

บทคัดย่อ

โครงการได้สร้างองค์ความรู้ใหม่ใน 3 เรื่อง คือ ธาตุอาหารโบรอน ธาตุอาหารอื่นในข้าว และ เรื่องความหลากหลายในระบบการเพาะปลูก

ในด้านธาตุอาหารโบรอนในพืช โครงการวิจัยได้ครอบคลุมถึงการปรับตัวต่อสภาพดินโบรอนต่ำ พันธุกรรมควบคุมการใช้โบรอน และบทบาทของโบรอนในกระบวนการทางชีวภาพในพืช ได้พบความหลากหลายในการปรับตัวต่อสภาพดินโบรอนต่ำของธัญพืชและถั่วที่สำคัญ ข้าวเน้นว่าปรับตัวต่อได้ดินโบรอนต่ำได้ดีที่สุดเพราะไม่เคยพบว่าขาดเลย ข้าวสาลี ข้าวสาลีดูรัม ข้าวบาร์เลย์ และทริติคัลเลย์ ไม่ทนทานต่อการขาดโบรอนในดินมากที่สุด ข้าวโพดถือว่าทนได้ปานกลาง การขาดโบรอนมีผลต่อธัญพืชในระบบการเจริญพันธุ์ แต่มีข้อแตกต่างตรงที่ข้าวสาลีมีปัญหาที่เกสรตัวผู้แต่ข้าวโพดมีปัญหาเกสรตัวเมีย

แม้ข้าวสาลีโดยทั่วไปจะปรับตัวต่อดินโบรอนต่ำได้ไม่ดี แต่มีข้อยกเว้นในบางพันธุ์ที่สามารถปรับตัวต่อดินโบรอนต่ำได้ดี และได้พบว่าพันธุกรรมที่เกี่ยวข้องไม่สลับซับซ้อน จึงเป็นทางนำไปสู่การแก้ปัญหาการผลิตในพื้นที่โบรอนต่ำได้ไม่ยากนัก ในโครงการได้พัฒนาวิธีการคัดเลือกที่ใช้ตรวจสอบการปรับตัวต่อดินโบรอนต่ำของสายพันธุ์ข้าวสาลีจำนวนมากเป็นพัน ๆ สายพันธุ์และใช้ในโครงการปรับปรุงพันธุ์ได้

องค์ความรู้ที่สร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการปรับตัวต่อภาวะเครียดของพืช อีกทั้งจะช่วยให้ได้ประโยชน์จากความสามารถปรับตัวของพืชในการเพาะปลูกในสภาพดินโบรอนต่ำอีกทางหนึ่งคือ กลไกที่เกี่ยวข้อง เราได้พบว่าพันธุ์ที่ปรับตัวได้ดีมากเช่น ผาง 60 สามารถดูดโบรอนจากดินได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า พันธุ์ที่อ่อนแอที่สุด เช่น บอนซ่า และ แทตเทียร์ว่า แต่ความสามารถดูดโบรอนจากดินนี้ไม่สามารถอธิบายความแตกต่างระหว่างระหว่าง ผาง 60 กับพันธุ์ที่อ่อนแอปานกลางเช่น SW41 ได้ ความแตกต่างนี้อธิบายได้ด้วยการทดลองที่สามารถแยกโบรอนที่ดูดขึ้นมาในเวลาต่างกันด้วยไอโซโทป ^{10}B กับ ^{11}B การวัดปริมาณโบรอนที่สะสมในรวงได้อย่างแม่นยำทันเวลาที่ต้องการในการสร้างละอองเรณูพอดี และการวัดผลของการขาดโบรอนในละอองเรณูที่มีชีวิต ซึ่งได้พบว่าถึงแม้โบรอนที่รากดูดได้จะมีปริมาณลดลง ผาง 60 ยังสามารถตอบสนองความต้องการโบรอนที่ใช้สร้างละอองเรณู (ซึ่งต้องการโบรอนมากกว่าเนื้อเยื่อ somatic เช่นต้น ใบ ราก และกลีบดอก ถึง 7-8 เท่า) ได้ดีโดยการลำเลียงโบรอนโดยตรงจากราก ในขณะที่ SW41 มีปัญหาในการขาดโบรอนที่จะนำไปสร้างละอองเรณู จึงทำให้มีละอองเรณูที่ตายไปถึง 40-70% เพราะไม่สามารถสนองความต้องการโบรอนในกระบวนการสำคัญนี้ได้

เราได้พิสูจน์อย่างชัดเจนว่ากระบวนการรีไซเคิลโบรอนไม่มีความสำคัญในข้าวสาลี แต่ได้พบว่าการรีไซเคิลโบรอน ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการลำเลียงโบรอนในโพลีเอม อาจมีความสำคัญในการปรับตัวต่อสภาพขาดโบรอนในพืชสำคัญของไทย 6 ชนิดคือ ต้นสัก มะละกอ ฝรั่ง มังคุด ขนุน และกาแฟ เพราะลักษณะของการกระจายโบรอนตามอายุใบของพืชเหล่านี้คล้ายกับการกระจายของโปแตสเซียมซึ่งเป็นธาตุที่มีการลำเลียงได้ดีในโพลีเอมและมีการรีไซเคิลอยู่ตลอดเวลา พืชสำคัญอีก 6 ชนิดคือ มะนาว มันสำปะหลัง มะม่วง มะม่วงหิมพานต์ น้อยหน่า และเสาวรส น่าจะไม่สามารถรีไซเคิลโบรอนได้ เพราะมีลักษณะของการกระจายโบรอนตามอายุใบคล้ายกับการกระจายของแคลเซียมซึ่งเป็นธาตุที่รีไซเคิลไม่ได้ เพราะไม่มีการลำเลียงเลยในโพลีเอม

ความเข้าใจพื้นฐานเหล่านี้ได้นำไปสู่กฎเกณฑ์ 2 ข้อ ในการศึกษาการตอบสนองและปรับตัวต่อการขาดโบรอนในพืช ซึ่งน่าจะใช้ได้ในการศึกษาการตอบสนองและปรับตัวต่อภาวะเครียดอื่นๆ ได้ด้วย ดังต่อไปนี้ คือ

1. ภาวะเครียดสามารถมีอิทธิพลต่อกระบวนการชีวภาพหลายกระบวนการ และมีการศึกษาและรายงานไว้ทุกกระบวนการ หากแต่ละกระบวนการมิได้มีความสำคัญต่อการตอบสนองของพืชทั้งต้นตลอดจนการผลิตเท่ากัน กฎเกณฑ์สำคัญของการศึกษากลพื้นฐานที่จะมีประโยชน์อย่างแท้จริงต่อการเพาะปลูกจึงจำเป็นต้องเน้นกระบวนการที่เป็นขั้นตอนที่จำกัดการตอบสนองของพืชทั้งต้น
2. การสนองต่อภาวะเครียดในพืช เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทั้งในภาวะเครียดและการตอบสนองของพืชที่เปลี่ยนไปตามอายุขัย การศึกษากลไกสรีระพื้นฐานที่จะนำไปสู่ความเข้าใจกลไกการปรับตัวของพืช ที่นำไปใช้ในการเพาะปลูกได้จึงจำเป็นต้อง (ก) แยกแยะการเปลี่ยนแปลงของภาวะเครียดตามกาลเวลาที่สอดคล้องกับอายุขัยของพืช และ (ข) การเปลี่ยนแปลงในลักษณะการตอบสนองต่อภาวะเครียดตามอายุขัยของพืช

นอกเหนือไปจากการเจริญพันธุ์ อีกกระบวนการหนึ่งที่พบว่ามีผลต่อการปรับตัวต่อการขาดโบรอนคือความงอกและการเจริญเติบโตของต้นอ่อน ซึ่งเราได้พบว่าเมล็ดถั่วที่ผลิตในดินโบรอนต่ำปานกลาง (ไม่มีผลต่อผลผลิต) อาจมีปริมาณโบรอนในเมล็ดต่ำซึ่งมีผลต่อการงอกและการเจริญเติบโตของต้นอ่อน และเนื่องจากมีรายงานว่าโบรอนอาจมีบทบาทในการสังเคราะห์ฟีนอลส์ อีกทั้งอาจเกี่ยวข้องกับการสร้าง oxygen free radicals จึงเป็นที่น่าสงสัยว่าโบรอนอาจมีบทบาทเกี่ยวข้องกับคุณภาพการเก็บรักษาของถั่วงอกด้วย

ภายใต้การสนับสนุนในโครงการนี้ ทางกลุ่มวิจัยได้ริเริ่มงานธาตุอาหารในข้าว โดยเน้นเรื่องกลไกเกี่ยวกับประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารเป็นหลัก งานที่ยังอยู่ในระยะแรกเริ่มได้แก่ประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส ประสิทธิภาพการใช้เหล็ก และการทนกรด ซึ่งเน้นการพัฒนากระบวนการ

ทดสอบพันธุ์ (screening) และการบ่งชี้พันธุ์ข้าวไทยที่มีประสิทธิภาพสูง พันธุ์ทนกรดและอลูมิเนียม เป็นพืช ใต้แก่พันธุ์ บือหมือดาบ้อง บือแก้ว บือปอแล พันธุ์พิษณุโลก 1 มีประสิทธิภาพในการใช้เหล็กสูง เป็นต้น ส่วนเรื่องที่มีความก้าวหน้าพอสมควรได้แก่ เรื่องเหล็กในเมล็ด การปรับตัวกับสภาพไร่ (ดินไม่ขังน้ำ) และแบคทีเรียเอ็นโดไฟต์ที่ตรึงไนโตรเจนในข้าว

หลังจากที่ได้สร้างฐานข้อมูลเหล็กในเมล็ดข้าวไทยว่า ข้าวดอกมะลิ 105 กข 6 กข 15 และข้าวพันธุ์มาตรฐานอื่นๆ และพันธุ์ปรับปรุงใหม่ทุกพันธุ์มีปริมาณเหล็กต่ำ เราได้พบว่าข้าวพันธุ์พื้นเมืองบางพันธุ์ที่มีเหล็กสูงกว่าเป็น 2 เท่า เราได้พบว่าสภาพแวดล้อมภายนอก (น้ำขัง ดินกรด/ด่าง ฯลฯ) มีผลต่อการดูดเหล็กเข้าไปในต้นข้าวแต่มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการสะสมเหล็กในเมล็ด (ไม่นับเปลือก) ปริมาณเหล็กในเมล็ดตั้งแต่ข้าวกล้องเป็นต้นไป นับว่าควบคุมโดยพันธุกรรมเป็นส่วนใหญ่ จึงนับว่ามีโอกาสสูงที่จะปรับปรุงพันธุ์ให้มีปริมาณเหล็กสูงขึ้น

โครงการได้พัฒนาวิธีการตรวจสอบปริมาณเหล็กในเมล็ดอย่างง่ายและรวดเร็วโดยการย้อมสี (Perls' Prussian blue หรือ “น้ำเงิน PP”) สามารถตรวจสอบได้ที่ละเมล็ด (การวิเคราะห์ทางเคมีใช้เมล็ดถึงร้อยเมล็ดต่อหนึ่งตัวอย่าง) ทำให้ได้พบความแตกต่างในปริมาณเหล็กในตัวอย่างเมล็ดข้าวของเกษตรกรที่ยังคงมีความหลากหลายทางพันธุกรรมอยู่ จึงคาดว่าอาจพบพันธุ์ข้าวที่มีเหล็กสูงกว่าที่พบอยู่ในปัจจุบัน การย้อมสี น้ำเงิน PP นี้ยังจะมีประโยชน์ในการคัดเลือกพันธุ์เหล็กสูงในโครงการปรับปรุงพันธุ์ทั้งยังจะเป็นประโยชน์ในการศึกษาพันธุกรรมที่ควบคุมปริมาณเหล็กในเมล็ดด้วย

ทางกลุ่มได้ริเริ่มโครงการศึกษาการดูดธาตุอาหารของข้าวในสภาพไร่ และพบว่าข้าวมีลักษณะพื้นฐานเป็นพืชน้ำ คือเจริญเติบโตในสภาพนาที่มีน้ำขังได้ดีกว่าในสภาพไร่ที่น้ำไม่ขัง แต่ได้พบพันธุ์ข้าวไทยที่มีการปรับตัวต่อสภาพไร่ได้ดีกว่าข้าวนาสวนส่วนใหญ่ และเราได้พบว่าความสามารถนี้ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดอาหารจากดินไม่ขังน้ำ ข้อมูลการดูดอาหารเบื้องต้นชี้ว่าความสามารถนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการสร้างรากในสภาพไร่ มากกว่าความสามารถในการดูดอาหารจำเพาะของราก (ต่อหน่วย น้ำหนักแห้งราก) กลุ่มผู้วิจัยคาดว่าความเข้าใจนี้จะนำไปสู่การปรับปรุงพันธุ์ให้มีการปรับตัวต่อสภาพไร่ ซึ่งรวมระบบการปลูกข้าวในระบบหว่านข้าวแห้งทั้งหมด

อีกธาตุอาหารหนึ่งที่สำคัญต่อการปลูกข้าวคือไนโตรเจน เราได้พบแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนได้อาศัยอยู่ในราก ต้นและใบข้าวเป็นหมื่นตัว/กรัมน้ำหนักสด และพบทั้งในข้าวปลูกและข้าวป่า ซึ่งได้ยืนยันว่าเป็นแบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนจากอากาศได้จริงโดยวิธี acetylene reduction แต่ความรู้นี้จะมามีผลกระทบต่อปลูกข้าวได้ก็ต่อเมื่อสามารถวัดได้ว่าแบคทีเรียเหล่านี้มีบทบาทอย่างไรต่อการใช้ธาตุอาหารไนโตรเจนในต้นข้าว ซึ่งในขณะนี้กำลังอยู่ในระหว่างการวัด

ธาตุอาหารไนโตรเจนยังอาจมีบทบาทต่อการผลิตข้าวอีกทางหนึ่งคือต่อคุณภาพการสี ได้พบว่าในการสีข้าว ข้าวที่มีปริมาณไนโตรเจนในเมล็ดสูง มีเมล็ดหักน้อยกว่าข้าวที่มีปริมาณไนโตรเจนในเมล็ด นอกจากนี้พันธุ์ข้าวเมล็ดยาวของไทยมีความทนทานต่อการหักในระหว่างสีต่างกัน ขณะนี้ยังอยู่ในระหว่างการศึกษาลักษณะภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์ (แสง และอิเล็กตรอน) ว่ามีความแตกต่างกันอย่างไรตามระดับไนโตรเจน และพันธุ์

งานด้านความหลากหลายในเกษตรนิเวศน์ (agrodiversity) ของกลุ่มได้เน้นการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพ และได้นำไปสู่การอนุรักษ์เชื้อพันธุ์ข้าวไทย¹

งานของโครงการทางด้าน agrodiversity ได้เน้นการค้นพบระบบองค์ความรู้ท้องถิ่นในการใช้พืชบำรุงดิน คือต้นปะตะ (*Macaranga denticulata* (Bl.) Muell. Arg.) ซึ่งพบว่าประกอบด้วย 2 องค์ประกอบที่สำคัญคือ (ก) ต้นปะตะ และ (ข) เชื้อราไมโคไรซา ระบบนี้สามารถรีไซเคิลธาตุอาหารอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถทำให้เกษตรกรปลูกข้าวไร้ได้ผลผลิต 320 – 640 กก/ไร่ ได้อย่างยั่งยืน และน่าจะมียบทบาทสำคัญในการฟื้นฟูป่าด้วย ต้นปะตะสามารถหมุนเวียนธาตุอาหารกลับไปยังรากและดินได้ในปริมาณสูง คาดว่าจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ที่ปะตะมีเชื้อราไมโคไรซาในบริเวณรากมากกว่าต้นไม้อื่นในบริเวณเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าประชากรของเชื้อราไมโคไรซามีความหลากหลายด้วย โดยพบถึง 29 species ใน 6 genera

ในท้ายนี้กลุ่มวิจัยได้สร้างองค์ความรู้ใหม่มากมายภายในเวลา 3 ปี โดยสร้างจากฐานงานเดิมที่มีอยู่ก่อนแล้ว การสนับสนุนกลุ่มวิจัยจาก สกว. ได้เปิดโอกาสให้นำความสามารถทางวิชาการที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้ และขยายงานไปครอบคลุมถึงปัญหาการเพาะปลูกในประเทศ ซึ่งคาดว่าขีดความสามารถในกลุ่ม โดยเฉพาะที่เกี่ยวกับสมรรถภาพการใช้ธาตุอาหารพืช และการปรับตัวเข้ากับภาวะเครียดจะสามารถนำไปสู่การปรับปรุงระบบการเพาะปลูกที่ได้ผล

¹ ซึ่งได้ขยายไปเป็นโครงการใหม่ “Agrodiversity for in situ Conservation and Management of Thailand’s Native Rice Germplasm” ได้รับทุนสนับสนุนจาก Collaborative Crop Research Program ของมูลนิธิ McKnight โครงการ McKnight นี้ได้อาศัยองค์ความรู้และวิธีการต่างๆที่ได้พัฒนามาจากโครงการเมธีวิจัยอาวุโสฯ แต่ application เหล่านี้ยังมีได้รวมไว้ในรายงานฉบับนี้ด้วย

ABSTRACT

Advances have been made in three areas, namely, boron (B) nutrition, other nutritional problems in rice and agrodiversity.

For B nutrition of plants, the areas covered included adaptation to low B soils, genetic control of B efficiency and function of B in plant processes. Genotypic variation in adaptation to low boron soils has been established among major crop species and within some important cereals and grain legumes. Rice is the most well adapted to low B soils, it has never been found to be deficient. Bread wheat, along with durum wheat, barley and triticale, is the most sensitive to B deficiency. Maize is intermediate between these two extremes. Wheat and its Triticeae relatives are affected by B deficiency in a different way from maize. Bread and durum wheat and barley and triticale are all affected by B deficiency primarily through the development of the male gametes, the pollen. Maize, on the other hand, is affected first through the function of the style of the female flower, commonly known as silk, during pollen germination.

The range of genotypic variation in adaptation to low B is very large in wheat. Boron efficiency genotypes will set grain normally in the same soils in which B inefficient genotypes fail completely. We have also found that the international wheat germplasm used to improve production by most developing countries is largely B inefficient. Wheat production on the world's wheat growing areas on low B soils, hundreds of thousand of hectares already identified in Asia, can be greatly boosted by increasing B efficiency in these international germplasm. This should be relatively easy. Some advanced breeding lines, even only a few, in the international germplasm are already B efficient. The genetics of B efficiency has been proved to be relatively simple, involving two dominant genes. We have developed a simple screening that may be used to evaluate very large germplasm with thousands of entries as well as to select segregating materials. The other Triticeae cereals, durum wheat, barley and triticale, have somewhat more complex response to low B. They should nevertheless also benefit from similar increase in B efficiency.

One key issue in B nutrition in this project is the mechanism by which B efficient genotypes become adapted to low B soils. For wheat, B efficient Fang 60 and very inefficient genotypes such as Bonza and Tatiara are distinguished by their B uptake. This, however, does not explain the difference between B efficient Fang 60 or Sonora 64 with moderately inefficient genotypes such as SW41. The differential mechanism was demonstrated with the use of ^{10}B and ^{11}B and more precise methods for evaluating pollen viability. Fang 60 has the ability to maintain the B supply line from the root to the developing ear and so meeting demand for microsporogenesis even while external supply was interrupted. The inefficient SW41 cannot do this. It was also clearly established that phloem mobility and recycling of B did not play a part. On the other hand, we found some evidence that phloem mobility and the ability to recycle B may be very important in the adaptation to low B of some tropical species, including coffee, guava, jackfruit, mangosteen, papaya and teak. In custard apple, cashew, mango, lime, passion fruit, and cassava, B appeared to be as immobile as calcium.

We have established 2 simple rules to study adaptation with implications to crop management in low B soils that may be applied to the study of whole plant responses to any stress factor.

1. While adverse effects of a stress factor of so many processes may be of interest to physiologists, not all of them are equally important to whole plant response and so relevant to crop adaptation and production. Physiological studies with agronomic aims should always try to identify those processes that are most sensitive and are likely to adversely affect whole plant response.
2. Physiological studies of plant under stress must always take into account all possible dynamics of (a) changes in the stress condition over time, (b) changes in the plant's various responses over different growth and developmental stages.

In addition to the reproductive response, which appears to be the key whole plant response in many crop species, germination and seedling growth have been identified as a possible limiting step in the production of grain legumes on low B soils. Low B concentration in the seed may depress germination and affect the growth of seedlings when grown on low B soils. Phenol metabolism and the production of oxygen free radicals have both been suggested to involve B. Keeping quality of bean sprouts is therefore another effect of low B that should be further investigated in sprout making species such as mungbean, black gram and soybean.

Our research group has initiated nutritional work in rice in several areas under this project. Many of the study areas that are still in the preliminary stage include phosphorus efficiency, iron efficiency and tolerance to soil acidity. Progress has been made in development of screening methods and identifying efficient and tolerant genotypes from Thailand's native rice germplasm. Areas in which considerable progress has been made are in iron (Fe) in rice grain, adaptation to wetland (water logging) and dryland (aerated) condition and nitrogen fixing endophytes of rice.

For grain Fe, we have earlier established the baseline of grain Fe contents of Thailand's many important varieties, including KDML105, RD6 and RD15 and some new improved varieties and advanced breeding lines. These are generally low, about 10 mg Fe/kg in brown rice. We have also identified genotypes with almost twice as much Fe among local varieties. Some GxE effects on grain Fe have been found, but largely on whole plant Fe uptake. The grain Fe is a relatively small fraction of the whole plant uptake. The grain Fe, especially after the husk is removed, appears to be controlled largely by genetics. This makes genetic improvement promising as a means to increase grain Fe.

A rapid and simple method for assessing Fe in individual rice grains has been developed by using a dye called Perls' Prussian blue (PP blue) for staining localized Fe on the grain. The PP blue has enabled us to discover a relatively large range of grain Fe-content in farmers' normally heterogeneous seed lots. Thus we are now optimistic in find genotypes with even higher grain Fe. The PP blue should also be useful in selection and breeding programs aiming to increase grain Fe, as well as to study the controlling genetics.

In the newly initiated program on nutrient uptake efficiency of rice in dryland, we are finding that rice is basically a 'water' plant. It generally grows better when waterlogged in the wetland condition than in the aerated soil of the dryland condition.

Among Thailand's native rice germplasm, however, we are finding varieties that are better adapted to dryland than others. Part of this adaptation is an ability to take up nutrients in dryland. Preliminary nutrient uptake data show that this ability may be related to the ability to continue to grow more roots in aerated soil rather than the specific ability of the roots to take up nutrients from dry soil per unit root dry weight. This is expected to be an area of understanding that can make significant contribution to rice breeding for Thailand's largely rainfed growing condition. The program now focuses on nutrient uptake efficiency in intermittently waterlogged and aerated soil, in acidic soil and with a special focus on phosphorus, one of the most limiting nutrients in dryland condition.

Nitrogen (N) was another important nutrient covered by the project. We have found large numbers of N fixing endophytic bacteria inside the rice plant, from the roots, stems and leaves. They were found in both crop rice and wild rice. Their N fixing ability has been confirmed by acetylene reduction assays. Practical implications of these findings require measurement of the impact on rice growth and N use. The methodology for doing this is now under investigation. Another aspect of N nutrition is the negative relationship between grain N concentration and grain breakage during milling. Different rice varieties with similar long grained type have also been found with different tolerance to grain breakage. The internal structure of the rice grain is now being studied under light and electron microscopy to determine the effect of grain N concentration and variety.

The group's research on agrodiversity on biodiversity management has led to its application on the conservation of Thailand's native rice germplasm¹. The other area was in forest regeneration and fallow enrichment. We found a system of local knowledge system involving a small pioneer tree called pada (*Macaranga denticulata* (Bl.) Muell. Arg.). The system has a most impressive capacity to recycle nutrients that has proved to be effective in keeping upland rice yield at respectable levels of 2-4 t/ha that should also be useful in forest regeneration. Furthermore, we have found that the system has two key elements. First is a highly diverse population of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi in the pada roots, which greatly enhanced nutrient uptake by the tree. Second is the tree itself which recycle a very large proportion of the nutrients back to the roots and soil. This second point may explain why the AM fungi are much more abundant in the rhizosphere of pada than other local tree species.

In conclusion, the group has made much progress in the 3 years of support from TRF. We have built on the work that had already been ongoing before August 2000. The TRF funding has enabled to group to embark on new areas, which are expected to have more impact on Thailand's agriculture. The group's technical capacity in nutrient efficiency should be particularly relevant particularly for understanding adaptation of rice and having real impact in improving production difficult growing conditions.

¹ This further evolved into the project "Agrodiversity for in situ Conservation and Management of Thailand's Native Rice Germplasm", which has received substantial funding from the Collaborative Crop Research Program of the McKnight Foundation. The McKnight project has been built on key findings and methodologies developed in this TRF project. However, findings on Thai rice germplasm from that project have largely been kept out of this report.