MSNC04036) ข้าวซิว (PMPC00157) ข้าวแดง แสงกับ (PMPC00004) บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) KDML 105 เปร้กังหมอ ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017) และข้าวลายซาน เป็นกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีความสูงต้นที่สูงที่สุด ในขณะที่พันธุ์ Nipponbare มีความสูงต้นน้อยที่สุด โดยมีความสูงต้นลดลงจากกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีความสูงต้นสูงที่สุดถึง 25-32 % ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส ข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์มีความสูงต้นที่สูงที่สุด รองลงมาคือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ซึ่งเป็นรูปฟอสฟอรัสที่อยู่สภาพดินด่างและข้าวที่ปลูกในสารละลาย Fe-P ซึ่งเป็นรูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในสภาพดินกรด ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P ส่งผลให้มีความสูงต้นน้อยที่สุด โดยมีความสูงต้นลดลงจากข้าวที่ปลูกในสาระละลาย K-P ถึง 43 % สำหรับความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P มีความสูงต้นมากกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ยกเว้นข้าว 11 สายพันธุ์ คือ ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032) บือโซ (MSNC04036) ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016) ข้าวแดง CM ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) PT 21/กข. 25 ข้าวแดง (PMPC00112) KDML 105 Nipponbare และ Kasalath ปลูกในสารละลาย 2 รูป มีความสูงต้นที่ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 13)

ตารางที่ 13 ความสูงต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	75.4	59.5	39.5	45.6
บือโซ (MSNC04036)	81.0	67.9	52.4	51.0
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	78.7	63.8	43.9	41.0
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	79.9	60.4	43.4	39.5
ข้าวลายซาน	80.8	63.2	44.4	45.2
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	84.6	59.9	50.4	51.3
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	76.3	60.8	43.0	43.4
เปรู้เป่าฉาง	83.4	58.0	41.4	47.8
เปรู้กังหมอ	79.6	62.3	45.7	51.4
ลาคือตะ	72.1	55.1	35.9	41.3
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	78.5	60.5	42.5	45.3
ข้าวซิว (PMPC00157)	89.6	63.7	46.1	51.5
ข้าวแดง CM	82.4	69.8	44.6	49.9
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	76.4	71.3	52.7	60.
แสงกับ (PMPC00004)	83.4	63.4	49.6	50.0
ปีอิกอ (MSNC04015)	87.8	70.5	47.6	53.4
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	82.2	61.8	43.8	50.8
PT 21/กข. 25	75.3	60.6	49.0	45.8
ข้าวแดง (PMPC00112)	65.3	61.9	35.7	40.2
KDML 105	75.4	61.9	50.3	53.7
Nipponbare	54.9	49.1	35.3	37.1
Kasalath	77.5	64.0	41.0	42.2
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms**			
HSD (P<0.05)	7.1 2.2 17.0			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

จำนวนรากต่อต้น

ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสที่เพียงพอต่อความต้องการนั้น สามารถสร้างจำนวนรากได้ดี จากการทดลองเมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าว 4 สายพันธุ์ คือ ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) KDML 105 Nipponbare และบือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) เป็นกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีจำนวนรากมากที่สุด ในขณะที่ข้าว 5 สายพันธุ์ คือ ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016) ลาคือตะ เปร้เป่าฉาง ข้าวลายซาน และข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055) เป็นกลุ่มพันธุ์ที่มีจำนวนรากน้อยที่สุด ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส ข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย K-P ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์มีจำนวนรากมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ซึ่งเป็นรูปฟอสฟอรัสที่อยู่สภาพดินด่าง และข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ซึ่งเป็นรูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในสภาพดินกรดและเป็นฟอสฟอรัสที่ไม่เป็นประโยชน์ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนรากน้อยที่สุดถึง 69 % และ 72 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P สำหรับความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P และ Ca-P มีจำนวนรากที่ไม่แตกต่างกัน ยกเว้นข้าว 5 สายพันธุ์ คือ บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) ข้าวชิว (PMPC00157) ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) ปีอิกอ (MSNC04015) และ KDML 105 ที่ปลูกในสารละลาย K-P มีจำนวนรากมากกว่าปลูกในสารลาย Ca-P ส่วนข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ส่งผลให้มีจำนวนรากน้อย และไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 จำนวนรากต่อต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	85.8	79.0	28.5	25.3
บือโซ (MSNC04036)	121.5	82.3	34.2	37.3
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	101.5	65.5	25.5	21.3
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	76.7	53.0	29.7	20.0
ข้าวลายซาน	80.0	51.0	25.5	24.3
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	147.7	99.2	33.0	32.8
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	86.5	64.3	25.3	25.8
เปรู้เป่าฉาง	79.2	57.5	32.3	27.0
เปรู้กังหมอ	92.8	65.0	32.7	25.3
ลาคือตะ	95.3	63.0	21.7	21.2
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	101.0	80.0	32.2	30.8
ข้าวซิว (PMPC00157)	106.2	60.5	30.8	32.0
ข้าวแดง CM	114.8	102.3	34.0	32.7
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	160.3	111.7	55.0	39.3
แสงกับ (PMPC00004)	102.7	78.8	32.0	30.5
ปีอิกอ (MSNC04015)	128.8	83.2	35.5	36.3
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	89.3	67.7	34.2	29.8
PT 21/กข. 25	120.2	92.2	42.2	35.3
ข้าวแดง (PMPC00112)	82.8	76.2	28.7	25.2
KDML 105	158.7	110.0	42.8	39.8
Nipponbare	136.7	115.3	50.2	38.0
Kasalath	132.3	95.0	27.2	32.8
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms***			
HSD (P<0.05)	17.6 5.3 41.7			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

ความยาวราก

เมื่อข้าวปลูกในสภาพฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปไม่เป็นประโยชน์ ข้าวมีการปรับตัวโดยมีการยืดขยายความยาวราก จากการทดลองเมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าวถึง 9 สายพันธุ์ คือ ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) เปร้กังหมอ ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016) ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025) ข้าวลายซาน ลาคือตะ เปร้เป่าฉาง ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017) และ Nipponbare เป็นกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีความยาวรากสูงสุด ในขณะที่ข้าวพันธุ์ PT 21/กข 25 เป็นพันธุ์ที่มีความยาวรากน้อยที่สุด โดยมีความยาวรากลดลงจากกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีความยาวรากสูงสุด ถึง 24-30 % ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส ข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ซึ่งเป็นรูปฟอสฟอรัสที่อยู่ในสภาพดินกรด ส่งผลให้ข้าวมีความยาวรากที่เพิ่มมากขึ้น รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสรูปที่เป็นประโยชน์ส่งผลให้ข้าวมีความยาวรากน้อยที่สุด โดยมีความยาวรากลดลงจากข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ถึง 34 % และ 33 % ตามลำดับ สำหรับความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P และ Ca-P มีความยาวรากที่ไม่แตกต่างกันและมีข้าว 2 สายพันธุ์ คือ ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) และ PT 21/กข. 25 ที่ปลูกในสารละลายฟอสฟอรัสทุกรูปมีความยาวรากไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 15)

ตารางที่ 15 ความยาวรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	ความยาวราก (เซนติเมตร)			
	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	25.7	29.1	36.4	38.4
บือโซ (MSNC04036)	22.4	28.3	35.7	37.7
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	30.0	35.0	45.7	48.7
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	26.3	32.2	42.5	40.3
ข้าวลายซาน	28.0	33.7	45.1	42.5
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	24.3	27.6	38.4	36.0
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	26.3	33.9	48.4	47.6
เปร้เป่าฉาง	26.8	33.5	45.2	41.4
เปร้กังหมอ	29.9	37.1	44.9	46.0
ลาคือตะ	28.7	34.4	44.4	41.5
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	27.3	34.2	43.3	44.5
ข้าวซิว (PMPC00157)	24.7	30.0	35.9	35.6
ข้าวแดง CM	25.8	28.3	38.7	38.3
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	27.5	31.4	26.8	28.0
แสงกับ (PMPC00004)	25.8	30.9	35.9	37.7
ปีอิกอ (MSNC04015)	22.3	31.4	37.4	38.6
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	26.8	32.0	43.5	44.3
PT 21/กข. 25	24.5	28.6	31.7	26.7
ข้าวแดง (PMPC00112)	24.9	29.4	36.6	37.1
KDML 105	26.0	29.6	32.5	36.7
Nipponbare	26.9	32.1	41.5	46.0
Kasalath	27.8	33.1	44.0	36.0
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms***			
HSD (P<0.05)	3.7 1.1 8.7			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

ความเขียวใบ

สำหรับความเขียวใบเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบหรืออาจบอกได้ว่ามีกระบวนการสังเคราะห์แสงที่ดีกว่าต้นที่มีความเขียวใบต่ำ สำหรับฟอสฟอรัสแม้ว่าไม่ได้เป็นธาตุอาหารที่มีหน้าที่เป็นโครงสร้างของคลอโรฟิลล์ แต่การได้รับฟอสฟอรัสที่ไม่เพียงพอกับความต้องการสามารถส่งผลต่อความไม่สมดุลของไนโตรเจนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของคลอโรฟิลล์ได้ จากการทดลองเมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าว 6 สายพันธุ์ คือ Nipponbare ลาคือตะ ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025) ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055) ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) และข้าวลายซานเป็นพันธุ์ที่มีความเขียวใบสูงที่สุด ในขณะที่พันธุ์บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) เป็นพันธุ์ที่มีความเขียวใบน้อยที่สุด ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย Ca-P นั้น ส่งผลให้มีความเขียวใบสูงต่างจากฟอสฟอรัสรูปอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสาระลาย K-P, Al-P และ Fe-P มีความเขียวใบที่ไม่แตกต่างกัน เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส ข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P และ Ca-P มีความเขียวใบที่ไม่แตกต่างกัน ยกเว้นข้าว 2 สายพันธุ์ คือ บือหมื่อโพขุนวงใต้ และปีอิบอโพสบโขงที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีความเขียวใบมากกว่าปลูกในสารละลาย K-P และข้าวส่วนใหญ่มีความเขียวใบลดลงเมื่อปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P เนื่องจากฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ข้าวดูดใช้ได้ยากส่งผลให้ข้าวไม่ได้รับฟอสฟอรัสเพียงพอจึงไปรบกวนกระบวนการดูดใช้ธาตุไนโตรเจนซึ่งเป็นโครงสร้างหลักของคลอโรฟิลล์ (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 ความเขียวใบของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	ความเขียวใบ			
	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	37.5	37.4	38.1	38.4
บือโซ (MSNC04036)	33.7	39.2	37.8	37.3
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	38.1	42.8	39.2	38.5
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	40.1	41.3	38.9	39.6
ข้าวลายซาน	39.8	40.8	39.1	38.2
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	31.9	38.1	35.7	34.7
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	37.2	39.0	36.	35.2
เปร้เป่าฉาง	36.9	38.2	35.6	36.0
เปร้กังหมอ	36.9	37.2	35.3	36.7
ลาคือตะ	41.0	42.2	39.4	39.7
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	39.6	41.7	38.9	40.1
ข้าวซิว (PMPC00157)	35.7	38.3	36.4	34.6
ข้าวแดง CM	36.4	38.8	38.0	36.1
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	35.1	41.5	36.1	39.7
แสงกับ (PMPC00004)	35.8	39.8	36.0	38.2
ปีอิกอ (MSNC04015)	36.7	39.9	36.6	35.1
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	38.6	37.3	35.8	36.2
PT 21/กข. 25	38.7	38.1	38.3	37.2
ข้าวแดง (PMPC00112)	39.7	39.9	37.5	39.3
KDML 105	36.5	42.1	39.9	38.9
Nipponbare	42.7	43.3	38.5	42.4
Kasalath	40.1	39.7	33.9	37.3
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms**			
HSD (P<0.05)	2.6 0.8 6.2			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งต้น

การที่ข้าวมีการแตกกอที่ดีนั้นส่งผลให้น้ำหนักแห้งต้นสูงตามไปด้วย จาการทดลองเมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าวถึง 17 สายพันธุ์ คือ ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017) ข้าวแดง CM บือโซ (MSNC04036) บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) แสงกับ (PMPC00004) ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) Kasalath ปีอิกอ (MSNC04015) ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025) เปร้เป่าฉาง ข้าวลายซาน เปร้กังหมอ ข้าวซิว (PMPC00157) KDML 105 ลาคือตะ และข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055) เป็นกลุ่มพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นมากที่สุด ในขณะที่พันธุ์ Nipponbare เป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นน้อยที่สุดถึง 18-38 % เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นมากที่สุด ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย K-P ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P และข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นน้อยที่สุดถึง 86 % และ 90 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวส่วนใหญ่ถึง 17 สายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย K-P มีน้ำหนักแห้งต้นมากกว่า Ca-P ยกเว้นข้าว 5 สายพันธุ์ คือ ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032) ลาคือตะ ข้าวแดง CM ข้าวแดง (PMPC00112) และ Nipponbare ที่ปลูกในสารละลาย 2 รูป มีน้ำหนักแห้งต้นไม่แตกต่างกัน ส่วนข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ส่งผลให้มีน้ำหนักแห้งต้นน้อยและไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งต้น (กรัม/กอ)			
	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	4.644	3.816	0.794	0.653
บือโซ (MSNC04036)	6.523	3.555	0.758	0.683
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	6.143	3.508	0.821	0.609
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	5.354	3.057	0.777	0.603
ข้าวลายซาน	5.862	3.188	0.877	0.649
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	7.413	4.131	0.777	0.498
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	5.217	3.190	0.790	0.571
เปร้เป่าฉาง	6.020	3.175	0.896	0.709
เปร้กังหมอ	5.832	3.064	0.981	0.654
ลาคือตะ	5.358	3.506	0.678	0.625
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	6.309	3.084	0.858	0.650
ข้าวซิว (PMPC00157)	6.109	2.948	0.841	0.630
ข้าวแดง CM	5.863	4.756	0.755	0.526
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	7.050	4.023	1.246	0.725
แสงกับ (PMPC00004)	6.185	3.508	0.799	0.671
ปีอิกอ (MSNC04015)	6.414	3.193	0.750	0.587
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	6.551	3.401	1.158	0.894
PT 21/กข. 25	4.954	2.802	0.663	0.378
ข้าวแดง (PMPC00112)	5.083	3.231	0.770	0.537
KDML 105	5.543	3.471	0.744	0.594
Nipponbare	4.178	2.671	0.793	0.436
Kasalath	6.374	3.679	0.472	0.458
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms**			
HSD (P<0.05)	0.820 0.248 1.950			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งราก

การที่ข้าวมีจำนวนรากและความยาวรากที่ดีนั้น ส่งผลให้มีน้ำหนักแห้งรากสูงตามไปด้วย จากการทดลองเมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าวถึง 16 สายพันธุ์ คือ ปีอิชูแม่ริดน้อย (MSNC05017) ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025) ข้าวแดง CM แสงกับ (PMPC00004) ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009) บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055) เปร้เป่าฉาง เปร้กังหมอ ปีอิกอ (MSNC04015) ข้าวซิว (PMPC00157) บือโซ (MSNC04036) ข้าวลายซาน ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055) KDML 105 และข้าวเฟืองคำ (MHSC09016) เป็นกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีน้ำหนักแห้งรากมากที่สุด ในขณะที่พันธุ์ PT 21/กข 25 เป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากน้อยที่สุด โดยมีน้ำหนักแห้งรากลดลงจากกลุ่มพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากมากที่สุดถึง 40-55 % ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย K-P ซึ่งเป็นฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งรากมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P และ Al-P ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Fe-P ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งรากน้อยที่สุดถึง 81 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส ข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P และ Ca-P มีน้ำหนักแห้งรากที่ไม่แตกต่างกัน ยกเว้นข้าว 2 สายพันธุ์ คือ ห้วยน้ำริน 1 และ KDML 105 ที่ปลูกในสารละลาย K-P มีน้ำหนักแห้งรากมากกว่า Ca-P ส่วนข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P และ Fe-P ส่งผลให้มีน้ำหนักแห้งรากน้อยและไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 18)

ตารางที่ 18 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/กอ)			
	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	1.238	1.796	0.523	0.375
บือโซ (MSNC04036)	2.059	1.441	0.367	0.351
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	2.438	1.650	0.595	0.414
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	1.723	1.438	0.502	0.400
ข้าวลายซาน	1.710	1.454	0.584	0.424
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	2.587	1.894	0.447	0.270
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	1.560	1.477	0.553	0.377
เปรู้เป่าฉาง	1.979	1.648	0.636	0.409
เปรู้กังหมอ	1.906	1.620	0.684	0.444
ลาคือตะ	1.417	1.508	0.448	0.383
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	2.303	1.673	0.625	0.484
ข้าวซิว (PMPC00157)	2.065	1.344	0.461	0.349
ข้าวแดง CM	2.336	1.877	0.453	0.298
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	2.270	1.598	0.558	0.342
แสงกับ (PMPC00004)	2.280	1.816	0.475	0.384
ปีอิกอ (MSNC04015)	2.281	1.580	0.458	0.320
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	2.172	1.668	0.748	0.654
PT 21/กข. 25	1.042	0.907	0.298	0.150
ข้าวแดง (PMPC00112)	1.540	1.490	0.479	0.362
KDML 105	2.095	1.307	0.336	0.258
Nipponbare	0.822	1.027	0.478	0.268
Kasalath	1.466	1.315	0.218	0.188
F-test		Var*** Pforms*** VarxPforms***		
HSD (P<0.05)		0.335 0.101 0.796		

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่าข้าวพันธุ์ Nipponbare เป็นพันธุ์ที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นสูงสุดเพียง 1 สายพันธุ์ ในขณะที่ข้าว 21 สายพันธุ์ มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นน้อยที่สุด ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย K-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมากที่สุด โดย K-P รูปนี้เป็นตัวแทนของฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P และ Fe-P ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Al-P ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นน้อยที่สุด โดยมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นลดลงจากข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P ถึง 79 % สำหรับความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส ข้าวทุกสายพันธุ์มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นสูงเมื่อปลูกในสารละลาย K-P ส่วนข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P และ Al-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นไม่แตกต่างกัน ยกเว้นพันธุ์ Nipponbare ที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมากกว่า Al-P (ตารางที่ 19)

ตารางที่ 19 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%)			
	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	0.258	0.079	0.054	0.088
บือโซ (MSNC04036)	0.231	0.074	0.067	0.072
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	0.200	0.102	0.062	0.084
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	0.255	0.082	0.059	0.075
ข้าวลายซาน	0.255	0.090	0.050	0.075
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	0.193	0.082	0.060	0.094
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	0.249	0.081	0.058	0.076
เปรู้เป่าฉาง	0.222	0.077	0.057	0.081
เปรู้กังหมอ	0.241	0.085	0.056	0.086
ลาคือตะ	0.266	0.092	0.055	0.086
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	0.233	0.082	0.060	0.085
ข้าวซิว (PMPC00157)	0.233	0.081	0.053	0.082
ข้าวแดง CM	0.210	0.092	0.058	0.081
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	0.210	0.085	0.048	0.080
แสงกับ (PMPC00004)	0.219	0.078	0.056	0.072
ปีอิกอ (MSNC04015)	0.233	0.082	0.060	0.070
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	0.225	0.074	0.059	0.088
PT 21/กข. 25	0.296	0.088	0.063	0.077
ข้าวแดง (PMPC00112)	0.246	0.088	0.052	0.077
KDML 105	0.208	0.081	0.060	0.101
Nipponbare	0.365	0.143	0.068	0.083
Kasalath	0.250	0.087	0.060	0.056
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms***			
HSD (P<0.05)	0.033 0.010 0.080			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่ามีข้าว 4 สายพันธุ์ คือ Nipponbare PT 21/กข 25 KDML 105 และ Kasalath เป็นกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากสูงสุด ในขณะที่พันธุ์ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002) มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากน้อยที่สุด ซึ่งมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากลดลงจากกลุ่มพันธุ์ข้าวที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากสูงสุดถึง 33-45 % ด้านความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมากที่สุด โดย Ca-P รูปนี้เป็นตัวแทนของฟอสฟอรัสที่อยู่ในสภาพดินด่างและเป็นฟอสฟอรัสที่ไม่เป็นประโยชน์ รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Fe-P ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P และ Al-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากน้อยที่สุด โดยมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากลดลงจากข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ถึง 32 % สำหรับความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส พบว่าข้าวส่วนใหญ่ที่ปลูกในสารละลาย K-P และ Ca-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากไม่แตกต่างกัน ยกเว้นพันธุ์บือโซที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมากกว่าปลูกในสารละลาย K-P (ตารางที่ 20)

ตารางที่ 20 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากของข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%)			
	K-P	Ca-P	Al-P	Fe-P
ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)	0.141	0.158	0.113	0.137
บือโซ (MSNC04036)	0.106	0.247	0.148	0.148
ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)	0.108	0.162	0.090	0.142
ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)	0.139	0.157	0.104	0.128
ข้าวลายซาน	0.143	0.190	0.081	0.105
บือหมื่อโพขุนวงใต้ (MHSC08055)	0.098	0.157	0.136	0.213
ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)	0.145	0.198	0.122	0.123
เปรู้เป่าฉาง	0.125	0.174	0.111	0.123
เปรู้กังหมอ	0.113	0.186	0.088	0.135
ลาคือตะ	0.121	0.178	0.116	0.116
ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)	0.131	0.141	0.133	0.135
ข้าวซิว (PMPC00157)	0.123	0.176	0.122	0.155
ข้าวแดง CM	0.116	0.172	0.118	0.182
ปีอิบอโพสบโขง (MSNC07009)	0.128	0.232	0.178	0.161
แสงกับ (PMPC00004)	0.114	0.230	0.103	0.157
ปีอิกอ (MSNC04015)	0.144	0.209	0.173	0.196
ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)	0.135	0.149	0.110	0.129
PT 21/กข. 25	0.161	0.254	0.214	0.210
ข้าวแดง (PMPC00112)	0.125	0.234	0.150	0.208
KDML 105	0.128	0.282	0.167	0.227
Nipponbare	0.264	0.216	0.174	0.252
Kasalath	0.153	0.235	0.170	0.169
F-test	Var*** Pforms*** VarxPforms***			
HSD (P<0.05)	0.045 0.014 0.108			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Pforms (Phosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของรูปฟอสฟอรัส

VarxPforms (VarietiesxPhosphorus forms) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและรูปฟอสฟอรัส

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2

ดินที่มี pH ต่ำ ฟอสฟอรัสจะถูกตรึงอยู่ในรูปของ Al-P และ Fe-P แต่ในสภาพดินที่มี pH สูง หรือดินด่างจะพบในรูปของ Ca-P (อัญธิชา, 2546) ซึ่งในการปลูกศึกษาข้าวในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัสรูปที่ต่างกัน คือ K-P, Ca-P, Al-P และ Fe-P ปรากฏผลของข้าวที่ปลูกใน Ca-P มีการเจริญเติบโตใกล้เคียงกับ K-P โดยฟอสฟอรัสที่ตรึงอยู่กับ Ca-P นี้ ปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาให้พืชดูดใช้ได้มากกว่าและมีความเป็นประโยชน์ให้พืชดูดใช้ได้ง่าย แตกต่างกับฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงอยู่กับอะลูมินัมและเหล็กด้วยพันธะที่แข็งแรงมาก (ธีรพงษ์, 2545; The University of Hawaii, 2007) ฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงอยู่กับธาตุอื่นด้วยพันธะแข็งแรงต่างกันนั้นทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อยออกมาสำหรับให้ข้าวดูดใช้ในการทดลองนี้จึงแตกต่างกัน โดยข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสน้อยเกินไปหรือเกิดอาการขาดฟอสฟอรัสเมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ (Al-P และ Fe-P) ส่งผลให้ลำต้นแคระแกร็นและแตกกอน้อย (Barry and Miller, 1989) สอดคล้องกับรายงานของ Dobermann and Fairhurst (2000) ที่รายงานว่า เมื่อพืชขาดฟอสฟอรัส ลำต้นมักแคระแกร็น แตกกอน้อย ออกดอกและให้ผลผลิตต่ำ และการตอบสนองที่ชัดเจนอีกลักษณะหนึ่ง คือ จำนวนรากและความยาวราก ดังจะเห็นได้ว่าพันธุ์ข้าวส่วนใหญ่ในการศึกษานี้ที่เจริญใน Al-P และ Fe-P มีจำนวนรากลดลงและมีความยาวรากเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนซึ่งเป็นลักษณะที่ตอบสนองต่อสภาพฟอสฟอรัสต่ำ สอดคล้องกับรายงานของ Gahoonia et al. (1999); Bates and Lynch (2001); Eticha and Schenk (2001) ที่รายงานว่า พืชบางชนิดหรือบางสายพันธุ์มีการเพิ่มความยาวรากของขนรากให้มากขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่ดินขาดฟอสฟอรัส และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Owen (2006) ที่พบว่าระบบรากมีการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสอย่างชัดเจนในด้านการลดลงของจำนวนรากต่อต้น รวมถึงการเพิ่มขึ้นของความยาวรากและการแตกแขนงรากให้มากขึ้น (Fageria et al., 1988; Kirk and Du, 1997; Owen, 2006) ซึ่งลักษณะความยาวรากและจำนวนรากต่อต้นของข้าวนี้เป็นการตอบสนองที่ชัดเจนกว่าลักษณะการเจริญเติบโตด้านอื่นๆ การตอบสนองของระบบรากนี้เป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการดูดใช้ฟอสฟอรัสและส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นที่ลดลงด้วย (Lynch, 1995) โดยข้าวที่ขาดฟอสฟอรัสมักส่งผลให้มีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและรากลดลงส่งผลไปถึงการลดลงของน้ำหนักแห้งต้นและรากด้วยเช่นกัน ซึ่งเป็นลักษณะที่บอกถึงความเครียดจากการขาดฟอสฟอรัส (Dobermann and Fairhurst, 2000)

แต่อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้ยังพบว่ามีพันธุ์ข้าวที่มีลักษณะการตอบสนองของระบบรากที่แตกต่างจากพันธุ์ข้าวอื่นที่มีจำนวนรากและความยาวรากที่ไม่แตกต่างกันในทุกรูปฟอสฟอรัสซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของพันธุ์ที่ดีที่สามารถนำไปพัฒนาเป็นพันธุ์ที่ปลูกในสภาพฟอสฟอรัสต่ำได้

ผลการทดลองที่ 3 ปลูกทดสอบการตอบสนองข้าว 4 สายพันธุ์ เพื่อประเมินการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัส (P) ในสภาพแปลง

จากการประเมินศักยภาพด้านการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าว 4 สายพันธุ์ (บือขอแผ่ ข้าวแดง เฟืองคำ ซิวแม่จัน) ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่ต่างกัน 4 ระดับ (0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่) ภายใต้โรงเรือนในกระถางบรรจุดินที่มีฟอสฟอรัสต่ำ เก็บข้อมูลข้าว 3 ระยะ คือ ระยะ 60 วัน ระยะแตกกอสูงสุดและระยะเก็บเกี่ยว พบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว อิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัสและอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส ดังนี้

ระยะ 60 วัน

จำนวนต้นต่อกอ

เมื่อข้าวอายุ 60 วัน ซึ่งเป็นระยะแตกกอเป็นช่วงที่ข้าวมีความต้องการฟอสฟอรัสมาก ข้าวที่ได้รับฟอสฟอรัสที่เพียงพอต่อความต้องการสามารถอตกกอและเจริญเติบโตได้ดี จากการทดลองพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว บือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีจำนวนต้นต่อกอมากที่สุด รองลงมา คือ พันธุ์ซิวแม่จัน ในขณะที่พันธุ์เฟืองคำมีจำนวนต้นต่อกอน้อยที่สุดถึง 59 % และ 54 % เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์บือขอแผ่และข้าวแดง เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120, 60 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนต้นต่อกอที่มากถึง 62 % 60 % และ 53 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) ในขณะที่ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าพันธุ์บือขอแผ่ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 60-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีจำนวนต้นต่อกอมากที่สุด ในขณะที่พันธุ์ข้าวแดงที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพียง 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีจำนวนต้นต่อกอไม่แตกต่างทางสถิติกับพันธุ์บือขอแผ่ อย่างไรก็ตามพันธุ์ซิวแม่จันมีจำนวนต้นต่อกอที่มากขึ้นตามการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยมีจำนวนต้นต่อกอที่มากเมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ ส่วนพันธุ์เฟืองคำมีจำนวนต้นต่อกอน้อยกว่าพันธุ์อื่นๆ ถึงแม้จะมีการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส (ตารางที่ 21)

ตารางที่ 21 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60 และ 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	จำนวนต้นต่อกอ			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	3.7 ± 2.1	7.7 ± 1.2	11.0 ± 2.0	10.7 ± 0.6
ข้าวแดง	3.3 ± 0.6	9.3 ± 1.2	8.7 ± 0.6	8.3 ± 0.6
เฟืองคำ	2.7 ± 0.6	3.3 ± 0.6	4.0 ± 1.0	3.7 ± 1.2
ซิวแม่จัน	2.7 ± 0.6	5.7 ± 2.5	7.3 ± 2.1	9.3 ± 0.6
F-test	Var*** Plevels*** VarxPlevels**			
HSD (P<0.05)	1.4 1.4 3.9			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความสูงต้น

ด้านความสูงต้นพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยซิวแม่จันและข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีความสูงต้นมากที่สุด รองลงมา คือ พันธุ์บือขอแผ่ ในขณะที่เฟืองคำเป็นพันธุ์ที่มีความสูงต้นน้อยที่สุดถึง 26 % และ 20 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ซิวแม่จันและข้าวแดง เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120, 60 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีความสูงต้นที่มากถึง 14 % 13 % และ 11 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 22)

ตารางที่ 22 ความสูงต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ความสูงต้น (เซนติเมตร)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	69.2 ± 2.1	80.1 ± 6.5	78.6 ± 7.8	83.2 ± 4.4
ข้าวแดง	75.0 ± 5.0	85.6 ± 1.6	86.6 ± 3.2	82.2 ± 3.3
เฟืองคำ	57.5 ± 17.2	64.5 ± 4.7	68.3 ± 2.8	74.2 ± 4.3
ซิวแม่จัน	82.5 ± 11.4	90.0 ± 18.6	91.9 ± 8.5	92.5 ± 12.0
F-test	Var*** Plevels* ns			
HSD (P<0.05)	9.8 9.8 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความยาวราก

เมื่อข้าวปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสไม่เพียงพอ ข้าวจะมีการปรับตัวโดยยืดขยายความยาวราก จากการทดลองพบความแตกต่างเฉพาะอิทธิพลของพันธุ์ข้าว โดยข้าวแดง บือขอแผ่และซิวแม่จันเป็นพันธุ์ที่มีความยาวรากมากกว่าเฟืองคำซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีความยาวรากน้อยที่สุด 28 % 23 % และ 17 % ตามลำดับ (ตารางที่ 23)

ตารางที่ 23 ความยาวรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ความยาวราก (เซนติเมตร)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	31.0 ± 5.8	27.1 ± 3.4	28.1 ± 8.0	23.7 ± 4.0
ข้าวแดง	29.9 ± 9.6	32.0 ± 2.4	27.7 ± 3.7	28.5 ± 3.8
เฟืองคำ	21.6 ± 3.7	23.1 ± 3.0	18.7 ± 7.8	21.2 ± 1.7
ซิวแม่จัน	24.4 ± 5.2	26.4 ± 4.5	27.5 ± 1.6	23.7 ± 4.8
F-test	Var** ns ns			
HSD (P<0.05)	5.3 - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความเขียวใบ

ด้านความเขียวใบไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ระยะ 60 วัน ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อความเขียวใบ (ตารางที่ 24)

ตารางที่ 24 ความเขียวใบของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ความเขียวใบ			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	40.9 ± 0.6	41.2 ± 2.0	40.8 ± 3.8	39.1 ± 9.3
ข้าวแดง	38.6 ± 2.3	40.7 ± 6.8	45.2 ± 1.7	44.0 ± 0.3
เฟืองคำ	38.2 ± 3.8	42.0 ± 1.5	39.0 ± 5.5	44.1 ± 1.0
ซิวแม่จัน	36.4 ± 2.4	41.1 ± 5.6	42.0 ± 2.7	43.7 ± 2.0
F-test	ns ns ns			
HSD (P<0.05)	- - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งต้น

น้ำหนักแห้งต้นเป็นลักษณะหนึ่งที่แสดงถึงการเจริญเติบโตที่ดีของข้าว ซึ่งข้าวที่ได้รับปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เพียงพอกับความต้องการช่วยส่งเสริมให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นที่สูงได้ จากการทดลองพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว บือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นที่มากรองลงมา คือ พันธุ์ซิวแม่จัน และเฟืองคำเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นน้อยที่สุด โดยมีน้ำหนักแห้งต้นลดลงจากพันธุ์บือขอแผ่และข้าวแดง 62 % และ 58 % ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นที่มากถึง 51-58 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) ในขณะที่ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าพันธุ์บือขอแผ่ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 60-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีน้ำหนักแห้งต้นมากที่สุด ในขณะที่พันธุ์ข้าวแดงที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 30-60 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีน้ำหนักแห้งต้นไม่แตกต่างทางสถิติกับพันธุ์บือขอแผ่ อย่างไรก็ตามพันธุ์ซิวแม่จันมีน้ำหนักแห้งต้นที่มากขึ้นตามการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยมีน้ำหนักแห้งต้นมากเมื่อปลูกใน

ดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ ส่วนพันธุ์เฟืองคำมีน้ำหนักแห้งต้นน้อยกว่าพันธุ์อื่นๆ ถึงแม้จะมีการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส (ตารางที่ 25)

ตารางที่ 25 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กรัม/กระถาง ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งต้น (กรัม/กอ)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	1.674 ± 0.401	3.444 ± 0.162	4.254 ± 0.473	4.376 ± 0.507
ข้าวแดง	1.503 ± 0.454	3.970 ± 0.499	4.130 ± 0.622	3.045 ± 0.484
เฟืองคำ	0.966 ± 0.779	1.314 ± 0.360	1.206 ± 0.282	1.810 ± 0.743
ซิวแม่จัน	1.324 ± 0.305	2.498 ± 1.137	3.516 ± 0.474	3.754 ± 0.557
F-test	Var*** Plevels*** VarxPlevels**			
HSD (P<0.05)	0.631 0.631 1.730			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งราก

สำหรับการตอบสนองด้านน้ำหนักแห้งรากพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส ด้านอิทธิพลของพันธุ์ข้าว พบว่าข้าวแดงและบือขอแผ่เป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากมากกว่าซิวแม่จันและเฟืองคำ เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งรากมากถึง 36-48 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 26)

ตารางที่ 26 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/กอ)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	0.322 ± 0.066	0.513 ± 0.100	0.578 ± 0.092	0.610 ± 0.126
ข้าวแดง	0.370 ± 0.134	0.550 ± 0.069	0.724 ± 0.243	0.503 ± 0.097
เฟืองคำ	0.198 ± 0.086	0.307 ± 0.034	0.315 ± 0.209	0.330 ± 0.113
ซิวแม่จัน	0.216 ± 0.044	0.345 ± 0.144	0.494 ± 0.098	0.424 ± 0.037
F-test	Var*** Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	0.124 0.124 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น

สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น ผลการวิเคราะห์พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 60 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ อย่างไรก็ตาม ข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นน้อยที่สุด (ตารางที่ 27)

ตารางที่ 27 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	0.100 ± 0.009	0.244 ± 0.026	0.321 ± 0.019	0.401 ± 0.035
ข้าวแดง	0.110 ± 0.013	0.219 ± 0.017	0.264 ± 0.069	0.400 ± 0.042
เฟืองคำ	0.121 ± 0.019	0.200 ± 0.077	0.260 ± 0.138	0.268 ± 0.030
ซิวแม่จัน	0.066 ± 0.006	0.247 ± 0.085	0.341 ± 0.116	0.446 ± 0.051
F-test	ns Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	- 0.069 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก

สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก ผลการวิเคราะห์พบว่าข้าว 3 สายพันธุ์ คือ บือขอแผ่ ข้าวแดง และซิวแม่จัน เป็นพันธุ์ที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมากที่สุด ในขณะที่เฟืองคำเป็นพันธุ์ที่มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากน้อยที่สุด และความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่ามีการตอบสนองตามการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากสูงเมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120, 60, 30 และ 0 กิโลกรัม/ไร่ ตามลำดับ ในขณะที่ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าพันธุ์บือขอแผ่และข้าวแดงที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ และพันธุ์ซิวแม่จันที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 60 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมากที่สุด ส่วนพันธุ์เฟืองคำที่ปลูกในดินที่ไม่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากน้อยที่สุด (ตารางที่ 28)

ตารางที่ 28 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	0.040 ± 0.012	0.094 ± 0.009	0.097 ± 0.011	0.245 ± 0.007
ข้าวแดง	0.047 ± 0.013	0.079 ± 0.003	0.110 ± 0.028	0.212 ± 0.039
เฟืองคำ	0.014 ± 0.001	0.020 ± 0.020	0.048 ± 0.048	0.080 ± 0.025
ซิวแม่จัน	0.029 ± 0.003	0.026 ± 0.026	0.182 ± 0.015	0.118 ± 0.022
F-test	Var*** Plevels*** VarxPlevels***			
HSD (P<0.05)	0.024 0.024 0.067			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส คือ ความสามารถของข้าวในการสร้างน้ำหนักแห้งต่อหน่วยฟอสฟอรัสที่ดูดได้ จากการทดลองพบว่าข้าวทุกสายพันธุ์มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสลดลงตามการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสมากที่สุด ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสน้อยที่สุด ในขณะที่ความแตกต่างด้านอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสลดลงตามการเพิ่มระดับของปุ๋ยฟอสฟอรัสและไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่พันธุ์ซิวแม่จันที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสมากกว่าข้าวอีก 3 สายพันธุ์ (ตารางที่ 29)

ตารางที่ 29 ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	10.098 ± 0.882	4.135 ± 0.441	3.122 ± 0.182	2.505 ± 0.227
ข้าวแดง	9.165 ± 1.038	4.589 ± 0.347	3.999 ± 1.230	2.518 ± 0.249
เฟืองคำ	8.382 ± 1.233	5.474 ± 1.860	4.489 ± 1.821	3.767 ± 0.444
ซิวแม่จัน	15.229 ± 1.229	3.931 ± 1.372	3.156 ± 1.010	2.262 ± 0.242
F-test	ns Plevels*** VarxPlevels***			
HSD (P<0.05)	- 1.180 3.235			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ระยะแตกกอสูงสุด

จำนวนต้นต่อกอ

ด้านจำนวนต้นต่อกอพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยบือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีการสร้างจำนวนต้นต่อกอได้มากกว่าพันธุ์ซิวแม่จันและเฟืองคำ การสร้างจำนวนต้นต่อกอยังมีความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 และ 60 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนต้นต่อกอมากกว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 30 กิโลกรัม/ไร่ ถึง 28 % และ 14 % ตามลำดับ (ตารางที่ 30)

ตารางที่ 30 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	จำนวนต้นต่อกอ			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	11.0 ± 4.4	22.3 ± 6.4	25.7 ± 2.5	33.3 ± 7.0
ข้าวแดง	10.0 ± 3.6	20.0 ± 5.0	22.0 ± 4.4	19.0 ± 2.6
เฟืองคำ	6.7 ± 4.6	9.3 ± 3.2	17.3 ± 12.9	25.7 ± 6.7
ซิวแม่จัน	8.0 ± 1.0	20.3 ± 1.5	18.3 ± 3.1	21.7 ± 2.5
F-test	Var** Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	5.5 5.5 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความสูงต้น

ด้านความสูงต้นพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยบือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีความสูงต้นที่มากกว่าซิวแม่จันและเฟืองคำ เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีความสูงต้นที่มากกว่าข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) ถึง 14 % (ตารางที่ 31)

ตารางที่ 31 ความสูงต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ความสูงต้น (เซนติเมตร)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	123.3 ± 17.9	147.3 ± 11.1	153.7 ± 6.7	145.3 ± 1.5
ข้าวแดง	118.7 ± 13.6	143.7 ± 11.4	140.0 ± 5.0	134.8 ± 5.5
เฟืองคำ	103.7 ± 19.0	113.2 ± 10.6	113.3 ± 6.4	126.0 ± 11.1
ซิวแม่จัน	106.5 ± 6.4	119.0 ± 5.3	118.7 ± 15.7	119.3 ± 5.1
F-test	Var*** Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	12.1 12.1 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความยาวราก

ด้านความยาวรากพบความแตกต่างเฉพาะอิทธิพลของพันธุ์ข้าวเพียงอย่างเดียว โดยข้าว 3 สายพันธุ์ คือ บือขอแผ่ ข้าวแดง และซิวแม่จัน เป็นกลุ่มพันธุ์ที่มีความยาวรากมากถึง 26 % 22 % และ 21 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์เฟืองคำซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีความยาวรากน้อยที่สุด (ตารางที่ 32)

ตารางที่ 32 ความยาวรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ความยาวราก (เซนติเมตร)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	34.3 ± 2.4	40.3 ± 0.8	34.6 ± 6.6	29.8 ± 1.0
ข้าวแดง	37.3 ± 7.7	31.5 ± 6.1	34.7 ± 8.1	28.3 ± 3.5
เฟืองคำ	27.0 ± 5.9	24.0 ± 5.2	26.0 ± 3.5	25.5 ± 4.3
ซิวแม่จัน	31.5 ± 1.5	32.8 ± 5.6	32.2 ± 4.8	33.4 ± 8.9
F-test	Var** ns ns			
HSD (P<0.05)	6.0 - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความเขียวใบ

ด้านความเขียวใบไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ระยะแตกกอสูงสุด ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อความเขียวใบ (ตารางที่ 33)

ตารางที่ 33 ความเขียวใบของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ความเขียวใบ			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	45.5 ± 3.5	44.3 ± 3.0	43.1 ± 4.8	46.9 ± 2.8
ข้าวแดง	46.6 ± 1.3	47.0 ± 3.0	47.1 ± 3.7	46.9 ± 3.0
เฟืองคำ	43.2 ± 8.5	45.8 ± 9.3	42.3 ± 5.6	48.5 ± 1.2
ซิวแม่จัน	46.9 ± 3.6	41.5 ± 4.1	44.1 ± 8.5	48.4 ± 2.4
F-test	ns ns ns			
HSD (P<0.05)	- - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งต้น

ด้านน้ำหนักแห้งต้นพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยบือขอแผ่เป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นที่มากถึง 46 % 47 % และ 57 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวอีก 3 สายพันธุ์ คือ ข้าวแดง เฟืองคำ และซิวแม่จัน เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120, 60 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นที่มากถึง 69 % 60 % และ 57 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 34)

ตารางที่ 34 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งต้น (กรัม/กอ)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	23.084 ± 7.447	64.397 ± 22.528	57.712 ± 10.892	82.148 ± 32.747
ข้าวแดง	16.531 ± 8.637	32.787 ± 15.353	33.739 ± 5.598	39.913 ± 7.264
เฟืองคำ	13.137 ± 8.897	19.797 ± 9.590	37.770 ± 33.250	49.092 ± 17.943
ซิวแม่จัน	10.115 ± 1.604	29.524 ± 5.312	26.915 ± 13.482	31.358 ± 7.271
F-test	Var*** Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	15.886 15.886 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งราก

ด้านน้ำหนักแห้งรากพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยบือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากที่มาก รองลงมา คือ พันธุ์เฟืองคำและซิวแม่จันเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120, 60 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งรากที่มากถึง 56 % 50 % และ 49 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 35)

ตารางที่ 35 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/กอ)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	3.314 ± 1.621	10.428 ± 4.053	9.342 ± 3.835	9.288 ± 6.188
ข้าวแดง	4.283 ± 2.381	5.569 ± 1.156	5.466 ± 1.216	8.579 ± 2.557
เฟืองคำ	3.399 ± 1.095	3.860 ± 3.625	5.804 ± 4.453	7.470 ± 2.882
ซิวแม่จัน	1.176 ± 0.528	4.262 ± 0.912	3.637 ± 1.529	2.470 ± 1.313
F-test	Var*** Plevels** ns			
HSD (P<0.05)	2.701 2.701 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น

สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น ผลการวิเคราะห์พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 และ 60 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมากที่สุดและไม่แตกต่างกันทางสถิติ รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 30 กิโลกรัม/ไร่ ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นน้อยที่สุด (ตารางที่ 36)

ตารางที่ 36 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	0.087 ± 0.015	0.157 ± 0.009	0.194 ± 0.014	0.210 ± 0.038
ข้าวแดง	0.098 ± 0.022	0.161 ± 0.040	0.246 ± 0.065	0.263 ± 0.049
เฟืองคำ	0.089 ± 0.048	0.188 ± 0.018	0.222 ± 0.027	0.264 ± 0.029
ซิวแม่จัน	0.064 ± 0.013	0.145 ± 0.012	0.094 ± 0.094	0.311 ± 0.038
F-test	ns Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	- 0.044 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก

สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก ผลการวิเคราะห์พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์มีการตอบสนองต่อการเพิ่มขึ้นของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากมากที่สุด ในขณะที่ข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากน้อยที่สุดและไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 37)

ตารางที่ 37 ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	0.051 ± 0.003	0.059 ± 0.005	0.070 ± 0.005	0.090 ± 0.012
ข้าวแดง	0.053 ± 0.003	0.061 ± 0.008	0.077 ± 0.022	0.091 ± 0.016
เฟืองคำ	0.042 ± 0.006	0.059 ± 0.006	0.081 ± 0.015	0.108 ± 0.021
ซิวแม่จัน	0.044 ± 0.009	0.064 ± 0.009	0.082 ± 0.027	0.106 ± 0.024
F-test	ns Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	- 0.014 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส

จากที่กล่าวมาแล้วว่าประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส คือ ความสามารถของข้าวในการสร้างน้ำหนักแห้งต่อหน่วยฟอสฟอรัสที่ดูดได้ จากการทดลองพบว่าข้าวทุกสายพันธุ์มีประสิทธิภาพลดลงตามการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสมากที่สุด ส่วนข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสน้อยที่สุดซึ่งประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสของข้าวที่ระยะแตกกอสูงสุดนี้ให้ผลเช่นเดียวกับที่ระยะ 60 วัน (ตารางที่ 38)

ตารางที่ 38 ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	11.659 ± 1.931	6.373 ± 0.365	5.179 ± 0.371	4.857 ± 0.875
ข้าวแดง	10.605 ± 2.630	6.483 ± 1.659	4.232 ± 0.969	3.887 ± 0.686
เฟืองคำ	13.270 ± 5.493	5.347 ± 0.499	4.548 ± 0.588	3.823 ± 0.435
ซิวแม่จัน	16.212 ± 3.890	6.933 ± 0.547	4.516 ± 1.545	3.251 ± 0.422
F-test	ns Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	- 2.237 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ระยะเก็บเกี่ยว

จำนวนต้นต่อกอ

ด้านจำนวนต้นต่อกอพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยบือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีจำนวนต้นต่อกอมากที่สุด รองลงมา คือ พันธุ์ซิวแม่จันและเฟืองคำเป็นพันธุ์ที่มีจำนวนต้นต่อกอน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีการจำนวนต้นต่อกอมากที่สุด รองลงมา คือ ข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 60 กิโลกรัม/ไร่ ในขณะที่ข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) ส่งผลให้ข้าวทุกสายพันธุ์มีจำนวนต้นต่อกอน้อยที่สุด (ตารางที่ 39)

ตารางที่ 39 จำนวนต้นต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	จำนวนต้นต่อกอ			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	10.7 ± 1.5	23.3 ± 3.5	26.3 ± 2.1	34.0 ± 5.3
ข้าวแดง	10.0 ± 4.0	22.7 ± 1.5	23.3 ± 4.5	24.7 ± 4.5
เฟืองคำ	3.7 ± 0.6	19.7 ± 2.1	14.0 ± 4.4	17.7 ± 7.6
ซิวแม่จัน	7.7 ± 2.5	18.7 ± 6.1	16.7 ± 7.0	25.0 ± 5.3
F-test	Var*** Plevels*** ns			
HSD (P<0.05)	5.0 5.0 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งต้น

ด้านน้ำหนักแห้งต้นพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าว 3 สายพันธุ์ คือ เฟืองคำ บือขอแผ่ และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นที่มากถึง 41-62 % เมื่อเปรียบเทียบกับซิวแม่จันซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งต้นน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งต้นที่มากถึง 71-72 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 40)

ตารางที่ 40 น้ำหนักแห้งต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งต้น (กรัม/กอ)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	36.674 ± 14.776	81.582 ± 20.380	84.491 ± 34.979	77.442 ± 19.305
ข้าวแดง	16.694 ± 5.703	51.263 ± 19.858	56.896 ± 24.777	56.730 ± 25.471
เฟืองคำ	12.434 ± 4.229	86.609 ± 70.693	91.844 ± 66.266	90.329 ± 92.628
ซิวแม่จัน	7.226 ± 4.868	33.110 ± 2.512	30.009 ± 7.953	36.422 ± 7.398
F-test	Var** Plevels** ns			
HSD (P<0.05)	35.678 35.678 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนักแห้งราก

ด้านน้ำหนักแห้งรากพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าว 3 สายพันธุ์ คือ เฟืองคำ บือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากที่มากถึง 71 % 69 % และ 47 % เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ซิวแม่จันซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีน้ำหนักแห้งรากน้อยที่สุด เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีน้ำหนักแห้งรากมากถึง 61-65 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 41)

ตารางที่ 41 น้ำหนักแห้งรากของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	น้ำหนักแห้งราก (กรัม/กอ)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	7.947 ± 4.808	13.474 ± 7.065	15.015 ± 6.842	8.848 ± 2.403
ข้าวแดง	3.159 ± 0.766	8.367 ± 6.041	7.788 ± 3.092	7.030 ± 1.169
เฟืองคำ	2.461 ± 1.334	10.379 ± 9.166	14.693 ± 9.184	19.885 ± 19.731
ซิวแม่จัน	1.242 ± 0.273	5.380 ± 1.403	4.280 ± 1.942	3.037 ± 0.446
F-test	Var** Plevels* ns			
HSD (P<0.05)	6.384 6.384 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

การเจริญเติบโตทางด้านลำต้นส่งผลถึงการสร้างผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตที่ดีเช่นกัน โดยเมื่อพิจารณาด้านผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิต จำนวนรวงต่อกอ มีความแตกต่างเฉพาะอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120, 60 และ 30 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนรวงต่อกอมากถึง 66 % 63 % และ 58 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 42)

ตารางที่ 42 จำนวนรวงต่อกอของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	จำนวนรวงต่อกอ			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	9.5 ± 0.7	14.0 ± 13.0	26.5 ± 2.1	25.0 ± 4.2
ข้าวแดง	9.5 ± 0.7	13.0 ± 5.7	16.0 ± 3.6	20.0 ± 9.8
เฟืองคำ	4.0 ± 0.0	14.5 ± 4.9	12.0 ± 0.0	11.0 ± 0.0
ซิวแม่จัน	3.3 ± 2.1	16.7 ± 8.3	13.3 ± 3.1	16.5 ± 10.6
F-test	ns Plevels** ns			
HSD (P<0.05)	- 8.0 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ความยาวรวง

ความยาวรวงไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ระยะเก็บเกี่ยว ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัสไม่มีผลต่อความยาวรวง (ตารางที่ 43)

ตารางที่ 43 ความยาวรวงของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	ความยาวรวง (เซนติเมตร)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	24.8 ± 0.8	21.9 ± 6.4	24.4 ± 1.0	24.6 ± 0.4
ข้าวแดง	23.9 ± 0.1	23.0 ± 4.6	25.4 ± 3.0	23.7 ± 2.0
เฟืองคำ	23.2 ± 3.0	23.3 ± 1.5	24.1 ± 0.0	24.9 ± 0.7
ซิวแม่จัน	17.7 ± 6.3	26.2 ± 1.6	25.4 ± 0.7	25.4 ± 2.0
F-test	ns ns ns			
HSD (P<0.05)	- - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

จำนวนเมล็ดดี

จำนวนเมล็ดดีพบความแตกต่างเฉพาะอิทธิพลของพันธุ์ข้าว โดยเฟืองคำ บือขอแผ่และข้าวแดงเป็นพันธุ์ที่มีจำนวนเมล็ดดีมากถึง 52 % 51 % และ 39 % ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์ซิวแม่จันซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีจำนวนเมล็ดดีน้อยที่สุด (ตารางที่ 44)

ตารางที่ 44 จำนวนเมล็ดดีต่อรวงของข้าว 4 สายเมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	จำนวนเมล็ดดีต่อรวง			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	85.9 ± 6.1	78.6 ± 6.2	75.7 ± 20.2	87.5 ± 12.6
ข้าวแดง	61.7 ± 4.6	59.9 ± 48.2	80.2 ± 29.6	60.7 ± 44.1
เฟืองคำ	57.7 ± 26.6	114.7 ± 29.0	68.7 ± 0.0	85.1 ± 0.3
ซิวแม่จัน	29.8 ± 22.6	53.7 ± 29.9	42.3 ± 15.0	33.2 ± 3.7
F-test	Var*** ns ns			
HSD (P<0.05)	26.1 - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

จำนวนเมล็ดลีบ

จำนวนเมล็ดลีบพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยซิวแม่จันเป็นพันธุ์ที่มีจำนวนลีบมาก อย่างไรก็ตามบือขอแผ่เป็นพันธุ์ที่มีจำนวนเมล็ดลีบน้อยที่สุด และเมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30 กิโลกรัม/ไร่ ขึ้นไป ส่งผลให้ข้าวมีจำนวนเมล็ดลีบมากเมื่อเปรียบเทียบกับการไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) โดยจำนวนเมล็ดลีบเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส (ตารางที่ 45)

ตารางที่ 45 จำนวนเมล็ดลีบต่อรวงของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	จำนวนเมล็ดลีบต่อรวง			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	10.3 ± 9.0	23.3 ± 9.0	17.3 ± 4.2	19.2 ± 7.6
ข้าวแดง	16.6 ± 0.1	22.7 ± 5.9	30.7 ± 12.9	41.0 ± 29.0
เฟืองคำ	44.9 ± 6.2	17.8 ± 4.4	32.7 ± 0.0	54.9 ± 27.3
ซิวแม่จัน	13.8 ± 1.6	38.4 ± 20.8	46.4 ± 14.0	64.2 ± 20.4
F-test	Var* Plevels* ns			
HSD (P<0.05)	19.5 19.3 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

น้ำหนัก 100 เมล็ด

น้ำหนัก 100 เมล็ด พบความแตกต่างเฉพาะอิทธิพลของพันธุ์ข้าว โดยพันธุ์บือขอแผ่และเฟืองคำมีน้ำหนัก 100 เมล็ด ที่มากกว่าพันธุ์ข้าวแดงและซิวแม่จัน (ตารางที่ 46)

ตารางที่ 46 น้ำหนัก 100 เมล็ด ของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	น้ำหนัก 100 เมล็ด (กรัม)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	3.2 ± 0.3	3.1 ± 0.1	3.0 ± 0.1	3.1 ± 0.1
ข้าวแดง	2.6 ± 0.1	2.6 ± 0.0	2.6 ± 0.2	2.5 ± 0.2
เฟืองคำ	3.1 ± 0.1	2.6 ± 0.1	2.9 ± 0.0	3.0 ± 0.2
ซิวแม่จัน	2.4 ± 0.3	2.6 ± 0.2	2.6 ± 0.4	2.5 ± 0.0
F-test	Var*** ns ns			
HSD (P<0.05)	0.3 - -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

ผลผลิตต่อต้น

ผลผลิตต่อต้นพบความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าวและอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยบือขอแผ่และเฟืองคำเป็นพันธุ์ที่มีผลผลิตต่อต้นมากกว่าข้าวแดงและซิวแม่จัน เมื่อพิจารณาความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส พบว่าข้าวทุกสายพันธุ์ที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสตั้งแต่ 30-120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้ข้าวมีผลผลิตต่อต้นที่สูงถึง 61-66 % เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) (ตารางที่ 47)

ตารางที่ 47 ผลผลิตต่อต้นของข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะเก็บเกี่ยว

พันธุ์ข้าว	ผลผลิตต่อต้น (กรัม/ต้น)			
	0 กิโลกรัม/ไร่	30 กิโลกรัม/ไร่	60 กิโลกรัม/ไร่	120 กิโลกรัม/ไร่
บือขอแผ่	24.1 ± 0.8	31.6 ± 29.5	62.1 ± 10.3	64.2 ± 14.1
ข้าวแดง	14.8 ± 1.8	23.2 ± 21.6	34.0 ± 16.6	24.1 ± 7.4
เฟืองคำ	7.5 ± 3.9	43.1 ± 26.7	26.1 ± 0.0	27.4 ± 4.0
ซิวแม่จัน	3.1 ± 2.8	20.5 ± 2.9	16.5 ± 1.1	17.6 ± 11.1
F-test	Var** Plevels* ns			
HSD (P<0.05)	18.8 18.5 -			

*** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.001

** แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.01

* แสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05

ns (not significant) คือ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

Var (Varieties) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของพันธุ์ข้าว

Plevels (Phosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

VarxPlevels (VarietiesxPhosphorus levels) คือ ความแตกต่างเนื่องจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุ์ข้าวและระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส

วิจารณ์ผลการทดลองที่ 3

การปลูกข้าวในดินที่มีค่าวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 17 ppm ซึ่งเป็นค่าของดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง การปลูกข้าวในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส (0 กิโลกรัม/ไร่) อาจส่งผลให้ข้าวมีการเจริญเติบโตไม่เต็มที่ ฉะนั้นการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวจึงเป็นสิ่งที่สำคัญซึ่งปุ๋ยฟอสฟอรัสเป็นปุ๋ยที่เหมาะแก่การเพิ่มประโยชน์ในระยะยาว เนื่องจากจะปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์อย่างช้าๆ (จีราภรณ์, 2557) และฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้าย (Marchner and Dell, 1994) เมื่อใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสลงไปในดินแล้วฟอสฟอรัสอาจถูกตรึงในอนุภาคของแร่ดินเหนียวทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารลดลงและอยู่ในรูปของสารประกอบที่ละลายน้ำยาก โดยในดินกรดฟอสฟอรัสถูกตรึงด้วยเหล็กและอะลูมินัมเกิดเป็นฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ ในดินด่างถูกตรึงด้วยแคลเซียมซึ่งการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสในปริมาณที่เหมาะสมช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าวได้ สำหรับระดับของปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของข้าวแต่ละสายพันธุ์มีระดับที่แตกต่างกันไปในแต่ละระดับ ในด้านการสร้างผลผลิตและองค์ประกอบผลผลิตสำหรับการให้ปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีจำนวนเมล็ดต่อรวงมาก แต่ก็ยังส่งผลให้มีจำนวนเมล็ดลีบต่อรวงมากเช่นเดียวกัน โดยข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีจำนวนเมล็ดลีบมากถึง 44.4 เมล็ดต่อรวง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการติดเมล็ดต่อรวงสูงส่งผลให้ปริมาณอาหารหรือแป้งที่สะสมในแต่ละเมล็ดไม่เพียงพอ รวงที่มีจำนวนเมล็ดมากจึงมีโอกาสเกิดเมล็ดลีบมากเช่นเดียวกัน ซึ่งแตกต่างกับงานวิจัยของ สุรพงษ์ และคณะ (2559) ที่รายงานว่า การใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 16-16-8 ในอัตรา 25, 50 และ 75 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้จำนวนเมล็ดลีบต่อรวงไม่แตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกับ นฤมล (2558) ที่พบว่า การให้ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงที่ระดับไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น อัตรา 21.84, 43.68 และ 87.40 กิโลกรัมไนโตรเจน/ไร่ ทำให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทำให้ข้าวมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดลีบมีแนวโน้มลดลง

สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุฟอสฟอรัสที่สะสมในต้นและราก พบว่าทั้งต้นและรากของข้าวทุกสายพันธุ์มีฟอสฟอรัสสะสมเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มระดับของปุ๋ยฟอสฟอรัส โดยระยะแตกกอสูงสุดข้าวที่ปลูกในดินที่มีการปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 และ 60 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีฟอสฟอรัสสะสมในต้นมากที่สุด 0.262 % และ 0.226 % และข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีฟอสฟอรัสสะสมในรากมากที่สุด 0.098 % แต่ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส ซึ่งหมายถึงความสามารถของข้าวในการสร้างน้ำหนักแห้งต่อหน่วยฟอสฟอรัสที่ดูดได้ (Blair, 1993; Richardson et al., 2011) กลับให้ผลตรงกันข้ามกับผลการวิเคราะห์ธาตุฟอสฟอรัส คือ ข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเลย (0 กิโลกรัม/ไร่) ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสมากที่สุด 12.936 กรัม/มิลลิกรัม ซึ่งข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเลยมีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสได้ดีกว่าข้าวที่ปลูกในดินที่มีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสทุกระดับ อาจเป็นเพราะข้าวที่ปลูกในดินที่ไม่ได้ใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมี

การปรับตัว โดยลดความต้องการฟอสฟอรัสที่จะใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมและการเจริญเติบโตให้น้อยลง แต่ยังมีการเจริญเติบโตที่ดีภายใต้สภาวะที่มีฟอสฟอรัสที่มีอยู่อย่างจำกัดส่งผลให้มีประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสที่ดีด้วยเช่นกัน (Duff et al., 1989; Plaxton and Carswell, 1999)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองที่ 1 ทำการปลูกคัดเลือกข้าว 147 สายพันธุ์ ที่มีระบบนิเวศการปลูกที่แตกต่างกันในสารละลายธาตุอาหารที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P) และไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P) จากการหาค่าเฉลี่ยการเจริญเติบโตของข้าว ด้านจำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก ความยาวราก ความเขียวใบ น้ำหนักแห้งต้นและราก รวมถึงวิเคราะห์ฟอสฟอรัสที่สะสมในต้นและราก พบว่าข้าวที่มาจากระบบนิเวศข้าวไร่ ข้าวนาสวน ข้าวน้ำลึกและข้าวขึ้นน้ำ ซึ่งปลูกในสารละลาย K-P ส่งผลให้จำนวนต้นต่อกอ ความสูงต้น จำนวนราก น้ำหนักแห้งต้นและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้นมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P ในขณะที่ความยาวราก ความเขียวใบและความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก ข้าวที่ปลูกในสารละลาย Ca-P มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าข้าวที่ปลูกในสารละลาย K-P

หลังจากนั้นคัดเลือกข้าวให้เหลือ 22 สายพันธุ์ และปลูกในสารละลายฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงไว้ด้วยธาตุต่างชนิดตามวัตถุต้นกำเนิดดินในสารละลายธาตุอาหารโดยอยู่ในรูปของ $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P, FeO_4P : Fe-P และ KH_2PO_4 : K-P จากการศึกษาลักษณะที่ตอบสนองต่อการได้รับฟอสฟอรัสจากรูปต่างกันของกล้าข้าว 22 สายพันธุ์ โดยลักษณะที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพด้านการดูดใช้ฟอสฟอรัส คือ ความยาวรากและจำนวนรากของข้าว ระบบรากของพันธุ์ข้าวส่วนใหญ่มีการตอบสนองต่อการขาดฟอสฟอรัสอย่างชัดเจน โดยการลดจำนวนรากต่อต้น เพิ่มความยาวรากและการแตกแขนงรากให้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการตอบสนองของระบบรากในการทดลองนี้ทำให้เห็นได้ว่าฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูป Ca-P ถูกปลดปล่อยออกมาได้มากกว่าฟอสฟอรัสที่ถูกตรึงอยู่ในรูป Al-P หรือ Fe-P ดังนั้นปัญหาการขาดฟอสฟอรัสของข้าวที่ปลูกในสภาพดินด่างอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญและการให้ผลผลิตข้าวได้น้อยกว่าสภาพดินกรด โดยลักษณะที่มีความยาวรากและจำนวนรากที่เพิ่มขึ้นจะเป็นลักษณะที่บ่งชี้ด้านประสิทธิภาพการดูดใช้ฟอสฟอรัสของข้าวที่ปลูกในสภาพที่มีฟอสฟอรัสต่างรูปกัน

สุดท้ายคัดเลือกข้าวให้เหลือ 4 สายพันธุ์ และปลูกทดสอบการตอบสนองต่อปุ๋ยฟอสฟอรัสในกระถางดินเพื่อคัดเลือกพันธุ์ข้าวไปปลูกในพื้นที่ที่มีปัญหาด้านธาตุฟอสฟอรัสต่ำในดินที่แตกต่างกัน โดยมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ (0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่) จากการศึกษาการตอบสนองของระดับปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของข้าว 4 สายพันธุ์นั้น พบว่าข้าวแต่ละสายพันธุ์มีการตอบสนองต่อระดับปุ๋ยฟอสฟอรัสที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะประจำพันธุ์ของข้าวเป็นสำคัญ โดยการเจริญเติบโตของข้าวที่ระยะการเจริญเติบโตทางลำต้นสูงสุด พันธุ์บือขอแผ่ที่ปลูกในระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 และ 60 กิโลกรัม/ไร่ ส่งผลให้มีจำนวนต้นต่อกอสูง ในขณะที่พันธุ์เฟืองคำ

และซิวแม่จันมีการตอบสนองเมื่อปลูกในระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 120 กิโลกรัม/ไร่ อย่างไรก็ตามพันธุ์ข้าวแดงมีการตอบสนองเมื่อปลูกในระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 60 กิโลกรัม/ไร่ ซึ่งการใส่ปุ๋ยในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับความต้องการของข้าวช่วยส่งเสริมให้ข้าวมีการเจริญเติบโตทางด้านลำต้นและรากที่ดี ส่งผลให้ผลผลิตของข้าวสูงตามไปด้วยซึ่งถ้าหากใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสเกินความจำเป็นอาจเป็นพิษหรือทำให้ข้าวไม่เจริญเติบโตได้อีกทั้งยังส่งผลให้ดินเสื่อมโทรม ดังนั้นการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัสในปริมาณที่เหมาะสมนอกจากจะลดการสูญเสียทรัพยากรโดยเปล่าประโยชน์แล้วยังช่วยให้ดินคงความอุดมสมบูรณ์ในระยะยาวและไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

บรรณานุกรม

เกตน์ณนิภา วันชัย และ สมาพร เรืองสังข์. 2557. ผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟตที่ตรึงอยู่บนขี้เถ้าแกลบต่อการเจริญเติบโตของข้าวพันธุ์ กข 47. **วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร,** 45(2) (พิเศษ), 513-516.

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

จีราภรณ์ อินทสาร. 2557. **ความอุดมสมบูรณ์ของดิน.** สำนักพิมพ์ดีพริ้นท์: เชียงใหม่.

ณฐมณ กันธิยะ และ ศุภธิดา อ่ำทอง. 2557. ผลของชนิดดิน ระดับความชื้นและค่า pH ของดินต่อความเป็นประโยชน์ของฟอสอฟรัสในส่วนต่างๆ. **แก่นเกษตร,** 42(2), 314-321.

ทัศนีย์ อัตตะนันทน์ และ จงรักษ์ จันทร์เจริญสุข. 2543. **คู่มือปฏิบัติการวิเคราะห์ดินและพืช.** กรุงเทพฯ: ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรพงษ์ แสงสิทธิ์. 2545. **การตรึงฟอสฟอรัสในดินโดยแร่ดินเหนียว.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.nakhamwit.ac.th/pingpong_web/Article_s/P_Clay.pdf (1 พฤศจิกายน 2559)

นฤมล สุขเกษม. 2558. **ประสิทธิภาพของปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูงต่อผลผลิตและคุณภาพข้าวในชุดดินองครักษ์และชุดดินรังสิต.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2552. **ธาตุอาหารพืช.** กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิศิษฐ์ โชลิตกุล, มะลิวัลย์ กาญจนนิรัติศัย และ มนูเวทย์ ศรีเสน. 2518. **เคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดิน.** กรุงเทพฯ: กรมวิชาการเกษตร กองเกษตรเคมี งานวิจัยเคมีและความอุดมสมบูรณ์ของดิน.

สมเกียรติ วัฒกวิกรานต์. 2552. การปรับพื้นที่สภาพไร่เป็นนาขั้นบันได: ทางเลือกของเกษตรกรบนพื้นที่สูง. **ในรายงานการประชุมทางวิชาการข้าวและธัญพืชเมืองหนาวประจำปี 2552**. โรงแรมซีบรีท จอมเทียน พัทยา ชลบุรี.

สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน เล่มที่ 3 โดยพระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว. 2520. **การปลูกข้าว.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://kanchanapisek.or.th/kp6/sub/book/book.php?Book=3&chap=1&page=t3-1-infodetail06.html (19 พฤศจิกายน 2559).

สำนักวิจัยและพัฒนาข้าว. 2559. **พันธุ์ข้าว.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.arda.or.th/kasetinfo/rice/rice-cultivate_species.html (19 พฤศจิกายน 2559).

สุภาพร จันรุ่งเรื่อง, เบญจมาส รสโสภา และ กรรณิการ์ สัจจาพันธ์. 2553. ผลของแบคทีเรียละลายฟอสเฟต *Burkholderia* sp. สายพันธุ์ Rs01 ต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรี 2 sp. สายพันธุ์ Rs01 ต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวานพันธุ์อินทรีย์ 2. **วิทยาสารกำแพงแสน,** 8(1), 1-14.

สุรพงษ์ เนตรพระ, สุภาวดี ตั้งธีระวัฒนะ และสาระ สวัสดิ์โยธิน. 2559. ผลของวันปลูกและอัตราปุ๋ยเคมีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ กข15 ที่ปลูกนอกฤดูกาลในจังหวัดสุรินทร์. **วารสารวิทยาศาสตร์คชสาส์น,** 38(2), 59-71.

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

อัญธิชา พรมเมืองคุก. 2546. **การหาชนิดของสารละลายสกัดที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการหาค่าดัชนีความเป็นประโยชน์ของฟอสอรัสในดินนาและดินไร่บางชุดดินในเขตลุ่มแม่กลองใหญ่.** วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Aluwihare, Y. C., Ishan, M., Chamikara, M. D. M., Weebadde, C. K., Siirisena, D. N., Samarasinghe , W. L. G. & Sooriyapathirana, S. D. S. S. 2016. Characterization and Selection of Phosphorus Deficiency Tolerant Rice Genotypes in Sri Lanka. **Rice Science,** 23(4), 184-195.

Barry, D. A. J. & Miller, M. H. 1989. Phosphorus nutrition requirement of maize seedlings for maximum yield. **Agronomy Journal,** 81, 95-99.

Bates, T. R. & Lynch, J. P. 2001. Root hairs confer a competitive advantage under low phosphorus availability. **Plant and Soil,** 236, 243-250.

Blair, G. 1993. **Nutrient efficiency-what do we really mean? In Randall PJ, Delhaize E, Richards RA, Munns R (eds.) Genetic aspects of plant nutrition.** Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

Bohn, H., McNeal, B. L. & O'Connor, G. A. 2001. **Soil Chemistry**. New York: John Wiley & Sons.

Brady, N. C. 1974. **The nature and properties of soils**. New York: MacMillan.

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

Duff, S. M. G., Moorhead, G. B. G., Lefebvre, D. D. & Plaxton, W. C. 1989. Phosphate starvation inducible bypasses of adenylate and phosphate dependent glycolytic enzymes in Brassica nigra suspension cells. **Plant Physiology,** 90, 1275-1278.

Eticha, D. & Schenk, M. K. 2001. **Phosphorus efficiency of cabbage varieties. In: Horst *et al*. (eds.) Plant nutrition-food security and sustainability of agroecosystems through basic and applied research.** The Netherlands: Kluwer Academic Publisher Dordrecht.

Fageria, N. K., Wright, R. J. & Baligar, V. C. 1988. Rice cultivar evaluation for phosphorus use efficiency. **Plant and Soil,** 111, 105-109.

Gahoonia, T. S., Nielsen, N. E. & Lyshede, O. B. 1999. Phosphorus (P) acquisition of cereal cultivars in the field at three levels of P fertilization. **Plant and Soil,** 211, 269-281.

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

Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. M. & Nelson, W. L. 2005. **Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management**. 7th ed. Pearson Prentice Hall Inc: New Jersey.

Holford, I. C. R. & Patrick, W. H. J. r. 1979. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. **Soil Science Society of America Journal,** 43, 292-297.

Khaild, R. A., Patrick, W. l. l. & DeLaune, R. D. 1977. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Science Society of America Journal,** 41, 305-310.

Khamis, S., Chaillou, S. & Lamare. 1990. CO_2 assimilation and partitioning of carbon in maize plants deprived of orthophosphate. **Journal of Experimental Botany,** 41, 1619-1625.

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

Kucey, R. M. N., Janzen, H. H. & Leggett, M. E. 1989. Microbial mediated increases in plant available phosphorus. **Ad. Agron,** 42, 199-228.

Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology,** 109, 7-13.

Marschner, H. and Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. **Plant and Soil,** 159, 89-102.

Marschner, H. 2012. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. Academic Press: New York USA.

Murdoch, C. L., Jackobs, J. A. & Gerdemann, J. W. 1967. Utilization of phosphorus sources of difference availability by mycorrhizal and non-mycorrhizal maize. **Plant and soil,** 27, 239-334.

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

Owen, J. J. 2006. **Mineral nutrient deficiencies and toxicities**. North Willamette Research and Extension Center: Oregon State University USA.

Patrick, W. H. & Reddy, C. N. 1978. Chemical change in rice soils: N.C. Brady (ed.) Soil and Rice. **International Rice Research Institute,** 361-379.

Penaloza, E., Munoz, G., Garrido, H. S., Silva, H. & Corcuera, L. J. 2005. Phosphate deficiency regulates phosphoenolpyruvate carboxylase expression in proteoid root clusters of white lupine. **Journal of Experimental Botany,** 56, 141-153.

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.** New York, NY, USA: Marcel-Dekker.

Ponnamperuma, F. N. 1972. The chemistry of submerged soils. **Advance in Agronomy,** 24, 29-96.

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

Ramulu, U. S. S., Pratt, P. F. & Page, A. L. 1967. Phosphorus fixation by soils in relation to extractable iron oxides and mineralogical composition. **Soil Science Society of America Journal,** 31, 193-196.

Reddy, E. P., Smith, M. l., Canaani, E., Robbins, K. C., Tronjck, S. R., Zain, S. & Aaronson, S. A. 1980. Nucleotide sequence analysis of the transforming region and large terminal redundancies of Moloney murine sarcoma virus: **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,** 77, 5234-5283.

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.

Sah, R. N. & Mikkelsen, D. S. 1989. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. I. Effect onphosphate sorption. **Soil Science Society of America Journal,** 53, 1718-1722.

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

Schachtman, D. P., Robert, J. R. & Ayling, S. M. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Journal of Plant Physiology,** 116, 447-453.

Shane, M. W., Vos, d. M., Roock, D. S. & Mambers, H. 2003. Shoot P status regulates cluster-root growth and citrate in Lupinus albus grown in divided root system. **Plant Cell and Environment,** 26, 265-273.

Smith, F. W., Jackson, W. A. & Van den Berg, P. J. 1990. Internal phosphorus flows during development of phosphorus stress in Stylosanthes hamata. **Australian Journal of Plant Physiology,** 17, 451-464.

The University of Hawaii. 2007. **Phosphorus.** [Online]. Available http://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/c_nutrients02.aspx (7 November 2016).

Tisdale, S. L. & Nelson, W. L. 1975. **Soil Fertility and Fertilizers**. New York: Collier Macmillan Publication, London.

Vance, C. P., Uhde-Stone & Allan, D. L. 2003. Phosphate acquisition and use: Critical adaptations by plant for securing a non renewable resources. **New Phytologist,** 157, 423-447.

Wang, B. L., Shen, J. B., Zhang, W. H. & Zhang, F. S. 2007. Citrate exudation from white lupin induced by phosphorus deficiency differs from that induced by aluminum. **New Phytologist,** 176, 581-589.

Wasaki, J., Kojima, S., Maruyama, H., Haase, S., Osaki, M. & Kandelar, E. 2008. Location of acid phosphatase activities in the roots of white lupin plants grown phosphorus-deficient conditions. **Soil Science and Plant Nutrition,** 54, 95-102.

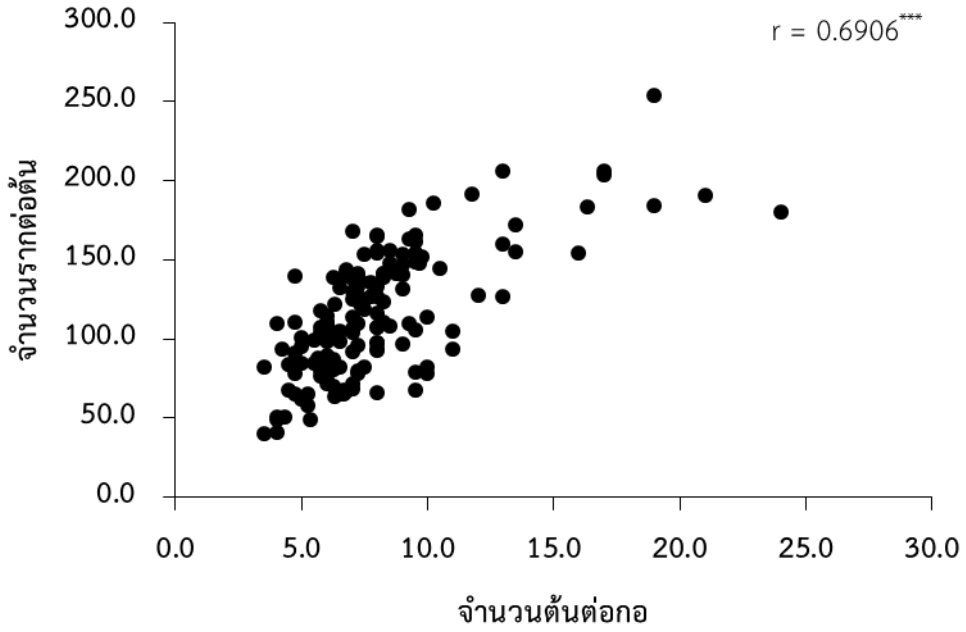
Watt, M. & Evane, R. 1999. Proteoid roots: Physiology and development. **Plant Physiology,** 121, 317-323.

Williams, C. H. 1975. **The chemical nature of sulphur compound in soils.** In: KD McLachlin (Editor), Sulphur in Australian Agriculture. Sidney University Press: Sydney.

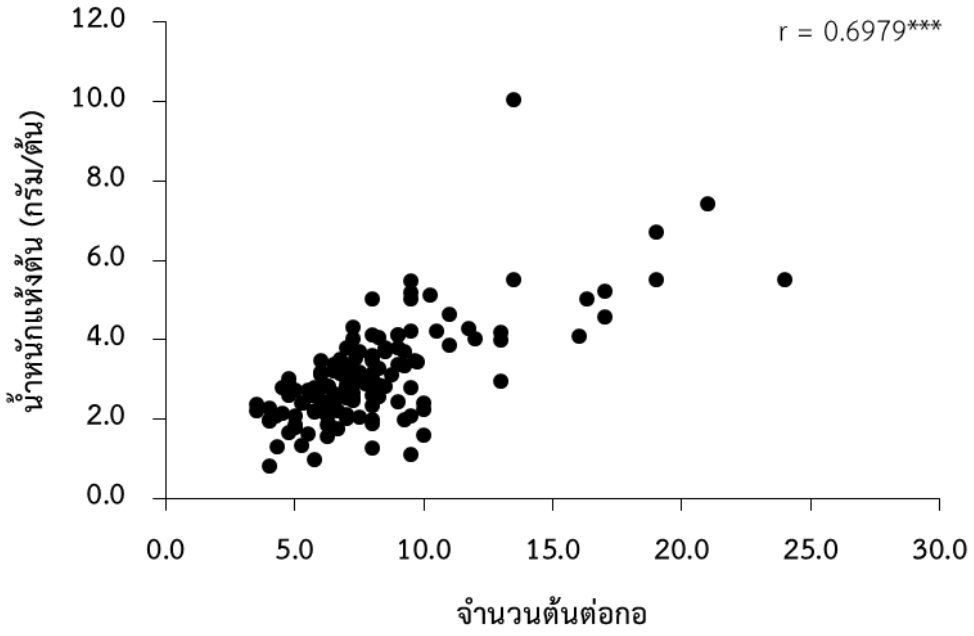
Wissuwa, M., Wegner, J., Ae, N. & Yano, M. 2002. Substitution mapping of Pup1: amajor QTL increasing phosphorus uptake of rice from a phosphorus-deficient soil. **Theor Appl Genet,** 105, 890-897.

Yoshida, S., Forno, D. A., Cock, J. H. & Gomez, K. A. 1976. **Laboratory manual for physiological studies of rice**. IRRI: Philippines.

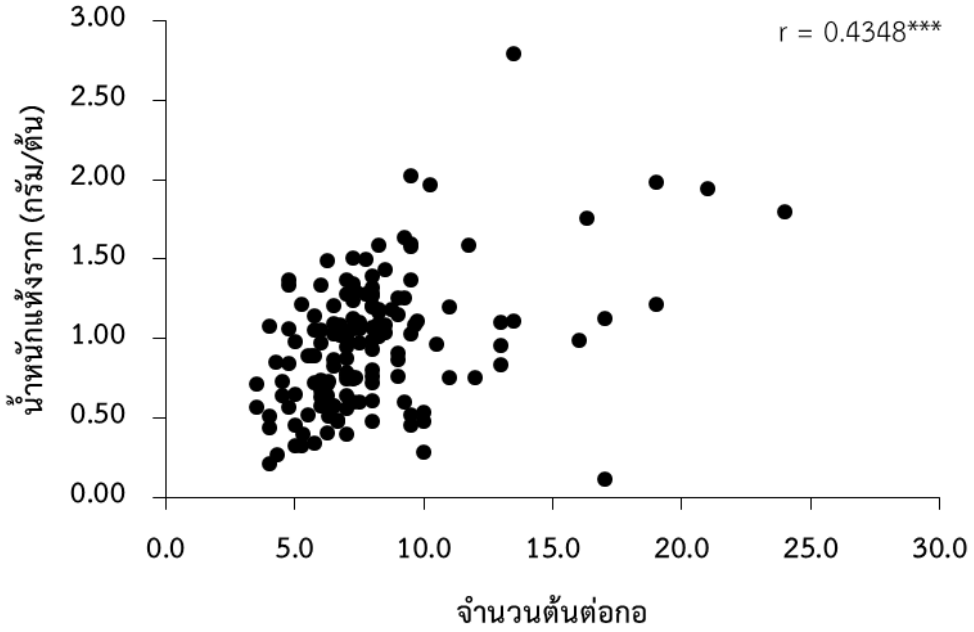
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY



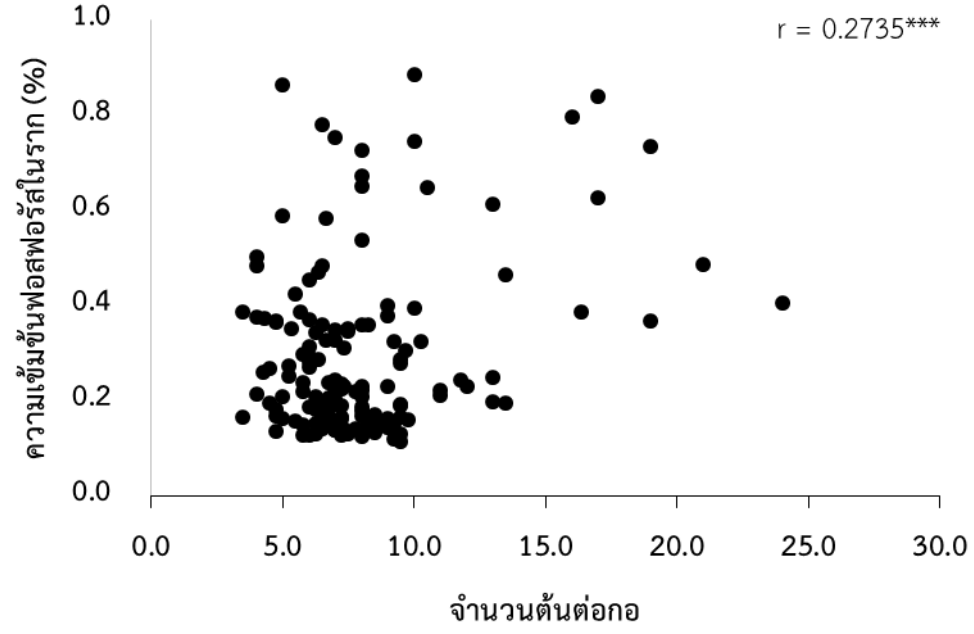
ภาพที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับจำนวนรากต่อต้นของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



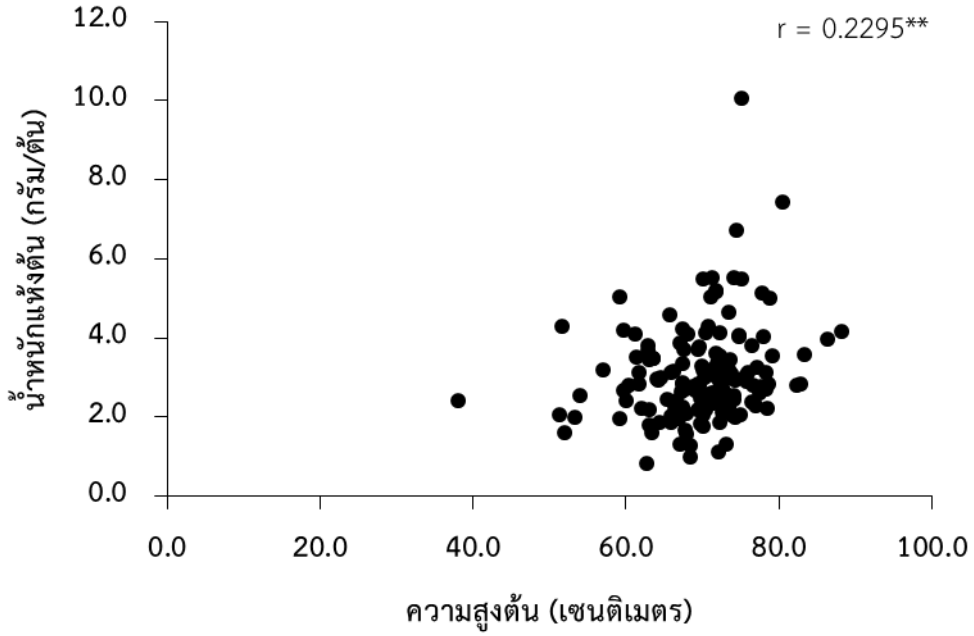
ภาพที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



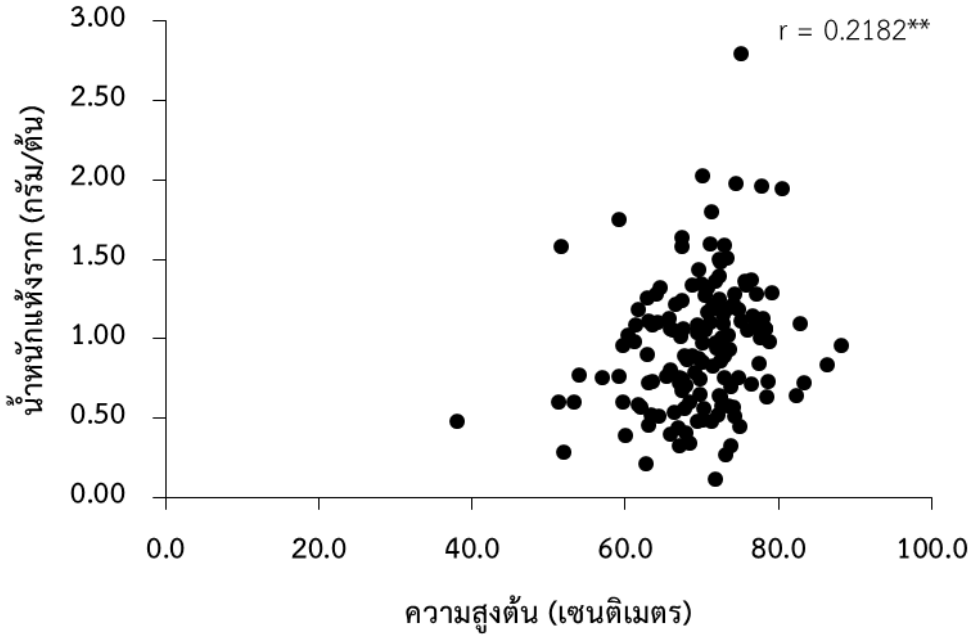
ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



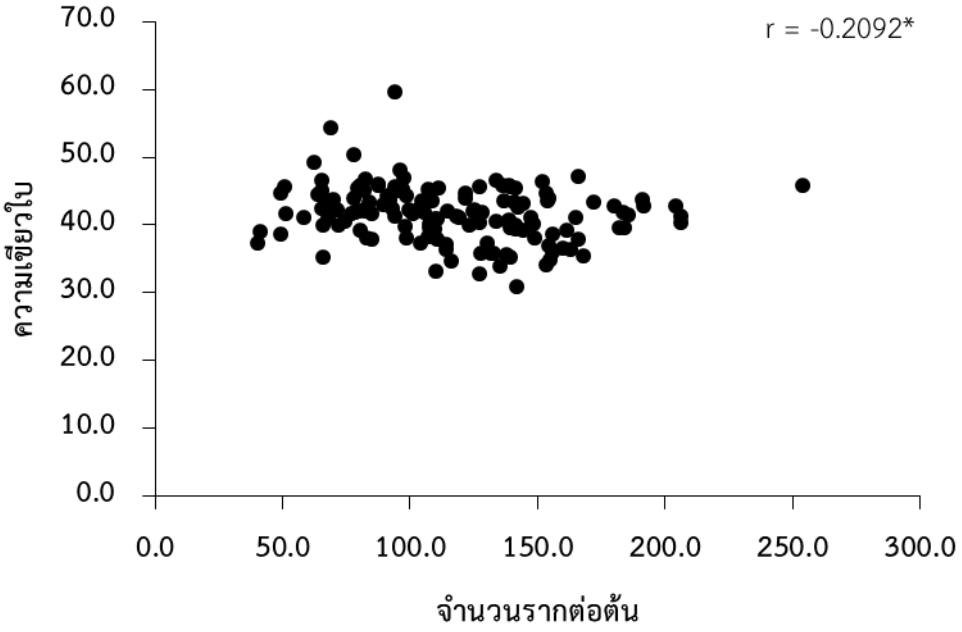
ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



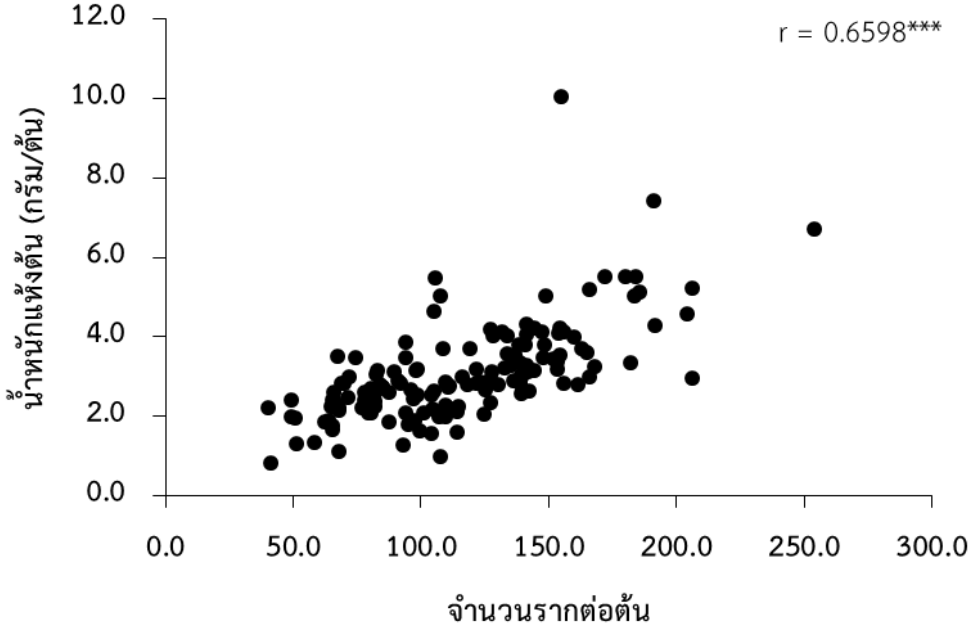
ภาพที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



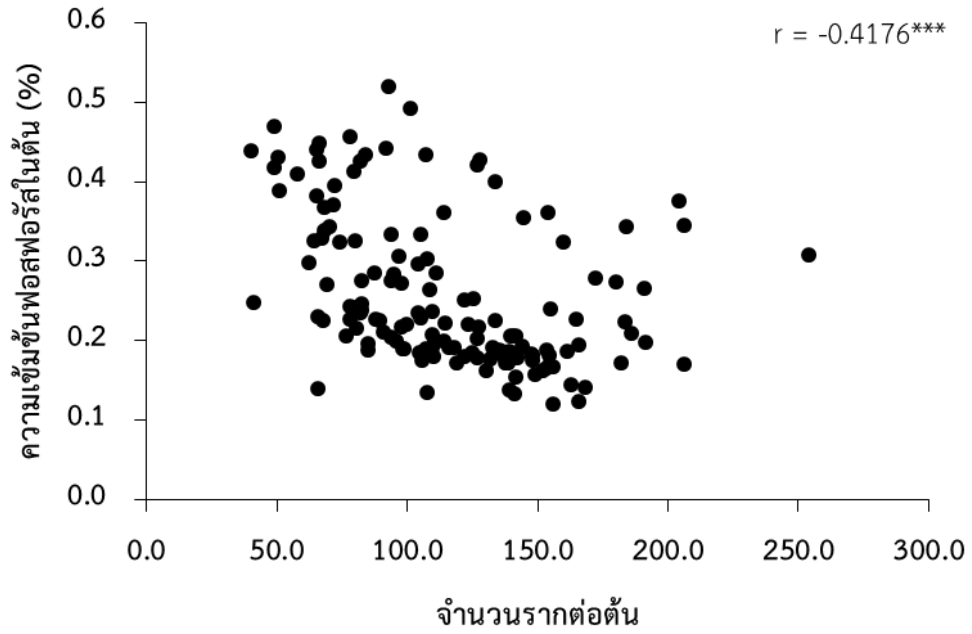
ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



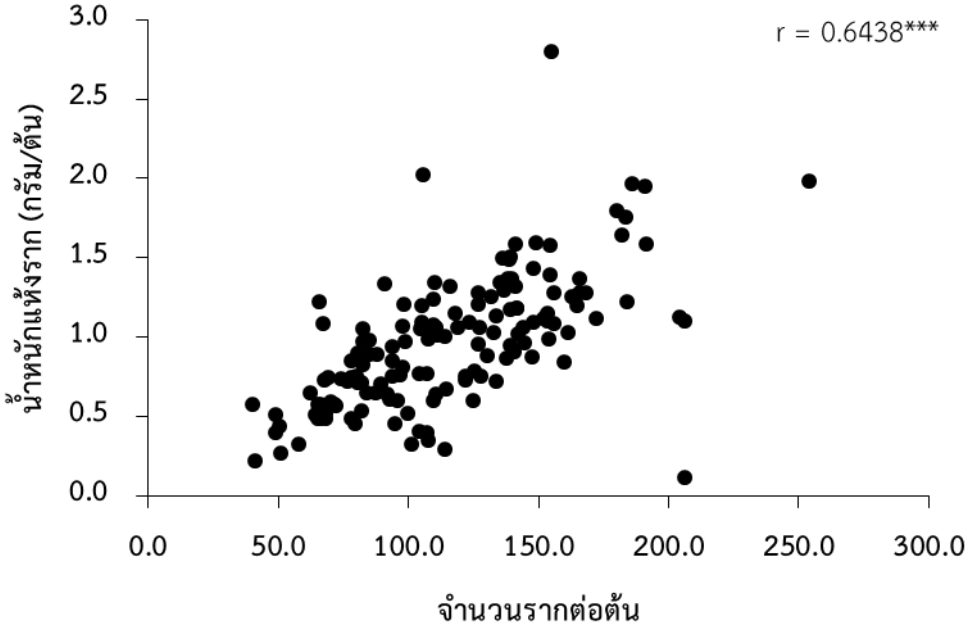
ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความเขียวใบของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



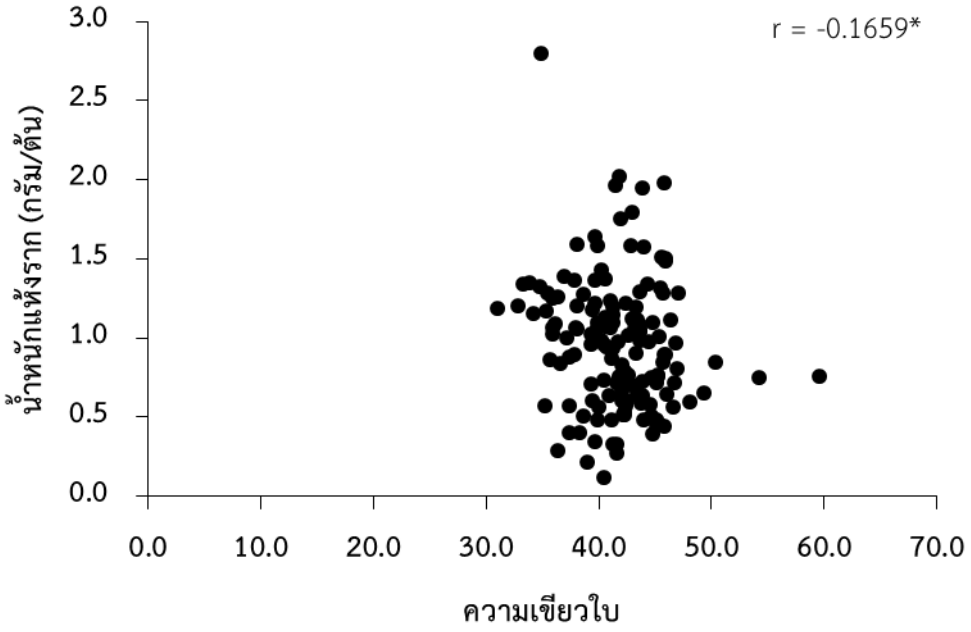
ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



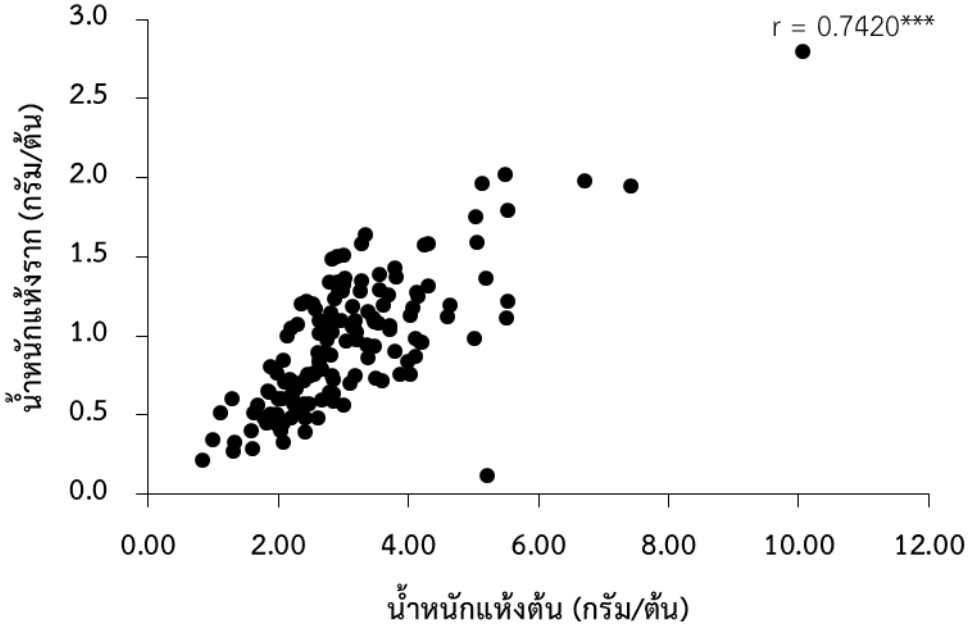
ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต้นต่อกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



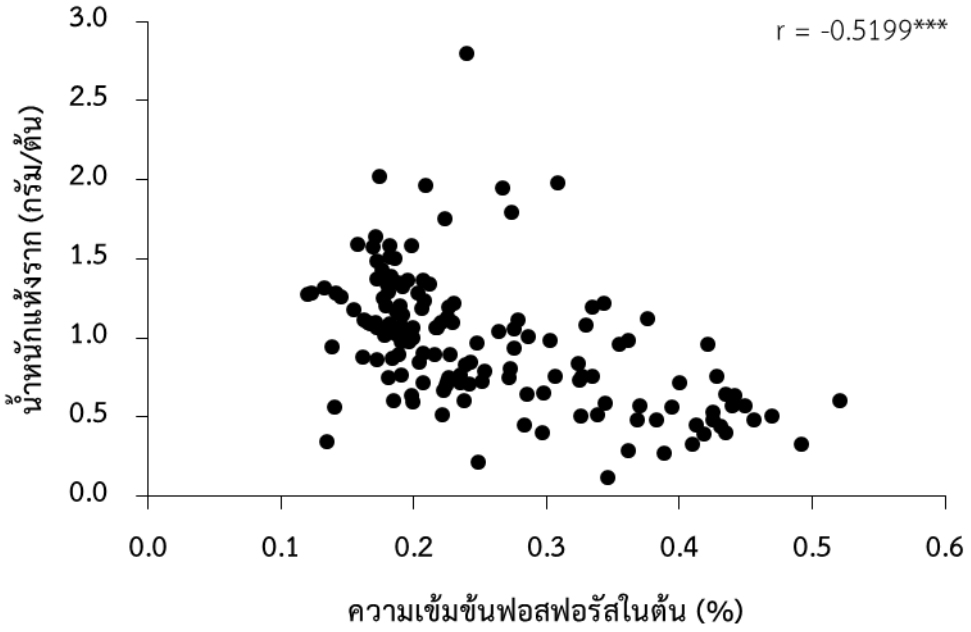
ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต้นต่อกับน้ำหนักแห้งราก (กรัมต่อต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



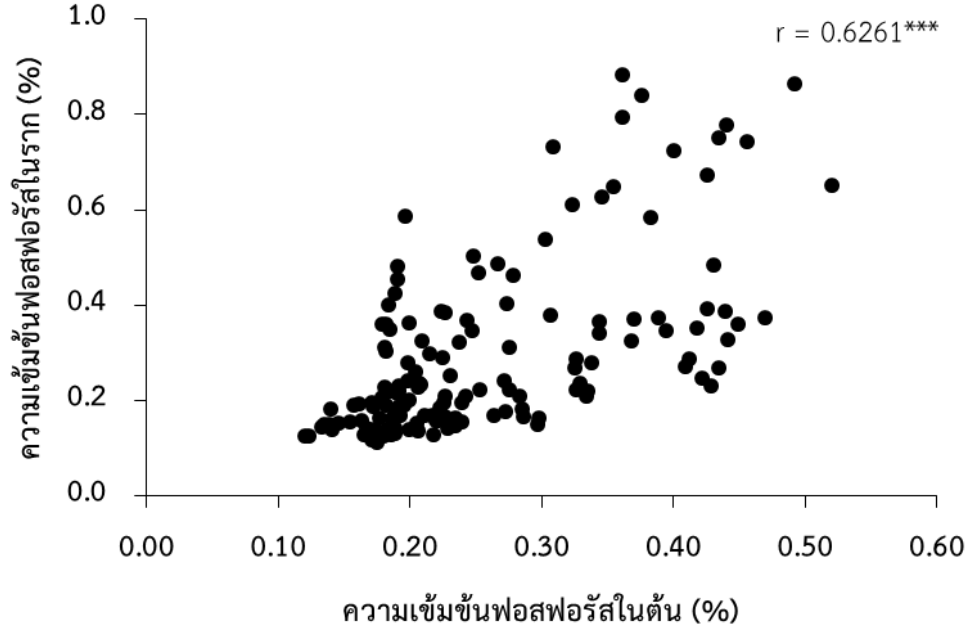
ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความเขียวใบกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



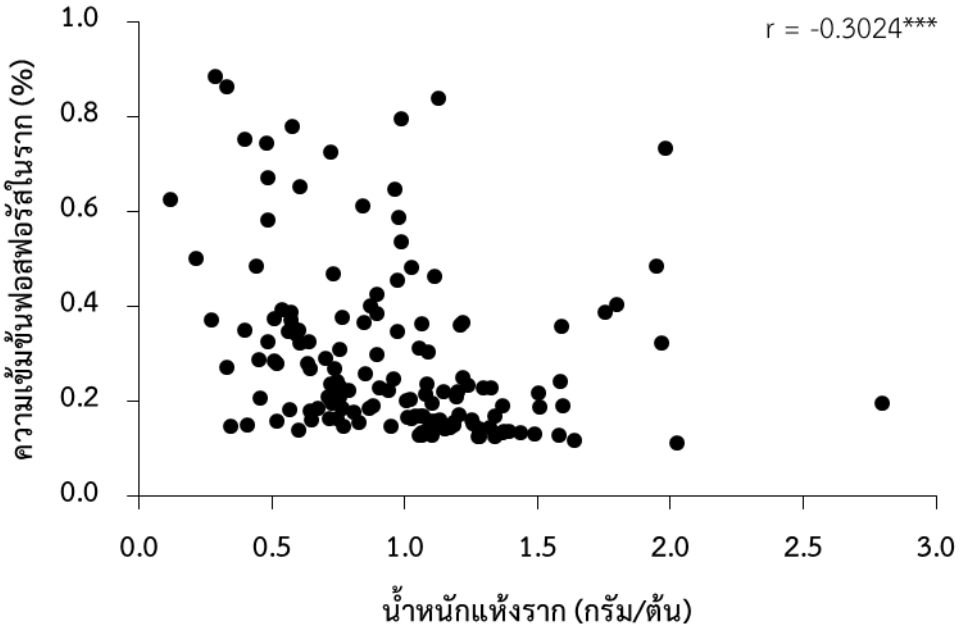
ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



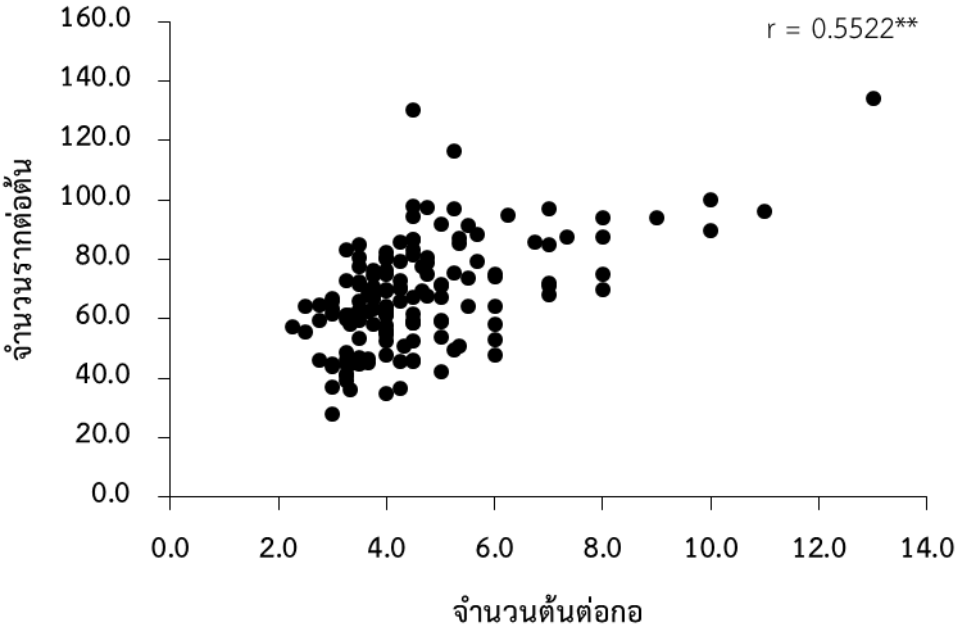
ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



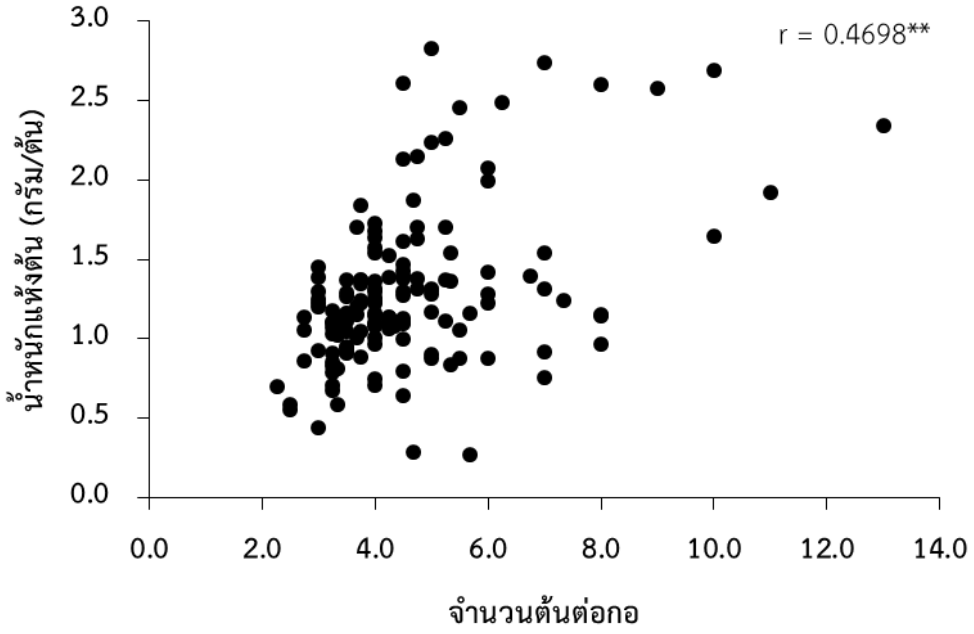
ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 :K-P)



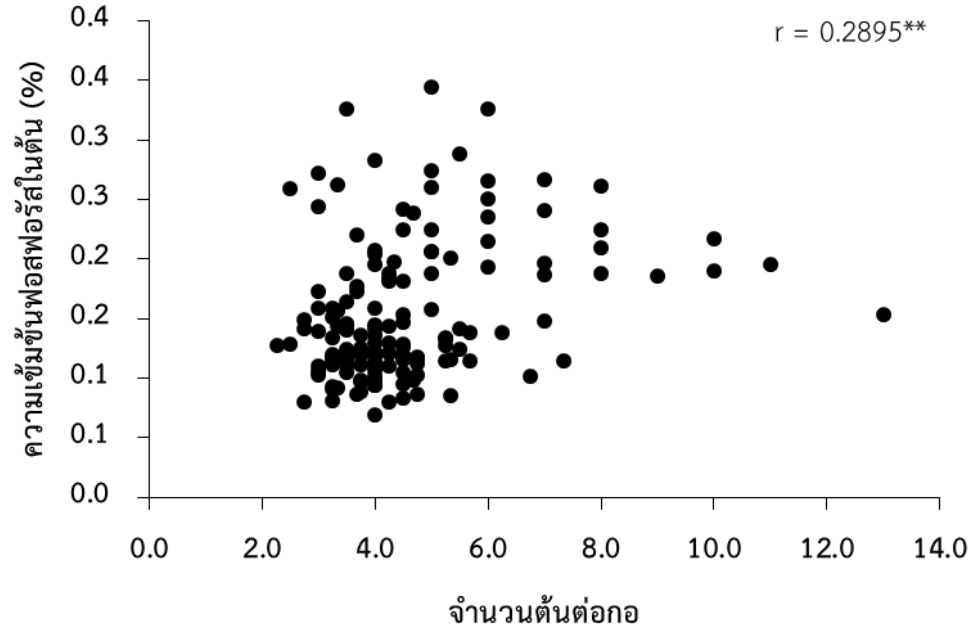
ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



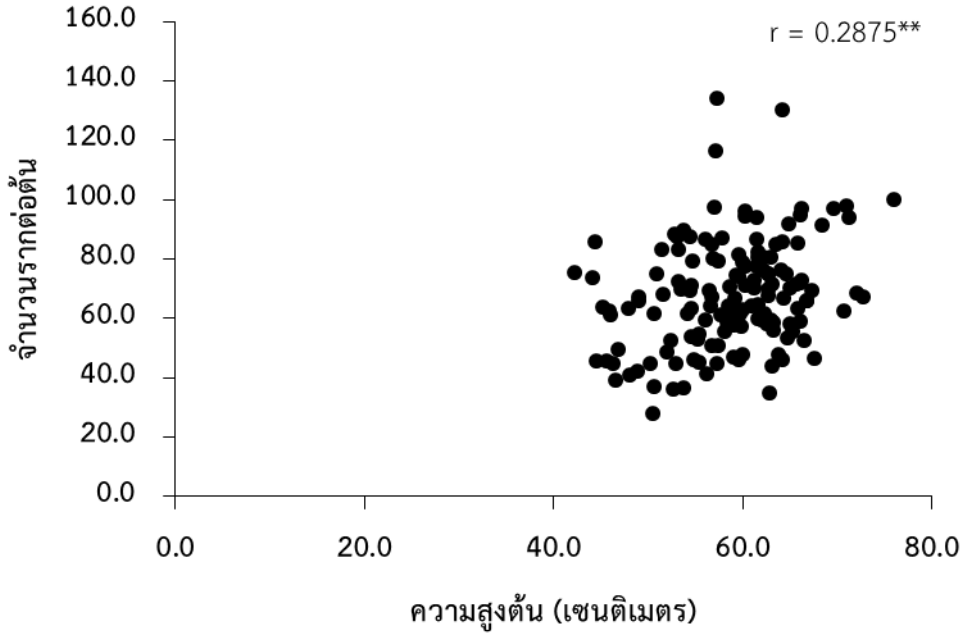
ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับจำนวนรากต่อต้นของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



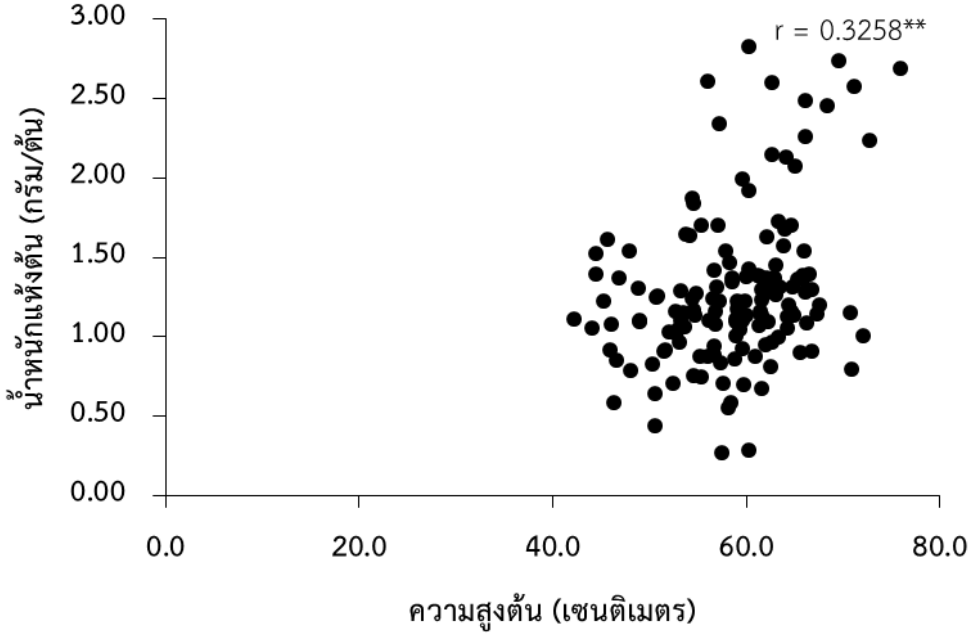
ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



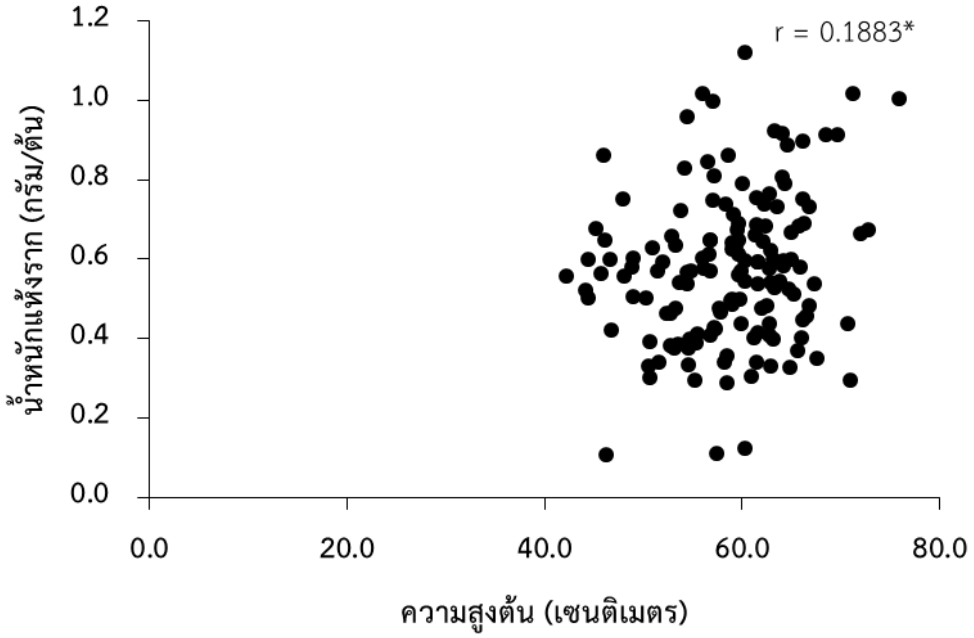
ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



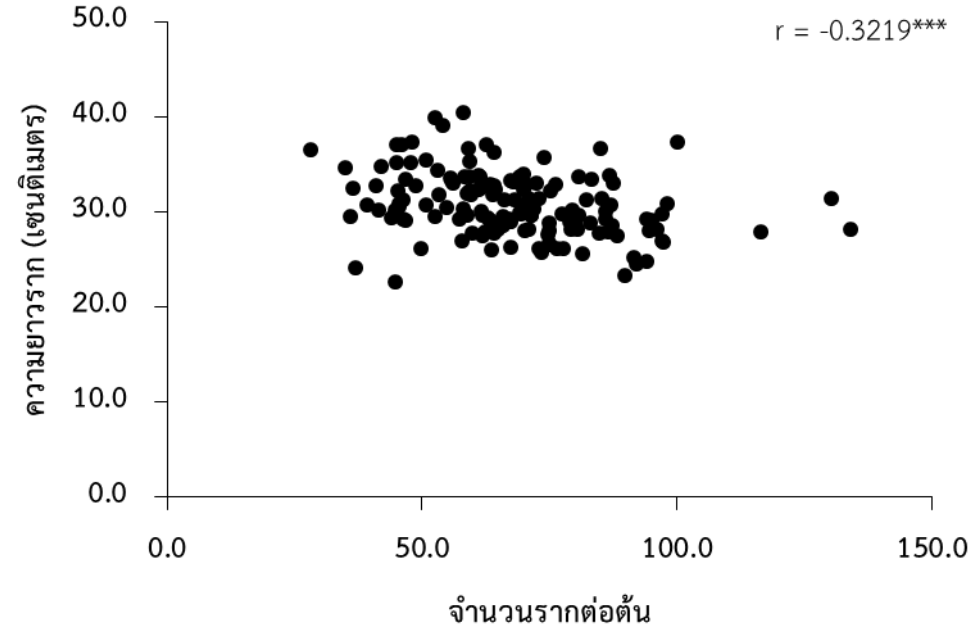
ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับจำนวนรากต่อต้นของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



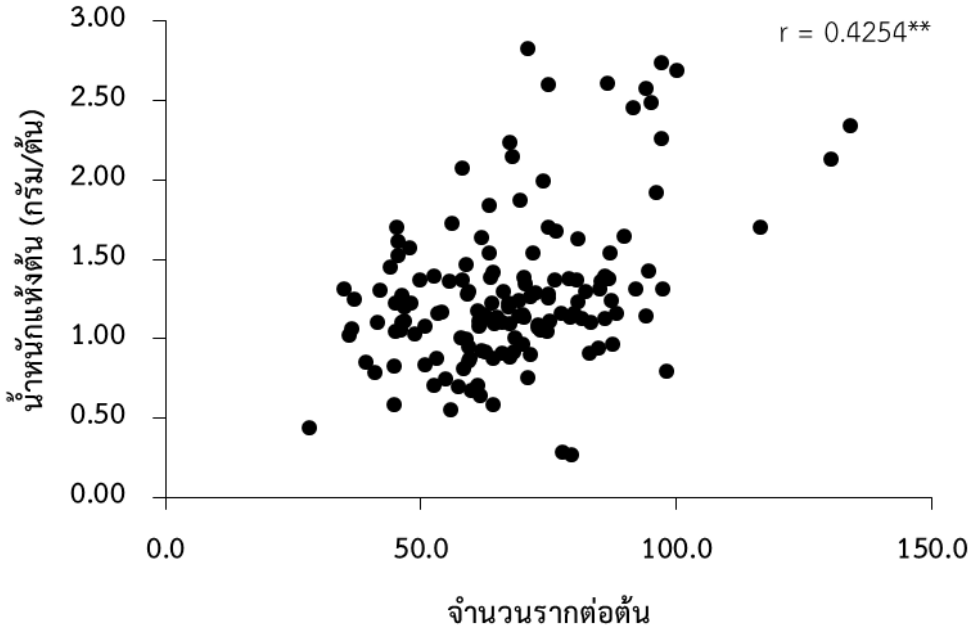
ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



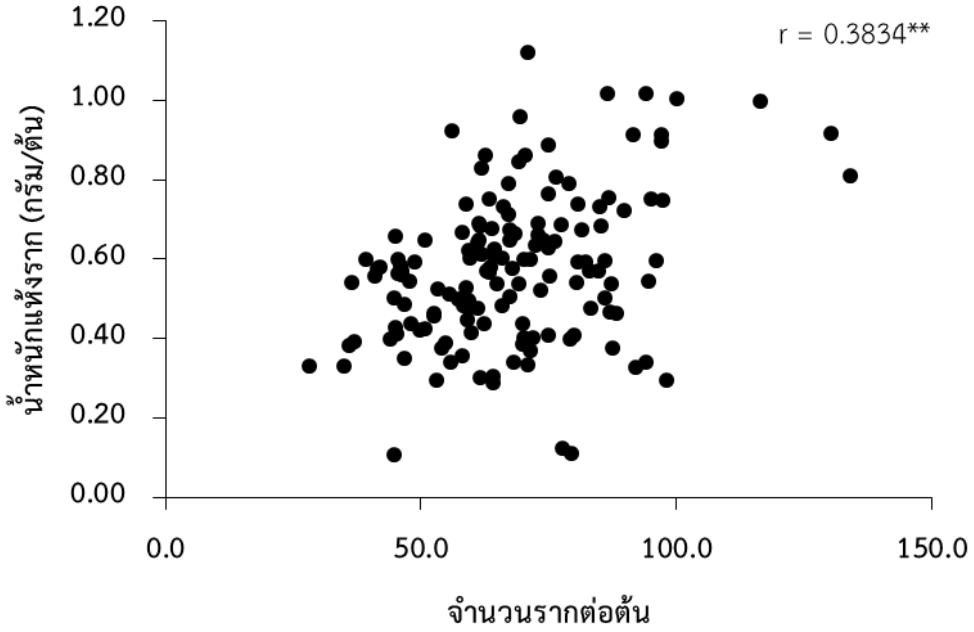
ภาพที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



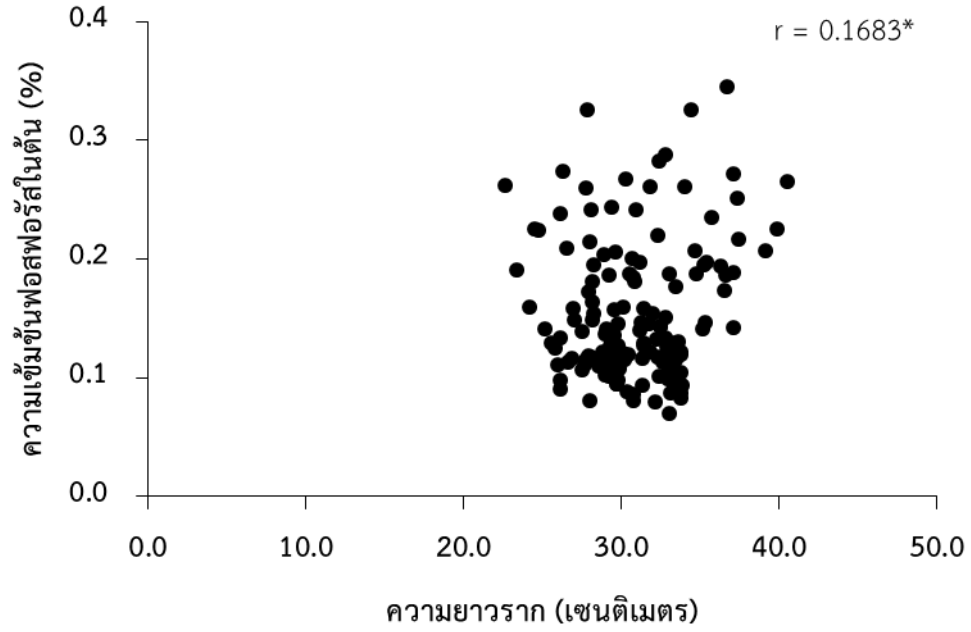
ภาพที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความยาวราก (เซนติเมตร) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



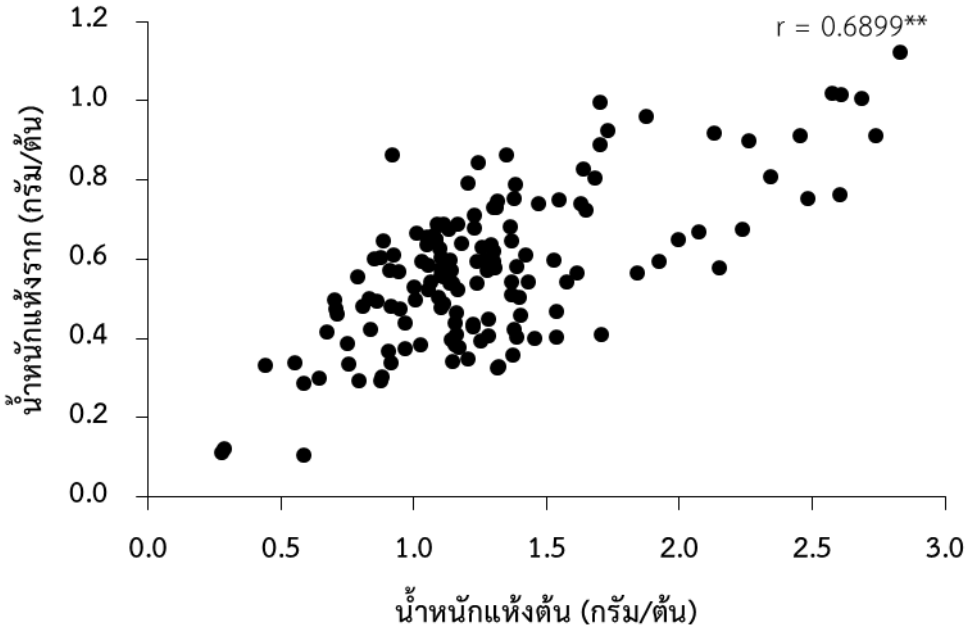
ภาพที่ 23 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



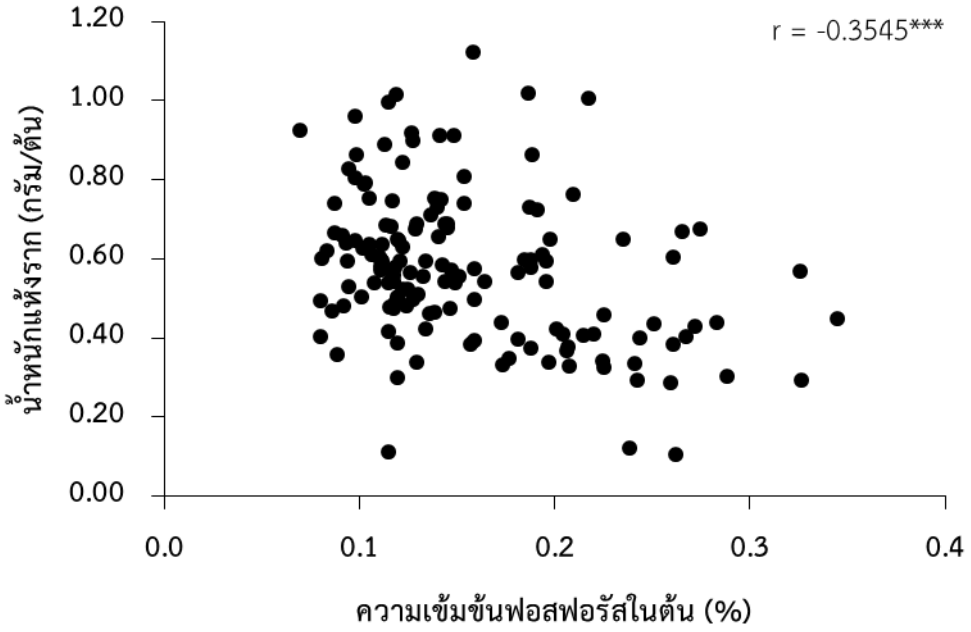
ภาพที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



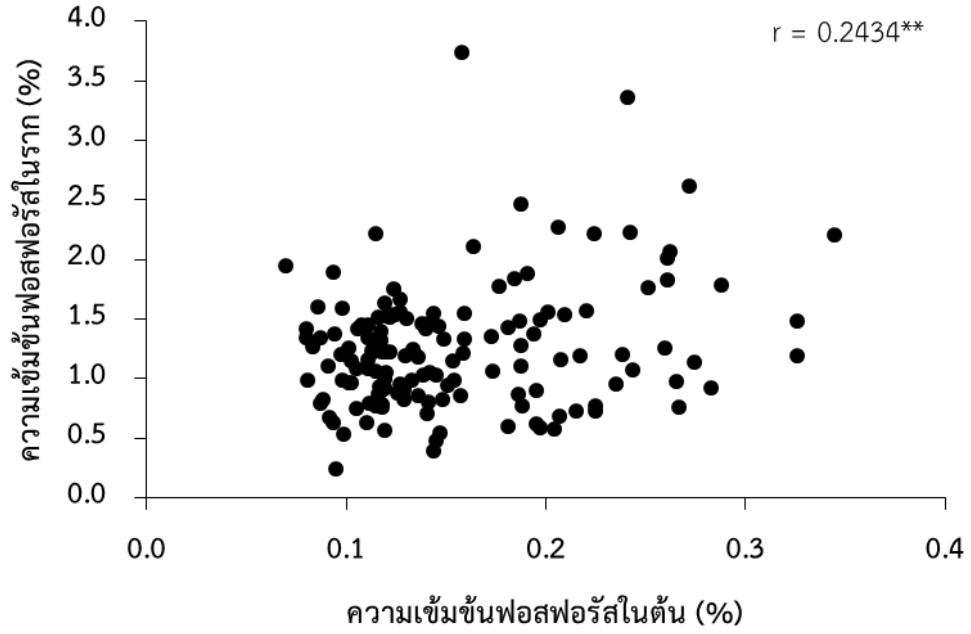
ภาพที่ 25 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวราก (เซนติเมตร) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



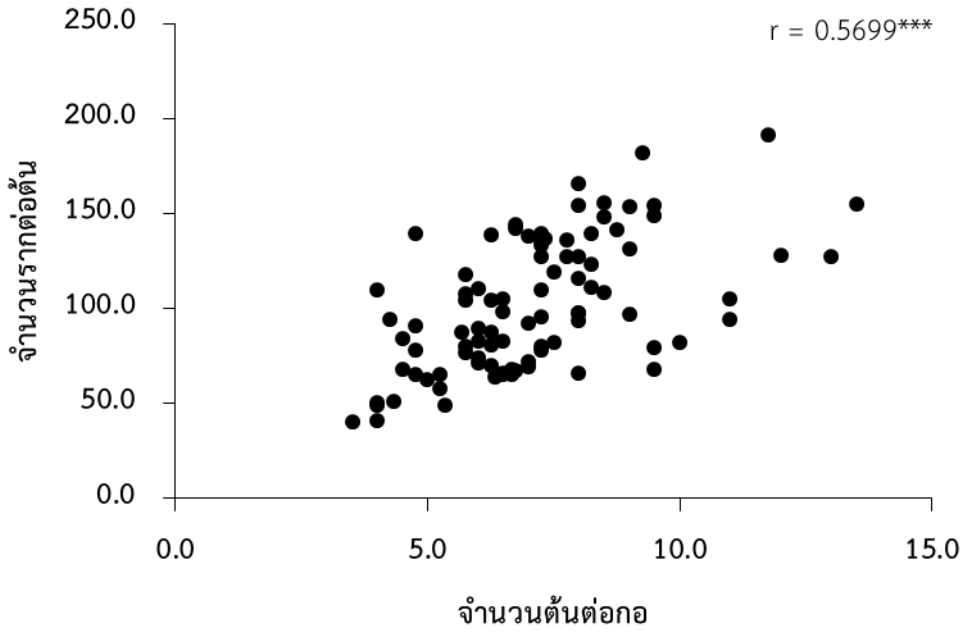
ภาพที่ 26 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



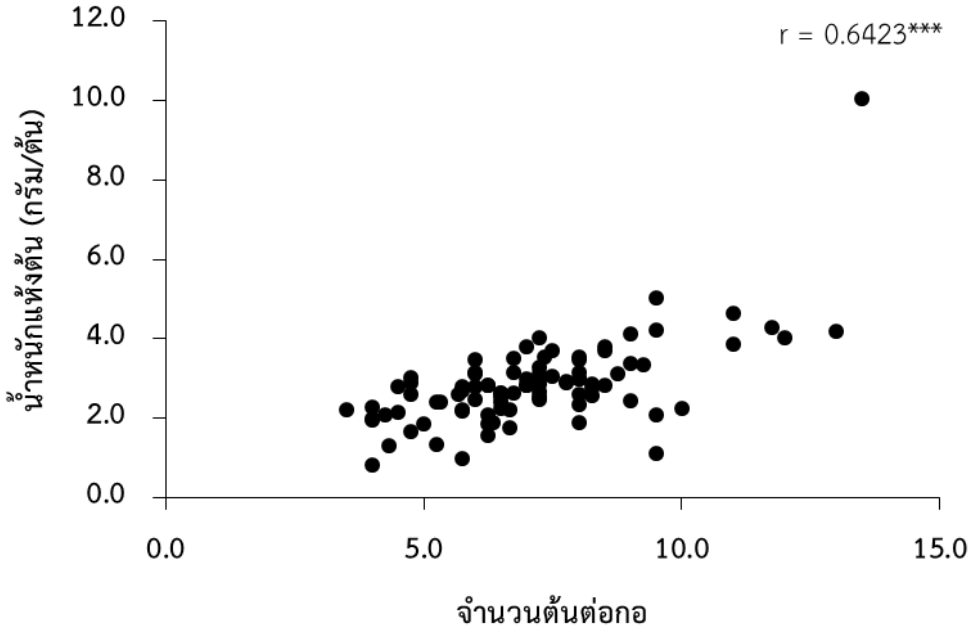
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



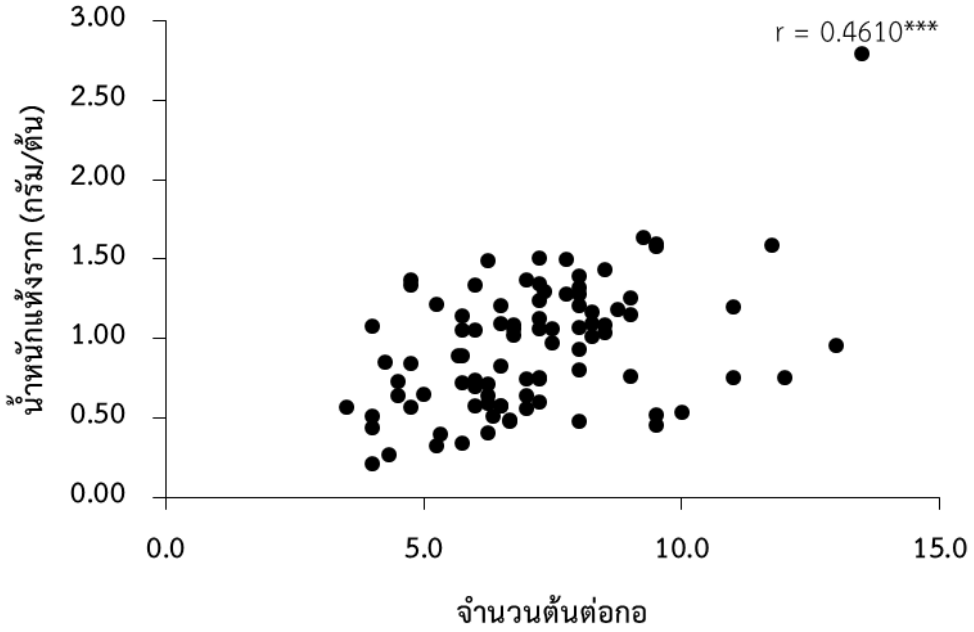
ภาพที่ 28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าว 147 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



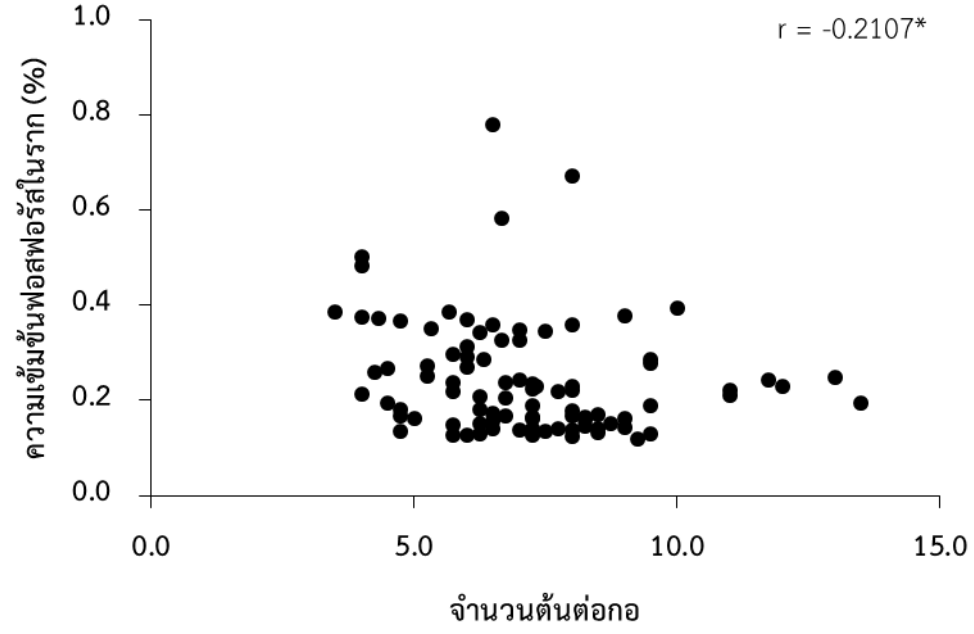
ภาพที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับจำนวนรากต่อต้นของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



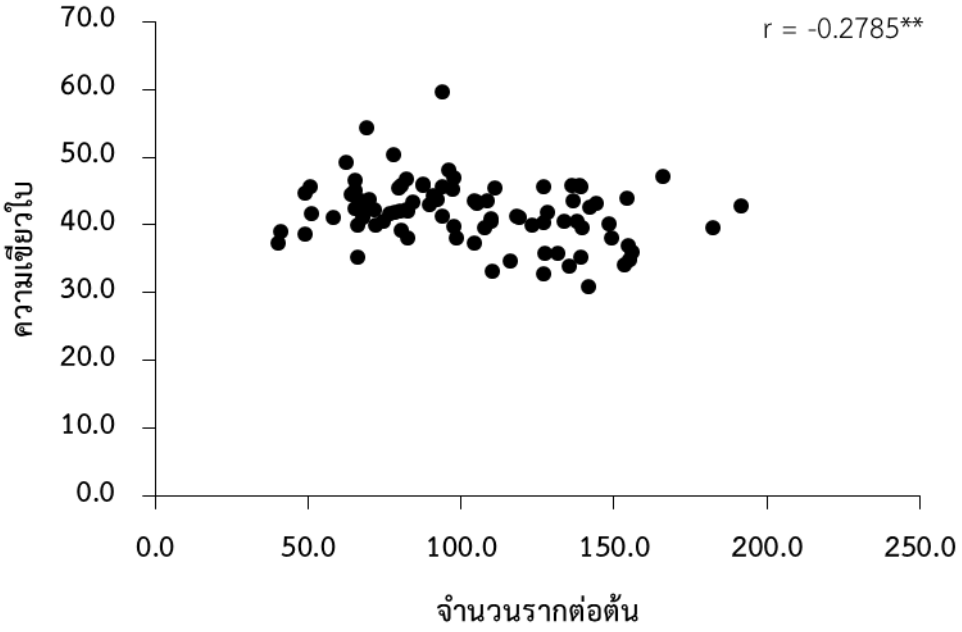
ภาพที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



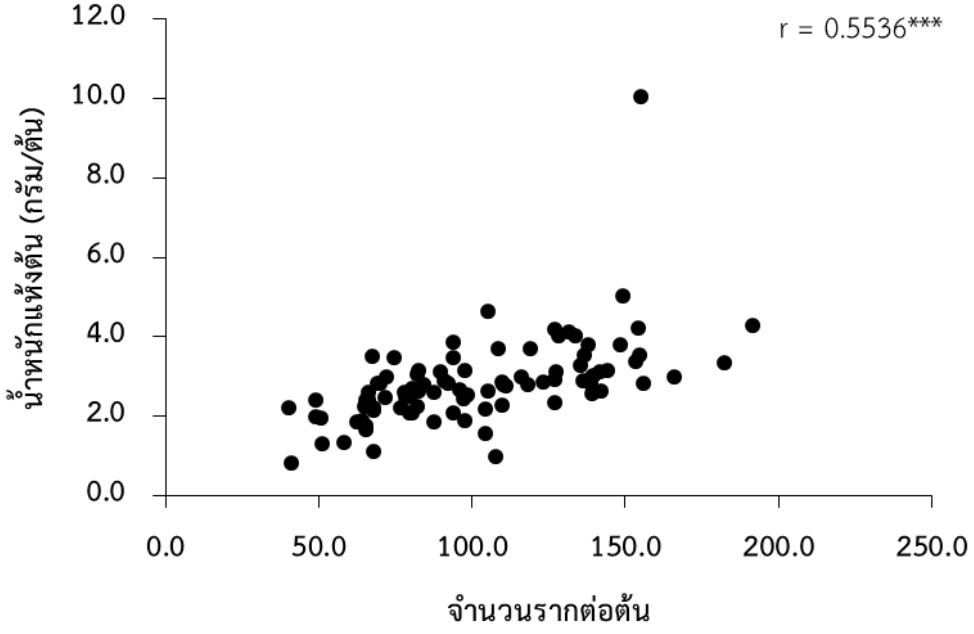
ภาพที่ 31 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



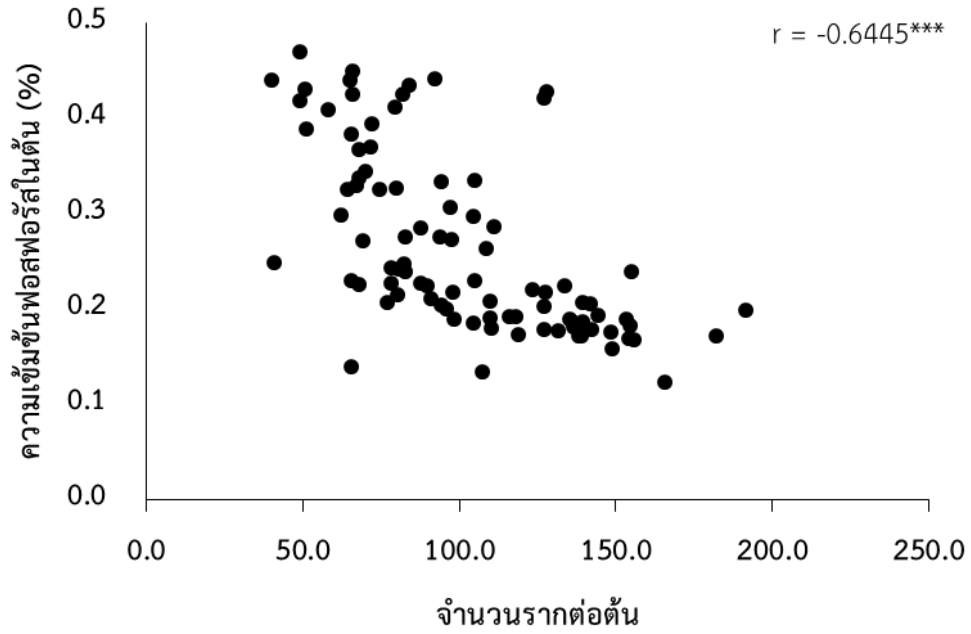
ภาพที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



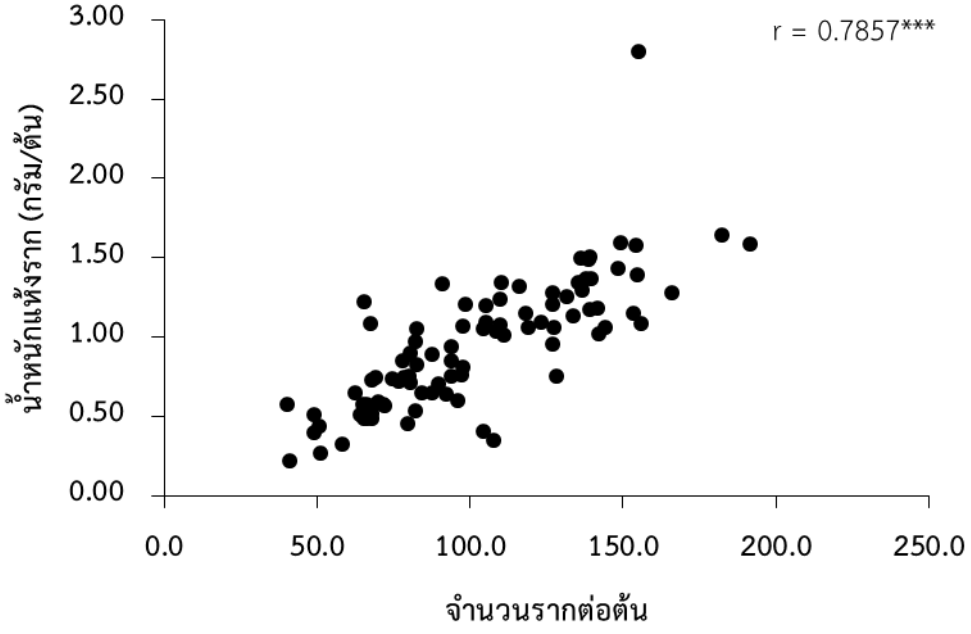
ภาพที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความเขียวใบของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



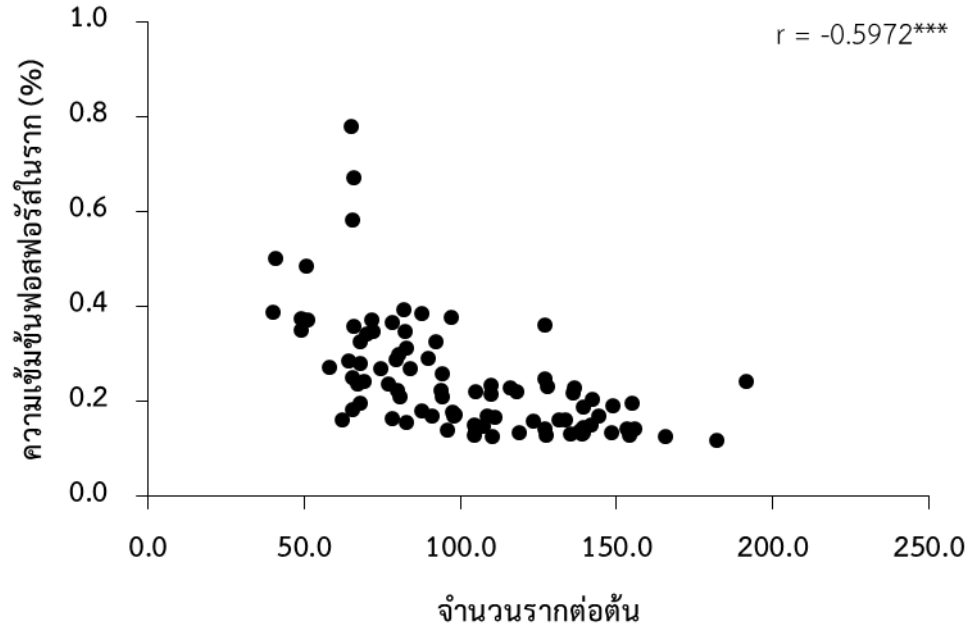
ภาพที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



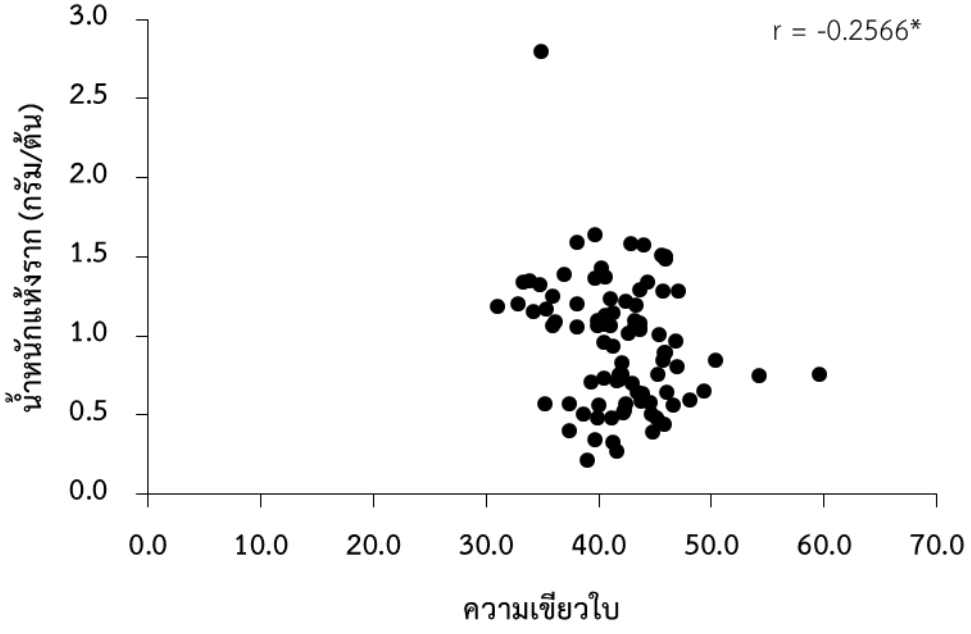
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



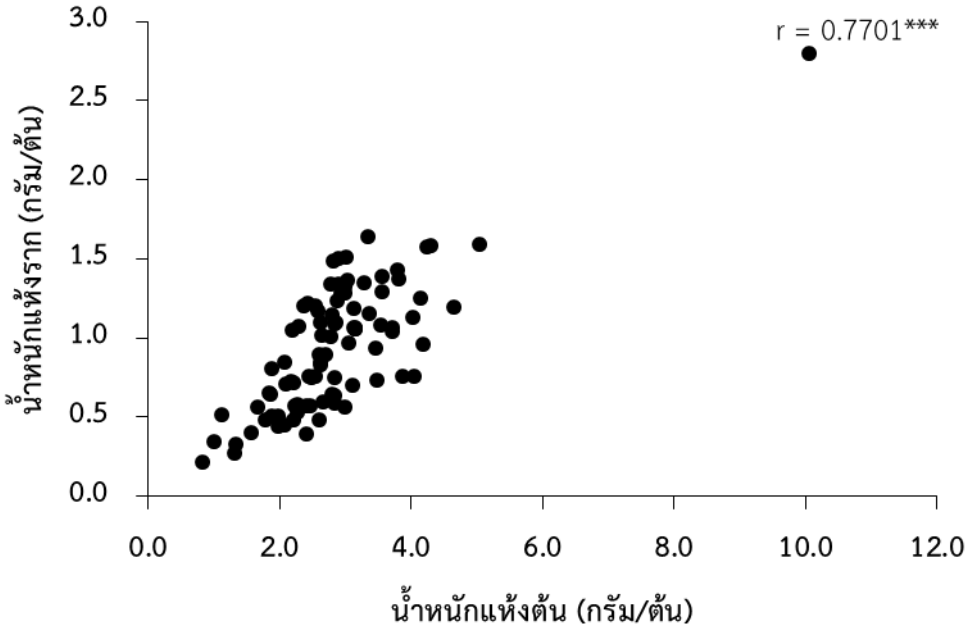
ภาพที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



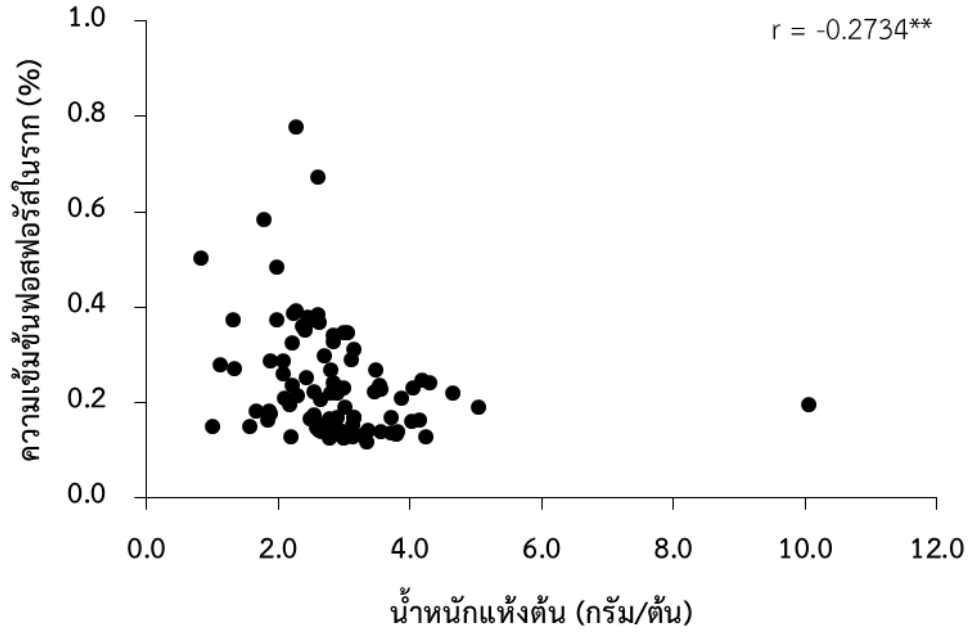
ภาพที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



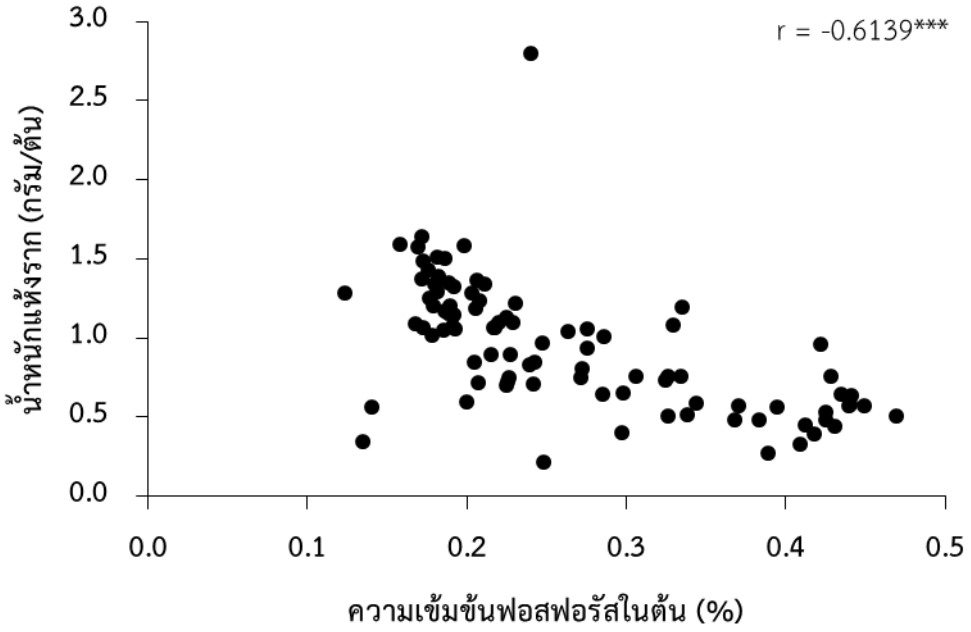
ภาพที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างความเขียวใบกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



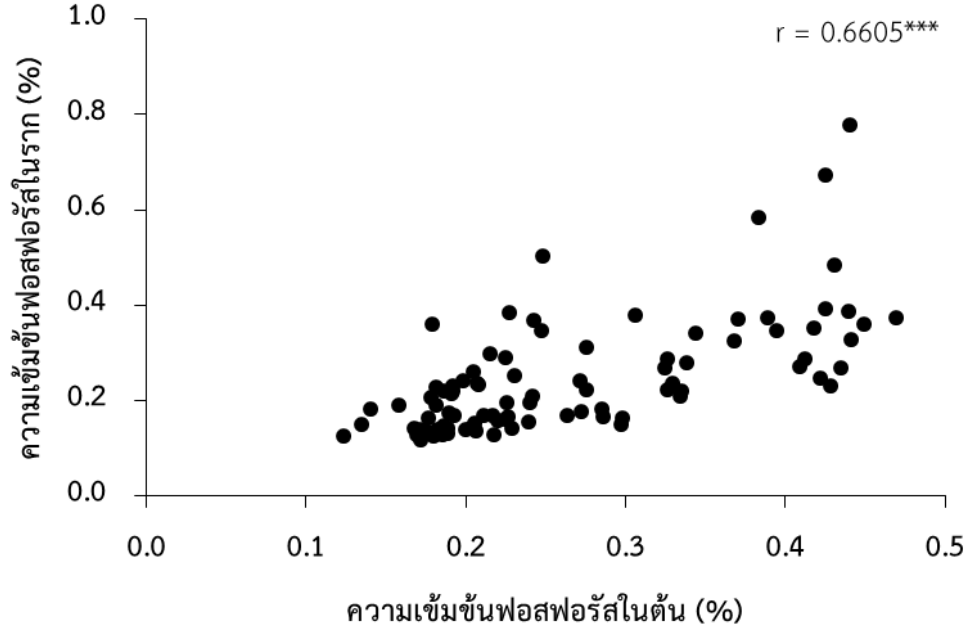
ภาพที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



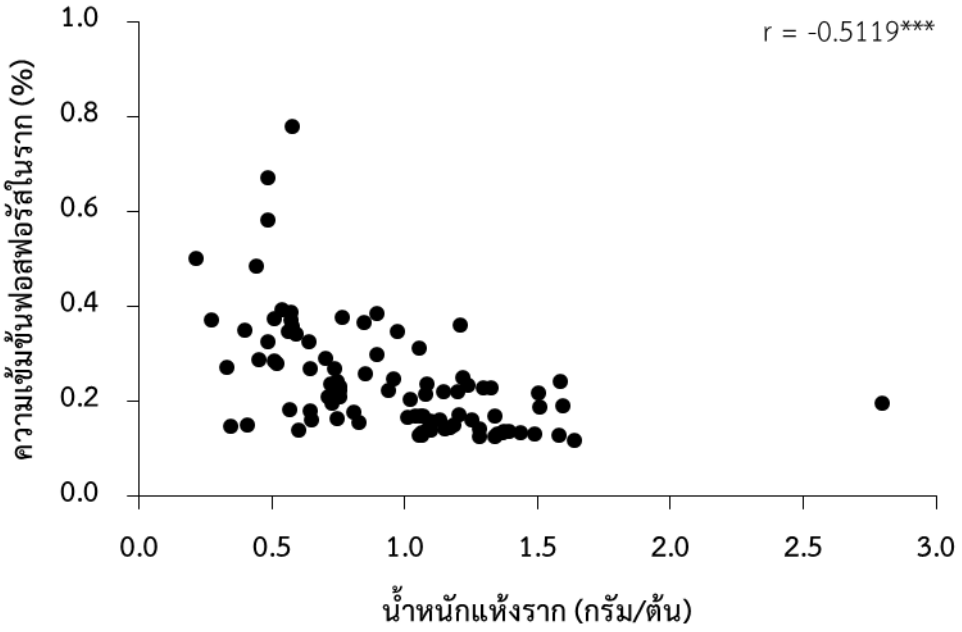
ภาพที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



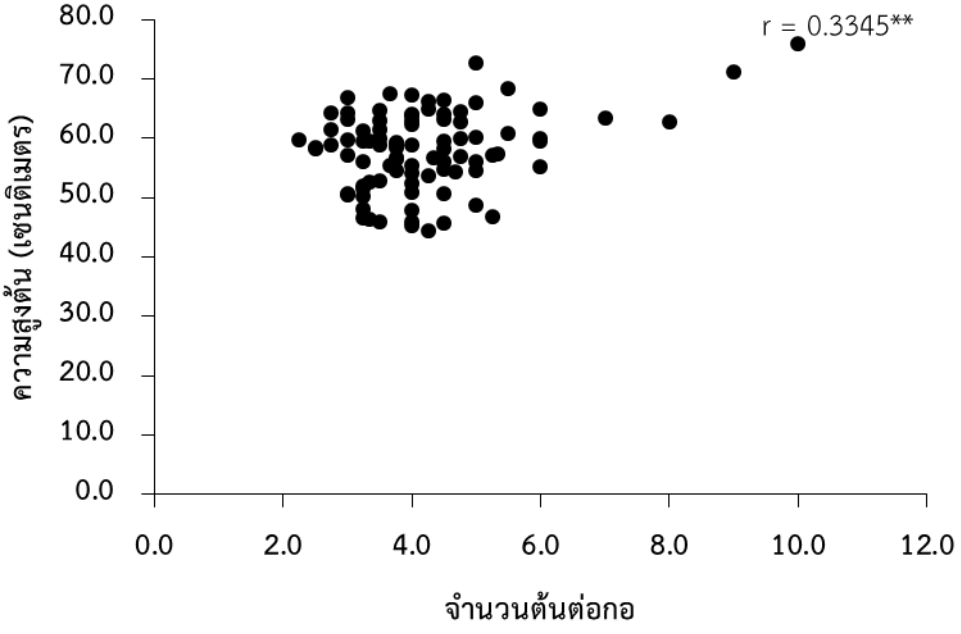
ภาพที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



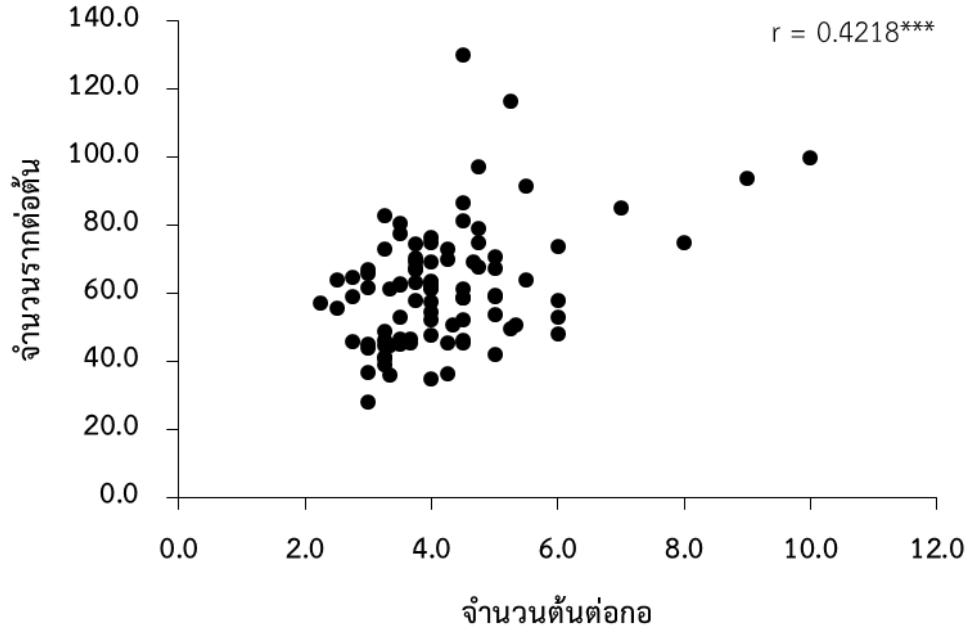
ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



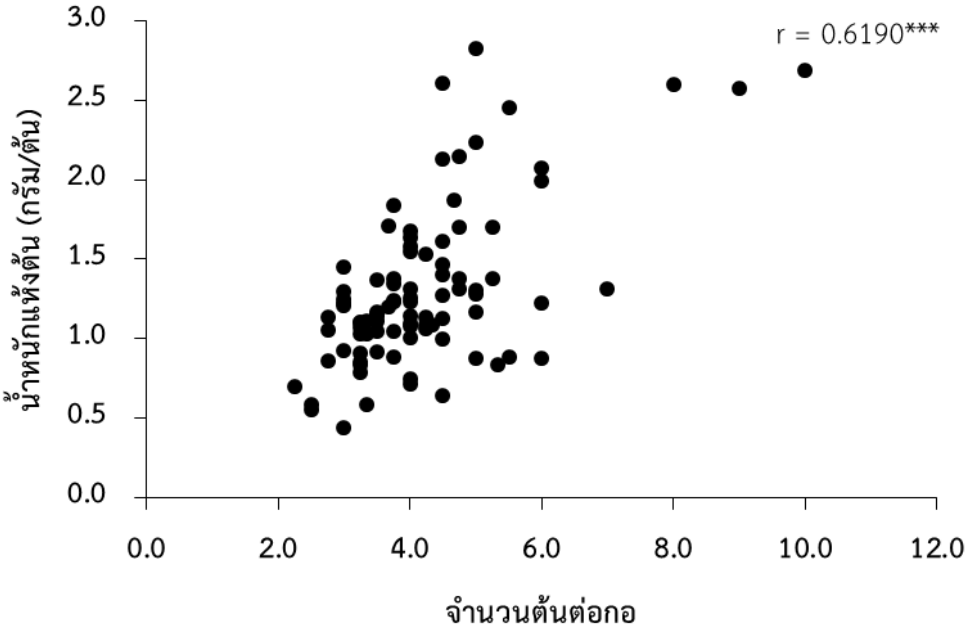
ภาพที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่เป็นประโยชน์ (KH_2PO_4 : K-P)



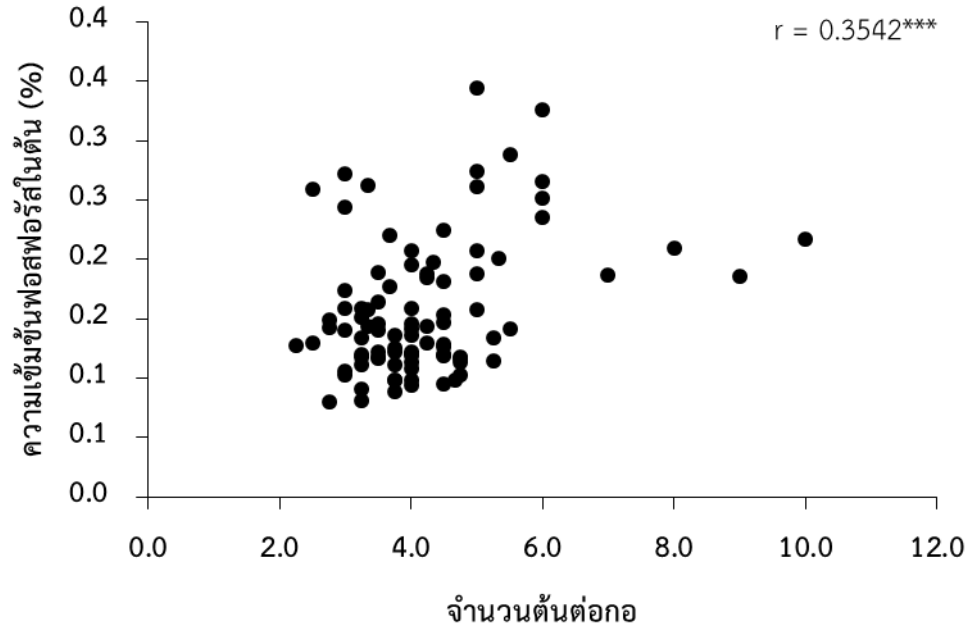
ภาพที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับความสูงต้น (เซนติเมตร) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



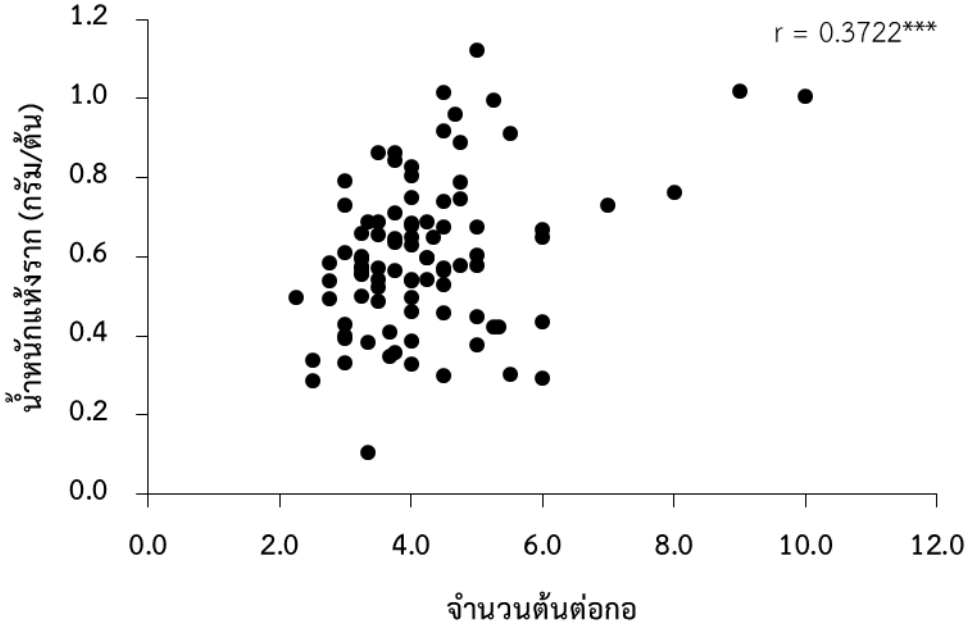
ภาพที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับจำนวนรากต่อต้นของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



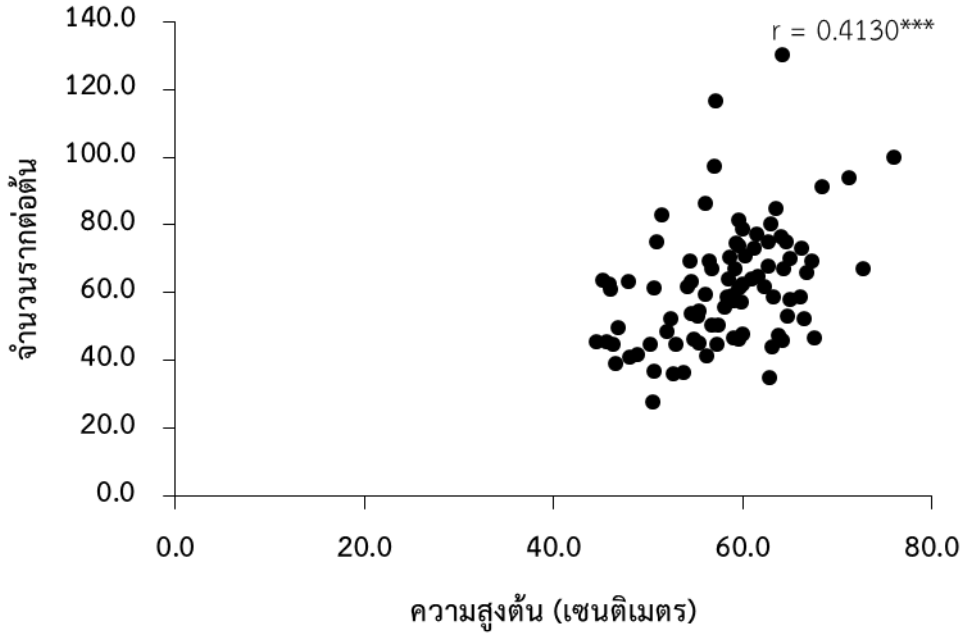
ภาพที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



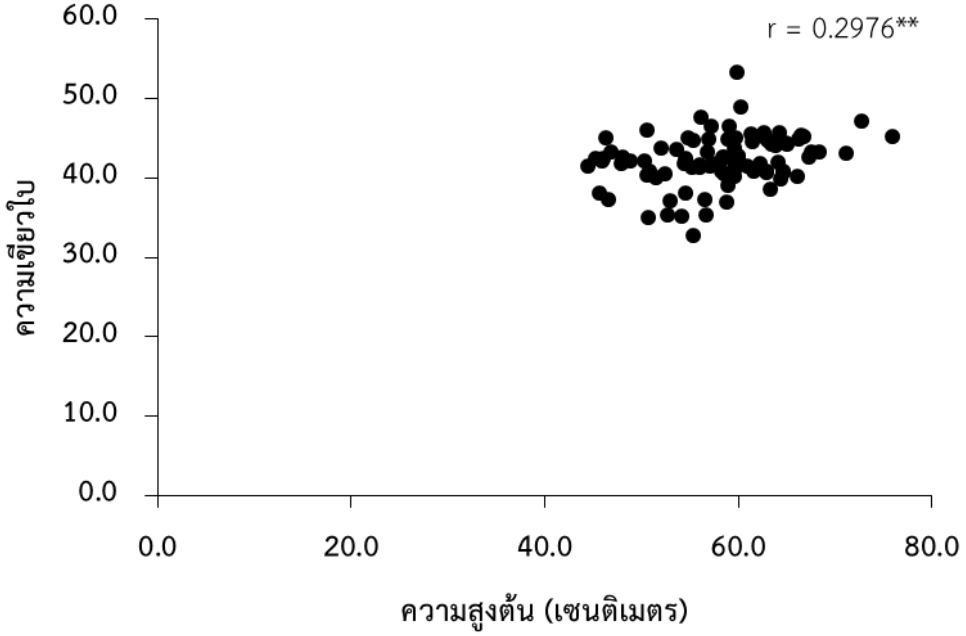
ภาพที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



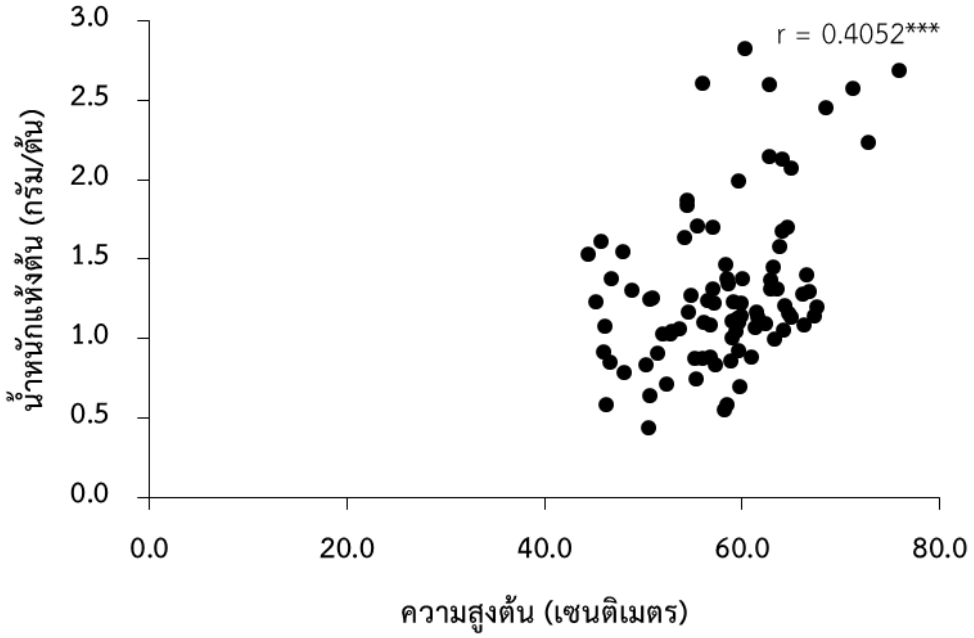
ภาพที่ 48 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนต้นต่อกอกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



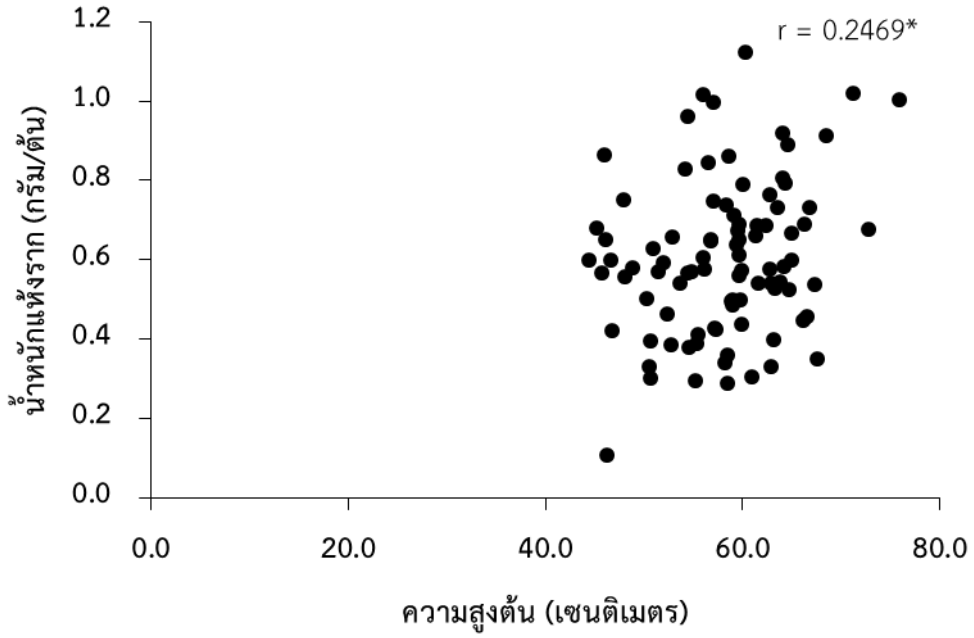
ภาพที่ 49 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับจำนวนรากต่อต้นของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



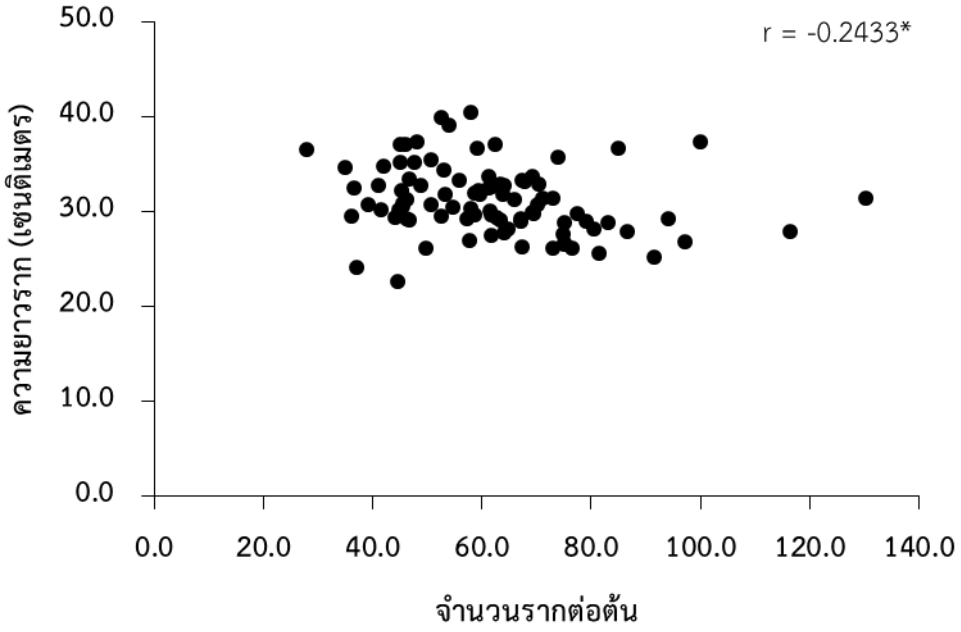
ภาพที่ 50 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับความเขียวใบของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



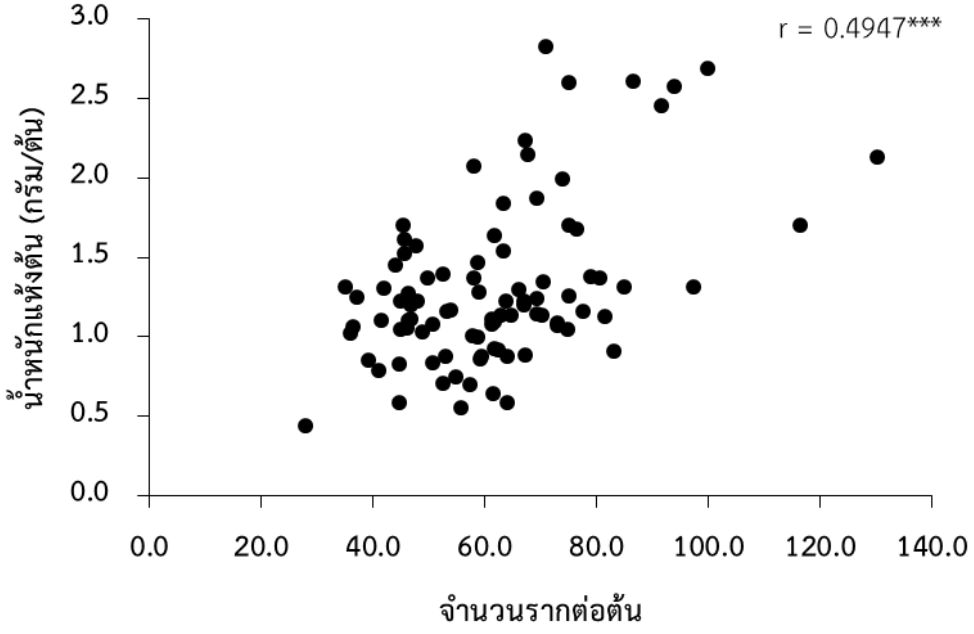
ภาพที่ 51 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



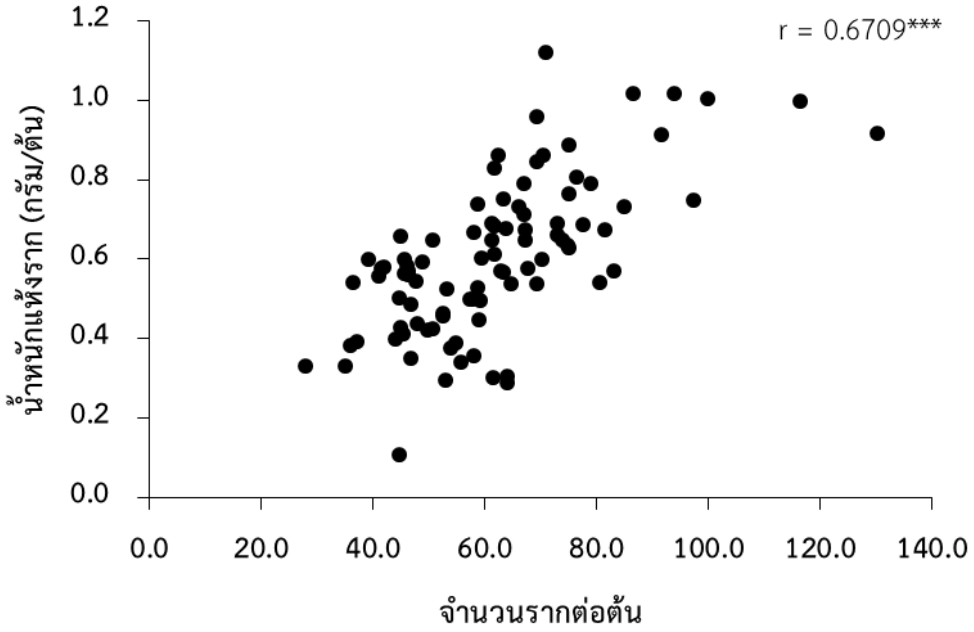
ภาพที่ 52 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงต้น (เซนติเมตร) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



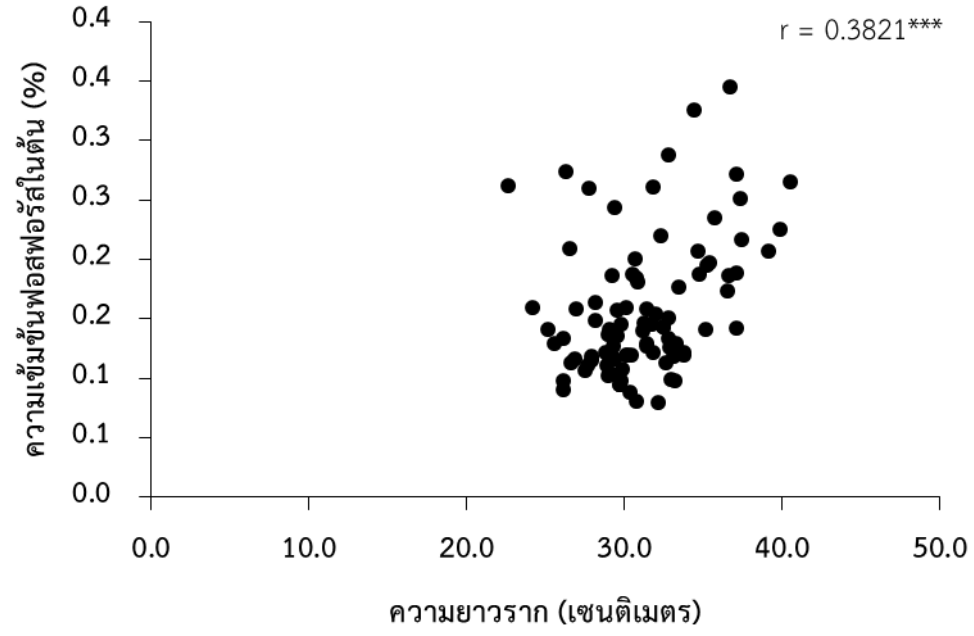
ภาพที่ 53 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับความยาวราก (เซนติเมตร) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



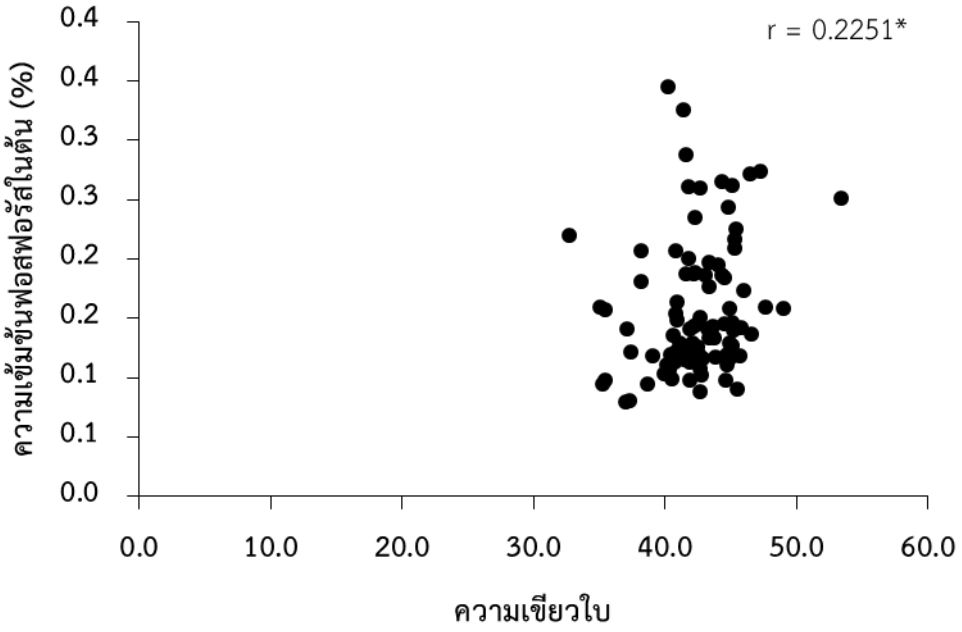
ภาพที่ 54 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



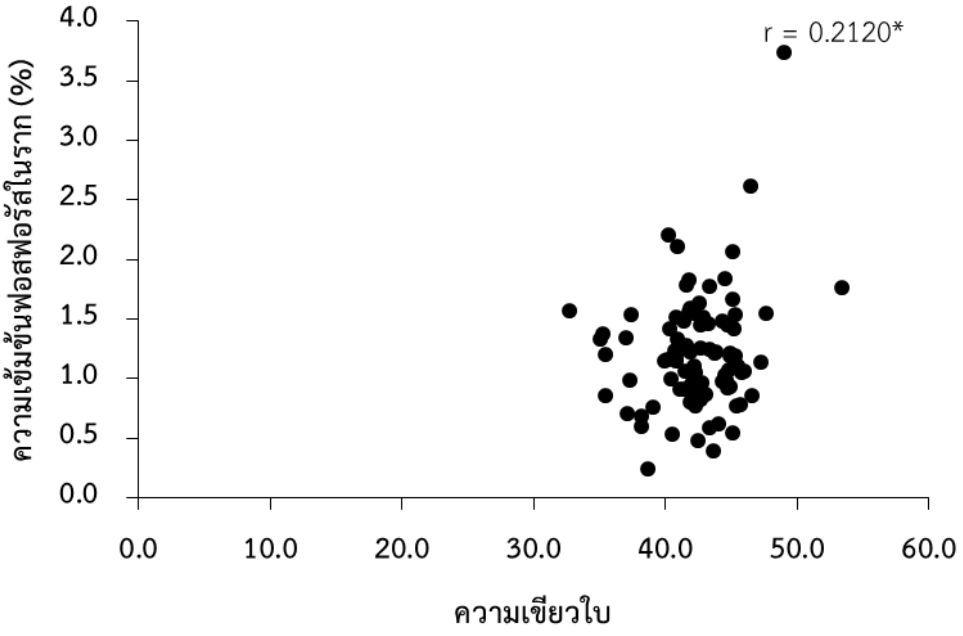
ภาพที่ 55 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรากต่อต้นกับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



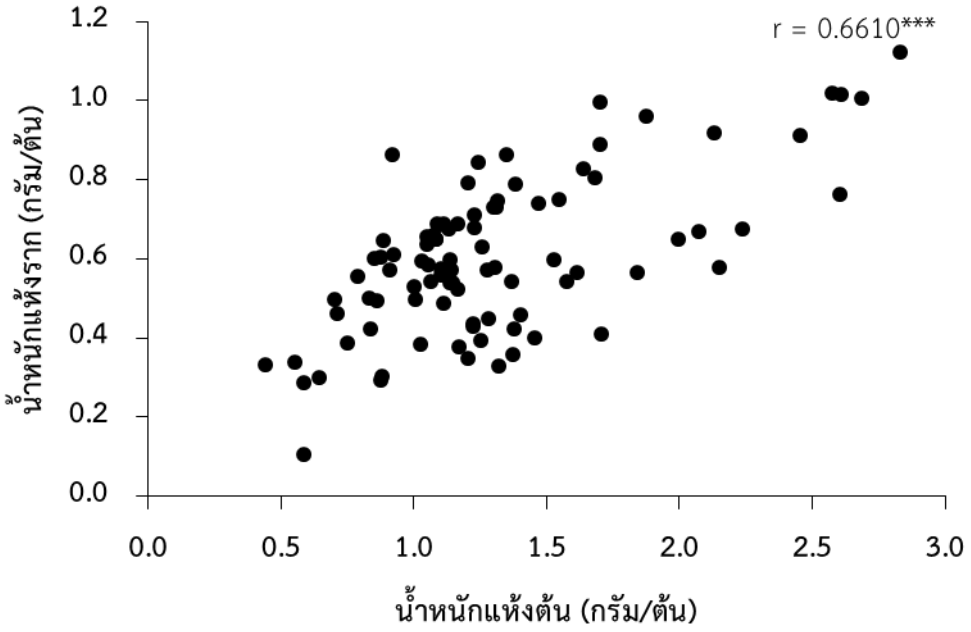
ภาพที่ 56 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวราก (เซนติเมตร) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



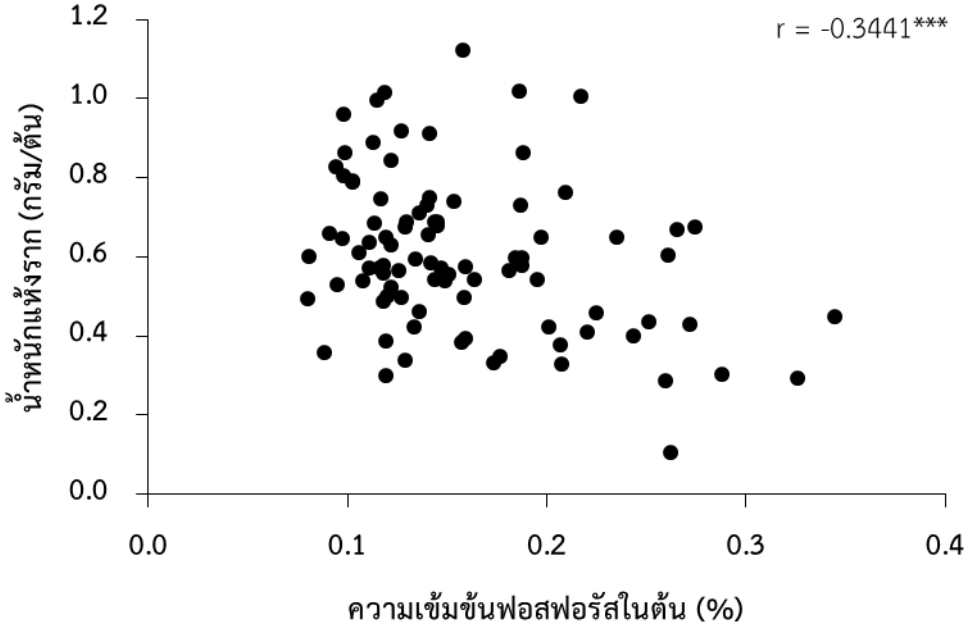
ภาพที่ 57 ความสัมพันธ์ระหว่างความเขียวใบกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



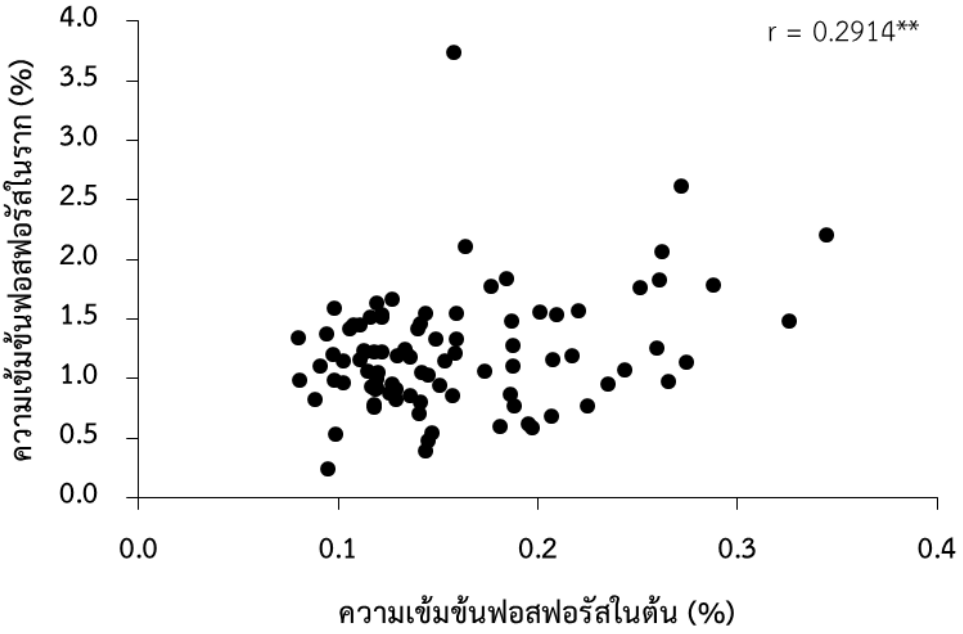
ภาพที่ 58 ความสัมพันธ์ระหว่างความเขียวใบกับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)



ภาพที่ 59 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) กับน้ำหนักแห้งต้น (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

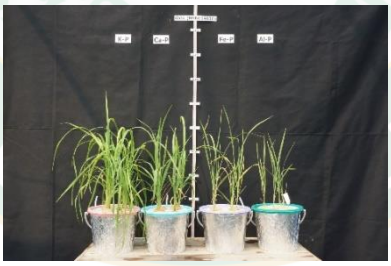


ภาพที่ 60 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับน้ำหนักแห้งราก (กรัม/ต้น) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

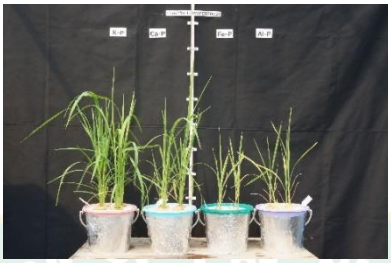


ภาพที่ 61 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นฟอสฟอรัสในต้น (%) กับความเข้มข้นฟอสฟอรัสในราก (%) ของข้าวไร่ เมื่อปลูกในสารละลายที่มีฟอสฟอรัส (P) ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ ($Ca_3O_8P_2$: Ca-P)

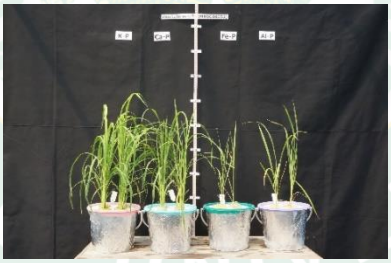
ตารางภาคผนวกที่ 1 ข้าว 22 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในสารละลายธาตุที่มีฟอสฟอรัส 4 รูป (KH_2PO_4 : K-P, $Ca_3O_8P_2$: Ca-P, AlO_4P : Al-P และ FeO_4P : Fe-P) ระยะเวลา 4 สัปดาห์

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
1	ข้าวต๋ำโหลง (PMPC00032)								
2	บือโซ (MSNC04036)								

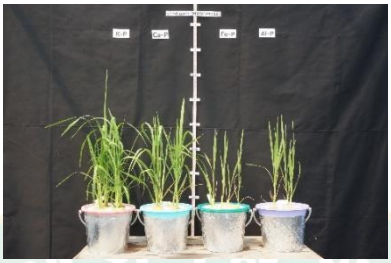
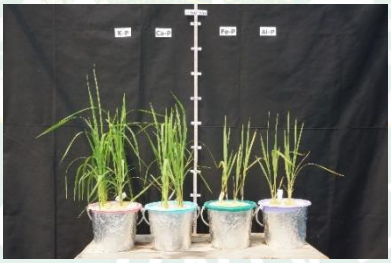
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
3	ห้วยน้ำริน 1 (PMPC02002)								
4	ข้าวลายปางคามน้อย (MSNC06055)								

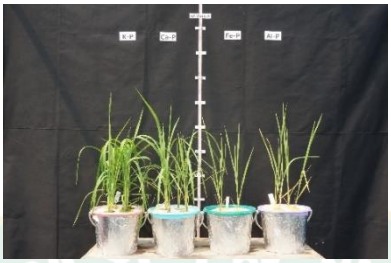
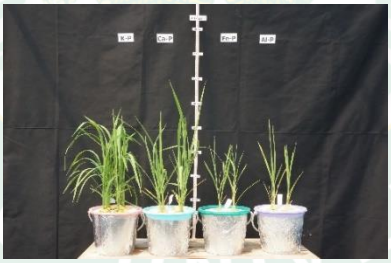
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
5	ข้าวลายซาน								
6	บือหมื่อโพ ขุนวงใต้ (MHSC08055)								

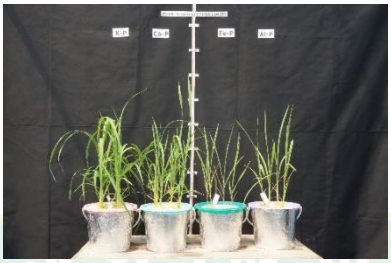
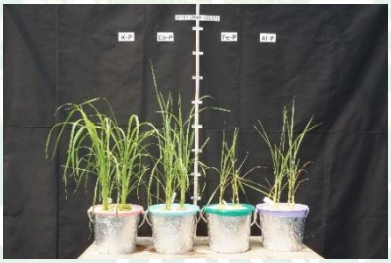
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
7	ข้าวเฟืองคำ (MHSC09016)								
8	เปร้เป่าฉาง								

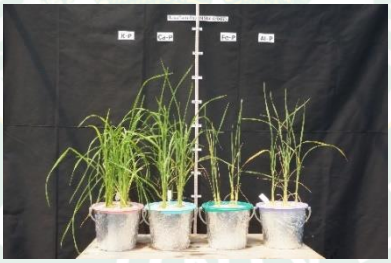
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
9	เปร้กังหมอ								
10	ลาคือตะ								

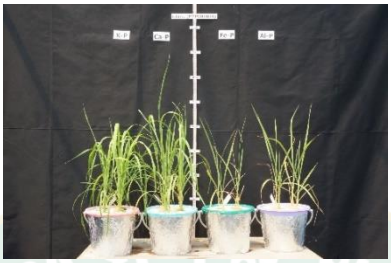
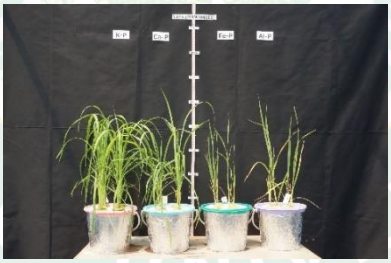
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
11	ข้าวเล็บนกแม่แจ่ม (MHSC10025)								
12	ข้าวแดง								

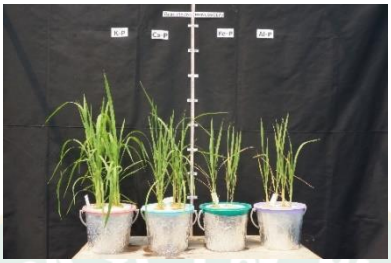
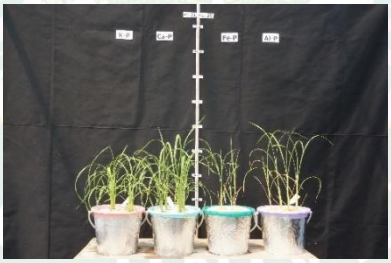
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
13	ข้าวแดง								
14	ปีอิบอโพ สบโขง (MSNC07009)								

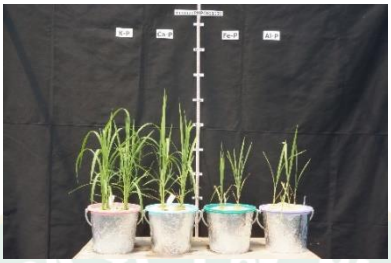
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
15	แสงกับ (PMPC00004)								
16	ปีอิกอ (MSNC04015)								

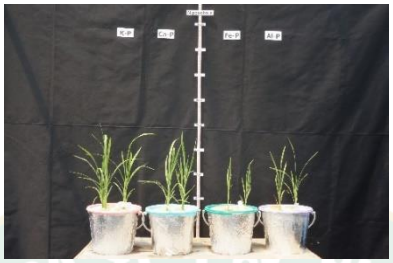
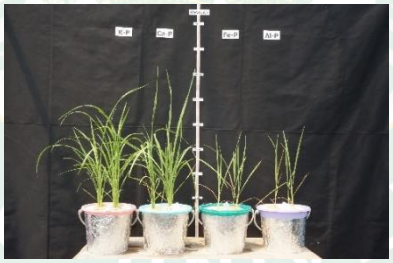
ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
17	ปีอิซูแม่ริดน้อย (MSNC05017)								
18	PT 21, กข 25								

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
19	ข้าวแดง (PMPC00112)								
20	KDML 105								

ตารางภาคผนวกที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	พันธุ์ข้าว	ฟอสฟอรัส 4 รูป				ฟอสฟอรัส 4 รูป			
		K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P	K-P	Ca-P	Fe-P	Al-P
21	Nipponbare								
22	Kasalath								

ตารางภาคผนวกที่ 2 ข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินเพื่อทดสอบการตอบสนองต่อระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะ 60 วัน

พันธุ์ข้าว	ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ (กิโลกรัม/ไร่)				พันธุ์ข้าว	ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ (กิโลกรัม/ไร่)			
	0	30	60	120		0	30	60	120
บือขอแผ่					เฟืองคำ				
ข้าวแดง					ซิวแม่จัน				

ตารางภาคผนวกที่ 3 ข้าว 4 สายพันธุ์ เมื่อปลูกในดินเพื่อทดสอบการตอบสนองต่อระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ คือ 0, 30, 60, 120 กิโลกรัม/ไร่ ที่ระยะแตกกอสูงสุด

พันธุ์ข้าว	ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ (กิโลกรัม/ไร่)				พันธุ์ข้าว	ระดับปุ๋ยฟอสฟอรัส 4 ระดับ (กิโลกรัม/ไร่)			
	0	30	60	120		0	30	60	120
บือขอแผ่					เฟืองคำ				
ข้าวแดง					ซิวแม่จัน				

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวปรียาภรณ์ แสงเรือน
เกิดเมื่อ	7 พฤศจิกายน 2532
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2555 ปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ (พืชสวน) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
	พ.ศ. 2550 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนพร้าววิทยาคม อำเภอพร้าว จังหวัดเชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2555-2556 สาขาวิชาพืชไร่ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

มหาวิทยาลัยแม่โจ้ MAEJO UNIVERSITY