ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา

Effects of Manganese on Growth and Antioxidant Enzyme Activity in Rubber Seedling

สายใจ หมื่นภักดี

Saijai Meunpakdee

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Soil Resources Management
Prince of Songkla University
2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา

ผู้เขียน นางสาวสายใจ หมื่นภักดี

สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดิน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

…….....

(รองศาสตราจารย์ ดร. จำเป็น อ่อนทอง)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

……..…

(ดร. ขวัญตา ขาวมี)

คณะกรรมการสอบ

……ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. อัจฉรา เพ็งหนู)

…….....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จำเป็น อ่อนทอง)

……..……กรรมการ

(ดร. อนิศรา เพ็ญสุข)

……...…กรรมการ

(ดร. ขวัญตา ขาวมี)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการทรัพยากรดิน

…….....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. จำเป็น อ่อนทอง)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....
(ดร. ขวัญตา ขาวมี)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....
(นางสาวสายใจ หมื่นภักดี)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ……..
(นางสาวสายใจ หมื่นภักดี)
นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา

ผู้เขียน นางสาวสายใจ หมื่นภักดี

สาขาวิชา การจัดการทรัพยากรดิน

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

พื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่เป็นดินกรดทำให้มีแมงกานีสละลายออกมามากจนอาจอยู่ในระดับที่เป็นพิษต่อยางพารา จึงศึกษาผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา โดยทำการทดลอง 2 การทดลอง คือ 1) ทดลองปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในดินที่เติมแมงกานีส 0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม วางแผนการทดลองแบบ CRD ทำ 4 ซ้ำ และ 2) ทดลองปลูกยางพารา พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600 ในสารละลายที่มีแมงกานีส 0, 0.01, 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

ผลการทดลองที่หนึ่ง พบว่า ในดินปลูกยางพาราที่เติมแมงกานีส 0-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยางพารามีการเจริญเติบโตดี และมีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสเพิ่มขึ้น แต่เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตของยางพาราลดลง รวมทั้งปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสในใบลดลง ในทางตรงกันข้ามมีการดูดใช้แมงกานีสในส่วนต่างๆ เพิ่มขึ้น ในขณะที่มีไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมลดลง

ผลการทดลองที่สอง พบว่า ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีน้ำหนักแห้งใบ ก้านใบ ลำต้น และรากแขนง รวมทั้งความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นสูงกว่าในยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีส แต่เมื่อได้รับแมงกานีสมากกว่า 0.01 มิลลิโมลาร์ ใบยางพารามีสีเขียวอ่อน และรากแขนงมีอาการเน่า ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีอาการรากแก้วแตก รวมทั้งมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบลดลงชัดเจน นอกจากนั้น มีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง แต่กิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสและซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสยังคงเพิ่มขึ้น ทำให้ยางพารามีการเจริญเติบโตลดลง ในขณะที่มีการสะสมแมงกานีสในส่วนต่างๆ เพิ่มขึ้น โดยรากแขนงมีแมงกานีสมากที่สุด และส่งผลให้ความ

เข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมลดลง โดยแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นมีผลกระทบกับยางพาราพันธุ์ RRIT 251 มากกว่าพันธุ์ RRIM 600

ทั้งนี้ ทั้ง 2 การทดลองให้ผลการทดลองสอดคล้องกัน โดยยางพาราที่ปลูกในดินสามารถเจริญเติบโตได้ปกติในดินที่มีการเติมแมงกานีสสูงถึง 0-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้นดินกรดเขตร้อนโดยทั่วไปแม้จะมีแมงกานีสละลายออกมามากก็ไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของยางพารา แต่แมงกานีสจะขัดขวางการดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ทำให้ยางพาราได้รับธาตุดังกล่าวไม่เพียงพอ จึงควรใส่ปุ๋ยเพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้กับยางพาราอย่างสมดุล และในพื้นที่ที่มีแมงกานีสสูงควรเลือกปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600

Thesis Title Effects of Manganese on Growth and Antioxidant Enzyme Activity in Rubber Seedling

Author Miss Saijai Meunpakdee

Major Program Soil Resources Management

Academic Year 2014

ABSTRACT

Most rubber plantation areas are acid soils. Consequently, there is a high solubility of manganese that may be toxic to rubber. This study investigated the effects of manganese on growth and antioxidant enzyme activity in rubber tree seedlings. This study consisted of two experiments. Rubber seedlings of RRIM 600 were planted in soil containing 0, 5, 10, 50, 100 and 1,000 mg kg^{-1} of manganese. A completely randomized design with four replicates was used. RRIT 251 and RRIM 600 rubber seedling clones were cultured in a nutrient solution containing 0, 0.01, 15 and 30 mM of manganese with three replicates.

The results of the first experiment showed that the growth of rubber tree seedlings and catalase enzyme activity in leaves increased with the increasing concentration of manganese in soil (0 to 100 mg kg^{-1}). However, the growth, total chlorophyll content and catalase enzyme activity in the leaves of rubber seedlings decreased when rubber seedlings were grown in soil applied with 1,000 mg kg^{-1} of manganese. But**,** uptake of manganese increased in the plant organs and concentrations of nitrogen, potassium, calcium and magnesium decreased.

The results of the second experiment showed that both rubber clones cultured in the 0.01 mM Mn were taller, had a larger diameter and a heavier dry weight of the leaves, petioles, stems and lateral roots than those in the control. The symptoms of light green color in the leaves of rubber tree seedlings and rotten lateral roots were found in both clones cultured in higher concentrations (>0.01 mM). The RRIT 251 seedling clones grown in 30 mM manganese showed

a broken tap root and a decrease in total chlorophyll content and total non-structural carbohydrate in the leaves. In addition, catalase activity decreased but peroxidase and superoxide dismutase activities increased. These resulted in a decrease in the growth of rubber tree seedling clones. However, accumulation of manganese increased in these plant organs; especially in the lateral roots giving the highest manganese concentration and decreasing concentrations of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium. Higher Mn concentrations more strongly affected the RRIT 251 clone than the RRIM 600 clone.

Results of both experiments were consistent. Even though tropical acid soils contain high concentrations of manganese, up to 100 mg kg^{-1}, there is no effect on rubber tree growth. However, manganese decreased the uptake of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium and magnesium and led to an insufficiency for the rubber tree seedlings. Therefore, appropriate nutrient management for rubber plantations should be considered, and RRIM 600 clones should be grown in soils containing high Mn instead of RRIM 251 clones.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. จำเป็น อ่อนทอง ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร. ขวัญตา ขาวมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม เป็นอย่างสูงที่ได้กรุณาเสียสละเวลา ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ตั้งแต่เริ่มต้น ด้วยการให้คำปรึกษา คำแนะนำ ให้กำลังใจ และข้อคิดในด้านต่างๆ ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไข จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และสำเร็จลุล่วงได้ดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. อัจฉรา เพ็งหนู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร.อนิศรา เพ็ญสุข กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องในด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และวิชาการด้านต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ขอขอบคุณเจ้าของสวนยางพาราที่ได้สละดินในสวนยางพาราสำหรับทำการศึกษาในครั้งนี้และขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้อำนวยการสถานีพัฒนาที่ดินตรัง และผู้อำนวยการสถานีพัฒนาที่ดินเขต 12 ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าลาศึกษาในครั้งนี้

สายใจ หมื่นภักดี

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(10)
รายการตาราง	(11)
รายการรูป	(14)
บทที่	
1. บทนำ	1
บทนำต้นเรื่อง	1
การตรวจเอกสาร	2
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	21
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	22
2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ	23
วัสดุและสารเคมี	23
อุปกรณ์	25
วิธีการทดลอง	26
3. ผลการทดลอง	32
4. วิจารณ์ผลการทดลอง	63
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	73
ประวัติผู้เขียน	82

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ความเข้มข้นของแมงกานีสในใบพืชบางชนิดที่จัดว่าขาด เพียงพอ และเป็นพิษ	7
3.1	ค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง	33
3.2	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อสมบัติทางเคมีของดินเมื่อเริ่มทดลอง	34
3.3	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อน้ำหนักแห้งส่วนต่างๆ ของยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน	36
3.4	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความสูงของต้นยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน	37
3.5	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความสูงของต้นยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน	38
3.6	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของต้นยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน	38
3.7	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของต้นยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน	39
3.8	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความกว้างและความยาวของใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน	40
3.9	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน	42
3.10	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ CAT, POD และ SOD ในใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน	43
3.11	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพารา	44
3.12	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อปริมาณแมงกานีสในรูปต่างๆ ในดินเมื่อสิ้นสุดการทดลอง	45

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.13	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างแมงกานีสรูปต่างๆ ในดินและในใบยางพารา	46
3.14	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในใบยางพารา	47
3.15	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในก้านใบยางพารา	47
3.16	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในลำต้นยางพารา	48
3.17	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในรากแก้วยางพารา	48
3.18	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในรากแขนงยางพารา	49
3.19	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อน้ำหนักแห้งใบ ก้านใบ และลำต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	52
3.20	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อน้ำหนักแห้งรากแก้วและรากแขนงยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	52
3.21	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	53
3.22	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความสูงของต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	54
3.23	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	55
3.24	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ CAT, POD และ SOD ในใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	56
3.25	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	57

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.26	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	58
3.27	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในก้านใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	59
3.28	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในลำต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	60
3.29	ผลของความเข้มข้นของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในรากแก้วยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	61
3.30	ผลของความเข้มข้นของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในรากแขนงยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	62

รายการภาพ

ภาพที่		หน้า
3.1	ผลของแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่ออาการเป็นพิษของใบยางพารา หลังทดลอง 3 เดือน	35
3.2	ผลของแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่อการเจริญเติบโตของยางพารา หลังทดลอง 100 วัน	35
3.3	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50 และ 100 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน	40
3.4	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50 และ 100 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของรากยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน	41
3.5	ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อการดูดใช้แมงกานีสที่สะสมในส่วนต่างๆ ของยางพารา	44
3.6	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่ออาการใบเหลืองของยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	50
3.7	ผลของแมงกานีส (30 mM) ต่ออาการแตกของรากแก้วยางพารา พันธุ์ RRIT 251	50
3.8	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อการเจริญเติบโตของรากยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)	51
3.9	ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อการดูดใช้แมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600	57

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

แมงกานีสเป็นธาตุอาหารเสริมที่พืชต้องการในปริมาณน้อย โดยส่วนใหญ่เกษตรกรจะให้ความสำคัญกับธาตุอาหารหลัก และธาตุอาหารรองโดยไม่คำนึงถึงธาตุอาหารเสริม อย่างไรก็ตามแมงกานีสเป็นธาตุอาหารที่มีบทบาทต่อการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เป็นตัวเร่งการทำงานและเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ และการพัฒนาของพืชในระยะเจริญพันธุ์ (ยงยุทธ, 2552) แต่หากพืชได้รับแมงกานีสมากเกินไปก็จะส่งผลต่อพืชเช่นกัน มีรายงานว่า แมงกานีสที่มากเกินจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแตงกวา (Shi *et al*., 2006) ใบลิ้นจี่มีอาการแคระแกรน บิดงอ ใบหนา มีขนที่ท้องใบ ใบเหลืองซีด และมีจุดสีน้ำตาลบนแผ่นใบ (มัลลิกา และตระกูล, 2542) ในใบชาจะปรากฏรอยด่างสีน้ำตาลที่ใบแก่ (Venkatesan *et al*., 2007) บริเวณใบแก่ของถั่วพีมีจุดสีน้ำตาล ใบอ่อนมีอาการย่นหรือม้วน และการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดินช้าลง ปริมาณการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ลดลง และส่งผลให้ปริมาณการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง (Rezai and Farboodnai, 2008) นอกจากนั้น ยังพบอาการขอบใบแห้งหรือไหม้เป็นสีน้ำตาล (necrosis) ในมะเขือเทศ (Sarkar *et al*., 2004) แมงกานีสยังมีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน หากพืชได้รับแมงกานีสในปริมาณมากทำให้กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลส (catalase) เพิ่มขึ้น โดยเอนไซม์คาทาเลสมีหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการสลายตัวของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ให้เป็นน้ำและออกซิเจน (Rezai and Farboodnai, 2008) เพื่อปกป้องเซลล์พืชไม่ให้ได้รับความเสียหายจากการทำลายของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย พื้นที่ปลูกยางพาราโดยส่วนใหญ่อยู่ในภาคใต้ ซึ่งดินปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีสภาพเป็นกรด เนื่องจากสภาพภูมิอากาศเขตร้อนมีฝนตกชุก ทำให้มีการชะละลายแคตไอออนสภาพเบส (Ca, Mg, K และ Na) และถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออนและอะลูมินัมไอออน เมื่อดินมีสภาพเป็นกรดทำให้มีแมงกานีสละลายออกมามากจนเป็นพิษ (Venkatesan *et al*., 2007) โดยความเข้มข้นของแมงกานีสในดินที่เพียงพอสำหรับยางพารา คือ 2-4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ, 2554) ในขณะที่ความเข้มข้นของแมงกานีสในใบยางพาราที่เพียงพอ คือ 45-150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Krishakumar and Potty, 1992)

ทั้งนี้มีรายงานว่า พื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีแมงกานีสที่สกัดได้เฉลี่ย 17-43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ และคณะ, 2556) และพบแมงกานีสในใบยางพาราอยู่ในช่วง 352-629 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ และคณะ, 2551) ซึ่งหากในดินมีแมงกานีสที่สกัดได้มากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ, 2552) และมีแมงกานีสในใบยางพาราสูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อาจเป็นพิษต่อยางพารา (นุชนารถ, 2552) แต่ยังไม่มีรายงานการศึกษา ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา

2. การตรวจเอกสาร

2.1 ความสำคัญของยางพารา

ยางพารามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. จัดอยู่ในวงศ์ Euphorbiaceae มีถิ่นกำเนิดบริเวณลุ่มน้ำอะเมซอน ประเทศบราซิลและเปรู ในทวีปอเมริกาใต้ ประเทศไทยมีการนำยางพารา มาปลูกเป็นครั้งแรก โดยพระยารัษฎานุประดิษฐ์มหิศรภักดี (คอซิมบี้ ณ ระนอง) ได้นำยางพาราจากประเทศมาเลเซียมาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรัง ในปี พ.ศ. 2442 และหลังจากนั้นมีการขยายพื้นที่ปลูกยางพาราในภูมิภาคอย่างต่อเนื่อง จนปัจจุบันมีการปลูกยางพาราทั่วทุกภาคของประเทศไทย (องค์การสวนยาง, 2555) เนื่องจากยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2553 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารา 18.76 ล้านไร่ รวมทั้งสิ้น 65 จังหวัด และปลูกมากที่สุดทางภาคใต้ของประเทศ โดยมีพื้นที่ปลูกถึง 11.90 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555ข) ในปี พ.ศ. 2551 พบว่า ประเทศไทยมีรายได้จากการส่งออกยางแผ่นรมควัน ยางแท่ง น้ำยางข้น และยางคอมปาวน์ สูงถึง 462,236 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2552) และมีการส่งออกยางพาราเป็นจำนวน 2.77 ล้านตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555ก) ในปี พ.ศ. 2554 มูลค่าการส่งออกยางดิบ ผลิตภัณฑ์ยาง รวมทั้งอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ไม้ยางพาราทำรายได้ให้ประเทศ 678,942 ล้านบาท เพิ่มจากปี พ.ศ. 2553 ร้อยละ 38.77 ซึ่งมีมูลค่า 489,244 ล้านบาท (สถาบันวิจัยยาง, 2555)

พื้นที่ปลูกยางพาราที่เหมาะสมอยู่ระหว่างเส้นละติจูดที่ 10 องศาเหนือ และ 10 องศาใต้ (สถาบันวิจัยยาง, 2553) โดยประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่าง ละติจูด 5 องศา 37 ลิปดาเหนือ กับ 20 องศา 27 ลิปดาใต้ ทำให้ภาคใต้และบางจังหวัดของภาคตะวันออก ซึ่งเป็นแหล่งปลูกยางเดิมมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูกยางพารา และต่อมาได้มีการขยายพื้นที่ปลูกยางพาราไปยังแหล่งปลูกยางใหม่ คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือ ซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องปริมาณและการกระจายของฝน และบางพื้นที่เป็นที่ราบสูง แต่เนื่องจากยางพาราสามารถปรับตัวให้เข้ากับ

สภาพแวดล้อมได้ดี จึงสามารถปลูกยางพาราได้เกือบทุกภาคของประเทศไทย (สถาบันวิจัยยาง, 2555) นอกจากสภาพแวดล้อมแล้วสมบัติของดินก็เป็นปัจจัยสำคัญต่อการปลูกยางพารา เพราะพื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีสมบัติทางเคมีที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากมีลักษณะดินเป็นดินเขตร้อน ซึ่งมีข้อจำกัดด้านความอุดมสมบูรณ์ของดิน

2.2 ดินเขตร้อน

ดินเขตร้อน (tropical soil) อยู่ในบริเวณระหว่างละติจูด 23.5 องศาเหนือและ 23.5 องศาใต้ จากเส้นศูนย์สูตรที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยของทุกเดือน 18 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า สภาพภูมิอากาศมีความผันแปรไปตามตำแหน่งในส่วนต่างๆ ของผิวโลก และเป็นปัจจัยที่ทำให้ดินในแต่ละบริเวณมีความแตกต่างกันออกไป ในสภาพภูมิอากาศแบบมรสุมเขตร้อน ปัจจัยที่สำคัญของภูมิอากาศ คือ อุณหภูมิ ปริมาณ และการกระจายตัวของฝน ในดินเขตร้อนที่มีอุณหภูมิสูง ปริมาณและการกระจายของฝนดี ทำให้อัตราการสลายตัวทั้งอินทรียสารและอนินทรียสารเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยกระบวนการผุพังสลายตัวทางกายภาพรุนแรงทำให้แร่ที่สลายตัวได้ง่ายเหลืออยู่น้อย ส่วนใหญ่คงเหลือแร่ที่สลายตัวได้ยาก และกระบวนการสลายตัวทางเคมี โดยมีกระบวนการ ชะละลาย (leaching process) เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างมากในการพัฒนาหน้าตัดดิน (soil profile development) เพราะเป็นการเคลื่อนย้ายวัสดุต่างๆ ในรูปสารละลายจากดินตอนบนลงไปสะสม (illuviation) ในดินชั้นล่าง มีการชะละลายแคตไอออนสภาพเบสออกไปจากดินทำให้มีหลงเหลืออยู่ในดินน้อยและถูกแทนที่ด้วยไฮโดรเจนไอออน ลักษณะเช่นนี้พบในดินอันดับ ออกซิซอลส์ (Oxisols) และอัลทิซอลส์ (Untisols) (อภิศักดิ์, 2543)

ดินเขตร้อนส่วนใหญ่เป็นดินเนื้อละเอียด เช่น ดินเหนียว ดินเหนียวปนทรายแป้ง ดินเหนียวปนทราย และดินร่วน มีหน้าดินลึก มีโครงสร้างแบบก้อนกลม ถึงแม้ว่าดินจะมีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ แต่เนื่องจากแร่ในดินส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม ที่สามารถเชื่อมยึดเม็ดดินเข้าด้วยกัน ความหนาแน่นรวมของดินต่ำ ดินจึงมีการระบายน้ำและอากาศดี มีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ แร่ดินเหนียวที่พบส่วนใหญ่เป็นพวกที่มีกิจกรรมต่ำผ่านการผุพังสลายตัวและกระบวนการชะละลายอย่างรุนแรง ได้แก่ แร่ดินเหนียวชนิด 1:1 คือ เคโอลิไนต์ นอกจากนี้ยังพบออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมสูง สารดังกล่าวมีพื้นที่ผิวน้อยกว่า แร่ดินเหนียวชนิด 2:1 และความจุแลกเปลี่ยนแคตไอออนต่ำ ทำให้ดินมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารได้น้อย และเนื่องจากเขตร้อนมีปริมาณฝนตกชุก ดินมีความชื้นต่อเนื่อง ทำให้ธาตุไฮโดรเจนที่ละลายมากับน้ำฝนเข้าไปไล่ที่แคตไอออนสภาพเบสที่ถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์ดิน แคตไอออนสภาพเบสเหล่านี้

ก็จะถูกชะละลายออกไปจากหน้าตัดดินทำให้มีร้อยละการอิ่มตัวด้วยแคตไอออนสภาพเบสต่ำ และดินมีสภาพเป็นกรด ทำให้มีไฮโดรเจน อะลูมินัม และแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้สูง (อภิศักดิ์, 2543)

ดินที่มี pH ต่ำกว่า 5.5 และดินกรดที่มีการผุพังสลายตัวสูง มักมีแมงกานีสละลายออกมาได้มากโดยอยู่ในรูปของแมงกานัสไอออน (Mn^{2+}) รวมทั้งดินในสภาพน้ำขัง แมงกานิก (Mn^{3+}) ถูกรีดิวซ์เป็นแมงกานัสซึ่งละลายได้ง่าย ทำให้ดินมีปริมาณแมงกานีสมากเช่นกัน (ยงยุทธ, 2552; Tan, 2005) ความเข้มข้นของแมงกานีสสูงขึ้นที่ pH ต่ำ และจะลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น ดังนั้นจึงพบแมงกานีสในปริมาณมากในอันดับดินออกซิซอลส์และอัลทิซอลส์ และพบในปริมาณน้อยมากในอันดับดินแอริดิซอลส์ (Aridisols) (Tan, 2005)

แมงกานีสในผิวโลกส่วนมากอยู่ในรูปของแร่ต่างๆ อันเป็นสารประกอบแมงกานีสออกไซด์ ซัลไฟด์ คาร์บอเนต และซิลิเกต แร่ที่สำคัญได้แก่ แร่ไพโรลูไซต์ (pyrolusite, MnO_2) แมงกาไนต์ (MnO(OH)) ตลอดจนแมงกานีสออกไซด์รูปอื่นๆ (Mn_2O_3, Mn_3O_4) ปริมาณของแมงกานีสในดินแต่ละชนิดแตกต่างกันตามวัตถุต้นกำเนิด โดยทั่วไปมีแมงกานีสทั้งหมดระหว่าง 20-3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 600 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พืชดูดแมงกานีสไปใช้ในรูป Mn^{2+} จากสารละลายดินและที่แลกเปลี่ยนได้ที่ผิวของคอลลอยด์ดิน และส่วนแมงกานีสคีเลตที่เกิดจากการรวมตัวกับสารคีเลตธรรมชาติ หรือคีเลตสังเคราะห์แม้จะเป็นประโยชน์ต่อพืชแต่รากดูดไปใช้ได้ช้ากว่า Mn^{2+} ปริมาณแมงกานีสสำหรับการเจริญเติบโตของพืชที่เหมาะสมในสารละลายดิน และที่แลกเปลี่ยนได้ควรเป็น 2-3 และ 0.2-5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Havlin *et al*., 2005)

2.3 บทบาทของแมงกานีสในพืช

แมงกานีสเป็นธาตุที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช แมงกานีสที่รากดูดได้จะเคลื่อนย้ายทางไซเลม (ยงยุทธ, 2552) โดยทั่วไปพบปริมาณแมงกานีสในพืชประมาณ 20 ถึง 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al*., 2005) และหากมีปริมาณแมงกานีสมากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ก็จะเป็นพิษต่อพืช (Tan, 2005) ถึงแม้ว่าพืชต้องการแมงกานีสในปริมาณน้อยแต่พืชไม่สามารถขาดได้ เนื่องจากแมงกานีสมีบทบาทที่สำคัญต่อพืช ดังนี้

2.3.1 การปลดปล่อยออกซิเจนจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ในปฏิกิริยาแสง (light reaction) ของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ ระบบแสง I (photo system I) และระบบแสง II (photo system II) ในระบบแสง II นี้มี

ปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำเพื่อเกิดการปลดปล่อยออกซิเจน ซึ่งมีแมงกานีส คลอไรด์ และแสง เป็นตัวกระตุ้น เรียกว่า ปฏิกิริยาฮิลล์ (hill reaction) ซึ่งเขียนสมการได้ ดังนี้

$$H_2O \xrightarrow[\text{แสง}]{Mn^{2+},\ Cl^-} 2H^+ + 2e^- + O_2$$

ศูนย์ปฏิกิริยาของระบบแสง II คือ สารสี (pigment) 680 มีแมงกาโนโปรตีน ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาให้น้ำแยกตัว ที่ศูนย์ปฏิกิริยานี้ต้องการแมงกานีส 4 อะตอม จึงเร่งปฏิกิริยาแยกน้ำเป็นออกซิเจนได้ (ยงยุทธ, 2552; Havlin *et al*., 2005)

2.3.2 การสังเคราะห์โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และลิพิด

อิทธิพลของแมงกานีสต่อการสังเคราะห์โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และลิพิด สรุปได้ดังนี้

2.3.2.1 แมงกานีสเป็นองค์ประกอบของไรโบโซม และมีบทบาทในการเร่งกิจกรรมของเอนไซม์อาร์เอ็นเอพอลีเมอเรส (RNA polymerase) (Hansch and Mendel, 2009) แต่ความเข้มข้นของโปรตีนในพืชที่ขาดธาตุนี้กับพืชปกติไม่แตกต่างกัน (ยงยุทธ, 2552)

2.3.2.2 แมงกานีสเกี่ยวข้องในเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในกระบวนการเผาผลาญไนโตรเจน (Hansch and Mendel, 2009) เมื่อพืชขาดแมงกานีสความสามารถในการรีดิวซ์ไนเตรตและความต้องการแอมโมเนียมไปใช้ก็ลดลง จึงมีไนโตรเจนที่ละลายน้ำได้ (solution nitrogen) เพิ่มขึ้น ในขณะที่คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (solution carbohydrate) ในใบ ลำต้น และรากลดลง จึงเป็นเหตุให้อวัยวะต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรากของพืชที่ขาดแมงกานีสหยุดชะงักการเจริญเติบโต (ยงยุทธ, 2552)

2.3.2.3 เมื่อพืชขาดแมงกานีสทำให้องค์ประกอบสำคัญของเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ เช่น ไกลโคลิพิด กรดไขมันไม่อิ่มตัว ลดปริมาณลงถึงร้อยละ 50 จึงเชื่อว่าแมงกานีสมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ กรดไขมัน แคโรทีนอยด์ และสารประกอบอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง (ยงยุทธ, 2552)

2.3.2.4 แมงกานีสมีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์ลิกนิน พืชที่ขาดแมงกานีสทำให้มีลิกนินต่ำกว่าปกติ (ยงยุทธ, 2552; Havlin *et al*., 2005)

2.3.3 บทบาทในการปลุกฤทธิ์เอนไซม์

แมงกานีสเป็นโคแฟกเตอร์และปลุกฤทธิ์เอนไซม์ได้มากกว่า 35 ชนิด เอนไซม์เหล่านี้ส่วนมากเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน และไฮโดรไลซิส (hydrolysis) แมงกานีสจึงมีบทบาทสำคัญในวัฏจักรคาร์บอกซิลิก (TCA) (ยงยุทธ, 2552; Havlin *et al*., 2005)

ในพืชซีสี่ (C_4) เอนไซม์ฟอสโฟอีนอลไพรูเวตคาร์บอกซีไคเนส (PEP-Carboxykinase) ต้องการแมงกานีสในการปลุกฤทธิ์อย่างเฉพาะเจาะจง และแมกนีเซียมทำหน้าที่แทนไม่ได้ โดยกิจกรรมสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อ Mn/ATP เท่ากับ 1 โดยเชื่อว่าซับสเทรตของเอนไซม์นี้ คือ แมงกานีสและเอทีพีเท่านั้น (ยงยุทธ, 2552)

แมงกานีสสามารถปลุกฤทธิ์เอนไซม์บางชนิดในวิถีกรดชิคินิก (shikinic acid pathway) ซึ่งนำไปสังเคราะห์กรดอะมิโนไทโรซีน (tyrosine) ตลอดจนผลิตภัณฑ์ทุติยภูมิ เช่น ลิกนิน ฟลาโวนอยด์ (flavonoid) และกรดอินโดลแอซีติก (IAA) (ยงยุทธ, 2552; Havlin *et al*., 2005)

2.3.4 แมงกานีสในโครงสร้างของเอนไซม์

เอนไซม์หลายชนิดมิได้เจาะจงการใช้ไอออนของโลหะอย่างเดียวเป็นโคแฟกเตอร์ ดังนั้นในระบบของเอนไซม์เหล่านี้แมงกานีสจึงทำหน้าที่แทนแมกนีเซียมได้ เช่น กลูโคสไคเนส (glucose kinase) เฮกโซไคเนส (hexokinase) ฟอสโฟกลูโคไคเนส (phosphoglucokinase) ฟอสโฟกลูโคมาเทส(phosphoglucomatase) และอะดิโนซินไลย์เนส (adenosine leinase) ส่วนเอนไซม์ที่ต้องการแมงกานีสอย่างเดียว ได้แก่ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase; SOD) เอนไซม์นี้มี 3 ไอโซไซม์ (isozyme) คือ แมงกานีสซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (Mn-SOD) เหล็กซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (Fe-SOD) และสังกะสี ทองแดงซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (Zn-Cu-SOD) โดย Mn-SOD และ Zn-Cu-SOD พบมากในพืชหลายชนิด ส่วน Fe-SOD พบในพืชไม่กี่ชนิด

ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสมีบทบาทสำคัญต่อการอยู่รอดของสิ่งมีชีวิตที่ใช้ออกซิเจน (O_2) เนื่องจากช่วยปกป้องอันตรายจากอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเกิดจากการส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจน

$$O_2 + e^- \longrightarrow O_2^-$$

เอนไซม์ SOD เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนซูเปอร์ออกไซด์ไปเป็นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งสลายตัวเป็นน้ำและออกซิเจนในขั้นตอนต่อมา ทั้งนี้ร้อยละ 90 ของ SOD อยู่ในคลอโรพลาสต์ และร้อยละ 4-5 อยู่ในไมโทคอนเดรีย (ยงยุทธ, 2552)

จากบทบาทของแมงกานีสที่ได้กล่าวมาข้างต้น พืชจะเจริญเติบโตได้ดีก็ต่อเมื่อพืชได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสม หากพืชได้รับในปริมาณที่น้อยเกินไป หรือมากเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อพืช โดยพืชแต่ละชนิดมีความต้องการแมงกานีสในระดับที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1.1)

ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นของแมงกานีสในใบพืชบางชนิดที่จัดว่าขาด เพียงพอ และเป็นพิษ

พืช	อายุพืช/ระยะ	ส่วนของพืช	ความเข้มข้น (มก./กก.)		
			ต่ำ	เพียงพอ	เป็นพิษ
ข้าวโพด	ออกดอกเพศผู้	ใบรองฝัก	<15	20-200	>300
	ออกไหม	ใบรองฝัก	<15	20-150	>200
ถั่วลิสง	25-33 วัน	ส่วนเหนือดิน	-	100-212	-
	ก่อนออกดอก	ใบเพิ่งพัฒนาเต็มที่	-	50-300	>700
ข้าว	30 วัน	ส่วนเหนือดิน	-	55-130	770-7,370
	ก่อนออกดอก	ใบเพิ่งพัฒนาเต็มที่	-	40-100	-
ข้าวฟ่าง	63 วัน	ใบจากส่วนกลางของลำต้น	12-15	20-30	-
	เมื่อออกดอก	ใบพัฒนาเต็มที่แล้ว	-	25-100	-
ถั่วเหลือง	37 วัน	ส่วนเหนือดิน	-	21-44	246-337
	เริ่มออกดอก	ใบเพิ่งพัฒนาเต็มที่	<15	30-100	750-1,000

ที่มา: Humphries และคณะ (2007 อ้างโดย ยงยุทธ, 2552)

2.4 ผลกระทบเมื่อพืชได้รับแมงกานีสน้อยเกินไป

ปกติในพืชจะมีแมงกานีส 20-500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และจะแสดงอาการขาดเมื่อมีแมงกานีสน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Tan, 2005) โดยที่ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสจะลดลง เมื่อระดับ pH มีค่าตั้งแต่ 6 ขึ้นไป มีผลทำให้พืชได้รับแมงกานีสไม่เพียงพอ และจะแสดงอาการผิดปกติที่ใบ เช่น ใบถั่วพีมีอาการเนื้อเยื่อไหม้ตายเป็นจุด ใบข้าวโอ๊ตเป็นจุดสีเทา (Tan, 2005) ใบพืชมีสีเหลือง (chlorosis) บริเวณระหว่างเส้นกลางใบเพราะขาดคลอโรฟิลล์ ส่วนเส้นใบยังเขียวอยู่เป็นปกติ และมักจะเกิดที่ใบอ่อนก่อนหรือบางทีอาจจะเกิดเป็นจุดสีขาว หรือเหลืองบนใบพืช พุ่มของใบจะน้อย เนื่องจากมีใบไม่สมบูรณ์ การเจริญเติบโตช้า ไม่ออกดอกออกผล พืชตระกูลหญ้ามีความว่องไวต่อการขาดแมงกานีสมาก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เช่น ข้าวโพดมีอาการลำต้นสั้นและใบมีสีเขียวอ่อนถึงเหลือง จำนวนฝักและจำนวนเมล็ด

ลดลง ทำให้ผลผลิตของข้าวโพดลดลงด้วย ในข้าวฟ่างมีอาการลำต้นสูงและใบมีสีเขียวเข้ม ในข้าวโอ๊ตมีอาการลำต้นอ้วนและใบมีสีเขียวอ่อนถึงสีน้ำตาล ใบแก่ของข้าวมีสีส้มเหลืองบริเวณพื้นที่ระหว่างเส้นกลางใบ (interveinal chlorosis) (Jones, 1930) พืชใบกว้างจะมีลักษณะเหลืองที่ใบอ่อนบริเวณระหว่างเส้นกลางใบ ในถั่วเหลืองใบอ่อนจะมีสีขาวแต่เส้นใบยังคงเขียว ถ้าขาดรุนแรงใบอ่อนจะเป็นจุดสีน้ำตาลและร่วงก่อนที่ใบจะคลี่ พืชจะชะงักการเจริญเติบโตและมีการแตกตาข้างเกิดขึ้น แต่ตาข้างจะไม่มีการพัฒนา หากมีแมงกานีสในปริมาณน้อยจะชักนำการเคลื่อนย้ายสังกะสีและแมกนีเซียมจากรากสู่ส่วนเหนือดินมากขึ้น (Shenker *et al*., 2004) ข้าวสาลีที่ได้รับแมงกานีสไม่เพียงพอทำให้มีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลดลง และมีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลงด้วย (Wilkinson and Ohki, 1988) เช่นเดียวกันกับถั่วเขียวที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณน้อยเกินไปทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง ส่งผลให้มีผลผลิตลดลง เนื่องจากพืชมีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ด้วยแสงลดลง (Sinha *et al*., 2006)

2.5 ผลกระทบเมื่อพืชได้รับแมงกานีสมากเกินไป

ในดินกรดที่ pH ต่ำกว่า 5.4 (Jones, 1930) และดินกรดที่มีการผุพังสลายตัวสูง รวมทั้งดินในสภาพน้ำขัง (ยงยุทธ, 2552; Tan, 2005) ทำให้มีแมงกานีสละลายออกมาในปริมาณมาก โดยทั่วไปแมงกานีสเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อย และหากพืชได้รับในปริมาณที่มากเกินไปก็ส่งผลกระทบต่อพืช ดังนี้

2.5.1 อาการเป็นพิษแมงกานีส

พืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการต้านทานความเป็นพิษของแมงกานีสในปริมาณที่แตกต่างกัน และหากพืชได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกินความต้องการก็จะแสดงอาการที่แตกต่างกัน มีรายงานว่า ข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีสสูง (1,830 และ 18,300 µM) ทำให้เนื้อเยื่อบริเวณใบตายเป็นจุดสีน้ำตาลดำ (Demirevska-kepova *et al*., 2004) สอดคล้องกับข้าวสาลีที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากเกินไปทำให้มีจุดสีน้ำตาลบริเวณใบแก่ (Khabaz-Saberi *et al*., 2010) ในถั่วฝักยาวที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากเกินไปทำให้ใบแก่และฐานของก้านใบจะเป็นจุดสีน้ำตาลดำ (Fecht-Christoffers *et al.,* 2003; Iwasaki *et al*., 2002) เช่นเดียวกันกับแตงกวาที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ ทำให้ใบเป็นจุดสีน้ำตาล (Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2006) รวมทั้งใบมีอาการเหลืองที่ใบแก่และใบอ่อน และนำไปสู่การตายของเนื้อเยื่อใบ (Jian-peng *et al*., 2009; Shi *et al*., 2005) ในขณะที่พริกหยวกที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสมากเกินไปทำให้

บริเวณผิวของผลมีจุดสีเหลือง (Silber *et al*., 2009) ส่วนในมันฝรั่งพบเนื้อเยื่อบริเวณลำต้นแห้งตายเป็นบางจุด (Sarkar *et al*., 2004)

นอกจากนั้นมีรายงานว่า ชาที่ปลูกในดินที่มีแมงกานีส 7,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใบแก่มีรอยด่างสีน้ำตาล (Venkatesan *et al*., 2007) ในขณะที่ต้น Japanese white bitch ที่ปลูกในดินเมื่อได้รับแมงกานีสมากกว่า 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ใบแก่มีจุดสีน้ำตาล ส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณขอบใบและพื้นที่ระหว่างเส้นกลางใบ เมื่อได้รับแมงกานีสมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ใบอ่อนมีอาการเหลืองทั้งใบ และเมื่อได้รับแมงกานีส 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ใบแก่มีลักษณะโค้งลงด้านล่างมีลักษณะคล้ายถ้วย (cupping leaf) (Kitao *et al*., 2001) ซึ่งอาการใบด่างของพืชอาจเกิดจากการเป็นพิษของแมงกานิกออกไซด์ (MnO_2) ลักษณะจุดสีน้ำตาลอาจเกิดจากฟอลิฟีนอลในรูปออกซิไดส์ (ยงยุทธ, 2552) โดยส่วนใหญ่จะเกิดที่ใบแก่ เนื่องจากแมงกานีสเป็นธาตุที่เคลื่อนย้ายได้ยากในพืช จึงมีการสะสมของแมงกานีสบริเวณใบแก่ ส่วนอาการใบเหลืองอาจเกิดจากปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบลดลง และอาการใบโค้งลักษณะคล้ายถ้วยเกิดจากการที่พืชได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้เกิดการขาดแคลเซียม

2.5.2 การเจริญเติบโตของพืช

แมงกานีสมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช แต่การที่พืชได้รับในปริมาณที่มากเกินไปก็มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชเช่นกัน โดยมีรายงานว่า การทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ พบว่า แตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ มีน้ำหนักแห้งในส่วนเหนือดินและรากต่ำกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส (Jian-peng *et al*., 2009) อีกทั้งในใบมีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น (Shi *et al*., 2006; Shi *et al*., 2005) และยังพบอีกว่า ในส่วนลำต้นและรากมีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้นด้วย (Shi and Zhu, 2008) สอดคล้องกับการทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 10-400 ไมโครโมลาร์ พบว่า แตงกวาที่ได้รับแมงกานีสมากกว่า 10 ไมโครโมลาร์ มีการเจริญเติบโตของรากและส่วนเหนือดินลดลง (Qing-hua *et al*., 2006)

การทดลองปลูกมันเทศในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีสสูง (0.25-100 mg L^{-1}) พบว่า เมื่อมันเทศได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นมีน้ำหนักแห้งในส่วนรากสะสมอาหารและใบลดลง (Mortley, 1993) เช่นเดียวกันกับการทดลองปลูกมันฝรั่งในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0.1-5.0 มิลลิโมลาร์ พบว่า มันฝรั่งที่ได้รับแมงกานีสมากกว่า 1.0 มิลลิโมลาร์ ทำให้ความยาวของส่วนเหนือดินและน้ำหนักสดลดลง (Sarkar *et al*., 2004) และการทดลองปลูกถั่วฝักยาวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0-250 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อถั่วฝักยาวได้รับแมงกานีส

เพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักรากและส่วนเหนือดินลดลง (Gangwar *et al*., 2010) รวมทั้งถั่วเขียวที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีสสูง (500 μM) ทำให้มีน้ำหนักแห้งและน้ำหนักเมล็ดลดลง (Sinha *et al*., 2006)

การทดลองปลูกข้าวสาลีในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 2-3,000 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อข้าวได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินและรากลดลง (Khabaz-Saberi *et al*., 2010) สอดคล้องกับการทดลองปลูกข้าวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีสสูง (9.1-582.5 μM) ทำให้ความยาวรากและส่วนเหนือดินลดลง และมีการสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้นทั้งในรากและส่วนเหนือดิน (Lidon, 2000) เช่นเดียวกันกับการทดลองปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในดินที่มีแมงกานีสสูง (150-750 mg kg^{-1}) ทำให้น้ำหนักแห้งลดลง (Hai-hua *et al*., 2009) รวมทั้งการทดลองปลูกข้าวโพด 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ Kneja 434 และพันธุ์ Kneja 605 ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีสสูง (5-500 μM) ทำให้มีน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินและรากลดลง โดยพันธุ์ Kneja 434 มีน้ำหนักและมีการสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินสูงกว่าพันธุ์ Kneja เนื่องจากพันธุ์ Kneja 434 มีความต้านทานแมงกานีสได้สูงกว่าพันธุ์ Kneja 600 (Doncheva *et al*., 2009)

การทดลองปลูกต้นยาสูบในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0.1-200 มิลลิโมลาร์ พบว่า เมื่อยาสูบได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลดลง (Santandrea *et al*., 1998; Santandrea *et al*., 1997) เช่นเดียวกันกับในต้น *Phytolacca acinosa* Roxb. ที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0-12,000 ไมโครโมลาร์ พบว่า ต้น *Phytolacca acinosa* Roxb. ที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินและรากลดลง และมีการสะสมของแมงกานีสในส่วนดังกล่าวเพิ่มขึ้น (Xue *et al*., 2004) รวมทั้งการทดลองปลูกต้นคาโมมายด์ (*Matricaria chamomilla*) ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 2.03-1,000 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อต้นคาโมมายด์ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทำให้ความยาวรากและส่วนเหนือดินลดลง เป็นผลให้น้ำหนักแห้งลดลงด้วย และมีการสะสมของแมงกานีสในส่วนดังกล่าวเพิ่ม (Kovacik *et al*., 2014) นอกจากนั้นการทดลองปลูกอุ่นในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0.01-60 มิลลิโมลาร์ พบว่า อุ่นที่ได้รับแมงกานีสสูงกว่า 30 มิลลิโมลาร์ มีน้ำหนักรวมของรากและส่วนเหนือดินลดลง และมีการสะสมแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นทั้งในใบ ลำต้น และราก (Mou *et al*., 2011)

2.5.3 การดูดใช้ธาตุอาหารของพืช

ธาตุอาหารแต่ละธาตุมีอันตรกิริยา (interaction) ที่เกี่ยวข้องกับธาตุต่างๆ อาจจะเป็นปฏิปักษ์ (antagonism) หรือส่งเสริมกัน (synergism) ทำให้มีผลต่อการดูดธาตุอาหารต่างๆ ไปใช้ การมีแมงกานีสในปริมาณมากอาจจะส่งเสริมการดูดธาตุบางตัว แต่อาจขัดขวางการดูดธาตุอีกหลายตัวเช่นกัน

2.5.3.1 ผลของแมงกานีสต่อฟอสฟอรัส ชาที่ปลูกในดินที่มีปริมาณแมงกานีส 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นทั้งในใบ ลำต้น และราก และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสลดลงทั้งในใบ ลำต้น และรากชา โดยมีความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในส่วนลำต้นมากกว่าในรากและใบ (Venkatesan *et al*., 2007) มันฝรั่งที่ปลูกในสารละลายเมื่อได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกินไปทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง (Sarkar *et al*., 2004) เพราะหากมีแมงกานีสมากเกินไป อาจทำให้เกิดการรวมตัวระหว่างแมงกานีสกับฟอสฟอรัสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำยาก ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง แต่กลับพบว่า มะเขือเทศที่ปลูกในสารละลายที่ได้รับแมงกานีสปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้มีความเข้มข้นฟอสฟอรัสในส่วนเหนือดินเพิ่ม เพราะปริมาณแมงกานีสยังอยู่ในระดับที่ไม่มากเกินไป (Shenker *et al*., 2004)

2.5.3.2 ผลของแมงกานีสต่อโพแทสเซียม แตงกวาที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากเกิน ทำให้มีโพแทสเซียมในรากและส่วนเหนือดินลดลง (Shi and Zhu, 2008) สอดคล้องกับข้าวที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมในส่วนเหนือดินลดลง (Lidon, 2000) รวมทั้งในต้นคาโมมายด์ที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสมากเกินทำให้มีความเข้มข้นของโพแทสเซียมทั้งในรากและส่วนเหนือดินลดลง (Kovacik *et al*., 2014) เพราะแมงกานีสในปริมาณมากขัดขวางการดูดโพแทสเซียมทำให้ในพืชมีความเข้มข้นของโพแทสเซียมลดลง (Shi and Zhu, 2008)

2.5.3.3 ผลของแมงกานีสต่อแคลเซียม พืชที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากทำให้เกิดการขาดแคลเซียม เนื่องจากแมงกานีสทำให้แคลเซียมเคลื่อนย้ายไปยังใบอ่อนลดน้อยลง จึงมีผลทำให้พืชแสดงอาการขาดแคลเซียมที่ใบอ่อน (ยงยุทธ, 2552) ในแตงกวาที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกินไปทำให้มีความเข้มข้นของแคลเซียมทั้งในใบ ลำต้น และรากลดลง (Shi and Zhu, 2008) ชาที่ปลูกในดินเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้มีความเข้มข้นของแคลเซียมทั้งในลำต้นและรากลดลง (Venkatesan *et al*., 2007) เช่นเดียวกันกับในต้นคาโมมายด์ที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสมากเกินทำให้มีความเข้มข้นของแคลเซียมทั้งในรากและส่วนเหนือดินลดลง (Kovacik *et al*., 2014) รวมทั้งต้น *Phytolacca americana* ที่ปลูกในสารละลายเมื่อได้รับแมงกานีสในปริมาณ

มากเกินทำให้มีความเข้มข้นของแคลเซียมในใบมีแนวโน้มลดลง (Zhao *et al*., 2012) เพราะแมงกานีสที่มากเกินไปไปขัดขวางการดูดใช้แคลเซียม เนื่องจากธาตุทั้ง 2 ตัว เป็นธาตุที่มีประจุบวกและมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน (Havlin, 2005)

2.5.3.4 ผลของแมงกานีสต่อแมกนีเซียม แตงกวาที่ได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในลำต้น ราก และใบลดลง (Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2006) สอดคล้องกับชาที่ได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในลำต้น ราก และใบลดลง (Venkatesan *et al*., 2007) ส่วนต้นคาโมมายด์ที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสมากเกินไปทำให้มีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในส่วนเหนือดินลดลง แต่ในรากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Kovacik *et al*., 2014) นอกจากนั้น ต้น *Phytolacca americana* ที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากเกินกลับมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมในใบมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน (Zhao *et al*., 2012) เพราะแมงกานีสในปริมาณมากขัดขวางการดูดใช้แมกนีเซียม ทำให้ทั้งในใบ ลำต้น และรากมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมลดลง

2.5.3.5 ผลของแมงกานีสต่อเหล็ก มันฝรั่งที่ได้รับแมงกานีสในสารละลายมากเกินไปจะแสดงอาการขาดธาตุเหล็ก (ยงยุทธ, 2552) แตงกวาที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของเหล็กลดลงทั้งในใบ ลำต้น และราก (Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2006) สอดคล้องกับชาที่ปลูกในดินที่มีแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของเหล็กลดลงทั้งในใบ ลำต้น และราก (Venkatesan *et al*., 2007) เพราะแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินขัดขวางการดูดธาตุเหล็กของพืชทำให้ในพืชมีความเข้มข้นของเหล็กลดลง ส่วนในคาโมมายด์ที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของเหล็กในส่วนเหนือดินลดลง แต่ในรากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Kovacik *et al*., 2014) เช่นเดียวกันกับในข้าวที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของเหล็กในส่วนเหนือดินลดลง แต่ในรากมีเพิ่มขึ้น เพราะพืชมีความสามารถในการสะสมโลหะหนักไว้ในส่วนรากตลอดจนลดการสะสมในส่วนเหนือดิน (Lidon, 2000)

2.5.3.6 ผลของแมงกานีสต่อสังกะสี แมงกานีสในปริมาณมากเกิน จะขัดขวางการดูดสังกะสี ทั้งในใบ ลำต้น และรากของแตงกวา (Shi and Zhu, 2008) สอดคล้องกับชาที่ปลูกในดินที่ได้รับแมงกานีสปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้มีความเข้มข้นของสังกะสีลดลงทั้งในราก ลำต้น และใบ โดยพบความเข้มข้นของสังกะสีในรากมากกว่าในใบและลำต้น (Venkatesan *et al*., 2007) และข้าวที่ปลูกในสารละลายที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของสังกะสีลดลงทั้งในส่วนเหนือดินและราก (Lidon, 2000) รวมทั้งต้น *Phytolacca americana* ที่ปลูกในสารละลายเมื่อ

ได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้มีความเข้มข้นของสังกะสีในใบลดลง (Zhao *et al*., 2012) เพราะแมงกานีสในปริมาณมากเกินขัดขวางการดูดสังกะสีทำให้ในพืชมีความเข้มข้นของสังกะสีลดลง

2.5.3.7 ผลของแมงกานีสต่อทองแดง ข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกในสารละลายที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากส่งเสริมให้มีการดูดและสะสมทองแดงในใบมากขึ้น (Demirevska-kepova *et al*., 2004) สอดคล้องกับในข้าวที่ปลูกในสารละลายเมื่อได้รับแมงกานีสในปริมาณมากทำให้มีความเข้มข้นของทองแดงเพิ่มขึ้น ทั้งในส่วนเหนือดินและในราก (Lidon, 2000) เพราะปริมาณของแมงกานีสยังอยู่ในระดับที่ไม่มากเกินไป ในทางตรงกันข้ามแตงกวาที่ปลูกในสารละลายที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกิน ทำให้มีความเข้มข้นของทองแดงลดลงทั้งในใบและลำต้น (Shi and Zhu, 2008) ต้นคาโมมายด์ที่ปลูกในสารละลายที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกิน ทำให้มีความเข้มข้นของทองแดงลดลงทั้งในใบ ลำต้น และราก (Kovacik *et al*., 2014) เพราะแมงกานีสในปริมาณมากเกิน ขัดขวางการดูดทองแดงทำให้ในพืชมีความเข้มข้นของทองแดงลดลง

2.5.4 กิจกรรมเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant enzyme activity)

แมงกานีสเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์และเป็นตัวกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ แต่ในขณะเดียวกันแมงกานีสก็มีสมบัติเป็นโลหะ โดยหากพืชได้รับในปริมาณที่มากเกินไปชักนำให้พืชเกิดสภาวะเครียด ทำให้พืชสร้างสารอนุมูลอิสระมากขึ้น

2.5.4.1 อนุมูลอิสระ (free radical) เป็นสารที่มีอิเล็กตรอนรอบนอกที่ยังไม่ได้จับคู่ (unpaired electron) อิเล็กตรอนดังกล่าวมีความว่องไวสูง ซึ่งทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลในสิ่งมีชีวิตได้เร็ว โดยทั่วไปจะกล่าวถึงอนุมูลอิสระของออกซิเจน (reactive oxygen species; ROS) ได้แก่ ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ไฮดรอกซิล (OH^-) และซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) ซึ่งเป็นอนุมูลอิสระภายในเซลล์ทั่วไป โดยเกิดจากกิจกรรมการเกิดออกซิเจนในระบบแสง II การเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน และเกิดจากกิจกรรมของเอนไซม์ (Scandalios, 1993) โดยเกิดขึ้นภายในคลอโรพลาสต์ ไมโทคอนเดรีย และเปอร์โรไซโซม โดยที่สภาวะเครียดของพืช เช่น ความเค็ม พีเอช การได้รับสารกำจัดวัชพืช การได้รับโลหะ (เหล็ก ทองแดง แมกนีเซียม และแมงกานีส) และความเข้มแสง เป็นต้น ทำให้มีการสร้างอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น (Gill and Tuteja, 2010) อนุมูลอิสระทำลายโมเลกุลของกรดไขมัน กรดอะมิโน โปรตีน รงควัตถุ และกรดนิวคลีอิก ทำให้เซลล์พืชได้รับความเสียหาย และส่งผลให้ประสิทธิภาพของกระบวนการเมทาบอลิซึมลดลง และทำให้เซลล์ตายในที่สุด (Scandalios, 1993)

การทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ พบว่า ใบแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ มีปริมาณซูเปอร์ออกไซด์

และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ มากกว่าที่ได้รับแมงกานีส 10 ไมโครโมลาร์ (Jian-peng *et al*., 2009; Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2006; Shi *et al*., 2005) เช่นเดียวกับการทดลองปลูกองุ่นในสารละลายที่มีความเข้มข้นแมงกานีสสูง (0.01-60 mM) ทำให้มีซูเปอร์ออกไซด์ในใบองุ่นเพิ่มขึ้น (Mou *et al*., 2011) การทดลองปลูกข้าวบาร์เลย์ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 18.3-18,300 ไมโครโมลาร์ พบว่า ข้าวบาร์เลย์ที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทำให้ในใบมีปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มากขึ้น (Demirevska-kepova *et al*., 2004) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และซูเปอร์ออกไซด์มากขึ้น (Hai-hua *et al*., 2009) และการทดลองปลูกต้นคาโมมายด์ในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 0-1000 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อต้นคาโมมายด์ได้รับแมงกานีสมากขึ้นทำให้มีปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และซูเปอร์ออกไซด์ในรากและส่วนเหนือดินมากขึ้น (Kovacik *et al*., 2014) เนื่องมาจากแมงกานีสมีสมบัติเป็นโลหะหนัก เมื่อพืชได้รับในปริมาณมากเกินไป ทำให้พืชเกิดสภาวะเครียด จึงเกิดการกระตุ้นให้มีการสร้างอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น

สารอนุมูลอิสระในปริมาณมากเป็นอันตรายต่อเซลล์พืช พืชจึงมีกลไกการตอบสนองโดยการเร่งการสลายอนุมูลอิสระด้วยเอนไซม์ที่มีบทบาทในการลดปริมาณอนุมูลอิสระเพื่อปกป้องไม่ให้เซลล์พืชได้รับอันตราย

2.5.4.2 เอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เอนไซม์ (enzyme) เป็นโปรตีน มีลักษณะเป็นก้อน (globular protein) ที่มีโครงร่างเฉพาะตัวอันเกิดจากการจัดเรียงตัวของกรดอะมิโน ส่วนใหญ่เอนไซม์จะประกอบด้วย โปรตีนหน่วยย่อย (subunit) หลายๆ หน่วยจับกันเป็นโครงสร้างจตุรภูมิ (quaternary structure)

เอนไซม์ ทำหน้าที่เร่ง (catalyst) ปฏิกิริยาทางเคมีต่างๆ ภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต การทำงานของเอนไซม์แต่ละชนิดจะมีความจำเพาะ คือ จะมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ดังนี้

1) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้อัตราของการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงจุดหนึ่งเอนไซม์แต่ละชนิดจะทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิเหมาะสมที่สุด (optimal temperature) ของเอนไซม์นั้น โดยทั่วอยู่ในช่วง 35-40 องศาเซลเซียส แต่ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด อัตราการเร่งของการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ลดลง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการเสียสภาพของเอนไซม์ด้วยความร้อนหรืออาจทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับ อุณหภูมิที่เหมาะสมของเอนไซม์ชนิดนั้นๆ ทำให้โครงรูปของโมเลกุลโปรตีนอยู่ในสภาวะที่แอกทีฟ (มนตรี และคณะ, 2542)

2) พีเอช เอนไซม์แต่ละชนิดจะทำงานได้ดีที่สุดที่พีเอชที่เหมาะสมของเอนไซม์นั้นๆ ถ้าพีเอชเปลี่ยนไปจากพีเอชเหมาะสมที่สุด ไม่ว่าจะสูงหรือต่ำกว่าก็ตาม การทำงานของ

เอนไซม์จะลดลง มีรายงานว่า ที่ระดับพีเอช 6.5 และ 4.5 ทำให้มีกิจกรรมของเอนไซม์แตกต่างกัน คือ ที่พีเอช 6.5 มีกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสและเอนไซม์คาทาเลสสูงกว่าที่พีเอช 4.5 (Qing-hua *et al*., 2006)

3) ความเข้มแสง เอนไซม์แต่ละชนิดจะทำงานได้ดีที่สุด ที่ความเข้มแสงที่เหมาะสมของเอนไซม์นั้นๆ เช่น ถ้าความเข้มแสงน้อยกว่าปกติทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสและเอนไซม์คาทาเลสน้อยกว่าที่ความเข้มแสงปกติ (Shi *et al*., 2006) ในที่มืดมีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสสูงกว่าในที่สว่าง แต่สำหรับเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสและเพอร์ออกซิเดสมีกิจกรรมของเอนไซม์ในที่สว่างสูงกว่าในที่มืด (Chang and Kao, 1998)

แมงกานีสเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์และเป็นตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์กว่า 35 ชนิด (ยงยุทธ, 2552; Havlin *et al*., 2005) กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในพืชสูงขึ้นเมื่อพืชได้รับแมงกานีสในปริมาณมากขึ้น (Rezai and Ferboodnai, 2006) แมงกานีสมีสมบัติเป็นโลหะหนัก การที่พืชได้รับในปริมาณมากเกินไปก็ทำให้เกิดจากสภาวะเครียด และเกิดการสร้างสารอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น เมื่อมีการสร้างสารอนุมูลอิสระออกมาเป็นปริมาณมาก สารประกอบนี้จะสร้างความเสียหายต่อระบบเซลล์ของพืช (Demirevska-kepova *et al*., 2004) พืชจึงมีกลไกการตอบสนองต่อสภาวะนี้โดยการเร่งการสลายอนุมูลอิสระของออกซิเจน ด้วยการควบคุมการทำงานของเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการกำจัดสารอนุมูลอิสระ ได้แก่ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส คาทาเลส (catalase; CAT) และเพอร์ออกซิเดส (peroxidase; POD)

2.5.4.2.1 ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส พบในสิ่งมีชีวิตที่มีนิวเคลียสทุกชนิด (eukaryotic cell) เช่น ยีสต์ เห็ด รา พืช และสัตว์ แต่ไม่พบในแบคทีเรียและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน โดยแมงกานีสมีหน้าที่เป็นตัวเร่งการทำงานและเป็นองค์ประกอบของกิจกรรมเอนไซม์ SOD ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในคลอโรพลาสต์ กว่าร้อยละ 90 และร้อยละ 4-5 อยู่ในไมโทคอนเดรีย โดยเป็นแมงกานีสเมทาลโลโปรตีน ซึ่งประกอบด้วยสองหน่วยย่อย แต่ละหน่วยย่อยมีแมงกานิกไอออน (Mn^{3+}) จับอยู่กับหมู่ฟังก์ชัน (functional group) ของกรดอะมิโนโมเลกุลโปรตีน เอนไซม์ SOD ในไมโทคอนเดรียทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ (superoxide free radical) ไปเป็นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ซึ่งสลายตัวเป็นน้ำกับออกซิเจนในขั้นตอนต่อมา เนื่องจากไมโทคอนเดรียมีปฏิกิริยาซึ่งก่อให้เกิดอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ได้มาก เอนไซม์ SOD จึงอยู่ในระบบต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ (ยงยุทธ, 2552)

$$O_2^{\cdot-} + O_2^{\cdot-} + 2H^+ \xrightarrow{\text{Superoxide dismutase}} H_2O_2 + O_2$$

SOD ในพืชมีหน้าที่ในการควบคุมและป้องกันอันตรายจากซูเปอร์ออกไซด์ โดยการเปลี่ยนอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ไปเป็นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และออกซิเจน (Scandalios, 1993)

การทดลองปลูกองุ่นในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0-60 มิลลิโมลาร์ พบว่า องุ่นที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น (30 mM) มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบองุ่นสูงขึ้น และเมื่อได้รับของแมงกานีสมากขึ้นกิจกรรมของเอนไซม์ลดลง (Mou *et al*., 2011) เพราะที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 0-30 มิลลิโมลาร์ ยังอยู่ในช่วงที่พืชสามารถผลิตเอนไซม์มาต้านอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นได้ แต่เมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสมากเกินยิ่งทำให้มีการสร้างอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งอนุมูลอิสระทำให้โครงสร้างของโปรตีนเสียหาย เมื่อโปรตีนสูญเสียโครงสร้างทำให้เอนไซม์เหล่านี้ไม่สามารถทำงานได้ เป็นผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง เช่นเดียวกันกับการทดลองปลูกข้าวบาร์เลย์ในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 18.3-18,300 ไมโครโมลาร์ พบว่า ข้าวบาร์เลย์ที่ได้รับแมงกานีส 18.3-183 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบคงที่ และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นกิจกรรมของเอนไซม์ลดลง (Demirevska-kepova *et al*., 2004)

การทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ พบว่า ในใบแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์มากกว่าแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 10 ไมโครโมลาร์ (Jian-peng *et al*., 2009; Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2005) สอดคล้องกับการทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ ร่วมกับการให้แสงที่ความเข้มแสงเหมาะสม (1,200 μmol m^{-2} s^{-1}) และความเข้มแสงต่ำ (500 μmol m^{-2} s^{-1}) พบว่า ในใบแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์มากกว่าได้รับแมงกานีส 10 ไมโครโมลาร์ ทั้งที่ความเข้มแสงเหมาะสมและความเข้มแสงต่ำ และที่ความเข้มแสงเหมาะสมมีกิจกรรมเอนไซม์สูงกว่าที่ความเข้มแสงต่ำ (Shi *et al*., 2006) ในขณะที่การทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 0-600 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อแตงกวาได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น (400 μM) มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบแตงกวาเพิ่มขึ้น และเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไป (>400 μM) มีกิจกรรมของเอนไซม์ลดลง (Qing-hua *et al*., 2006) เพราะอายุของใบแตงกวาที่เก็บมาวิเคราะห์แตกต่างกันทำให้มีกิจกรรมเอนไซม์แตกต่างกัน

การทดลองปลูกต้น *Phytolacca americana* ในสารละลายที่ไม่มีแมงกานีสและมีแมงกานีส 2,000 ไมโครโมลาร์ พบว่า ในใบของต้น *Phytolacca americana* ที่ปลูกในสารละลายที่มีแมงกานีส 2,000 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีแมงกานีส (Zhao *et al*., 2012) เช่นเดียวกันกับการทดลองปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในดินที่ไม่มี

แมงกานีส และมีแมงกานีส 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ในใบข้าวโพดที่ได้รับแมงกานีส 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีกิจกรรมของเอนไซม์มากกว่าที่ปลูกในสารละลายที่ไม่มีแมงกานีส (Hai-hua *et al*., 2009) รวมทั้งการทดลองปลูกถั่วฝักยาวในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 0-250 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อถั่วฝักยาวได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ทั้งในรากและส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น (Gangwar *et al*., 2010) เพราะเมื่อปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีการสร้างอนุมูลอิสระมากขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์จึงเพิ่มขึ้นเพื่อไปลดอนุมูลอิสระที่เป็นอันตรายต่อเซลล์พืช แต่ปริมาณแมงกานีสอาจไม่มากเกินไปจนทำให้มีการสร้างอนุมูลอิสระออกมากจนไปทำลายโครงสร้างของโปรตีน จึงทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ยังคงเพิ่มขึ้น

2.5.4.2.2 คาทาเลส พบในสิ่งมีชีวิตเกือบทุกชนิด ทั้งในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์ที่ไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะที่มี pH เป็นกลาง เอนไซม์ชนิดนี้จะสูญเสียกิจกรรมอย่างรวดเร็วที่ 35 องศาเซลเซียส แมงกานีสมีหน้าที่ในปฏิกิริยารีดอกและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยากิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ CAT ในพืชส่วนใหญ่พบคาทาเลสในไมโทคอนเดรีย ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการสลายตัวของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ได้จากการออกซิไดส์อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ของเอนไซม์ SOD ในกระบวนการเมทาบอลิซึมของพืชให้เป็นน้ำและออกซิเจน (Scandalios, 1993) เนื่องจากไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นอันตรายต่อองค์ประกอบในกระบวนการเมทาบอลิซึม โดยการทำลายหรือขัดขวางการทำงานของเซลล์และเนื้อเยื่อพืช โดยคาทาเลสเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้สูง (Willekens *et al.,* 1995 อ้างโดย Noctor and Foyer, 1998)

$$2H_2O_2 \xrightarrow{\text{Catalase}} 2H_2O + O_2$$

การทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ ร่วมกับ การได้รับความเข้มแสงเหมาะสม (1,200 μmol m^{-2} s^{-1}) และความเข้มแสงต่ำ (500 μmol m^{-2} s^{-1}) พบว่า ในใบแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 10 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ ทั้งที่ความเข้มแสงเหมาะสมและความเข้มแสงต่ำ (Shi *et al*., 2006) สอดคล้องกับการทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ พบว่า ในใบแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 10 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ (Jian-peng *et al*., 2009; Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2005) เช่นเดียวกับการทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 0-600 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น กิจกรรมของเอนไซม์ในรากลดลง (Qing-hua *et al*., 2006)

การทดลองปลูกอ่อนในสารละลายที่มีความเข้มข้นแมงกานีส 0.01-60 มิลลิโมลาร์ พบว่า ในใบอ่อนมีกิจกรรมของเอนไซม์สูงขึ้นเมื่อได้รับแมงกานีสในช่วง 15-30 มิลลิโมลาร์ และกิจกรรมของเอนไซม์ลดลงเมื่อได้รับแมงกานีสมากขึ้น (Mou *et al*., 2011) เพราะในช่วงความเข้มข้นของแมงกานีสมากกว่า 30 มิลลิโมลาร์ มีไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์และซูเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความเสียหายให้กับเซลล์พืชทำให้มีการผลิตเอนไซม์ลดลง เป็นผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลงด้วย สอดคล้องกับการทดลองปลูกถั่วเขียวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 1, 10 และ 500 ไมโครโมลาร์ พบว่า ในใบถั่วเขียวมีกิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นเป็น 10 ไมโครโมลาร์ และเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไป (500 μM) กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง เพราะในช่วงความเข้มข้นของแมงกานีส 1-10 ไมโครโมลาร์ มีไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในปริมาณน้อยทำให้เอนไซม์สามารถกำจัดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้ และเมื่อความเข้มข้นแมงกานีสมากขึ้นยิ่งมีไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ก็จะไปสร้างความเสียหายให้กับเซลล์พืชทำให้มีการผลิตเอนไซม์ลดลง เป็นผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง (Sinha *et al*., 2006)

นอกจากนั้นการทดลองปลูกชาในดินที่มีแมงกานีส 0-7,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ชาที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น (0-1,000 mg kg^{-1}) มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบชาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไป (>1,000 mg kg^{-1}) ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง (Venkatesan *et al*., 2007) การทดลองปลูกข้าวบาร์เลย์ในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 18.3-18,300 ไมโครโมลาร์ พบว่า ข้าวบาร์เลย์ที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น (18.3-183 μM) มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบคงที่ และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น (>183 μM) ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้น (Demirevska-kepova *et al*., 2004) เพราะเอนไซม์คาทาเลสเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการลดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้ดีในข้าว หรือเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ที่ได้จากกิจกรรมเอนไซม์ SOD ลดลง ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้น

การทดลองปลูกถั่วพีในดินที่ความเข้มข้นแมงกานีส 0-200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า เมื่อถั่วพีที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นมีกิจกรรมเอนไซม์ทั้งในรากและส่วนเหนือดินเพิ่มขึ้น (Rezai and Ferboodnai, 2006) เนื่องจากความเข้มข้นของแมงกานีสอยู่ในระดับปานกลาง เกิดการสร้างอนุมูลอิสระในปริมาณน้อย ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ยังคงสูงขึ้น เป็นผลให้ถั่วพีสามารถเจริญเติบโตได้ที่แมงกานีส 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในทางตรงกันข้ามการทดลองปลูกถั่วฝักยาวในสารละลายที่ความเข้มข้นของแมงกานีส 0-250 ไมโครโมลาร์ พบว่า ถั่วฝักยาวที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นมีกิจกรรมของเอนไซม์ทั้งในรากและส่วนเหนือดินลดลง (Gangwar *et al*., 2010)

เพราะเมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสมากขึ้นทำให้มีการผลิตอนุมูลอิสระมากขึ้น ปริมาณอนุมูลอิสระที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความเสียหายให้กับเซลล์พืชเป็นผลให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ลดลง

การทดลองปลูกต้น *Phytolacca americana* ในสารละลายที่ไม่ใส่แมงกานีส และใส่แมงกานีส 2,000 ไมโครโมลาร์ พบว่า ในใบของต้น *Phytolacca americana* ที่ได้รับแมงกานีส 2,000 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส (Zhao *et al*., 2012) อาจเนื่องจากความเข้มข้นของแมงกานีสอยู่ในระดับที่ไม่มากเกินไป ทำให้มีอนุมูลอิสระไม่มากพอที่จะไปทำลายองค์ประกอบของเอนไซม์ ส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ยังคงสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามการทดลองปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในดินที่ไม่ใส่แมงกานีส และใส่แมงกานีส 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ในใบข้าวโพดที่ได้รับแมงกานีส 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีกิจกรรมของเอนไซม์น้อยกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส เพราะเอนไซม์คาทาเลสไม่ได้เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการลดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในพืชดังกล่าว (Hai-hua *et al*., 2009)

2.5.4.2.3 เพอร์ออกซิเดส พบในสัตว์ พืช และจุลินทรีย์ เอนไซม์นี้มี 2 ประเภท คือ เปอร์ออกไซม์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (iron-containing peroxide) และฟลาโวโปรตีนเปอร์ออกไซด์ (flavoprotein peroxide) พวกแรกมีไอรอนพอไพริน (iron porphyrin) เป็นโคเอนไซม์ที่จับแน่นอยู่กับเอนไซม์ (prosthetic group) และพบในเนื้อเยื่อพืช ส่วนพวกหลังมีฟลาวินอะดีนีนไดนิวคลีโอไทด์ (flavin adenine dinucleotide; FAD) เป็นโคเอนไซม์ที่จับแน่นอยู่กับเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์และเนื้อเยื่อของสัตว์ POD ในเนื้อเยื่อพืชสันนิษฐานว่าเกี่ยวข้องกับการพัฒนาและการเกิดการเสื่อมของเซลล์ (senescence) ของเนื้อเยื่อพืช การสังเคราะห์เอทิลีน (biogenesis of ethylene) การสลายของคลอโรฟิลล์และออกซิเดชันของ indole-3- acetic acid (ยงยุทธ, 2552)

POD ในพืชส่วนใหญ่พบในไมโทคอนเดรีย ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นการสลายตัวของไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ ที่ได้จากการออกซิไดส์อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ของเอนไซม์ SOD ทำปฏิกิริยากับสารที่ให้ไฮโดรเจน เช่น กัวไอเอคอล (guaiacol) และกรดยูริก ในกระบวนการเมทาบอลิซึมของพืชให้เป็นน้ำ (Scandalios, 1993) เนื่องจากไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เป็นอันตรายต่อองค์ประกอบในกระบวนการเมทาบอลิซึม โดยการทำลายหรือขัดขวางการทำงานของเซลล์และเนื้อเยื่อพืช โดยเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสมีปริมาณมากกว่าเอนไซม์คาทาเลส (Yamaguchi *et al*., 1995 อ้างโดย Noctor and Foyer, 1998)

$$R\text{-}H + R\text{-}H + 2H_2O_2 \xrightarrow{\text{Peroxidase}} R\text{-}R + 2H_2O$$

มีรายงานว่า เมื่อทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ พบว่า ในใบแตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าที่ได้รับแมงกานีส 10 ไมโครโมลาร์ (Shi and Zhu, 2008) ในขณะที่การทดลองปลูกอุ่นในสารละลายที่มีความเข้มข้นแมงกานีส 0.01-60 มิลลิโมลาร์ พบว่า อุ่นที่ได้รับแมงกานีส 0.01-30 มิลลิโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบสูงขึ้นและเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไป (>30 mM) ทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง (Mou *et al*., 2011)

การทดลองปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในดินที่ไม่ใส่แมงกานีสและใส่แมงกานีส 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า ในใบของข้าวโพดที่ได้รับแมงกานีส 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีกิจกรรมของเอนไซม์สูงกว่าไม่ได้รับแมงกานีส (Hai-hua *et al*., 2009) เพราะแมงกานีสที่พืชได้รับอยู่ในระดับที่ไม่มากเกินไป เช่นเดียวกันกับการทดลองปลูกชาในดินที่แมงกานีส 0-7,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า เมื่อต้นชาได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้กิจกรรมเอนไซม์ในใบเพิ่มขึ้น (Venkatesan *et al*., 2007) รวมทั้งในถั่วฝักยาวที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณเพิ่มขึ้นทำให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบเพิ่มขึ้น (Fecht-Christoffers *et al.,* 2003) แต่กลับพบว่า การทดลองปลูกถั่วเขียวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 1, 10 และ 500 ไมโครโมลาร์ มีกิจกรรมของเอนไซม์ในใบถั่วเขียวลดลงเมื่อถั่วเขียวได้รับแมงกานีสมากขึ้น (Sinha *et al*., 2006) รวมทั้งการทดลองปลูกต้น *Phytolacca americana* ในสารละลายที่ไม่ใส่แมงกานีส และในสารละลายที่มีความเข้มข้นแมงกานีส 2,000 ไมโครโมลาร์ พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ในใบของต้น *Phytolacca americana* ที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 2,000 ไมโครโมลาร์ มีน้อยกว่าในสารละลายที่ไม่ใส่แมงกานีส (Zhao *et al*., 2012) เพราะเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสไม่ได้เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการลดไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในพืชดังกล่าว

2.5.5 ผลของแมงกานีสต่อคลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์ เป็นสารประกอบที่พบได้ในส่วนที่มีสีเขียวของพืช โดยพบมากที่ใบ นอกจากนี้ ยังพบได้ที่ลำต้น ดอก ผล และรากที่มีสีเขียว และยังพบได้ในสาหร่ายทุกชนิด คลอโรฟิลล์ทำหน้าที่เป็นโมเลกุลรับพลังงานจากแสง และนำพลังงานดังกล่าวไปใช้ในการสร้างพลังงานเคมี โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างสารอินทรีย์ มีรายงานว่า ชาที่ปลูกในดินเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นจาก 0-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณคลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นแมงกานีสมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Venkatesan *et al*., 2007) เช่นเดียวกันกับในถั่วพีที่ปลูกในดินเมื่อได้รับแมงกานีสในปริมาณ 0-25 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีเพิ่มขึ้น และเมื่อปริมาณแมงกานีสมากกว่า 25

มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง (Rezai and Ferboodnai, 2006) รวมทั้งการทดลองปลูกถั่วเขียวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0, 10 และ 500 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อถั่วเขียวได้รับแมงกานีสมากกว่า 10 ไมโครโมลาร์ ทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง (Sinha *et al*., 2006) ส่วนข้าวที่ปลูกในสารละลายเมื่อได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกินไปทำให้มีการสะสมแมงกานีสภายในโพโทพลาสต์ แวคิวโอล และคลอโรพลาสต์ในใบข้าวมากขึ้น และทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์รวมทั้งคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง (Lidon *et al*., 2004; Lidon, 2001)

การทดลองปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0-500 ไมโครโมลาร์ พบว่า เมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง (Doncheva *et al*., 2009) ในข้าวบาร์เลย์ที่ปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีสสูง (18.3-18,300 µM) ทำให้มีปริมาณของคลอโรฟิลล์ลดลง (Demirevska-kepova *et al*., 2004) การทดลองปลูกถั่วฝักยาวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 0-250 ไมโครโมลาร์ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้นปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง (Gangwar *et al*., 2010) รวมทั้งในการทดลองปลูกแตงกวาในสารละลายที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส 10 และ 600 ไมโครโมลาร์ พบว่า แตงกวาที่ได้รับแมงกานีส 600 ไมโครโมลาร์ มีปริมาณคลอโรฟิลล์เอและบีลดลง และในต้น *Phytolacca americana* ที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณมากเกินทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์มีแนวโน้มลดลง (Zhao *et al*., 2012) การที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงอาจเนื่องมาจากใบเกิดอาการนิโครซิสจากความเป็นพิษของแมงกานีส หรือกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ถูกยับยั้งในกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์จะมีเหล็กเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ Aminolevulinic acid (ALA) (ยงยุทธ, 2552) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เมื่อสารนี้มีน้อยก็มีการสร้างคลอโรฟิลล์ได้น้อยด้วย โดยแมงกานีสที่มากเกินมีผลยับยั้งการทำงานของเหล็กในกระบวนการนี้ (Shenker, 2004) รวมทั้งแมงกานีสในปริมาณมากเกินไป ไปขัดขวางการดูดใช้ไนโตรเจนและแมกนีเซียม ทำให้พืชดูดใช้ธาตุดังกล่าวลดลง เมื่อธาตุดังกล่าวลดลงทำให้คลอโรฟิลล์ลดลง เนื่องจากธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ (ยงยุทธ, 2552; Halvin *et al*., 2005)

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาอาการเป็นพิษของแมงกานีสในกล้ายางพารา
2. ศึกษาผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของกล้ายางพารา
3. ศึกษาผลของแมงกานีสต่อการดูดใช้ธาตุอาหารต่างๆ ในกล้ายางพารา

4. ศึกษาผลของแมงกานีสต่อกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบของกล้ายางพารา

4. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงระดับและผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของกล้ายางพารา และลักษณะอาการเป็นพิษของแมงกานีสในกล้ายางพารา เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการนำข้อมูลไปทดลองในสภาพพื้นที่จริง
2. ทราบถึงผลของแมงกานีสส่วนเกินต่อการดูดธาตุอาหารต่างๆ รวมถึงกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณคลอโรฟิลล์ในกล้ายางพารา เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการธาตุอาหารให้เหมาะสมต่อยางพารา

บทที่ 2

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. วัสดุและสารเคมี

1.1 กรดซัลฟิวริก (sulphuric acid: 98% w/w H_2SO_4)

1.2 กรดไนทริก (nitric acid: 65% w/w HNO_3)

1.3 กรดบอริก (boric acid: H_3BO_3)

1.4 กรดเพอร์คลอริก (perchloric acid: 70% w/w $HClO_4$)

1.5 กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid: $C_6H_8O_6$)

1.6 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric: HCl)

1.7 กรดอะซีติก (glacail acetic acid: 99.5 % CH_3COOH)

1.8 กัวไอเอคอล (guaiacol)

1.9 คอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate: $CuSO_4.5H_2O$)

1.10 แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต (calcium chloride dihydrate: $CaCl_2.2H_2O$)

1.11 ไดเอธิลลีนไทรเอมีนเพนทาอะซีติกแอซิต (diethylenetriaminepentaacetic acid: $C_4H_{23}N_3O_{10}$)

1.12 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (disodium hydrogen phosphate: Na_2HPO_4)

1.13 ยูเรีย (urea: 46-0-0)

1.14 ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (di-ammonium phosphate: DAP: 18-46-0)

1.15 ซิงค์ซัลเฟต (zinc sulfate: $ZnSO_4.7H_2O$)

1.16 ไรโบฟลาวิน (riboflavin)

1.17 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH)

1.18 ไทรเอธาโนลามีน (triethanolamine: $C_6H_{15}NO_3$ หรือ TEA)

1.19 โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (sodium dihydrogen phosphate: $NaH_2PO_4.2H_2O$)

1.20 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ (ammonium fluoride: NH_4F)

1.21 ไนโตรบลูเทตระโซเลียม (nitro blue tetrazolium: NBT)

1.22 โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dicromate: $K_2Cr_2O_7$)

1.23 โพแทสเซียมคลอไรด์ (potassium chloride: KCl: 0-0-60)

1.24 โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate: K_2SO_4)

1.25 โพลีไวนิลไพโรลไอโดน (polyvinyl pyrolidone: PVP)

1.26 ฟีนอล์ฟธาลีนอินดิเคเตอร์ (phenolphthalein indicator)

1.27 เฟอรัสซัลเฟต (ferrous sulfate: $FeSO_4.7H_2O$)

1.28 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (ferrous ammonium sulfate hexahydrate: $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$)

1.29 เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (ferroin indicator)

1.30 แมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulfate: $MgSO_4.7H_2O$)

1.31 แมงกานีสซัลเฟต (manganese sulfate monohydrate: $MnSO_4.H_2O$)

1.32 สารผสมเร่งปฏิกิริยา (catalyst mixture)

1.33 กลูโคสแอนไฮดรัส (glucose anhydrous: $C_6H_{12}O_6$)

1.34 สารละลายมาตรฐานแคลเซียม (standard calcium: 1,000 mg L^{-1})

1.35 สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียม (standard potassium: 1,000 mg L^{-1})

1.36 สารละลายมาตรฐานฟอสฟอรัส (standard phosphorus: 1,000 mg L^{-1})

1.37 สารละลายมาตรฐานแมกนีเซียม (standard magnesium: 1,000 mg L^{-1})

1.38 สารละลายมาตรฐานเหล็ก (standard iron: 1,000 mg L^{-1})

1.39 สารละลายมาตรฐานแมงกานีส (standard manganese: 1,000 mg L^{-1})

1.40 สารละลายมาตรฐานทองแดง (standard copper: 1,000 mg L^{-1})

1.41 สารละลายมาตรฐานสังกะสี (standard zinc: 1,000 mg L^{-1})

1.42 สารละลายเอธานอล (ethanol)

1.43 สทรอนเทียมคลอไรด์ (strontium chloride: $SrCl_2.6H_2O$)

1.44 อินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator)

1.45 แอมโมเนียมเมทาวาเนเดต (ammonium metavanadate: NH_4VO_3)

1.46 แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate: $(NH_4)_6Mo_7O_{24}.4H_2O$)

1.47 แอมโมเนียมอะซีเทต (ammonium acetate: NH_4OAc)

1.48 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide: NH_4OH)

1.49 แอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate: $(NH_4)_2SO_4$)

1.50 แอนโทรน (anthrone: $C_{14}H_{10}O$)

1.51 เอธิลลีนไดเอมีนเททาอะซีติกแอซิด (ethylenediaminetetraacetic-acid: EDTA)

1.52 ไฮโดรควิโนน (hydroquinone)

1.53 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide: H_2O_2)

1.54 ไดเมทิลฟอร์มเอไมด์ (dimethylformamide: C_3H_7NO)

1.55 เมไธโอนีน (methionine)

1.56 แอนทิโมนีโพแทสเซียมทาร์เทรต (antinomy potassium tartrate: $KSbO.C_4H_4O_6$)

2. อุปกรณ์

2.1 กระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 1 และ 5

2.2 เครื่องวัด pH (pH meter)

2.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge) ความเร็ว 3,200 และ 14,000 รอบต่อนาที

2.4 เครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer: AAS)

2.5 เครื่องอิเล็กทริคอลคอนดักทิวิทีมิเตอร์ (electrical conductivity meter)

2.6 โถดูดความชื้น (desiccator)

2.7 ตู้อบตัวอย่างพืช (hot air oven)

2.8 เตาย่อยตัวอย่าง (digestion block)

2.9 เตาให้ความร้อน (hot plate)

2.10 เครื่องกลั่นไนโตรเจน (nitrogen distillation apparatus)

2.11 เครื่องแก้ว อุปกรณ์ตวงวัดชนิดต่างๆ และวัสดุสิ้นเปลือง

2.12 เครื่องเขย่า (shaker)

2.13 เครื่องเขย่าผสมสารละลาย (vortex mixer)

2.14 เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม และ 0.0001 กรัม

2.15 เครื่องบดตัวอย่างพืช (grinder)

2.16 เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (visible spectrophotometer)

2.17 โกรงบดดินและตะแกรงร่อนดิน

2.18 เครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างดินและกล้ายางพารา

2.19 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

2.20 เครื่องวัดเส้นผ่าศูนย์กลาง

2.21 กระถางทดลองขนาด 30 ลิตร

2.22 เทปวัดระยะ

2.23 กล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600

2.24 กล่องพลาสติกขนาด 48×75×42 เซนติเมตร

3. วิธีการทดลอง

การศึกษาผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา ประกอบด้วย 2 การทดลอง คือ การทดลองผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา ที่ปลูกในดินและในสารละลาย

3.1 การทดลองผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพาราที่ปลูกในดิน

ทำการทดลองในเรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ทดลองปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ในดินที่แมงกานีสระดับต่างๆ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) ทำ 4 ซ้ำ ประกอบด้วย 6 ทรีตเมนต์ โดยใส่แมงกานีส ($MnSO_4.H_2O$) ในดินให้มีแมงกานีสเท่ากับ 0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 มิลลิกรัม Mn ต่อกิโลกรัม โดยบรรจุดิน 28 กิโลกรัม ลงไปในกระถาง (ขนาด 30 ลิตร) และใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในรูปปุ๋ยยูเรีย ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) และโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ให้มีไนโตรเจนทั้งหมด (N) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (P_2O_5) และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ (K_2O) เท่ากับ 100, 40 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ จากนั้นผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน และปลูกกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 (ขนาด 1 ฉัตร) ลงในกระถาง ให้น้ำและรักษาความชื้นให้อยู่ในช่วง 70 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นสนาม ตลอดการทดลอง 5 เดือน

3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินและวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

การศึกษานี้ใช้ดินที่เก็บจากแปลงปลูกยางพาราที่มีแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ 1.26 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยสุ่มเก็บดินชุดดินคอหงส์ (Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiudults) ที่ระดับความลึก 0-30 เซนติเมตร จากผิวดิน แบ่งดินเป็น 2 ส่วน คือ เก็บดินไว้ทำการทดลอง และตัวอย่างดินที่เป็นตัวแทนมาวิเคราะห์ทางสมบัติเคมี โดยส่วนที่ใช้สำหรับทำการทดลอง นำดินมาผึ่งให้แห้งในเรือนกระจก โดยเกลี่ยดินบนพลาสติกเป็นชั้นบางๆ เมื่อดินแห้งนำมา

ร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 เซนติเมตร เก็บไว้ทำการทดลองปลูกยางพารา ส่วนตัวอย่างดินที่เป็นตัวแทนมาวิเคราะห์ทางสมบัติเคมี นำมาผึ่ง บด และร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 มิลลิเมตร และเก็บไว้วิเคราะห์ทางสมบัติเคมี (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) สำหรับดินเริ่มทดลองปลูกยางพาราเมื่อผสมดินกับแม่ปุ๋ย และแมงกานีสเรียบร้อยแล้ว สุ่มเก็บตัวอย่างดิน นำมาผึ่ง บด ร่อนผ่านตะแกรงช่องเปิดขนาด 2 มิลลิเมตร และวิเคราะห์สมบัติทางเคมี (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) ตามวิธีด้านล่าง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองสุ่มเก็บดินจากในกระถางมาวิเคราะห์แมงกานีสในรูปแมงกานีสที่ละลายน้ำได้ แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ แมงกานีสที่รีดิวซ์ได้ง่าย และแมงกานีสทั้งหมด (Gambrell, 1996)

3.1.1.1 ปฏิกิริยาดิน (pH) ชั่งดิน 5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติก เติมน้ำที่ปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร (ใช้ดิน : น้ำ อัตราส่วน 1 : 5) เขย่า แล้ววัดด้วยเครื่อง pH meter

3.1.1.2 ค่าการนำไฟฟ้าของดิน (EC) ชั่งดิน 5 กรัม ใส่หลอดเหวี่ยงพลาสติก เติมน้ำที่ปราศจากไอออน 25 มิลลิลิตร (ใช้ดิน : น้ำ อัตราส่วน 1 : 5) เขย่า แล้ววัดด้วยเครื่อง Conductivity meter

3.1.1.3 อินทรียวัตถุ (OM) โดยการวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์คาร์บอนด้วยการออกซิไดซ์อินทรีย์คาร์บอนให้กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วย $K_2Cr_2O_7$ ในกรดกำมะถันเข้มข้น แล้ววิเคราะห์ไดโครเมตที่เหลือด้วยการไทเทรตกับสารละลาย FAS โดยใช้ เฟอร์โรอิน (ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณปริมาณอินทรียวัตถุ โดยหลักการในอินทรียวัตถุประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 58

3.1.1.4 ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available P) โดยวิธีเบรย์ทู (Bray II method) ชั่งดิน 1.00 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) เติมน้ำยาสกัดเบรย์ทู (0.10 M HCl +0.03 M NH_4F) 10 มิลลิลิตร เขย่า กรอง แล้วทำให้เกิดสีโดยวิธีโมลิบดินัมบลู นำไปวัดด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer

3.1.1.5 โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable K, Ca and Mg) สกัดดินด้วยสารละลาย 1.0 โมลาร์ NH_4OAc pH 7.0 แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.1.6 เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดงที่สกัดได้ (extractable Fe, Mn, Zn และ Cu) สกัดดินด้วยสารละลาย 0.005 โมลาร์ DTPA pH 7.3 แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดงที่สกัดได้ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.1.7 แมงกานีสที่ละลายน้ำได้ (water-soluble Mn) สกัดดินด้วยน้ำ แล้วนำไปวิเคราะห์ความเข้มข้นแมงกานีส ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.1.8 แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Mn) สกัดดินด้วยสารละลาย 1.0 โมลาร์ NH_4OAc pH 7.0 แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นแมงกานีส ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.1.9 แมงกานีสที่รีดิวซ์ได้ง่าย (easily reducible Mn) สกัดดินด้วยสารละลายผสม 1.0 โมลาร์ NH_4OAc 7.0 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ hydroquinone แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นแมงกานีส ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.1.10 แมงกานีสทั้งหมด (total Mn) สกัดดินด้วย 30 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น และ 48 เปอร์เซ็นต์ กรดไฮโดรฟลูออริก แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นแมงกานีส ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3.1.2 การเก็บตัวอย่างพืช

หลังปลูกยางพาราได้ 3 เดือน เก็บใบยางพาราตำแหน่งใบย่อยกลาง จากก้านใบประกอบที่ 3 (นับจากล่าง) ของฉัตรที่ 2 มาวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลส เพอร์ออกซิเดส และซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส และเก็บใบยางพาราตำแหน่งใบย่อยกลาง จากก้านใบประกอบที่ 4 (นับจากล่าง) ของฉัตรที่ 2 มาวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และนำใบดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืชผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เก็บไว้ในถุงกระดาษขนาดเล็ก และอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 5 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์หาคาร์โบไฮเดรตในใบ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (5 เดือน) นำตัวอย่างยางพาราแยกส่วนใบ ก้านใบ ลำต้น รากแก้ว และรากแขนง และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน ชั่งน้ำหนักแห้ง นำตัวอย่างใบ ก้านใบ ลำต้น รากแก้ว และรากแขนง มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืชผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เก็บไว้ในถุงกระดาษขนาดเล็ก และอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 5 ชั่วโมง นำตัวอย่างยางพาราที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารต่างๆ (สำหรับทรีตเมนต์ที่ใส่แมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เก็บตัวอย่างเมื่อยางพาราอายุ 100 วัน เพราะใบยางพาราเริ่มแสดงอาการเหี่ยว) ดังนี้

3.1.2.1 ไนโตรเจน ด้วยวิธี Kjeldahl โดยชั่งตัวอย่างพืช 0.1000 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร และสารเร่งปฏิกิริยา ย่อยตัวอย่างพืชจนใส จากนั้นนำไปเติมด่าง และกลั่นหาแอมโมเนียมโดยมีสารละลายกรดบอริกเป็นตัวจับแก๊ส

แอมโมเนีย หรือแอมโมเนียมไอออน แล้วไทเทรตหาแอมโมเนียมในกรดบอริกด้วยสารละลายกรดที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

3.1.2.2 ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ย่อยสลายด้วยกรดผสมไนทริกและเพอร์คลอริค (HNO_3 : $HClO_4$; 3 : 1) ย่อยตัวอย่างพืชจนใส แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธี Vanadomolybdate วัดด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer และวิเคราะห์โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

3.1.2.3 เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง ย่อยสลายด้วยกรดผสมไนทริกและเพอร์คลอริค (HNO_3 : $HClO_4$; 3 : 1) ย่อยตัวอย่างพืชจนใส และวิเคราะห์ความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดงด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

3.1.2.4 กิจกรรมเอนไซม์ การสกัดเอนไซม์ (enzymes extraction) นำใบยางพาราสดไปสกัดด้วย 100 มิลลิโมลาร์ sodium phosphate buffer pH 7.0 นำสารที่สกัดได้ไปวิเคราะห์หากิจกรรมเอนไซม์ (El-Shraiy *et al.*, 2011)

3.1.2.4.1 เอนไซม์เพอร์ออกซิเดส ใช้สารละลายผสม 2.9 มิลลิลิตร (ประกอบด้วย 0.25% (v/v) guaiacol ใน 10 มิลลิโมลาร์ sodium phosphate buffer pH 6 10 มิลลิโมลาร์ hydrogen peroxide, H_2O_2) หลังจากนั้นเติม สารสกัดตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร นำไปวัดด้วย Visible spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร ทันที (El-Shraiy *et al*., 2011)

3.1.2.4.2 เอนไซม์คาทาเลส ใช้สารละลายผสม 2.9 มิลลิลิตร (ประกอบด้วย 20 มิลลิโมลาร์ hydrogen peroxide และ 50 มิลลิโมลาร์ sodium phosphate buffer pH 7) เติมสารสกัดตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร นำไปวัดด้วย Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร ทันที (El-Shraiy *et al.*, 2011)

3.1.2.4.3 เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส เติมสารละลายผสม 3 มิลลิลิตร (ประกอบด้วย 40 มิลลิโมลาร์ phosphate buffer pH 7.8, 13 มิลลิโมลาร์ methionine, 75 ไมโครโมลาร์ NBT, 2 ไมโครโมลาร์ riboflavin, 0.1 มิลลิโมลาร์ EDTA) และสารสกัดตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน และนำไปวางภายใต้แสงฟลูออเรสเซ็น ให้ห่างประมาณ 30 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดด้วย Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (El-Shraiy *et al*., 2011)

3.1.2.5 คลอโรฟิลล์ สกัดตัวอย่างใบด้วย dimethylformamide (DMF; C_3H_7NO) ตัวอย่างใบละ 1 หลอด จากนั้นปิดฝาให้สนิท วางในที่มืดทันทีเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และ

นำสารสกัดไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 และ 647 นาโนเมตร (กฤษดา และพิเชษฐ, 2552)

3.1.2.6 คาร์โบไฮเดรต สกัดตัวอย่างด้วยกรดเพอร์คลอริก (52% w/v $HClO_4$) ทำการชั่งตัวอย่างใบที่ผ่านการบดแล้วมา 0.1000 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) ใส่ในหลอดเหวี่ยงพลาสติก เติมน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร และเติมกรดเพอร์คลอริก 1.3 มิลลิลิตร นำไปเขย่า 20 นาที กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 โดยชะด้วยน้ำกลั่นครั้งละ 10 มิลลิลิตร 5 ครั้ง และปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร ปิเปตสารละลายมาตรฐานกลูโคส 0, 10. 20, 30, 40, 100 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลอง เติมสารละลาย 0.1% w/v Anthrone จำนวน 5 มิลลิลิตร และนำไปต้มในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 นาที ตั้งไว้ให้สารละลายเย็น แล้วนำมาอ่านค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลาย ด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 627 นาโนเมตร โดยวัดสารละลายมาตรฐานกลูโคสตามลำดับความเข้มข้นแล้วจึงวัดตัวอย่าง คำนวณความเข้มข้นของกลูโคสในหน่วยกรัมต่อกิโลกรัม (Osborne and Voogt, 1978)

3.1.3 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต

เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของกล้ายางพาราตอนเริ่มทำการทดลอง หลังปลูก 3 เดือน และสิ้นสุดการทดลอง ได้แก่ วัดความสูง (รอยแตกตาถึงปลายยอด) และเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น (เหนือรอยเท้าช้าง 10 cm)

3.2 การทดลองผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพาราที่ปลูกในสารละลาย

ทำการทดลองในเรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยปลูกกล้ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600 (ขนาด 1 ฉัตร) ในกล่องพลาสติก (ขนาด 48x75x42 cm) ที่บรรจุสารละลายธาตุอาหารปริมาตร 80 ลิตร ในสารละลายมีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก โบรอน สังกะสี ทองแดง และโมลิบดีนัม เข้มข้น 15, 2, 15, 25, 10, 2, 0.5, 0.2, 0.01 และ 0.005 มิลลิกรัมของธาตุต่อลิตร ในรูป $(NH_4)_2SO_4$, $NaH_2PO_4.2H_2O$, K_2SO_4+KCl, $CaCl_2.2H_2O$, $MgSO_4.7H_2O$, $FeSO_4.7H_2O$, H_3BO_3, $ZnSO_4.7H_2O$, $CuSO_4.5H_2O$ และ $(NH_4)_6.Mo_7O_{24}.4H_2O$ ตามลำดับ และใส่แมงกานีสที่มีความเข้มข้นต่างๆ ปรับพีเอชสารละลายให้มีค่าเท่ากับ 5.5 โดยใช้ NaOH หรือ HCl และเปลี่ยนสารละลายทุกๆ 2 สัปดาห์ วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ ประกอบด้วย 4 ทรีตเมนต์ คือ แมงกานีส (จาก $MnSO_4.H_2O$) 0, 0.01, 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ ตลอดการทดลองให้อากาศโดยใช้ปั๊มอากาศ

3.2.2 การเก็บตัวอย่างพืช

เมื่อปลูกยางพาราในสารละลาย 30 วัน เก็บใบยางพาราตำแหน่งใบย่อยกลาง จากก้านใบประกอบที่ 3 (นับจากล่าง) ของฉัตรที่ 1 มาวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลส เพอร์ออกซิเดส และซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (El-Shraiy *et al*, 2011) และเก็บใบยางพาราตำแหน่งใบย่อยกลาง จากก้านใบประกอบที่ 4 (นับจากล่าง) ของฉัตรที่ 1 มาวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (กฤษดา และพิเชษฐ, 2552) และนำใบดังกล่าวไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน นำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืชผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เก็บไว้ในถุงกระดาษขนาดเล็กและอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 5 ชั่วโมง และนำไปวิเคราะห์หาคาร์โบไฮเดรตในใบ (Osborne and Voogt, 1978)

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (40 วัน) นำตัวอย่างยางพาราแยกส่วนใบ ก้านใบ ลำต้น รากแก้ว และรากแขนง และนำใบไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน นำตัวอย่างมาชั่งหาน้ำหนักแห้ง และนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืชผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เก็บไว้ในถุงกระดาษขนาดเล็กและอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 5 ชั่วโมง นำตัวอย่างพืชที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารต่างๆ (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

3.2.3 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต

เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของกล้ายางพาราเริ่มทำการทดลองและสิ้นสุดการทดลอง ได้แก่ วัดความสูง (รอยแตกตาถึงปลายยอด) และเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น (เหนือรอยเท้าช้าง 10 cm) รวมทั้งอาการที่แสดงออกของยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีสระดับต่างๆ

4. การวิเคราะห์สถิติ

นำข้อมูลการเจริญเติบโต ปริมาณธาตุอาหารทั้งในดินและในส่วนต่างๆ ของยางพารา กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และปริมาณคาร์โบไฮเดรตในใบมาหาค่าเฉลี่ย และนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวนทางเดียวด้วยวิธี ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างทรีตเมนต์โดยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 รวมทั้งหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างแมงกานีสรูปต่างๆ ในดินและในใบยางพาราโดยวิธี Pearson

บทที่ 3

ผลการทดลอง

การศึกษาผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา ประกอบด้วย 2 การทดลอง คือ การทดลองผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา ที่ปลูกในดินและในสารละลาย มีผลการทดลอง ดังนี้

1. ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพาราที่ปลูกในดิน

1.1 ค่าวิเคราะห์ดินก่อนการทดลอง

ดินก่อนการทดลองมีค่าพีเอชเป็นกรดเล็กน้อย ค่าการนำไฟฟ้าต่ำมาก อินทรียวัตถุค่อนข้างต่ำ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ปานกลาง เหล็กที่สกัดได้สูง แมงกานีสและสังกะสีที่สกัดได้ต่ำ และทองแดงที่สกัดได้ต่ำมาก (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 ค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

Parameter	Value
pH (1:5)	6.1
EC (1:5)(dS m^{-1})	0.023
OM (%)	1.03
Avai. P (mg kg^{-1})	4.15
Exch. K ($cmol_c$ kg^{-1})	0.06
Exch. Ca ($cmol_c$ kg^{-1})	0.29
Exch. Mg ($cmol_c$ kg^{-1})	0.16
Extr. Mn (mg kg^{-1})	1.26
Extr. Fe (mg kg^{-1})	64.98
Extr. Cu (mg kg^{-1})	0.02
Extr. Zn (mg kg^{-1})	0.22

เมื่อเก็บดินหลังจากผสมดินกับปุ๋ย และแมงกานีส เสร็จแล้วมาวิเคราะห์ พบว่า ดินที่ไม่ใส่และใส่แมงกานีส 5, 10 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าพีเอช (5.5-5.8) ไม่แตกต่างทางสถิติ แต่ดินที่เติมแมงกานีส 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าพีเอชลดลง โดยลดลงชัดเจนในดินที่ใส่แมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ดินที่ไม่ใส่และใส่แมงกานีส 5, 10, 50 และ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าการนำไฟฟ้า ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และแมงกานีสที่สกัดได้ไม่แตกต่างกัน แต่ดินที่ใส่แมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าการนำไฟฟ้า ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และแมงกานีสที่สกัดได้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแมงกานีสที่สกัดได้เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน นอกจากนั้น การใส่แมงกานีสที่เพิ่มขึ้นทำให้เหล็ก สังกะสี และทองแดงที่สกัดได้ลดลง (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อสมบัติทางเคมีของดินเมื่อเริ่มทดลอง

Mn (mg kg^{-1})	Nutrients										
	pH	EC	OM	Avai. P	Exch. K	Exch. Ca	Exch. Mg	Extr. Mn	Extr. Fe	Extr. Zn	Extr. Cu
	(1:5)	(1:5)(dS m^{-1})	(%)	(mg kg^{-1})	($cmol_c$ kg^{-1})			(mg kg^{-1})			
0	5.8a	0.10b	0.97	3.7b	0.11b	0.25	0.13	1.8d	80a	0.33a	0.06a
5	5.5bc	0.12b	0.96	4.0b	0.39a	0.29	0.15	8.2d	78a	0.26ab	0.05a
10	5.8a	0.05b	0.95	4.7b	0.18ab	0.31	0.15	11d	82a	0.25abc	0.04ab
50	5.6ab	0.15b	0.98	5.4b	0.30ab	0.28	0.15	46c	69b	0.24bc	0.02b
100	5.2c	0.15b	0.99	4.1b	0.15b	0.28	0.14	76b	61c	0.23bc	0.02b
1,000	4.5d	0.54a	0.97	11a	0.22ab	0.26	0.13	569a	13d	0.17c	0.00c
F-test	*	*	NS	*	*	NS	NS	*	*	*	*
C.V. (%)	4.00	41.96	9.91	42.38	65.83	16.02	0.00	52.20	6.28	22.25	0.00

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

1.2 ผลของแมงกานีสต่ออาการเป็นพิษของยางพารา

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใบมีอาการเหลือง โดยเริ่มจากขอบและปลายใบ และเมื่อใบเหลืองเพิ่มขึ้นปลายใบเริ่มไหม้ (ภาพที่ 3.1) หากอาการรุนแรงใบมีอาการเหี่ยว ลามไปยังก้านใบ และลำต้น ทำให้ทั้งใบและก้านใบแห้งติดต้นโดยไม่ร่วง หลังจากนั้นยางพารายืนต้นตาย (ภาพที่ 3.2)

ภาพที่ 3.1 ผลของแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่ออาการเป็นพิษของใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน

ภาพที่ 3.2 ผลของแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต่อการเจริญเติบโตของยางพาราหลังทดลอง 100 วัน

1.3 ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีน้ำหนักแห้งใบ ก้านใบ และรากแขนง มีแนวโน้มสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีน้ำหนักแห้งลำต้นและรากแก้วมีแนวโน้มสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักแห้งส่วนต่างๆ มีแนวโน้มลดลง แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ จึงไม่มีข้อมูลมาแสดง (ตารางที่ 3.3)

ตารางที่ 3.3 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อน้ำหนักแห้งส่วนต่างๆ ของยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Dry weights (g)				
	Leave	Petiole	Stem	Tap root	Lateral root
0	3.5	0.91	4.5	17.7	4.6
5	3.9	0.88	5.5	19.2	4.7
10	5.8	1.00	5.7	19.8	5.8
50	3.8	0.91	6.3	23.5	5.5
100	3.9	0.79	5.2	16.3	5.5
1,000	ND	ND	ND	ND	ND
F-test	NS	NS	NS	NS	NS
C.V. (%)	36.25	30.63	36.24	38.20	31.03

หมายเหตุ : NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

ND คือ ไม่มีข้อมูลเนื่องจากยางพาราตายระหว่างการทดลอง

หลังจากทดลองปลูกยางพารา 3 เดือน พบว่า ยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีสมีความสูงของลำต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความสูงของลำต้นมีแนวโน้มน้อยที่สุด (ตารางที่ 3.4)

ตารางที่ 3.4 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความสูงของต้นยางพารา หลังทดลอง 3 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Heights (cm)		
	Before	After (3 month)	Difference
0	20.5	46.4	25.9
5	21.9	38.5	16.6
10	19.3	47.8	28.5
50	20.5	39.6	19.1
100	21.1	48.3	27.2
1,000	20.1	34.4	14.3
F-test	NS	NS	NS
C.V. (%)	16.24	44.55	83.70

หมายเหตุ : NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

หลังจากทดลองปลูกยางพารา 5 เดือน พบว่า ยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความสูงของลำต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่สามารถจะเจริญเติบโตได้ จึงไม่มีข้อมูลมาแสดง (ตารางที่ 3.5)

หลังจากทดลองปลูกยางพารา 3 เดือน พบว่า ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการเจริญเติบโตของลำต้นเพิ่มขึ้นสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้การเจริญเติบโตของลำต้นลดลง และลดลงชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.6)

ตารางที่ 3.5 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความสูงของต้นยางพารา หลังทดลอง 5 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Heights (cm)		
	Before	After (5 month)	Difference
0	20.5	62.3	41.8
5	21.9	74.1	52.2
10	19.3	79.0	59.7
50	20.5	75.5	55.0
100	21.1	84.8	63.7
1,000	ND	ND	ND
F-test	NS	NS	NS
C.V. (%)	17.08	20.34	29.11

หมายเหตุ : NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

ND คือ ไม่มีข้อมูลเนื่องจากกล้ายางพาราตายระหว่างการทดลอง

ตารางที่ 3.6 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของต้นยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Diameters (mm)		
	Before	After (3 month)	Difference
0	4.35	5.59ab	1.24ab
5	4.39	5.82ab	1.43ab
10	4.18	6.36a	2.18a
50	4.38	6.40a	2.02a
100	4.34	6.10a	1.76a
1,000	4.23	4.71b	0.48b
F-test	NS	*	*
C.V. (%)	9.65	14.84	40.74

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

หลังจากปลูกยางพาราอายุ 5 เดือน พบว่า ยางพาราที่ไม่ได้รับและได้รับแมงกานีส 5-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการเจริญเติบโตของลำต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่สามารถเจริญเติบโตได้จึงไม่มีข้อมูลมาแสดง (ตารางที่ 3.7)

ตารางที่ 3.7 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Diameters (mm)		
	Before	After (5 month)	Difference
0	4.35	6.41	2.06
5	4.39	6.66	2.27
10	4.18	7.12	2.94
50	4.38	6.59	2.21
100	4.34	6.74	2.40
1,000	ND	ND	ND
F-test	NS	NS	NS
C.V. (%)	20.34	14.05	31.99

หมายเหตุ : NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

ND คือ ไม่มีข้อมูลเนื่องจากกล้ายางพาราตายระหว่างการทดลอง

ยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีสมีความกว้างของใบไม่แตกต่างกันทางสถิติ และยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความยาวใบไม่แตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีความยาวใบน้อยที่สุด (ตารางที่ 3.8)

ตารางที่ 3.8 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความกว้างและความยาวของใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Width (cm)	Length (cm)
0	4.7	14.5ab
5	5.2	16.5ab
10	5.4	15.7ab
50	5.4	17.5a
100	5.2	15.9ab
1,000	4.6	13.8b
F-test	NS	*
C.V. (%)	16.20	13.24

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีการเจริญเติบโตทั้งส่วนเหนือดินและส่วนรากไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 3.3 และ 3.4)

ภาพที่ 3.3 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50 และ 100 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของยางพาราหลังทดลอง 5 เดือน

ภาพที่ 3.4 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50 และ 100 mg kg^{-1}) ต่อการเจริญเติบโตของรากยางพารา หลังทดลอง 5 เดือน

1.4 ผลของแมงกานีสต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบยางพารา

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลง และลดลงชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นอกจากนั้น ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5 และ 10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตมีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 3.9)

ตารางที่ 3.9 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	Total chlorophyll (mg dm^{-2})	Total non-structural carbohydrate in leaf (g kg^{-1})
0	4.4ab	93c
5	4.3ab	112bc
10	4.9a	115bc
50	3.5b	156a
100	3.9ab	130ab
1,000	1.7c	117bc
F-test	*	*
C.V. (%)	21.77	16.03

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

1.5 ผลของแมงกานีสต่อกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบยางพารา

ยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 5-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีกิจกรรมของเอนไซม์ลดลงชัดเจน ในขณะที่ระดับแมงกานีสที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน มีกิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสและซูเปอร์ออกไซม์ดิสมิวเทสไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 3.10)

ตารางที่ 3.10 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ CAT, POD และ SOD ในใบยางพาราหลังทดลอง 3 เดือน

Mn (mg kg^{-1})	CAT (mmol min^{-1} gFW^{-1})	POD (O.D. $min^{-1}gFW^{-1}$)	SOD (U gFW^{-1})
0	1.3ab	317	134
5	2.1a	360	129
10	2.1a	367	126
50	1.6ab	347	136
100	2.0a	355	131
1,000	1.1b	355	140
F-test	*	NS	NS
C.V. (%)	30.54	17.05	9.00

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

1.6 ผลของแมงกานีสต่อความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของกล้ายางพารา

เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทำให้ในส่วนต่างๆ ของยางพารามีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยในรากแขนงมีความเข้มข้นของแมงกานีสมากที่สุด รองลงมา คือ ก้านใบ ลำต้น ใบ และรากแก้ว ตามลำดับ (ตารางที่ 3.11)

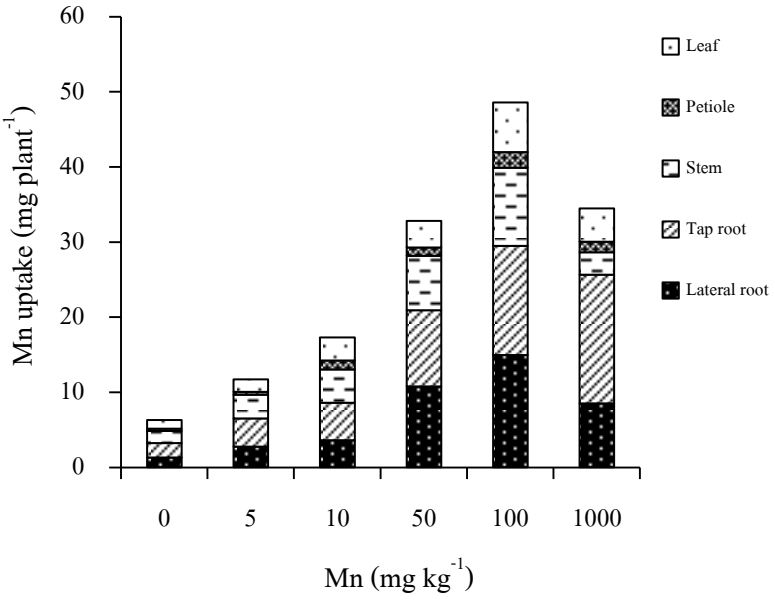
เมื่อประเมินปริมาณแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพาราจากความเข้มข้นและน้ำหนักแห้ง พบว่า เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีการสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยแมงกานีสสะสมมากที่สุดในรากแก้ว รองลงมา คือ รากแขนง ลำต้น ใบ และก้านใบ ตามลำดับ (ภาพที่ 3.5)

ตารางที่ 3.11 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพารา

Mn (mg kg^{-1})	leaf	petiole	stem	tap root	lateral root
	Mn (mg kg^{-1})				
0	324c	340c	359d	108d	286d
5	422c	454c	570cd	197cd	586cd
10	530c	1,212b	775c	254cd	617cd
50	943b	1,207b	1,156b	433c	1,947bc
100	1,685a	2,629a	1,997a	895b	2,713b
1,000	1,623a	2,533a	1,818a	1,213a	8,588a
F-test	*	*	*	*	*
C.V. (%)	24.08	30.42	17.02	33.88	23.27

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



ภาพที่ 3.5 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อการดูดใช้แมงกานีสที่สะสมในส่วนต่างๆ ของยางพารา

หมายเหตุ : ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เก็บข้อมูลที่อายุ 100 วัน

เมื่อสิ้นสุดการทดลองแล้วเก็บดินมาวิเคราะห์แมงกานีสในรูปต่างๆ พบว่า ดินที่ใส่แมงกานีส 0-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นตามปริมาณแมงกานีสที่ใส่ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ทั้งแมงกานีสที่อยู่ในรูป แมงกานีสในสารละลาย (Water) แมงกานีสที่สกัดได้ (DTPA) แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ (NH_4OAc) แมงกานีสที่รีดิวซ์ได้ง่าย (Reducible) และแมงกานีสทั้งหมด (Total) และดินที่ใส่แมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นชัดเจน โดยมีแมงกานีสในรูปแมงกานีสทั้งหมดมีปริมาณแมงกานีสมากกว่าแมงกานีสในรูปอื่นๆ (ตารางที่ 3.12)

ตารางที่ 3.12 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อปริมาณแมงกานีสในรูปต่างๆ ในดินเมื่อสิ้นสุดการทดลอง

Mn	Water	DTPA	NH_4OAc	Reducible	Total
(mg kg^{-1})			(mg kg^{-1})		
0	0.59b	3.0b	2.5b	6.0b	14b
5	5.0b	13b	12b	16b	27b
10	8.1b	16b	15b	18b	34b
50	43b	64b	59b	83b	93b
100	64b	81b	78b	94b	158b
1,000	744a	772a	788a	1,106a	1,119a
F-test	*	*	*	*	*
C.V. (%)	27.98	28.36	46.10	24.01	33.22

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

แมงกานีสในดินในรูปต่างๆ มีความสัมพันธ์กัน และแมงกานีสในใบยางพารามีความสัมพันธ์กับแมงกานีสในดินในรูปในสารละลาย (water) แมงกานีสที่สกัดได้ (DTPA) และแมงกานีสที่อยู่ในรูปรีดิวซ์ได้ง่าย (reducible) ที่ความเชื่อมั่น 99 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งแมงกานีสในใบยางพารามีความสัมพันธ์แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ (NH_4OAc) และแมงกานีสทั้งหมด (total) ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 3.13)

ตารางที่ 3.13 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ระหว่างแมงกานีสรูปต่างๆ ในดินและในใบยางพารา

Manganese fraction	Water	DTPA	NH_4OAc	Reducible	Total	Leaf
Water	1.000					
DTPA	0.985**	1.000				
NH_4OAc	0.958**	0.959**	1.000			
Reducible	0.992**	0.988**	0.956**	1.000		
Total	0.981**	0.980**	0.944**	0.997**	1.000	
Leaf	0.639**	0.710**	0.499*	0.549**	0.429*	1.000

หมายเหตุ : *, ** คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $P \leq 0.05$ และ $P \leq 0.01$

1.7 ผลของแมงกานีสต่อการดูดใช้ธาตุอาหารต่างๆ ของกล้ายางพารา

เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ในส่วนต่างๆ ของยางพารามีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18) แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกิน (1,000 mg kg^{-1}) ทำให้การดูดใช้ไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในใบ ก้านใบ ลำต้น และรากแขนงลดลง (ตารางที่ 3.14, 3.15, 3.16 และ 3.18) รวมทั้งไนโตรเจนและแคลเซียมในรากแก้ว (ตารางที่ 3.14) และสังกะสีในรากแก้วและรากแขนง (ตารางที่ 3.17 และ 3.18) แต่ความเข้มข้นของแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นกลับมีฟอสฟอรัสในส่วนต่างๆ ของยางพาราเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 และ 3.18) รวมทั้งเหล็กในส่วนรากแขนง (ตารางที่ 3.18)

ตารางที่ 3.14 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในใบยางพารา

Mn (mg kg^{-1})	Leaf nutrients							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn
	(g kg^{-1})					(mg kg^{-1})		
0	37ab	1.6	21a	4.0ab	3.6a	324c	27	13b
5	34ab	2.0	19a	2.9c	3.8a	422c	29	12b
10	40a	1.7	21a	4.4a	3.3a	530c	36	11b
50	34ab	1.8	18ab	3.9ab	3.6a	943b	38	19b
100	38a	2.0	20a	3.3bc	3.0a	1,685a	37	16b
1,000	27b	2.2	14b	2.7c	1.6b	1,623a	47	30a
F-test	*	NS	*	*	*	*	NS	*
C.V. (%)	19.10	23.04	16.01	12.98	13.84	24.08	34.08	28.29

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ตารางที่ 3.15 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในก้านใบยางพารา

Mn (mg kg^{-1})	Petiole nutrients							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn
	(g kg^{-1})					(mg kg^{-1})		
0	14bc	0.71b	32a	3.2ab	1.8a	340c	17ab	17
5	21a	1.3a	31a	2.3bc	1.6a	454c	22a	18
10	18ab	0.73b	31a	3.7a	1.9a	1,212b	19ab	18
50	16abc	0.86ab	30a	2.4bc	1.5ab	1,207b	25a	13
100	16abc	1.2ab	30a	2.6bc	1.0b	2,629a	11b	13
1,000	11c	1.4a	14b	2.1c	0.42c	2,533a	11b	18
F-test	*	*	*	*	*	*	*	NS
C.V. (%)	19.36	31.36	21.39	23.65	24.27	30.42	29.22	23.97

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ตารางที่ 3.16 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในลำต้นยางพารา

Mn (mg kg^{-1})	Stem nutrients							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn
	(g kg^{-1})					(mg kg^{-1})		
0	14a	0.63b	20a	6.8a	1.2ab	359d	41a	13b
5	10abc	0.52bc	24a	6.3ab	1.4a	570cd	29abc	12b
10	13ab	0.50bc	24a	5.9abc	1.1ab	775c	14c	18a
50	10abc	0.42c	22a	5.0abc	0.90b	1,156b	19bc	12b
100	9.5bc	0.51bc	24a	3.7c	0.63c	1,997a	31ab	14ab
1,000	8.8c	1.2a	13b	4.4bc	0.61c	1,818a	20bc	16ab
F-test	*	*	*	*	*	*	*	*
C.V. (%)	22.63	17.89	13.39	26.47	15.60	17.02	36.72	20.58

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ตารางที่ 3.17 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในรากแก้วยางพารา

Mn (mg kg^{-1})	Tap root nutrients							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn
	(g kg^{-1})					(mg kg^{-1})		
0	7.7bc	0.49ab	6.6b	3.5a	0.65	108d	269b	21bc
5	8.1abc	0.43ab	7.4ab	4.5a	0.73	199cd	273b	26ab
10	11ab	0.32ab	9.3a	3.0ab	0.69	254cd	308ab	31a
50	9.0abc	0.22b	6.0b	3.0ab	0.62	433c	238b	19bc
100	11a	0.35ab	6.2b	2.7ab	0.58	894b	486a	27ab
1,000	7.3c	0.61a	6.5b	1.1c	0.53	1,213a	345ab	13c
F-test	*	*	*	*	NS	*	*	*
C.V. (%)	18.54	43.83	17.37	40.99	4.73	33.88	35.92	23.98

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ตารางที่ 3.18 ผลของแมงกานีส (0, 5, 10, 50, 100 และ 1,000 mg kg^{-1}) ต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารต่างๆ ในรากแขนงยางพารา

Mn (mg kg^{-1})	Lateral root nutrients							
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn
	(g kg^{-1})					(mg kg^{-1})		
0	34ab	0.66b	13a	2.7a	1.0a	286d	1,777b	39a
5	31ab	0.72b	11a	2.9a	1.1a	586cd	1,711b	36ab
10	39a	0.86ab	13a	2.1ab	0.91a	617cd	1,998b	42a
50	27b	0.84ab	1.0a	3.1a	1.2a	1,947bc	2,472b	43a
100	37a	0.79ab	13a	2.0ab	0.92a	2,713b	1,982b	35ab
1,000	16c	1.0a	3.3b	1.0b	0.43b	8,588a	6,285a	26c
F-test	*	*	*	*	*	*	*	*
C.V. (%)	18.79	18.57	24.52	30.84	25.37	37.49	23.27	19.16

หมายเหตุ :* คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$

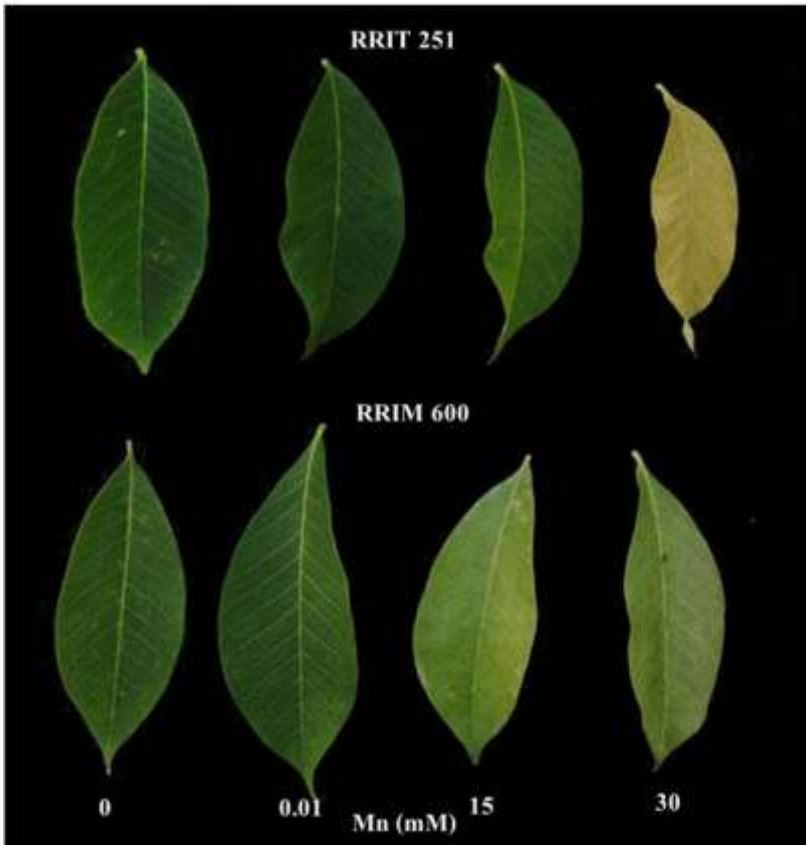
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

2. ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพาราที่ปลูกในสารละลาย

2.1 ผลของแมงกานีสต่ออาการเป็นพิษของกล้ายางพารา

ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ ใบมีสีเขียวเข้ม แต่ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ (หลังทดลองประมาณ 30 วัน) พบว่า ใบยางพารามีสีเขียวอ่อนและเหลือง โดยเฉพาะยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีอาการใบเหลืองชัดเจน (ภาพที่ 3.6)

รากแขนงยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ (หลังทดลองประมาณ 20 วัน) มีอาการเน่าและรากมีสีน้ำตาลดำ นอกจากนั้น รากแก้วของยางพาราพันธุ์ RRIT 251 มีอาการแตกเป็นแผลและมีน้ำยางไหลออกมา (หลังทดลองประมาณ 35 วัน) โดยแผลจะเป็นสีขาวและเมื่อแผลเริ่มเน่าจะเปลี่ยนเป็นสีดำ (ภาพที่ 3.7)



ภาพที่ 3.6 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่ออาการใบเหลืองของยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

ภาพที่ 3.7 ผลของแมงกานีส (30 mM) ต่ออาการแตกของรากแก้วยางพาราพันธุ์ RRIT 251

2.2 ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของกล้ายางพารา

รากยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ เจริญเติบโตดีกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส แต่เมื่อได้รับแมงกานีสมากขึ้นทำให้การเจริญเติบโตของรากยางพาราลดลงชัดเจน และรากแขนงของยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีอาการรากเน่า (ภาพที่ 3.8)

ภาพที่ 3.8 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อการเจริญเติบโตของรากยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีน้ำหนักแห้งใบ ก้านใบ ลำต้น (ตารางที่ 3.19) และรากแขนง (ตารางที่ 3.20) สูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้น้ำหนักแห้งของยางพาราในทุกส่วนที่กล่าวมาลดลง ยกเว้นน้ำหนักแห้งของรากแก้วที่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 3.19 และ 3.20)

ตารางที่ 3.19 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อน้ำหนักแห้งใบ ก้านใบ และลำต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Leaf dry weight (g)		Petiole dry weight (g)		Stem dry weight (g)	
	RRIT 251	RRIM 600	RRIT 251	RRIM 600	RRIT 251	RRIM 600
0	3.6a	4.9a	0.6ab	1.2a	1.5	2.0b
0.01	5.1a	5.3a	0.9a	1.3a	2.0	3.3a
15	2.8ab	2.4b	0.4b	0.5b	1.2	1.2c
30	1.1b	1.6b	0.4b	0.3b	1.0	1.1c
F-test	*	*	*	*	NS	*
C.V. (%)	28.32	33.03	38.75	32.61	32.66	17.59

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ตารางที่ 3.20 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อน้ำหนักแห้งรากแก้ว และรากแขนงยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Tap root dry weight (g)		Lateral root dry weight (g)	
	RRIT 251	RRIM 600	RRIT 251	RRIM 600
0	21	26	1.2ab	1.4ab
0.01	29	25	2.1a	2.6a
15	30	22	0.65b	1.0b
30	29	35	1.0ab	0.68b
F-test	NS	NS	*	*
C.V. (%)	33.87	36.88	40.81	47.03

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีการเจริญเติบโตของลำต้นสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้การเจริญเติบโตของลำต้นช้ามาก ในขณะที่ยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 และ 15 มิลลิโมลาร์ มีการเจริญเติบโตของลำต้นสูงกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้การเจริญเติบโตของลำต้นช้าลงเช่นเดียวกับยางพาราพันธุ์ RRIT 251 โดยยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีการเจริญเติบโตของลำต้นสูงกว่าพันธุ์ RRIT 251 (ตารางที่ 3.21)

ตารางที่ 3.21 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	RRIT 251 (mm)			RRIM 600 (mm)		
	Before	After	Difference	Before	After	Difference
0	4.84	4.98	0.14b	4.98	5.33	0.35b
0.01	4.45	5.09	0.64a	5.03	5.98	0.95a
15	4.84	4.85	0.01b	4.39	4.86	0.47b
30	4.92	4.92	0.00b	4.9	4.97	0.07b
F-test	NS	NS	*	NS	NS	*
C.V. (%)	11.16	10.12	67.11	10.93	9.58	45.65

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05 และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีความสูงของลำต้นเพิ่มขึ้นเท่ากับ 11.17 และ 19.07 เซนติเมตร ในยางพาราพันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600 ตามลำดับ โดยสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ความสูงที่เพิ่มขึ้นของยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ลดลง โดยยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีความสูงของลำต้นสูงกว่าพันธุ์ RRIT 251 (ตารางที่ 3.22)

ตารางที่ 3.22 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความสูงของต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	RRIT 251 (cm)			RRIM 600 (cm)		
	Before	After	Difference	Before	After	Difference
0	21.50	29.10	7.60	22.35	38.00a	15.65ab
0.01	26.78	37.93	11.17	27.60	46.67a	19.07a
15	21.03	21.33	0.30	21.33	21.93b	0.60b
30	22.43	22.60	0.16	21.60	22.10b	0.05b
F-test	NS	NS	NS	NS	*	*
C.V. (%)	28.81	32.19	67.11	25.06	17.99	45.65

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P = 0.05$

2.3 ผลของแมงกานีสต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบยางพารา

ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อได้รับแมงกานีสสูงเกินไปทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง โดยยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ไม่ได้รับแมงกานีสมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบสูงสุด และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลง และลดลงชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ (1.5 mg dm^{-2}) ส่วนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดมีแนวโน้มสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีสมากกว่า 0.01 มิลลิโมลาร์ นอกจากนั้น ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 0.01 และ 15 มิลลิโมลาร์ ส่วนในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ไม่ได้รับและได้รับแมงกานีสมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตไม่แตกต่างทางสถิติ แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ ทั้งนี้ ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีปริมาณคลอโรฟิลล์และคาร์โบไฮเดรตลดลงชัดเจนกว่ายางพาราพันธุ์ RRIM 600 (ตารางที่ 3.23)

ตารางที่ 3.23 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Total chlorophyll (mg dm^{-2})		Total non-structural carbohydrate in leaf (g kg^{-1})	
	RRIT 251	RRIM 600	RRIT 251	RRIM 600
0	3.3a	3.4	172a	173
0.01	2.4ab	3.7	136ab	136
15	1.9ab	3.1	158a	172
30	1.5b	3.0	95b	128
F-test	*	NS	*	NS
C.V. (%)	35.87	22.94	19.12	21.99

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

2.4 ผลของแมงกานีสต่อกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบยางพารา

แมงกานีสมีผลกระทบต่อกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ชัดเจนกว่าพันธุ์ RRIM 600 โดยกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสในใบยางพาราพันธุ์ RRIT 251 มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นเป็น 15 มิลลิโมลาร์ และกิจกรรมของเอนไซม์ลดลงชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ (0.21 mmol min^{-1} gFW^{-1}) ซึ่งต่ำกว่าในใบยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีส (1.7 mmol min^{-1} gFW^{-1}) ในขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสในใบยางพาราพันธุ์ RRIT 251 เพิ่มขึ้นชัดเจน เมื่อได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ (611 O.D. min^{-1} gFW^{-1}) ซึ่งสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 0.01 และ 15 มิลลิโมลาร์ ส่วนในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นเป็น 15 มิลลิโมลาร์ และมีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ ในขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสและซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสมีแนวโน้มการตอบสนองต่อแมงกานีสเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับพันธุ์ RRIT 251 แต่ไม่แตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 3.24)

ตารางที่ 3.24 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ CAT, POD และ SOD ในใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	CAT (mmol min^{-1} gFW^{-1})		POD (O.D. min^{-1} gFW^{-1})		SOD (U gFW^{-1})	
	RRIT 251	RRIM 600	RRIT 251	RRIM 600	RRIT 251	RRIM 600
0	1.7a	2.1	177b	396	124	125
0.01	1.8a	2.1	320ab	347	130	119
15	2.0a	3.2	340ab	415	142	127
30	0.21b	2.8	611a	420	172	141
F-test	*	NS	*	NS	NS	NS
C.V. (%)	20.76	19.20	37.62	11.28	19.41	24.54

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P = 0.05$

2.5 ผลของแมงกานีสต่อความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพารา

ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีสมากกว่า 0.01 มิลลิโมลาร์ มีความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพาราสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสและได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ อย่างชัดเจน โดยแมงกานีสมีมากที่สุดในรากแขนง และใบมีแมงกานีสน้อยที่สุด (ตารางที่ 3.25)

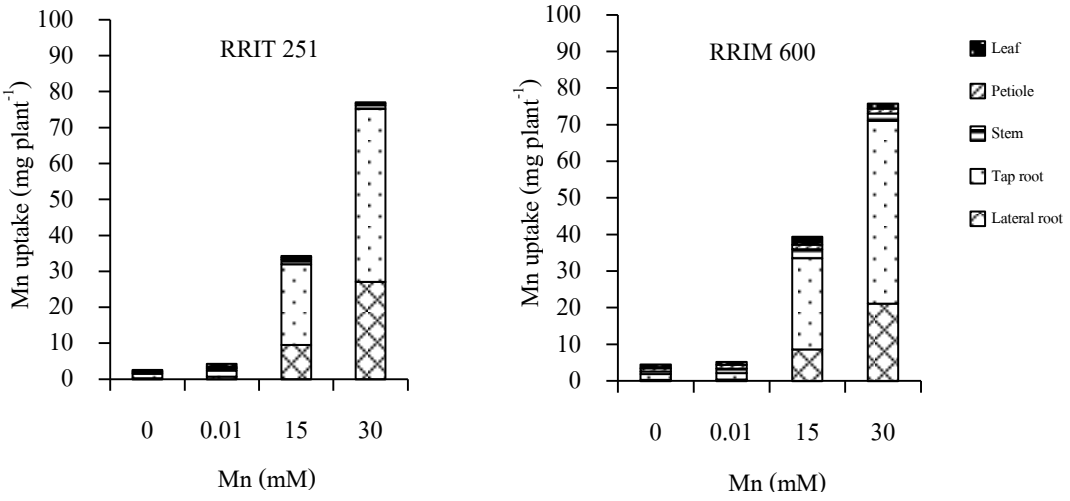
เมื่อประเมินปริมาณแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพาราจากความเข้มข้นและน้ำหนักแห้ง พบว่า ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีการสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสมากกว่า 0.01 มิลลิโมลาร์ โดยยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีการสะสมแมงกานีสมากที่สุด และยางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีสมีการสะสมแมงกานีสน้อยที่สุด โดยแมงกานีสสะสมมากที่สุดในรากแก้ว รองลงมา คือ รากแขนง (ภาพที่ 3.9)

ตารางที่ 3.25 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นแมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Leaf	Petiole	Stem	Tap root	Lateral root
	Mn (mg kg^{-1})				
RRIT 251					
0	115b	419b	225b	58c	300c
0.01	169b	596ab	299b	59c	383c
15	171b	1,291a	1,094a	756b	14,743b
30	301a	1,288a	1,146a	1,655a	27,715a
F-test	*	*	*	*	*
C.V. (%)	19.01	41.72	58.36	25.90	30.89
RRIM 600					
0	147b	702c	332b	62b	178c
0.01	217b	743c	382b	70b	251c
15	863a	2,665b	1,891a	1,122a	8,786b
30	874a	3,761a	2,075a	1,412a	31,130a
F-test	*	*	*	*	*
C.V. (%)	26.73	23.89	24.97	47.92	7.34

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ P≤0.05

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05



ภาพที่ 3.9 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อการดูดใช้แมงกานีสในส่วนต่างๆ ของยางพาราพันธุ์ RRIT 251และ RRIM 600

2.6 ผลของแมงกานีสต่อการดูดธาตุอาหารต่างๆ ของยางพารา

เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ในใบยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ มีแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยพันธุ์ RRIT 251 เพิ่มขึ้นชัดเจน เมื่อได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ และพันธุ์ RRIM 600 เพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ นอกจากนั้น ยังมีเหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียมสูงกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีธาตุอาหารดังกล่าวลดลง ส่วนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แมกนีเซียม และทองแดงสูงกว่ายางพาราที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีธาตุอาหารดังกล่าวลดลง (ตารางที่ 3.26)

ตารางที่ 3.26 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Leaf nutrients								
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	Cu
	($g\ kg^{-1}$)					($mg\ kg^{-1}$)			
RRIT 251									
0	37ab	2.8b	12	3.6c	2.6a	115b	90b	43b	5.4a
0.01	40a	4.0a	10	5.9a	2.3ab	169b	67b	33b	4.6a
15	32ab	2.1b	11	3.6c	2.2ab	171b	66b	35b	4.6a
30	25b	2.1b	11	5.0b	1.9b	301a	155a	124a	3.3b
F-test	*	*	NS	*	*	*	*	*	*
C.V. (%)	20.24	15.03	19.01	8.98	11.69	19.01	12.35	15.59	11.3
RRIM 600									
0	35ab	2.6ab	11ab	5.9	1.9	147b	69	41	5.2b
0.01	39a	3.3a	12a	5.7	2.5	217b	62	34	7.1a
15	37ab	2.5b	11ab	5.5	2.0	863a	91	45	3.6b
30	28b	1.5c	8b	7.1	2.3	874a	109	44	4.3b
F-test	*	*	*	NS	NS	*	NS	NS	*
C.V. (%)	13.27	15.66	17.25	23.52	18.13	26.73	28.23	11.36	16.21

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

เมื่อยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ในส่วนก้านใบยางพารามีความเข้มข้นแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีส 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ ทำให้ในก้านใบมีฟอสฟอรัสสูงกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีฟอสฟอรัสลดลง นอกจากนั้น ยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ ทำให้ในก้านใบมีไนโตรเจน โพแทสเซียม และแคลเซียมลดลง (ตารางที่ 3.27)

ตารางที่ 3.27 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในก้านใบยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Petiole nutrients								
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	Cu
	($g\ kg^{-1}$)					($mg\ kg^{-1}$)			
RRIT 251									
0	14	1.2b	16a	5.6	1.7	419b	38a	31	3.8bc
0.01	18	3.5a	15ab	7.1	1.4	596ab	19ab	29	3.0c
15	19	1.3b	13b	5.4	1.4	1,291a	15b	29	5.9a
30	14	1.2b	12b	6.1	1.6	1,288a	19ab	40	5.1ab
F-test	NS	*	*	NS	NS	*	*	NS	*
C.V. (%)	20.31	10.95	14.66	17.92	36.28	41.72	35.51	37.89	14.75
RRIM 600									
0	14b	2.4b	14ab	8.2	0.9b	702c	30ab	33	2.8b
0.01	20a	3.8a	16a	6.7	1.3a	743c	24b	31	5.5a
15	16b	1.7c	11ab	9.7	0.8b	2,665b	56ab	30	2.4b
30	14b	1.4c	8b	7.5	1.0b	3,761a	74a	34	2.6b
F-test	*	*	*	NS	*	*	*	NS	*
C.V. (%)	15.78	13.49	19.69	59.37	21.49	23.89	46.92	19.75	10.76

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ยางพารา 2 พันธุ์ ที่ได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ส่วนลำต้นมีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นชัดเจน ในยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ ทำให้ส่วนลำต้นมีไนโตรเจน

ฟอสฟอรัส แคลเซียม และแมกนีเซียมสูงกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้น ทำให้ธาตุดังกล่าวรวมทั้งเหล็ก สังกะสี และทองแดงลดลง ส่วนยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ที่ได้รับแมงกานีส 30 มิลลิโมลาร์ มีฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในส่วนลำต้นลดลง (ตารางที่ 3.28)

ตารางที่ 3.28 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในลำต้นยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Stem nutrients								
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	Cu
	($g\ kg^{-1}$)					($mg\ kg^{-1}$)			
RRIT 251									
0	17	2.2b	16a	10a	2.8	225b	44a	36a	7.9a
0.01	19	3.4a	13ab	9.5a	3.0	299b	29ab	26b	4.1c
15	13	1.8b	15a	6.5b	2.6	1,094a	18b	26b	6.1b
30	13	1.5b	9.6b	8.8ab	2.8	1,146a	17b	21b	3.7c
F-test	NS	*	*	*	NS	*	*	*	*
C.V. (%)	30.58	18.56	18.52	16.05	23.99	58.36	48.29	16.03	14.61
RRIM 600									
0	13	2.6ab	15a	10	1.8ab	332b	14	29	3.1ab
0.01	14	3.3a	15a	9.9	2.1ab	382b	24	28	3.7a
15	15	2.1b	11ab	13	1.4b	1,891a	19	34	2.4b
30	17	1.7b	7.8b	14	2.5a	2,075a	19	28	3.4a
F-test	NS	*	*	NS	*	*	NS	NS	*
C.V. (%)	25.05	19.96	21.62	23.24	21.55	24.97	28.57	13.21	11.37

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ $P = 0.05$

ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ในส่วนรากแก้วมีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ ยางพาราพันธุ์ RRIT 251 ที่ไม่ได้รับแมงกานีสมีแคลเซียมและแมกนีเซียมสูงกว่าที่ได้รับแมงกานีส ในขณะที่ความเข้มข้นของธาตุอาหารดังกล่าวในยางพาราพันธุ์ RRIM 600 ทั้งที่ไม่ได้รับและได้รับแมงกานีสไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 3.29)

ตารางที่ 3.29 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในรากแก้วยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Tap root nutrient								
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	Cu
	($g\ kg^{-1}$)					($mg\ kg^{-1}$)			
RRIT 251									
0	7.3	0.62	8.3	4.7a	0.79a	58c	403	17b	5.6ab
0.01	6.8	0.93	5.7	3.7ab	0.68ab	59c	390	17b	3.2c
15	7.8	0.96	8.0	2.3b	0.50ab	756b	232	10c	6.6a
30	5.4	0.82	5.4	2.2b	0.48b	1,655a	325	25a	4.6bc
F-test	NS	NS	NS	*	*	*	NS	*	*
C.V. (%)	25.43	34.59	25.79	26.81	19.89	25.9	24.86	18.9	13.17
RRIM 600									
0	8.4	1.4	4.7	2.3	0.44	62b	570	24a	2.8b
0.01	8.1	1.3	5.9	3.1	0.62	70b	309	15ab	3.0b
15	8.1	1.5	5.8	2.0	0.43	1,122a	316	10b	3.9ab
30	8.7	1.4	6.0	2.0	0.54	1,412a	382	11b	5.1a
F-test	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	*	*
C.V. (%)	21.79	36.37	15.68	35.25	27.48	47.92	42.45	24.41	18.78

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ เมื่อได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ในส่วนรากแขนงมีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นชัดเจนเมื่อได้รับแมงกานีส 15 และ 30 มิลลิโมลาร์ นอกจากนี้ในรากแขนงยังมีเหล็กเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ยางพาราทั้ง 2 พันธุ์ ที่ไม่ได้รับแมงกานีสมีไนโตรเจนและแคลเซียมสูงกว่าที่ได้รับแมงกานีส ส่วนยางพาราที่ได้รับแมงกานีส 0.01 มิลลิโมลาร์ มีฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และแมกนีเซียม สูงกว่าที่ไม่ได้รับแมงกานีส และเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีธาตุอาหารดังกล่าวลดลง (ตารางที่ 3.30)

ตารางที่ 3.30 ผลของแมงกานีส (0, 0.01, 15 และ 30 mM) ต่อความเข้มข้นธาตุอาหารต่างๆ ในรากแขนงยางพารา (พันธุ์ RRIT 251 และ RRIM 600)

Mn (mM)	Lateral root nutrients								
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	Cu
	($g\ kg^{-1}$)					($mg\ kg^{-1}$)			
RRIT 251									
0	29a	3.5	20a	6.1a	1.1a	300c	1,864b	87a	46a
0.01	26b	4.2	23a	3.7b	1.5a	383c	1,921b	71a	25b
15	22b	3.9	13b	1.8c	0.4b	14,743b	3,932a	35b	41a
30	20c	4.0	1.9c	1.7c	0.4b	27,715a	4,294a	71a	52a
F-test	*	NS	*	*	*	*	*	*	*
C.V. (%)	2.22	11.2	16.32	25.68	26.59	30.89	16.90	17.89	13.09
RRIM 600									
0	26	3.8	13a	6.1a	1.4a	178c	1,535b	92a	40
0.01	25	4.4	17a	4.5b	1.4a	251c	2,048b	49b	30
15	25	4.0	12a	2.1c	0.6b	8,786b	3,491b	38b	41
30	22	4.4	5.2b	1.8c	0.4b	31,130a	4,166a	50b	49
F-test	NS	NS	*	*	*	*	*	*	NS
C.V. (%)	14.18	14.81	22.44	16.02	28.83	7.34	27.22	12.5	28.34

หมายเหตุ : * คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา

1. สมบัติทางเคมีของดิน

ดินก่อนการทดลองที่ใส่แมงกานีส 100 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีค่าพีเอชลดลง (ตารางที่ 3.2) อาจเกิดจากแมงกานีสไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออนที่ถูกดูดซับที่คอลลอยด์ดินออกมาในสารละลายทำให้ในสารละลายมีไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ดินมีพีเอชลดลง (Brady and Weil, 2008) แต่พีเอชยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับยางพารา (4.5-5.5) (นุชนารถ, 2552) ในทางตรงกันข้ามดินมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นชัดเจน อาจเนื่องจากเกลือซัลเฟตที่เกิดจากการใส่แมงกานีสในรูปแมงกานีสซัลเฟต และมีแมงกานีสที่สกัดได้ต่ำกว่าปริมาณแมงกานีสที่ใส่ลงไป (ตารางที่ 3.2) เพราะแมงกานีสเปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ DTPA ไม่สามารถสกัดออกมาได้ ส่วนในดินหลังสิ้นสุดการทดลอง แมงกานีสที่ใส่ลงไปส่วนใหญ่เปลี่ยนเป็นรูปแมงกานีสที่รีดิวซ์ได้ง่ายและแมงกานีสทั้งหมด ทั้งนี้ในดินที่ใส่แมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม มีแมงกานีสในรูปต่างๆ มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.12) อาจเนื่องมาจากดินมีพีเอชลดลง (ตารางที่ 3.2) ทำให้แมงกานีสที่อยู่ในรูปแมงกานีสทั้งหมดละลายออกมาเพิ่มขึ้น อย่างที่เคยมีรายงานว่า ดินชนิดเดียวกันเมื่อมีค่าพีเอชลดลงทำให้มีแมงกานีสที่สกัดได้ (Mehlich-3-Mn) เพิ่มขึ้น (Hue and Mai, 2002) นอกจากนั้นยังพบว่า แมงกานีสรูปต่างๆ ในดิน มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของแมงกานีสในใบ (ตารางที่ 3.13) ดังนั้นหากวิเคราะห์แมงกานีสรูปต่างๆ ในดิน พบว่า มีความเข้มข้นแมงกานีสสูงก็สามารถคาดคะเนได้ว่า ในใบมีความเข้มข้นของแมงกานีสเพิ่มขึ้นเช่นกัน เช่นเดียวกับที่มีรายงานว่า ความเข้มข้นของแมงกานีสในต้น *Erica arborea* มีความสัมพันธ์กับแมงกานีสรูปต่างๆ ในดิน ในขณะที่พืชบางชนิดมีความสัมพันธ์กับแมงกานีสบางรูปในดินเท่านั้น (Anjos *et al*., 2012)

2. อาการเป็นพิษของแมงกานีสในกล้ายางพารา

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีอาการรากแขนงเน่า และรากแก้วมีอาการแตกและมีน้ำยางไหลออกมา (ภาพที่ 3.7 และ 3.8) ทำให้รากเจริญเติบโตได้น้อยลง (ภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.20) คล้ายคลึงกับผลการทดลองในต้นแตงกวา (Qing-hua *et al*., 2006) ยาสูบ (Santandrea *et al*., 1998) มันเทศ (Mortley, 1993) และถั่วเหลือง (Yang *et al*., 2009) มีน้ำหนักของรากลดลงเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไป อาจเนื่องจากรากแขนงของยางพาราดูดใช้แคลเซียมลดลง (ตารางที่ 3.18 และ3.30) เช่นเดียวกับต้น *Phytolacca Americana* (Zhao *et al*., 2012) ต้นคาร์โมมายด์ (Kovacik *et al*., 2014) ข้าว (Lidon *et al*., 2000) และชา (Venkatesan *et al*., 2007) เพราะแคลเซียมเป็นปฏิปักษ์กับแมงกานีส เมื่อมีแมงกานีสมากเกินไป แมงกานีสก็จะไปขัดขวางการดูดใช้แคลเซียม (Jones, 2003) ซึ่งแคลเซียมมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงให้ผนังเซลล์ เพราะช่วยให้มีการเชื่อมไขว้ของโซ่เพกทินในมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella) ซึ่งเป็นชั้นบางๆ ของผนังเซลล์ปฐมภูมิอยู่กึ่งกลางระหว่างผนังเซลล์ของเซลล์ที่ติดกัน นอกจากนั้นแคลเซียมทำให้เยื่อหุ้มเซลล์มีเสถียรภาพ เพราะเป็นสะพานเชื่อมระหว่างฟอสเฟตกับหมู่คาร์บอกซิลของฟอสโฟลิพิดและโปรตีนตรงบริเวณผิวของเยื่อหุ้มเซลล์ (ยงยุทธ, 2552)

เมื่อรากยางพาราดูดใช้แคลเซียมไม่เพียงพอกับความต้องการจึงทำให้รากแขนงมีอาการเน่าและรากแก้วมีอาการแตกทำให้น้ำยางไหลออกมา (ภาพที่ 3.7 และ 3.8) ส่งผลให้รากแขนงยางพารามีพื้นที่ผิวในการดูดธาตุอาหารลดลง รวมทั้งแมงกานีสยังเป็นปฏิปักษ์กับธาตุอาหารต่างๆ ที่พืชดูดไปใช้ในรูปของแคตไอออน เช่น แอมโมเนียม (Husteg *et al*., 2005) โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (Jones, 2003) เมื่อมีแมงกานีสมากขึ้น แมงกานีสก็ไปขัดขวางการดูดใช้ธาตุดังกล่าว เมื่อยางพาราดูดใช้ธาตุอาหารต่างๆ ลดลง จนอาจทำให้ยางพาราได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ ทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบลดลง (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) ส่งผลให้ใบมีสีเหลือง (ภาพที่ 3.6) ถ้ารุนแรงใบจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและปลายใบไหม้ (ภาพที่ 3.1) เช่นเดียวกับต้นแตงกวา (Hai-hua *et al*., 2009; Jian-peng *et al*., 2009) รวมทั้งการทดลองกับต้น Japanese white bitch ที่พบว่า ใบอ่อนมีอาการเหลืองทั้งใบ (Kitao *et al*., 2001) เนื่องจากเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้ดูดใช้ไนโตรเจนและแมกนีเซียมในใบลดลง (ตารางที่ 3.14 และ 3.26) ซึ่งธาตุดังกล่าวเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ ซึ่งเป็นรงควัตถุและสารประกอบที่มีสีเขียว นอกจากนั้นยังทำให้มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตลดลง (ตารางที่ 3.23) โดยมีผลมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ลดลง และเมื่ออาการรุนแรงมากขึ้นใบและก้านใบเหี่ยว และยืนต้นตาย

(ภาพที่ 3.2) อาการเหี่ยวติดต้นของใบและก้านใบยางพารา อาจเนื่องมาจาก ในใบยางพารามีแมงกานีสมาก (ตารางที่ 3.11 และ 3.26) แมงกานีสชักนำให้เกิดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น (Demirevska-kepova *et al*., 2004) ในขณะที่กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง (ตารางที่ 3.10 และ 3.24) ส่งผลให้เซลล์ยางพาราถูกทำลาย ยางพาราจึงแสดงอาการดังกล่าว คล้ายคลึงกับผลการทดลองในแตงกวาที่พบว่า ใบมีอาการเหลืองทั้งใบแก่และใบอ่อน และนำไปสู่การตายของเนื้อเยื่อใบ (Jian-peng *et al*., 2009; Shi *et al*., 2005) และที่สำคัญส่งผลให้การเจริญเติบโตของยางพาราที่ปลูกในดินลดลง (ตารางที่ 3.4, 3.6 และ 3.8) ในขณะที่ยางพาราที่ปลูกในสารละลายก็ให้ผลเช่นเดียวกัน (ตารางที่ 3.19, 3.20, 3.21 และ 3.22)

3. ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของกล้ายางพารา

รากยางพาราเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสม และเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้การเจริญเติบโตของรากลดลง (ภาพที่ 3.7) เช่นเดียวกับผลการทดลองในองุ่น (Mou *et al*., 2011) เนื่องจากแมงกานีสมีบทบาทในบางขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดอินโดลแอซีติก (IAA) และยังมีส่วนร่วมในการควบคุมกิจกรรมของ IAA ด้วย เมื่อพืชได้รับแมงกานีสมากเกินไประดับของ IAA ในเนื้อเยื่อจะลดลง (ยงยุทธ, 2552) ทำให้การเจริญเติบโตของรากแขนงลดลง และลดการดูดธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (ตารางที่ 3.14, 3.17, 3.26 และ 3.30) ที่เข้าไปในรากโดยการกระจายอาจจะถูกขัดขวางโดยแมงกานีส (Venkatesan *et al*., 2007) เมื่อยางพาราดูดใช้ธาตุอาหารดังกล่าวลดลง (ตารางที่ 3.25, 3.26, 3.27 และ 3.28) ทำให้ยางพาราได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอ ทำให้การเจริญเติบโตช้า ส่งผลให้หนักแห้งของใบ ก้านใบ ลำต้น และรากแขนงลดลง (ตารางที่ 3.3, 3.19 และ 3.20) รวมทั้งความกว้างและยาวของใบ (ตารางที่ 3.8) นอกจากนั้น เส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงของลำต้นยางพาราลดลงด้วย (ตารางที่ 3.4, 3.6, 3.21 และ 3.22) ทั้งนี้อาจเกิดจากปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดที่ลดลง (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) ทำให้การสังเคราะห์ด้วยแสงลดลงด้วย เช่นเดียวกับที่พบในต้นอินทผาลัม (Saidi *et al*., 2012) แตงกวา (Jian-peng *et al*., 2009) และข้าวโพด (Doncheva *et al*., 2009; Hai-hua *et al*., 2009) เป็นผลให้คาร์โบไฮเดรตในใบลดลง (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) ประกอบกับกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง (ตารางที่ 3.10 และ 3.24)

ยางพาราได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้มีการเจริญเติบโตลดลง เช่นเดียวกับผลการทดลองในถั่วเหลือง (Yang *et al*., 2009) แตงโม (Hue and Mai, 2002) มันเทศ (Mortley, 1993) ยาสูบ (Santandrea, 1998) ข้าว (Lidon, 2000) ข้าวสาลี (Khabaz-Saberi *et al*., 2010) ข้าวโพด (Hai-hua *et al*., 2009) มันฝรั่ง (Sarkar *et al*., 2004) แตงกวา (Jian-peng *et al*., 2009; Shi and Zhu , 2008; Qing-Hua *et al*., 2006) ต้น *Phytolacca acinosa* Roxb. (Xue *et al*., 2004) ต้นคาร์โมมายด์ (Kovacik *et al*., 2014) ถั่วลันเตา (Gangwar *et al*., 2010) และองุ่น (Mou *et al*., 2011)

4. ผลของแมงกานีสต่อการดูดใช้ธาตุอาหารต่างๆ ในกล้ายางพารา

เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีการดูดใช้แมงกานีสเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.11 และ 3.25) สอดคล้องการทดลองในต้นคาร์โมมายด์ (Kovacik *et al*., 2014) ข้าวโพด (Doncheva *et al*., 2009) ข้าวบาร์เลย์ (Husteg *et al*., 2005) และแตงกวา (Shi and Zhu, 2008) เนื่องจากในดินและในสารละลายมีแมงกานีสปริมาณมากส่งผลให้รากดูดใช้แมงกานีสได้มาก ในทางตรงกันข้ามมีธาตุไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในใบและรากแขนงลดลง (ตารางที่ 3.13, 3.17, 3.26 และ 3.30) สอดคล้องกับความเข้มข้นของไนโตรเจนที่ลดลงในรากและใบของข้าวบาร์เลย์ (Husteg *et al*., 2005) ความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่ลดลงในส่วนเหนือดินของข้าว (Lidon, 2000) ในรากและใบแตงกวา (Shi and Zhu, 2008) ความเข้มข้นของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่ลดลงในรากของชา (Venkatesan *et al*., 2007) และต้นคาร์โมมายด์ (Kovacik *et al*., 2014) รวมทั้งความเข้มข้นของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในส่วนใบของต้น *Phytolacca acinosa* Roxb. (Xue *et al*., 2004) ในส่วนใบและรากของต้นอินทผาลัม (Saidi *et al*., 2012) เนื่องจากแมงกานีสเป็นปฏิปักษ์กับธาตุต่างๆ เช่น ไนโตรเจน (Husteg *et al*., 2005) โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม (Venkatesan *et al*., 2007; Jones, 2003) เพราะแมงกานีสเป็นธาตุที่มีประจุบวกเช่นเดียวกับธาตุดังกล่าว เมื่อยางพาราดูดใช้ธาตุเหล่านี้ได้น้อยลง ทำให้รากแก้วมีอาการแตกและรากแขนงเน่า (ภาพที่ 3.7 และ 3.8) ใบมีสีเหลือง (ภาพที่ 3.2 และ 3.6) ยืนต้นตาย (ภาพที่ 3.2) ใบมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดลดลง (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) ประกอบกับแมงกานีสที่มากเกินไปทำให้กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง (ตารางที่ 3.10 และ 3.24) ส่งผลให้การเจริญเติบโตของยางพาราทั้งที่ปลูกในดิน (ตารางที่ 3.3, 3.4 และ 3.6) และในสารละลายลดลง (ตารางที่ 3.19, 3.20, 3.21 และ 3.22) ในทางตรงกันข้ามกลับพบว่า เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสเพิ่มขึ้นทำให้มีความเข้มขันของเหล็กในส่วนใบและรากแขนงมากขึ้น (ตารางที่ 3.14, 3.18, 3.26 และ 3.29) ทั้งนี้อาจเกิดจากเมื่อแมงกานีสมากขึ้นทำให้การเจริญเติบโตของยางพารา

ลดลง (ตารางที่ 3.3, 3.19 และ 3.20) ส่งผลให้มีการสะสมเหล็กเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการทดลองในข้าว (Lidon, 2000) และในใบของต้น *Phytolacca acinosa* Roxb. (Xue *et al*., 2004)

5. ผลของแมงกานีสต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบยางพารา

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบทั้งหมดลดลง (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) สอดคล้องกับผลการทดลองในข้าว (Lidon *et al*., 2004) ข้าวโพด (Doncheva *et al*., 2009; Hai-hua *et al*., 2009) ข้าวบาร์เลย์ (Demirevska-Kepova *et al*., 2004) ถั่วพีแคน (Henriques, 2003) ถั่วเขียว (Sinha *et al*., 2006) ถั่วลันเตา (Gangwar *et al*., 2010) มะเขือเทศ (Shenker *et al*., 2004) และแตงกวา (Jian-peng *et al*., 2009) เนื่องจากเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้มีการดูดใช้แมงกานีสได้มาก แต่แมงกานีสไปลดการดูดใช้ไนโตรเจนและแมกนีเซียม (ตารางที่ 3.14 และ 3.26) เนื่องจากแมงกานีสเป็นปฏิปักษ์กับธาตุไนโตรเจน (Husteg *et al*., 2005) และแมกนีเซียม (Jones, 2003) ทำให้ในใบยางพารามีธาตุอาหารไนโตรเจน (2.65%) และแมกนีเซียม (0.16%) ลดลง (ตารางที่ 3.14) ซึ่งต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม โดยค่าไนโตรเจนและแมกนีเซียมที่เหมาะสม คือ 3.3-3.7 และ 0.20-0.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (นุชนารถ, 2552) เมื่อธาตุอาหารดังกล่าวลดลง เป็นผลให้ในใบยางพารามีปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบลดลง ทำให้ใบยางพารามีสีเหลือง (ภาพที่ 3.6) เพราะไนโตรเจนและแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ (ยงยุทธ, 2552; Halvin *et al*., 2005) ทั้งนี้คลอโรฟิลล์ที่ลดลงอาจเป็นผลมาจากกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลงด้วย (ตารางที่ 3.10 และ 3.24) เมื่อคลอโรฟิลล์ลดลงทำให้การสังเคราะห์ด้วยแสงของยางพาราลดลง ส่งผลให้ในใบยางพารามีคาร์โบไฮเดรตลดลง (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) เป็นผลให้การเจริญเติบโตของยางพาราทั้งที่ปลูกในดิน (ตารางที่ 3.3 และ 3.6) และในสารละลายลดลง (ภาพที่ 3.8 และตารางที่ 3.19, 3.20, 3.21 และ 3.22) เช่นเดียวกับที่มีรายงานว่าใบยางพาราที่มีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำ ส่งผลให้เส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้นยางพาราต่ำด้วย (กฤษดา และพิเชษฐ, 2553)

ยางพาราที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินไปทำให้มีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง ในขณะที่ไม่มีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสและเพอร์ซิเดส (ตารางที่ 3.10 และ 3.24) กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสที่ลดลงสอดคล้องกับการทดลองถั่วลันเตา (Gangwar *et al*., 2010) แตงกวา (Jian-peng *et al*., 2009; Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2006) ข้าวโพด (Hai-hua *et al*., 2009) และองุ่น (Mou *et al*., 2011) เนื่องจากเมื่อใบยางพารามีแมงกานีส

ในปริมาณมาก (ตารางที่ 3.11 และ 3.26) ทำให้ยางพาราเกิดสภาวะเครียดจึงชักนำให้มีการสร้างอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์มากขึ้น (Demirevska-kepova *et al*., 2004) โดยอนุมูลอิสระทำลายผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์พืชทำให้เซลล์ได้รับความเสียหาย (Gill and Tuteja, 2010) ทำให้มีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสเพิ่มขึ้นเพื่อป้องกันอันตรายจากอนุมูลอิสระ โดยการเปลี่ยนอนุมูลอิสระไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำและออกซิเจน อนุมูลอิสระไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ได้จากการเปลี่ยนของอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์โดยเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส ทั้งนี้แมงกานีสยังเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ดังกล่าว (Jian-peng *et al*., 2009; Marschner,1995) ส่งผลให้มีอนุมูลอิสระไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น เมื่อมีอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มากเกินไป อนุมูลอิสระดังกล่าวก็ทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ (Venkatesan *et al*., 2007) รวมทั้งโปรตีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ (Salin, 1988 อ้างโดย Gangwar *et al*., 2010) เป็นผลให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง เมื่อกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลงในขณะที่มีอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นทำให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย (Gill and Tuteja, 2010) รวมทั้งเยื่อหุ้มเซลล์คลอโรพลาสต์ด้วย เนื่องจากเอนไซม์คาทาเลสเกี่ยวข้องกับเยื่อหุ้มเซลล์ในคลอโรพลาสต์ และอนุมูลอิสระไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์มีการสะสมมากในคลอโรพลาสต์มากขึ้น เป็นผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดในใบลดลง (Demirevska-Kepova *et al*., 2004) นอกจากนี้การที่เซลล์ของพืชถูกทำลายอาจเป็นผลให้ยางพารายืนต้นตาย (ภาพที่ 3.2) ทำให้การเจริญเติบโตของยางพาราทั้งที่ปลูกในดินและในสารละลายลดลงด้วย (ตารางที่ 3.4, 3.6, 3.8, 3.19, 3.20, 3.21 และ 3.22)

6. ระดับความเป็นพิษของแมงกานีสในดิน

จากผลทดลองปลูกยางพาราในดินแสดงให้เห็นว่า ยางพาราสามารถเจริญเติบโตได้ดีถึงแม้ได้รับแมงกานีสสูงถึง 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.3 และ 3.4 และตารางที่ 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 และ 3.8) เนื่องจากยางพาราสามารถดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมได้อย่างเพียงพอ (ตารางที่ 3.14) ส่งผลให้ในใบมีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและคาร์โบไฮเดรตในใบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.9) และมีการดูดใช้แมงกานีสไม่มากเกินไปจนไปมีผลให้กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง (ตารางที่ 3.10) อาจเนื่องมาจากยางพารามีกลไกการลดการเคลื่อนย้ายแมงกานีสสู่ส่วนเหนือดินโดยสะสมไว้ส่วนราก เพราะจากข้อมูลการสะสมของ

แมงกานีสในส่วนต่างๆ พบว่า ยางพารามีการสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนรากแขนงและรากแก้วมากกว่าส่วนอื่นๆ (ภาพที่ 3.5) และการทดลองที่ปลูกในสารละลายก็ให้ผลเช่นเดียวกัน (ภาพที่ 3.9) ทั้งนี้พืชบางชนิดสามารถทนต่อสภาพที่มีแมงกานีสสูง อาทิ ชาจะแสดงอาการเป็นพิษก็ต่อเมื่อได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Venkatesan *et al*., 2007) โดยพืชแต่ละชนิดมีกลไกในการทนต่อแมงกานีสแตกต่างกัน เช่น การเพิ่มพื้นที่ผิวรากเพื่อเพิ่มพื้นที่ดูดใช้แมงกานีส (Kovacik *et al*., 2014; Mou *et al*., 2011) การมีกลไกขับแมงกานีสออกจากใบ (Mou *et al*., 2011) และการสะสมแมงกานีสไว้ในส่วนขนใบของต้นทานตะวัน (Hajiboland *et al*., 2008 อ้างโดย Mou *et al*., 2011) แต่ยางพาราจะแสดงอาการเมื่อยางพาราได้รับแมงกานีส 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้น ระดับแมงกานีสในดินที่เป็นพิษกับยางพาราจึงอาจสูงกว่าที่เคยรายงานไว้ (>4 mg kg^{-1}) (นุชนารถ, 2551) ทั้งนี้ พื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีแมงกานีสเฉลี่ย 17-43 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ และคณะ, 2556) และแปลงปลูกยางพาราในจังหวัดสงขลา ในที่ดอนและที่ลุ่ม (0-30 cm) มีแมงกานีสเฉลี่ย 7 และ 46 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (จำเป็น และคณะ, 2556) แต่ยางพาราก็ยังเจริญเติบโตได้ปกติไม่แสดงอาการผิดปกติ ดังนั้น แปลงปลูกยางพาราส่วนใหญ่อาจไม่ต้องมีการจัดการแมงกานีส แต่ควรมีการใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ให้กับยางพาราเพิ่มขึ้นเพื่อให้ยางพาราได้รับธาตุอาหารดังกล่าวอย่างเพียงพอ เพราะเมื่อในดินและในสารละลายมีแมงกานีสสูง แมงกานีสจะไปขัดขวางการดูดใช้ธาตุอาหารดังกล่าวลดลง รวมทั้งหากพื้นที่ที่มีแมงกานีสสูงควรเลือกปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 เนื่องจากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 สามารถทนต่อสภาพที่มีแมงกานีสสูงได้ดีกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251

7. ระดับความเป็นพิษของแมงกานีสในใบยางพารา

จากข้อมูลความเข้มข้นของแมงกานีสในใบยางพาราที่ปลูกในดินและในสารละลายต่อระดับความเป็นพิษของแมงกานีสในใบ แสดงให้เห็นว่า ยางพาราที่ปลูกในดินมีแมงกานีสในใบสูงถึง 1,685 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.11) และยางพาราที่ปลูกในสารละลาย มีแมงกานีสสูงถึง 169 และ 217 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (พันธุ์ RRIM 251 และ RRIT 600 ตามลำดับ) (ตารางที่ 3.26) ก็ยังสามารถเจริญเติบโตได้ปกติดี (ตารางที่ 3.3, 3.19 และ 3.20) อาจเนื่องจากความสามารถของยางพาราที่ยังดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมได้ในระดับ

ที่เพียงพอ (ตารางที่ 3.14 และ 3.26) ส่งผลให้ยางพาราได้รับธาตุอาหารดังกล่าวอย่างเพียงพอ ทำให้ยางพาราสามารถสร้างคลอโรฟิลล์ได้อย่างเพียงพอ ทำให้มีคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงยังคงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.9 และ 3.23) รวมทั้งกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลส เพอร์ออกซิเดส และซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสยังคงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.10 และ 3.24) อาจเป็นเพราะไม้ยืนต้นสามารถทนต่อความเข้มข้นของแมงกานีสได้สูง อาทิ ใบชาจะแสดงอาการก็ต่อเมื่อมีแมงกานีสประมาณ 4,700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Venkatesan *et al*., 2007) และใบอุ่นสามารถทนต่อแมงกานีสได้ถึง 1,000-5,000 มิลลิกรัมกรัมต่อกิโลกรัม (Mou *et al*., 2011) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนต่อระดับแมงกานีสที่แตกต่างกันของพืชแต่ละพันธุ์ (Mou *et al*., 2011; Doncheva *et al*., 2009) นอกจากนั้นยังพบว่า ข้าว ข้าวบาร์เลย์ และถั่วเหลือง สามารถทนต่อความเป็นพิษของแมงกานีสได้สูงถึง 2,020, 656 และ 806 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (Millaleo *et al*., 2010) ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่า ใบยางพาราที่มีแมงกานีส 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อาจยังไม่เป็นพิษต่อยางพารา ถึงแม้จะเกินช่วงที่เหมาะสม (45-150 mg kg^{-1}) (นุชนารถ และคณะ, 2551) ของแมงกานีสในใบก็ตาม ทั้งนี้มีรายงานว่าใบยางพาราส่วนใหญ่มีแมงกานีส 353-629 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ และคณะ, 2551) และยางพาราที่ปลูกในที่ดอนและที่ลุ่มในจังหวัดสงขลามีแมงกานีสในใบเฉลี่ย 388 และ 572-698 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (จำเป็น และคณะ, 2556) และยางพาราที่ปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคเหนือ และภาคใต้ มีแมงกานีสในใบเฉลี่ย 335, 336, 273 และ 288 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (นุชนารถ และคณะ, 2556) แต่ยังไม่มีการรายงานถึงการเป็นพิษของแมงกานีสในใบยางพารา

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในกล้ายางพารา สรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1. **อาการเป็นพิษของแมงกานีสในกล้ายางพารา** เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสม ยางพารามีการเจริญเติบโตปกติดี แต่เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้ในระยะแรกใบยางพาราเริ่มมีสีเขียวอ่อน เมื่ออาการรุนแรงขึ้นใบยางพาราเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และเกิดอาการเหี่ยวและแห้ง จากนั้นลุกลามไปยังส่วนก้านใบและลำต้น ทำให้ยางพารายืนต้นตาย นอกจากนั้น รากของยางพาราที่ได้รับแมงกานีสมากเกินไปมีอาการรากแก้วแตกและมีน้ำยางไหลออกมา รวมทั้งรากแขนงและรากแก้วมีอาการเน่า
2. **ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของกล้ายางพารา** ยางพาราที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสมมีการเจริญเติบโตดีทั้งในส่วนของรากแขนง ความสูงและความกว้างของลำต้น ก้านใบ และใบ แต่เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้ยางพารามีการเจริญเติบโตในส่วนดังกล่าวลดลง
3. **ผลของแมงกานีสต่อการดูดใช้ธาตุอาหารต่างๆ ในกล้ายางพารา** ยางพาราที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสมมีการดูดใช้ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และมีการดูดใช้แมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสม แต่เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสมากเกินไปทำให้มีการดูดใช้แมงกานีสเพิ่มขึ้นชัดเจน ในขณะที่แมงกานีสไปขัดขวางการดูดใช้ธาตุอาหารดังกล่าวข้างต้น ทำให้ยางพาราดูดใช้ธาตุอาหารดังกล่าวลดลง
4. **ผลของแมงกานีสต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบยางพารา** เมื่อยางพาราที่ได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เหมาะสมทำให้ใบยางพารามีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีคาร์โบไฮเดรตในใบเพิ่มขึ้น รวมทั้งมีกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลส เพอร์ออกซิเดส และซูเปอร์

ออกไซด์ดิสมิวเทสเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสในปริมาณที่มากเกินไปส่งผลให้ใบยางพารามีปริมารคลอโรฟิลล์ทั้งหมด คาร์โบไฮเดรต และกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสลดลง

กล่าวโดยสรุป เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสในปริมาณที่เพียงพอทำให้ยางพารามีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและกิจกรรมของเอนไซม์เพิ่มขึ้น รวมทั้งมีการดูดธาตุอาหารต่างๆ ดีขึ้น ส่งผลให้ต้นกล้ายางพารามีการเจริญเติบโตดีขึ้น แต่เมื่อยางพาราได้รับแมงกานีสมากเกินไป ทำให้การเจริญเติบโตรากแขนงลดลงและมีอาการรากเน่า รากแก้วมีอาการแตก และใบมีสีเหลือง ทำให้การเจริญเติบโตของยางพาราลดลง รวมทั้งการดูดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมลดลง ทำให้มีปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมดและกิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลสในใบลดลงเช่นกัน ดังนั้น แมงกานีสเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับยางพารา และพื้นที่ปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีแมงกานีสอยู่ในระดับต่ำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งยางพาราสามารถเจริญได้ตามปกติ อย่างไรก็ตามในพื้นที่ที่มีแมงกานีสสูง (>100 mg kg^{-1}) อาจเลือกปลูกยางพาราพันธุ์ RRIM 600 เนื่องจากยางพาราพันธุ์ RRIM 600 สามารถทนต่อสภาพที่มีแมงกานีสสูงได้ดีกว่ายางพาราพันธุ์ RRIT 251 และควรใส่ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารหลักมากกว่าอัตราปกติเพื่อให้ยางพาราดูดใช้ธาตุอาหารดังกล่าวได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

กฤษดา สังข์สิงห์ และพิเชษฐ ไชยพานิชย์. 2552. สมบัติทางเคมีและปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบกับการเจริญเติบโตของต้นยางพาราช่วงก่อนเปิดกรีดในเขตปลูกยางใหม่. วารสารยางพารา 30 : 35-60.

กฤษดา สังข์สิงห์ และพิเชษฐ ไชยพานิชย์. 2553. การวิเคราะห์ศักยภาพการปลูกยางพาราในช่วงก่อนเปิดกรีดระดับแปลงเกษตรกรในโครงการปลูกยางพาราเพื่อยกระดับรายได้และความมั่นคงให้แก่เกษตรกรในเขตปลูกยางใหม่. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จำเป็น อ่อนทอง และจักรกฤษณ์ พูนภักดี. 2555. การวิเคราะห์ดินและพืช. สงขลา : ภาควิชาธรณี-ศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จำเป็น อ่อนทอง, จุฑามาศ แก้วมโน และจักรกฤษณ์ พูนภักดี. 2556. สถานะโพแทสเซียมและสมบัติของดินนาร้างและดินดอนที่ใช้ปลูกยางพารา. สงขลา : ภาควิชาธรณีศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นุชนารถ กังพิศดาร, ปูชิตา เปรมกระสิน และชำนาญ บุญเลิศ. 2551. การจัดการธาตุอาหารพืชเพื่อเพิ่มผลผลิตยางให้เหมาะสมเฉพาะพื้นที่ตามค่าวิเคราะห์ดิน. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

นุชนารถ กังพิศดาร. 2552. การจัดการสวนยางพาราอย่างยั่งยืน : ดิน น้ำ และธาตุอาหาร. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

นุชนารถ กังพิศดาร. 2554. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยยางพารา ปี 2554. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

นุชนารถ กังพิศดาร, มนัชญา รัตนโชติ, ปูธิตา เปรมกระสิน, ธมลวรรณ ขิวรัมย์, ลาวัณย์ จันทร์อัมพร และอนันต์ ทองภู. 2556. การพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการธาตุอาหารพืชสำหรับยางพาราเฉพาะพื้นที่. กรุงเทพฯ : กรมวิชาการเกษตร.

มนตรี จุฬาวัฒนกุล, ชิษณุสวร สวัสดิวัตน์, ยงยุทธ ยุทธวงศ์, ภิญโญ พานิชพันธ์, ประหยัด โกมารทัต, พิณทิพ รื่นวงษา, ธีรยศ วิทิตสุวรรณกุล, บุรชัย สนธยานนท์, สุมาลี ตั้งประดับกุล และมธุรส พงษ์ลิขิตมงคล. 2542. เอนไซม์และปฏิกิริยาชีวเคมี. *ใน* ชีวเคมี. หน้า 125-149. กรุงเทพฯ : ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.

มัลลิกา วารีรัตน์ และตระกูล ตันสุวรรณ. 2542. ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของลิ้นจี่. วารสารเกษตร 15 : 287-293.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2552. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สถาบันวิจัยยาง. 2553. ข้อมูลวิชาการยางพารา 2553. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สถาบันวิจัยยาง. 2555. ข้อมูลวิชาการยางพารา 2555. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2552. ข้อมูลพื้นฐานเศรษฐกิจการเกษตรปี 2552. กรุงเทพฯ : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2555ก. สถานการณ์สินค้าเกษตรที่สำคัญ และแนวโน้ม ปี 2555. กรุงเทพฯ : สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2555ข. สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2554. กรุงเทพฯ : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

องค์การสวนยาง. 2555. ประวัติยางพารา. [Online] Available from http://www.reothai.co.th/-Para1.htm. [Accessed July 20, 2013].

อภิศักดิ์ โพธิ์ปั้น. 2543. ดินเขตร้อน. กรุงเทพฯ : ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

Anjos, C., Magalhães, M.C.F. and Abreu, M.M. 2012. Metal (Al, Mn, Pb and Zn) soils xtractable reagents for available fraction assessment: Comparison using plants, and dry and moist soils from the Braçal abandoned lead mine area, Portugal. Journal of Geochemical Exploration 113 : 45–55.

Brady, N.C. and Weil, R.R. 2008. The Nature and Properties of Soils. New Jersey : Pearson Prentice Hall.

Chang, C.J. and Kao, C.H. 1998. H_2O_2 metabolism during senescence of rice leaves: changes in enzyme activities in light and darkness. Plant Growth Regulation 25 : 11-15.

Demirevska-Kepova, K., Simano-Stoilova, L., Stoyanova, Z., Holzer, R. and Feller, U. 2004. Biochemical changes in barley plant after excessive supply of copper and manganese. Environment and Experimental Botany 52 : 253-266.

Doncheva, S., Poschenrieder, C., Stoyanova, Z., Georgieva, K., Velichkova, M. and Barcelo, J. 2009. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. Environmental and Experimental Botany 65 : 189-197.

El-Shraiy, A.M., Mostafa, M.A., Zaghlool, S.A. and Shehala, S.A.M. 2011. Alleviation of salt injury of cucumber plant by grafting onto salt tolerance rootstock. Australian Journal of Basic and Applied Sciences 5 : 1414-1423.

Fecht-Christoffers, M.M., Braun, H., Lemaitre-Guillier, C., VanDorsselaer, A. and Horst, W.J. 2003. Effect of manganese toxicity on the proteome of the leaf apoplast in cowpea. Plant Physiology 133 : 1935-1946.

Gambrell, R.P. 1996. Manganese. *In* Methods of Soil Analysis. Past 3. Chemical Methods (ed. Segoe, S.) pp. 665-680. Madison : Soil Science Society of American and American of Agronomy.

Gangwar, S., Singh, V.P., Prasad, S.M. and Maurya, J.N. 2010. Modulation of manganese toxicity in *Pisun sativam* L. seedlings by kinetin. Scientia Horticulture 126 : 467-474.

Gill, S.S. and Tuteja, N. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. Plant Physiology and Biochemistry 48 : 909-930.

Hai-hua, W., Tao, F., Xi-xu, P., Ming-li, Y., Ping-lan, Z. and Xin-ke, T. 2009. Ameliorative effect of brassinosteroid on excess manganese-induced oxidative stress in *Zea mays* L. leaves. Agricultural Sciences in China 8 : 1063-1074.

Hansch, R. and Mendel, R.R. 2009. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). Plant Biology 12 : 259-266.

Havlin, J.L., Beaton, J.D., Tisdale, S.L. and Nelson, W.L. 2005. Soil Fertility and Fertilizer: An Introduction to Nutrient Management. New Jersey : Coral Graphics.

Henriques, F.S. 2003. Gas exchange, chlorophyll *a* fluorescence kinetics and lipid peroxidation of pecan leaves with varying manganese concentration. Plant Sciences 165 : 239-244.

Hue, N.V. and Mai, Y. 2002. Manganese toxicity in watermelon as affected by lime and compost amended to a hawaiian acid oxisol. Hortscience 37 : 656-661.

Husteg, S., Thomsen, M.U., Mattsson, M. and Schjoerring, J.K. 2005. Influence of nitrogen and sulphur form on manganese acquisition by barley (*Hordeum vulgare*). Plant and Soil 268 : 309-317.

Iwasaki, K., Maier, P., Fecht, M. and Horst, W.J. 2002. Leaf apoplastic silicon enhances manganese tolerance of cowpea (*Vigna unguiculata*). Journal of Plant Physiology 159 : 167-173.

Jian-peng, F., Qing-hua, S. and Xiu-feng, W. 2009. Effect of exogenous silicon on photosynthetic capacity and antioxidant enzyme activities in chloroplast of cucumber seedling under excess manganese. Agricultural Sciences 8 : 40-50

Jones, J.B. 1930. Agronomic Handbook: Management of Crops, Soils, and Their Fertility. Boca Raton : CRC PRESS.

Jones, J.B. 2003. Agronomic Handbook: Management of Crop, Soils, and their Fertility. Florida : CRC Press.

Khabaz-Saberi, H., Rengel, Z., Wilson, R. and Setter, T.L. 2010. Variation of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173 : 103-112.

Kitao, M., Lei, T.T., Nakamura, T. and Koike, T. 2001. Manganese toxicity as indicated by visible foliar symptom of Japanese white birch (*Betula platyphylla* var. *japonica*). Environmental Pollution 111 : 89-94.

Kovacik, J., Babula, P., Hedbanvy, J. and Svec, P. 2014. Manganese-induced oxidative stress in two ontogenetic stages of chamomile and amelioration by nitric oxide. Plant Science 215 : 1-10.

Krishakumar, A.K. and Potty, S.N. 1992. Nutrition of Hevea. *In* Natural Rubber. (eds. Sethuraj, M.R. and Mathew, N.M.) pp. 239-262. Kottayam : Rubber Research Institute of India.

Lidon, F.J.C. 2000. Rice adaptation to excess manganese: nutrient accumulation and implications of the quality of crops. Journal of Plant Physiology 156 : 652-658.

Lidon, F.C. 2001. Tolerance of rice to excess manganese in the early stages of vegetative growth. Characterisation of manganese accumulation. Journal of Plant Physiology 158 : 1341-1348.

Lidon, F.C., Barreiro, M.G. and Ramalho, C. 2004. Manganese accumulation in rice: implication for photosynthetic functioning. Journal of Plant Physiology 161 : 1235-1244.

Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. London : Academic Press.

Millaleo, R., Reyes-Diaz, M., Ivanov, A.G., Mora, M.L. and Alberdi, M. 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: Transport, accumulation and resistance mechanisms. Journal of Soil Science Plant Nutrient 10 : 476-494.

Mortley, D.G. 1993. Manganese toxicity and tolerance in sweetpotato. HortScience 28 : 812-813.

Mou, D., Yao, Y., Yang, Y., Zhang, Y., Tain, C. and Achal, V. 2011. Plant high tolerance to excess manganese related with root growth, manganese distribution and antioxidative enzyme activity in three grape cultivars. Ecotoxicology and Environmental Safety 74 : 776-786.

Nortor, G. and Foyer, C.H. 1998. Ascorbate and glutathione: keeping active oxygen under control. Plant Physiology and Plant Molecular Biology 49 : 249-79.

Osborne, D.R. and Voogt, P. 1978. Carbohydrates. *In* The Analysis of Nutrients in Foods. (ed. Osborne, D.R.) pp. 130-154. London : Academic Press.

Qing-hua, S., Zhu-jun, Z., Juan, L. and Qiong-qiu, Q. 2006. Combined effect of excess Mn and low pH on oxidative stress and antioxidant in cucumber roots. Agricultural Science in China 5 : 767-772.

Rezai, K. and Farboodnai, T. 2008. Manganese toxicity effect on chlorophyll content and antioxidant enzymes in pea plant (*Pisum sativum* L. *c. v qazvin*). Agricultural Journal 3 : 454-458.

Saidi, M.N., Jbir, R., Ghorbel, I., Namsi, A., Drira, N. and Gargouri-Bouzid, R. 2012. Brittle leaf disease induces an oxidative stress and decreases the expression of manganese-related genes in date palm (*Phoenix dactylifera* L.). Plant Physiology and Biochemistry 50 : 1-7.

Santandrea, G., Schiff, S. and Bennici, A. 1997. Manganese toxicity to different growth processes in *vitro* in *Nicotiana.* Plant cell, Tissue and Organ Culture 50 : 125-129.

Santandrea, G., Schiff, S. and Bennici, A. 1998. Effect of manganese on *Nicotiana* species cultivated in *vitro* and characterization of regenerated Mn-tolerant tobacco plants. Plant Science 132 : 71-82.

Sarkar, D., Pandey, S.K., Sud, K.C. and Chanemougasoundharam, A. 2004. In vitro characterization of manganese toxicity in relation to phosphorus nutrition in potato (*Solanum tuberosum* L.). Journal of Plant Science 167 : 977-986.

Scandalios, J.G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutase. Plant Physiology 101 : 7-12.

Shenker, M., Plessner, O.E. and Tel-Or, E. 2004. Manganese nutrition effects on tomato growth, chlorophyll concentration, and superoxide dismutase activity. Journal of Plant Physiology 161 : 197-202.

Shi, Q., Bao, Z., Zhu, Z., He, Y., Qian, Q. and Yu, J. 2005. Silicon-mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. Phytochemistry 66 : 1551-1559.

Shi, Q., Zue, Z., Xu, M., Qian, Q. and Yu, J. 2006. Effect of excess on the anthioxidant system in *Cucumis sativus* L. under two light intensities. Environmental and Experimental Botany 58 : 197-205.

Shi, Q. and Zhu, Z. 2008. Effect of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidant system in cucumber. Environmental and Experimental Botany 63 : 317-326.

Silber, A., Bar-Tal, A., Levkovitch, I., Bruner, M., Yeehezkel, H., Shmuel, D., Cohen, S., Matan, E., Karni, L., Aktas, H., Turhan, E. and Aloni, B. 2009. Manganese nutrition of pepper (*Capsicum annuum* L.): Growth, Mn uptake and fruit disorder incidence. Scientia Horticulture 123 : 197-203.

Sinha, P., Dube, B.K. and Chatterjee, C. 2006. Manganese stress alters phytotoxic effects of chromium in green gram physiology (*Vigna radiate* L.) cv. PU 19. Environment and Experimental Botany 57 : 131-138.

Tan, K.H. 2005. Soil Sampling, Preparation and Analysis. New York : Taylor & Francis.

Venkatesan, S., Hemalatha, K.V. and Jayaganesh, S. 2007. Characterization of manganese toxicity and its influence on nutrient uptake, antioxidant enzymes and biochemical parameter in tea. Journal of Phytochemistry 1 : 52-60.

Wilkinson, R.E. and Ohki, K. 1988. Influence of manganese deficiency and toxicity on isoprenoid syntheses. Journal of Plant Physiology 87 : 841-846.

Xue, S.G., Chen, Y.X., Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Lin, Q. and Fernando, D.R. 2004. Manganese uptake and accumulation by the hyperaccumulator plant *Phytolacca acinosa* Roxb. (*Phytolaccaceae*). Environmental Pollution 131 : 393-399.

Yang, Z.B., You, J.F., Xu, M.Y. and Yang, Z.M. 2009. Interaction between aluminum toxicity and manganese toxicity in soybean (*Glycine max*). Plant Soil 319 : 277-289.

Zhao, H., Wu, L., Chai, T., Zhang, Y., Tan, J. and Ma, S. 2012. The effects of copper, manganese and zinc on plant growth and elemental accumulation in the manganese-hyperaccumulator *Phytolacco Americana.* Journal of Plant Physiology 169 : 1243-1252.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นางสาวสายใจ หมื่นภักดี

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5610620008

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2550

ทุนการศึกษา

ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน

นักวิชาการเกษตรปฏิบัติการ สถานีพัฒนาที่ดินตรัง สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 12

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน