# อันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสและการเจริญเติบโตของยางพารา

# Interactions of Magnesium-Manganese and Aluminum-Manganese in Relation to Manganese Uptake and Growth of Rubber Trees


**ฮูซัน บือราเฮง**

**Husun Bueraheng**


**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**
**2559**


**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

# อันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสและการเจริญเติบโตของยางพารา

# Interactions of Magnesium-Manganese and Aluminum-Manganese in Relation to Manganese Uptake and Growth of Rubber Trees

**ฮูซัน บือราเฮง**

**Husun Bueraheng**

**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**
**2559**

**ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์**

**ชื่อวิทยานิพนธ์** อันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสและการเจริญเติบโตของยางพารา

**ผู้เขียน** นายสุซัน บือราเฮง

**สาขาวิชา** การจัดการทรัพยากรดิน

---

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก**

……...

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง)

**อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม**

……

(ดร.ขวัญตา ขาวมี)

**คณะกรรมการสอบ**

...……ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.อัจฉรา เพ็งหนู)

…….....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.จำเป็น อ่อนทอง)

……..……..กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์)

…….……...…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.....
(นายฮูซัน บือราเฮง)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ……..
(นายฮูซัน บือราเฮง)
นักศึกษา

**ชื่อวิทยานิพนธ์** อันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสและการเจริญเติบโตของยางพารา

**ผู้เขียน** นายสูซัน บือราเฮง

**สาขาวิชา** การจัดการทรัพยากรดิน

**ปีการศึกษา** 2559

## บทคัดย่อ

ดินปลูกยางพาราในประเทศไทยส่วนใหญ่มีสภาพเป็นกรด ดินดังกล่าวมักขาดแมกนีเซียม และมีอะลูมินัมและแมงกานีสละลายออกมามากจนอาจส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของยางพาราได้ จึงได้ศึกษาอันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสและการเจริญเติบโตของยางพารา ประกอบด้วย 2 การทดลอง คือ 1) ผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสของยางพารา ได้ดำเนินการปลูกต้นยางพาราชำถุงขนาด 1 ฉัตร พันธุ์ RRIM 600 ในกระถาง ทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (CRD) มี 3 ซ้ำ ประกอบ ด้วย 2 ปัจจัยการทดลอง คือ เติมแมกนีเซียม (ในรูปปุ๋ยคีเซอไรต์) อัตรา 0, 2 และ 10 เซนติโมล แมกนีเซียม ต่อกิโลกรัม และเติมแมงกานีส (ในรูปแมงกานีสซัลเฟต) อัตรา 0 และ 50 มิลลิกรัม แมงกานีส ต่อกิโลกรัม และ 2) ผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโต และการดูดธาตุอาหารของยางพารา โดยปลูกต้นยางพาราในถุงดำพลาสติก ทดลองแบบแฟคทอเรียลใช้แผนการทดลองแบบ CRD จำนวน 3 ซ้ำ มี 2 ปัจจัย ได้แก่ เติมอะลูมินัม (อะลูมินัมซัลเฟต) 2 อัตรา คือ 0 และ 200 มิลลิกรัม อะลูมินัม ต่อกิโลกรัม และแมงกานีส 2 อัตรา คือ 0 และ 50 มิลลิกรัม แมงกานีส ต่อกิโลกรัม เป็นระยะเวลา 5 เดือน ทั้งสองการทดลองปลูกภายในเรือนกระจกคณะทรัพยากรธรรมชาติ

ผลการทดลอง พบว่า การเติมแมกนีเซียมทำให้ความเข้มข้นและการดูดใช้แมงกานีสในทุกส่วนของต้นยางพาราลดลง และลดแคลเซียมในส่วนเหนือดิน สำหรับแมกนีเซียมมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นตามอัตราแมกนีเซียมที่ใส่สูงขึ้น ส่วนโพแทสเซียมลดลง เมื่อเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และการเติมแมกนีเซียมอัตรานี้ ทำให้ต้นยางพาราชะงักการเจริญเติบโตทั้งส่วนเหนือดินและราก ส่วนการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตของต้นยางพารามีผลไม่ต่างจากตำรับควบคุม

การเติมอะลูมินัมร่วมกับแมงกานีสทำให้ความสูงและน้ำหนักแห้งของยางพาราต่ำที่สุด และต่ำกว่าตำรับควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ การเติมอะลูมินัมทำให้ความเข้มข้นของอะลูมินัมใน

ยางพาราเพิ่มขึ้น โดยมีการสะสมมากในรากแขนง ในขณะที่ความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนใบ ลำต้น และรากลดลง นอกจากนี้ อะลูมินัมยังลดไนโตรเจน โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ในราก สำหรับการเติมแมงกานีสมีแนวโน้มให้อะลูมินัมในส่วนเหนือดินลดลง อันตรกิริยาของทั้งสองธาตุนี้เป็นปฏิปักษ์ต่อกัน ดังนั้น ในดินกรดอะลูมินัมจะช่วยลดการดูดแมงกานีสที่มากเกินไปได้ แต่เมื่อมีความเข้มข้นของแมงกานีสและอะลูมินัมมากเกินไปจะมีผลชะงักการเจริญเติบโตของยางพารา

การเติมแมกนีเซียมและอะลูมินัมสามารถลดความเข้มข้นของแมงกานีสในยางพาราได้ โดยอะลูมินัมมีผลลดความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนเหนือดินมากกว่าส่วนราก ทั้งนี้ อัตราที่เหมาะสมของธาตุทั้งสองมีประสิทธิภาพในการลดแมงกานีสได้สูงสุด และการเติมธาตุทั้งสองในอัตราที่มากเกินไป (แมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม) นอกจากทำให้แมงกานีสลดลงเพียงเล็กน้อย ยังทำให้ยางพาราชะงักการเจริญเติบโต ในขณะเดียวกัน การเติมแมงกานีสก็ลดความเข้มข้นของธาตุทั้งสองด้วย และการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสในยางพารา 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยังไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของยาง-พารา แสดงให้เห็นว่า ยางพาราสามารถทนต่อสภาพดินที่มีแมงกานีสสูงได้ และการใช้วิธีเพิ่มธาตุแมกนีเซียม เพื่อลดความเข้มข้นของแมงกานีสนั้น สามารถทำได้ นอกจากช่วยลดแมงกานีสแล้ว ยังเป็นการเพิ่มปุ๋ยแมกนีเซียมด้วย ทั้งนี้ควรใส่ในอัตราที่เหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพในการลดแมงกา-นีส และไม่ทำให้ยางพาราชะงักการเจริญเติบโต

**Thesis Title** Interactions of Magnesium-Manganese and Aluminum-Manganese in Relation to Manganese Uptake and Growth of Rubber Trees

**Author** Mr. Husun Bueraheng

**Major Program** Soil Resources Management

**Academic Year** 2016

## ABSTRACT

Most rubber plantations are acid soils. These soils often contain insufficient magnesium (Mg) and excess aluminum (Al) and manganese (Mn) that may affect rubber plant growth. The study was conducted to investigate interactions of magnesium-manganese and aluminum-manganese in relation to manganese uptake and growth of rubber trees. It consisted of 2 experiments. The first one, the effect of Mg on the Mn uptake in rubber trees was conducted. One whorl of RRIM 600 clone rubber trees were grown in plastic pots using factorial experiment in completely randomized design (CRD) with three replications. The treatments included 2 factors with 3 rates of Mg viz. 0, 2 and 10 $cmol_c$ Mg $kg^{-1}$ (as kieserite) and 2 rates of Mn viz. 0 and 50 mg Mn $kg^{-1}$(as manganese sulfate). The second one, the effect of Al and Mn on growth and nutrient uptake of rubber trees was carried out. The experiment was factorial in CRD with three replications. Two factors consisted of 2 rates of Al viz. 0 and 200 mg Al $kg^{-1}$ and 2 rates of Mn viz. 0 and 50 mg Mn $kg^{-1}$. Experiment was conducted for 5 month periods. The both experiments were conducted in greenhouse of Faculty of Natural Resources.

The results showed that Mn concentrations and their uptake in all parts of rubber trees decreased when applying Mg. Mg concentrations increased with increasing of applied Mg while calcium (Ca) concentrations in shoot decreased. When applying Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$, potassium (K) concentration decreased and rubber tree growths both shoot and root were stunted. Applying Mn 50 mg $kg^{-1}$ did not affect rubber tree growth compared with the control.

When applying Al concurrently with Mn, the height and dry weight of rubber trees were lowest and were significantly less than the control. Applying Al resulted in increase of Al concentration and accumulated in lateral roots while Mn in leaves, stems and roots were

decreased. In addition, Al resulted in decrease of N, K, Mg and Ca in roots. Aluminum concentration in shoots tended to decrease when applying Mn. Negative interaction of Al and Mn was found Therefore, Al in acid soil can alleviate excess Mn uptake whereas the combined excess of Mn and Al concentrations inhibited growth of rubber trees.

Applying Mg and Al can reduce Mn concentration in rubber trees. Aluminum affected Mn in shoot more than in root. The appropriate concentration of both elements greatly reduced Mn concentration while the excess concentration (Mg 10 $cmol_c\ kg^{-1}$) slightly reduced Mn and also reduced rubber growth. On the other hand, Mn applying so reduced both two elements. Applying Mn 50 mg $kg^{-1}$ or Mn over 1,000 mg $kg^{-1}$ concentration in rubber leaves did not affect to rubber growth. These results implied that rubber trees can resist to high Mn in soil. Magnesium application is not only able to reduce Mn concentration in rubber tree but also increase Mg nutrition. However, Mg should be appropriately applied for decreasing Mn uptake and did not inhibit rubber tree growth.

# กิตติกรรมประกาศ

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

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อัจฉรา เพ็งหนู ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องในด้านการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และวิชาการด้านต่างๆ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ และขอขอบคุณเจ้าของสวนยางพาราที่ได้สละดินในสวนสำหรับทำการศึกษาในครั้งนี้ ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ ๆ น้องๆ ภาควิชาธรณีศาสตร์ทุกคนที่คอยให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบพระคุณทางครอบครัวที่ให้การสนับสนุนตลอดการศึกษา ภาควิชาธรณีศาสตร์ที่ได้มอบทุนการศึกษาในการเรียนครั้งนี้ และกรมส่งเสริมการเกษตรที่อนุญาตให้ข้าพเจ้าลาศึกษาในครั้งนี้

ฮูซัน บือราเฮง

# สารบัญ


| | หน้า |
|---|---|
| สารบัญ | (10) |
| รายการตาราง | (11) |
| รายการภาพ | (13) |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ | 1 |
| บทนำต้นเรื่อง | 1 |
| การตรวจเอกสาร | 2 |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย | 29 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 30 |
| 2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ | 31 |
| วัสดุและสารเคมี | 31 |
| อุปกรณ์ | 33 |
| วิธีการทดลอง | 34 |
| การวิเคราะห์สถิติ | 39 |
| 3. ผลการทดลอง | 40 |
| 4. วิจารณ์ผลการทดลอง | 66 |
| 5. สรุปและข้อเสนอแนะ | 78 |
| เอกสารอ้างอิง | 80 |
| ประวัติผู้เขียน | 94 |

# รายการตาราง


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 1.1 | สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารพืชตามเขตปลูกยางพารา | 6 |
| 1.2 | ระดับความเป็นพิษของแมงกานีสของพืชชนิดต่าง ๆ | 16 |
| 3.1 | ค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง | 40 |
| 3.2 | สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นธาตุอาหารในดินเมื่อเริ่มทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 42 |
| 3.3 | สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นธาตุอาหารในดินหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 43 |
| 3.4 | ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นยางพาราที่ระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 46 |
| 3.5 | จำนวนใบและก้านใบของกล้ายางพาราที่ระยะเวลา 1, 3, 6 และ 8 เดือน เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 50 |
| 3.6 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 52 |
| 3.7 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในก้านใบหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 53 |
| 3.8 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในลำต้นหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 54 |
| 3.9 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากแก้วหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 55 |
| 3.10 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากแขนงหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 56 |
| 3.11 | ความเข้มข้นของแมงกานีสในต้นยางส่วนต่าง ๆ หลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) | 57 |

# รายการตาราง (ต่อ)


| ตารางที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.12 | ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 59 |
| 3.13 | น้ำหนักแห้งส่วนต่าง ๆ ของกล้ายางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 60 |
| 3.14 | สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารในดินก่อนการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 61 |
| 3.15 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 63 |
| 3.16 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในลำต้นยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 64 |
| 3.17 | ความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากแขนงยางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 64 |
| 3.18 | ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ และกิจกรรมเอนไซม์ คาทาเลส (CAT) ซูเปอร์ออกไซด์ ดิสมิวเทส (SOD) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ในใบกล้ายางพาราภายใต้การเติมแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 65 |

# รายการภาพ


| ภาพที่ | | หน้า |
|---|---|---|
| 3.1 | ลักษณะคราบเกลือบนผิวดินในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม | 41 |
| 3.2 | การเจริญเติบโตของกล้ายางพาราส่วนเหนือดิน เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$) | 44 |
| 3.3 | การเจริญเติบโตของรากยางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$) | 45 |
| 3.4 | ความสูง (A) และเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (B) ของยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส และ แมกนีเซียมระดับต่าง ๆ ที่ระยะ 8 เดือน | 47 |
| 3.5 | ผลของแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$) ต่อน้ำหนักแห้งของใบ (A) ก้านใบ (B) ลำต้น (C) ยางพารา | 48 |
| 3.6 | ผลของแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$) ต่อน้ำหนักแห้งของรากแก้ว (A) และรากแขนง (B) ยางพารา | 49 |
| 3.7 | ลักษณะอาการใบร่วง (A) ลำต้นช้ำ (B) และยอดไม่พัฒนา (C) ของยางพาราที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม | 51 |
| 3.8 | การกระจายของแมงกานีส (A) และแมกนีเซียม (B) ในกล้ายางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$) | 58 |
| 3.9 | ความเข้มข้นของแมงกานีสในใบ ลำต้น และรากแขนงกล้ายางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 62 |
| 3.10 | ความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบ ลำต้น และรากแขนงกล้ายางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$) | 63 |

# บทที่ 1

# บทนำ

## 1. บทนำต้นเรื่อง

ยางพาราเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ซึ่งปัจจุบันมีพื้นที่ปลูก 19.27 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) โดยภาคใต้มีพื้นที่ปลูกยางพารามากที่สุดโดยมีพื้นที่สูงถึง 12.19 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) ดินปลูกยางพาราในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นดินกรด และมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ โดยเฉพาะภาคใต้ เนื่องจากเป็นเขตพื้นที่ปลูกยางเดิมที่ปลูกยางพาราติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน ส่งผลให้ดินขาดความอุดมสมบูรณ์จากการสูญเสียธาตุอาหารออกไปจากดิน โดยเฉพาะธาตุอาหารหลัก จึงต้องใส่ปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสเฟต และโพแทช เพิ่มเติมให้แก่ต้นยางพารา ปัจจุบันสูตรปุ๋ยแนะนำมีเพียงธาตุอาหารหลักอย่างเดียว แต่การเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรนั้น ปริมาณธาตุอาหารรองได้ถูกนำออกจากดินอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้หลายพื้นที่มีไม่เพียงพอต่อความต้องการของยางพารา โดยมีรายงานพบว่า ดินปลูกยางพาราชุดดินคอหงส์ ท่าแซะ และรือเสาะขาดธาตุอาหารรอง โดยเฉพาะแมกนีเซียมทั้งดินบนและดินล่างที่มีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤต ($0.30\ cmol_c\ kg^{-1}$) (โสภา และคณะ, 2536) นอกจากนั้น ดินกรดทำให้แมงกานีสและอะลูมินัมละลายออกมาได้ดีจนอาจเป็นพิษต่อพืชได้ โดยมีรายงานพบว่า ยางพาราที่ปลูกในชุดดินคอหงส์มีปริมาณการสะสมแมงกานีสในใบยางพาราสูงถึง 200 - 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งอาจเป็นพิษต่อต้นยาง-พาราได้ (นุชนารถ, 2552)

แมงกานีส เป็นธาตุอาหารจำเป็นที่พืชต้องการในปริมาณน้อย โดยมีความจำเป็นต่อปฏิกิริยาในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง กิจกรรมเอนไซม์ และการเจริญเติบโตของราก หากพืชได้รับแมงกานีสในปริมาณที่สูงถึงระดับหนึ่งจะทำให้เกิดพิษได้ เช่น มะเขือเทศที่ได้รับแมงกานีสมากเกินทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ และการเจริญเติบโตของรากและส่วนเหนือดินลดลง (Shenker *et al*., 2004) สำหรับระดับแมงกานีสในใบยางพาราที่เป็นพิษ คือ สูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ, 2552) ปัจจุบันมีการขยายพื้นที่ปลูกยางพาราเพิ่มขึ้น มีการใช้พื้นที่ลุ่ม หรือพื้นที่นาร้างมาปลูกยางพารา สภาพพื้นที่ดังกล่าวดินเป็นกรดและมีสภาพรีดักชันทำให้เสี่ยงต่อการเกิด

ปัญหาความเป็นของพิษแมงกานีสสูง สำหรับการเพิ่มระดับ pH ในดินให้สูงขึ้น เป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้โดยทั่วไปในการลดความเป็นพิษของแมงกานีส ถึงแม้ว่า สามารถลดการละลายของแมงกานีสในดินได้ แต่อาจทำให้เชื้อรา *Rigidoporus microporus* (Sw.) Overeen (ชื่อเดิม *Rigidoporus lingosus*) ซึ่งเป็นเชื้อสาเหตุของโรครากขาว มีการเจริญได้ดีตามระดับ pH ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะ pH ในช่วง 5 - 7 และที่ pH 3 เชื้อไม่สามารถเจริญเติบโตได้ (อารมณ์ และคณะ, 2541) จึงควรหาวิธีการอื่นเพื่อลดการดูดแมงกานีสของยางพารา โดยมีรายงานว่า การใส่แมกนีเซียมทำให้อัตราการดูดแมงกานีสของพืชลดลง (ยงยุทธ, 2552; Maas *et al*., 1969) เช่นเดียวกับการใส่อะลูมินัมที่ลดแมงกานีสได้เช่นกัน (Yang et al., 2009) ประกอบกับดินกรดมักมีอะลูมินัมมาก และดินปลูกยางพาราส่วนใหญ่โดยเฉพาะภาคใต้มีแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (นุชนารถ และคณะ, 2556) ดังนั้น การใช้แมกนีเซียมเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการแก้ไขความเป็นพิษแมงกานีสของยางพารา จึงศึกษาอันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีส และการเจริญเติบโตของยางพารา เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินปลูกยางพาราที่มีแมงกานีสสูง

## 2. การตรวจเอกสาร

### 2.1 ความสำคัญของยางพารา

ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) เป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพารา 19.27 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) โดยภาคใต้มีพื้นที่ปลูกยางพารามากที่สุดสูงถึง 12.19 ล้านไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) ประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกยางพารามากเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากประเทศอินโดนีเซีย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกยางพาราน้อยกว่าประเทศอินโดนีเซีย แต่กลับพบว่า ประเทศไทยมีผลผลิตยางพาราที่สูงกว่า โดยมีผลผลิต 3.5 ล้านตัน ในปี พ.ศ. 2554 เทียบกับอินโดนีเซียที่มีผลผลิตเพียง 2.8 ล้านตัน (สถาบันวิจัยยาง, 2555) นอกจากนี้ ยางพาราเป็นพืชพรรณทางการเกษตรที่มีมูลค่าส่งออกมากเป็นอันดับหนึ่งของประเทศในปี พ.ศ. 2555 เมื่อเทียบกับพืชพรรณชนิดอื่น โดยมีมูลค่าส่งออก 3.26 แสนล้านบาท ในขณะที่ข้าวและปาล์มน้ำมันมีมูลค่าส่งออกอยู่ที่ 1.43 แสนล้านบาท และ 5.88 พันล้านบาท ตามลำดับ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2555) ยางพาราเป็นไม้ยืนต้นที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาพแวดล้อมที่มีปริมาณน้ำฝนไม่ต่ำกว่า 1,250 มิลลิเมตรต่อปี โดยมีช่วงแล้งไม่เกิน 4 เดือน และมีอุณหภูมิระหว่าง 26 - 30 องศาเซลเซียส (สถาบันวิจัยยาง, 2555) สำหรับพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการปลูกยางพาราควรเป็นพื้นที่ราบมีความชันไม่เกิน 35 องศา ดินลึกไม่น้อยกว่า 1 เมตร เป็น

ดินร่วนเหนียวหรือร่วนทราย ไม่มีชั้นหิน ชั้นดินดานสูงกว่า 1 เมตร พื้นที่สูงจากระดับน้ำทะเลควรไม่เกิน 600 เมตร การระบายน้ำดี ไม่เป็นที่ลุ่มน้ำขัง ดินเค็ม หรือดินด่าง (สถาบันวิจัยยาง, 2555)

ยางพาราเป็นวัตถุดิบสำคัญที่ใช้ในการผลิตสินค้าหลายประเภท จึงทำให้ความต้องการใช้ยางทั่วโลกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้มีการขยายพื้นที่ปลูกยางพาราเพิ่มขึ้นตามเช่นเดียวกัน สำหรับประเทศไทยมีการส่งเสริมให้ขยายพื้นที่ปลูกไปยังภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ ซึ่งเป็นเขตปลูกยางใหม่ ส่วนในเขตปลูกยางเดิม ได้แก่ ภาคใต้และภาคตะวันออก ได้มีการขยายพื้นที่ปลูกเช่นเดียวกัน โดยเกษตรกรใช้พื้นที่ลุ่มหรือนาร้างมาปลูกยางพาราแทนการปลูกข้าวที่ไม่ได้ผล ดินที่ลุ่มมีข้อจำกัดต่อการเจริญเติบโตของยางพารา เนื่องจากเป็นดินที่ระบายน้ำเลว ระดับน้ำใต้ดินตื้น จึงทำให้เกิดสภาพน้ำท่วมขัง นอกจากนี้ ดินในที่ลุ่มมีสภาพเป็นกรด จึงทำให้เกิดความเป็นพิษของอะลูมินัม เหล็ก และแมงกานีสได้ (อิสริยาภรณ์ คณะ, 2558)

## 2.2 ดินปลูกยางพาราในประเทศไทย

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิภาคที่มีสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น ซึ่งเหมาะสมต่อการปลูกยางพารา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคใต้และบางจังหวัดทางภาคตะวันออกที่เป็นแหล่งปลูกยางเดิม ต่อมาได้ขยายพื้นที่ปลูกไปยังแหล่งปลูกยางใหม่ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ) โดยมีข้อจำกัดด้านความอุดมสมบูรณ์ของดิน ปริมาณและการกระจายของฝน และบางพื้นที่เป็นที่สูง แต่เนื่องจากยางพาราสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี จึงสามารถปลูกยางพาราได้เกือบทุกภาคของประเทศ (สถาบันวิจัยยาง, 2555) ความอุดมสมบูรณ์ของดินในแต่ละพื้นที่นั้นมีความแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับสมบัติต่าง ๆ ของดิน ทั้งสมบัติทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของดิน

เป็นสมบัติที่มองเห็นและสัมผัสได้ มีผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อการงอกของเมล็ด การเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตของพืช สมบัติทางกายภาพหลัก ๆ ประกอบด้วยเนื้อดินและโครงสร้างดิน ส่วนสมบัติอื่นเป็นผลต่อเนื่องจาก 2 สมบัตินี้ เช่น ความหนาแน่น ความพรุน การระบายน้ำและอากาศ และความสามารถในการอุ้มน้ำ เป็นต้น

**2.1.1.1 เนื้อดิน (soil texture)** เนื้อดินสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ดินเนื้อหยาบ ดินเนื้อปานกลาง และดินเนื้อละเอียด โดยเนื้อดินแต่ละประเภทมีความแตกต่างกันทางธรณีสัณฐานและวัตถุต้นกำเนิดดิน สำหรับเนื้อดินในสวนยางพาราที่ได้มีการศึกษาทั่วทุกภาคของประเทศสามารถจัดออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มดินทราย เช่น ดินร่วนปนทราย (sandy loam) ดินทรายปนดินร่วน (loamy sand) ดินร่วน (loam) และดินร่วนเหนียวปนทราย (sandy clay loam) โดย

ชุดดินที่อยู่ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ชุดดินโคราช ร้อยเอ็ด สตึก วังสะพุง นครพนม วาริน เชียงคาน ท่ายาง เชียงแสน คลองชาก บ้านจ้อง โป่งตอง วังชมพู สันป่าตอง ห้างฉัตร หางดง ตรัง ท่าแซะ บางนารา ท่าใหม่ แกลง คอหงส์ ชุมพร ทุ่งหว้า นาทวี ฝั่งแดง ภูเก็ต รือเสาะ วิสัย และหาดใหญ่ และ 2) กลุ่มดินเหนียว เช่น ดินเหนียว (clay) และดินร่วนเหนียว (clay loam) ได้แก่ ชุดดินโชคชัย เลย เชียงคาน พะเยา กบินทร์บุรี และรือเสาะ (นุชนารถ และคณะ, 2556)

ดินเนื้อหยาบมีการระบายน้ำดี แต่มีข้อจำกัดด้านธาตุอาหารที่มีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช ส่วนดินเนื้อละเอียดมีปริมาณธาตุอาหารสูงกว่าดินเนื้อหยาบ แต่การระบายน้ำเลวอาจเกิดการท่วมขังของน้ำได้ ซึ่งเป็นข้อจำกัดต่อการเจริญเติบโตของยางพารา โดยมีรายงานพบว่าต้นยางพาราพันธุ์พื้นเมือง หรือต้นยางพาราพันธุ์ดีที่ปลูกในดินที่ระบายน้ำเลว จะมีลักษณะลำต้นแคระแกรน โคนต้นโต แตกพุ่มเตี้ย และมีใบเหลืองซีดคล้ายขาดธาตุไนโตรเจน บางครั้งอาจพบการแห้งตายของปลายยอด นอกจากนี้ ยังพบว่า ยางพาราที่เจริญเติบโตในดินที่ระบายน้ำเลว มีโอกาสเกิดโรครากขาว และการระบาดของโรคจะรุนแรงกว่ายางพาราที่ปลูกในดินที่การระบายอากาศดี (ปราโมทย์ และสมเจตน์, 2530)

**2.1.1.2 ความหนาแน่นรวมของดิน (bulk density)** ความหนาแน่นรวมของดินเป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการอัดตัวของอนุภาคดิน ดินที่มีค่าความหนาแน่นรวมเท่ากับ 2 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นดินที่อัดตัวแน่นทำให้รากของพืชไม่สามารถชอนไชได้ง่าย (Brady and Weil, 2008) ส่งผลให้การดูดน้ำและธาตุอาหารของพืชน้อยลง และส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ไม่สมบูรณ์ ความหนาแน่นรวมของดินปลูกยางพาราที่ศึกษาในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าในระดับต่ำถึงค่อนข้างสูง โดยมีค่าพิสัยของดินบน (ความลึก 0 - 30 cm) ระหว่าง 1.08 - 1.81 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และดินล่าง (ความลึก 30 - 60 cm) ระหว่าง 1.14 - 2.00 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในภาค เหนือมีความหนาแน่นรวมของดินบนระหว่าง 1.01 - 1.76 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และดินล่างระหว่าง 1.35 - 1.84 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร สำหรับดินปลูกยางพาราภาคตะวันออกมีค่าพิสัยความหนาแน่นรวมของดินบนระหว่าง 1.30 - 1.85 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และดินล่างระหว่าง 1.37 - 1.82 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนภาคใต้มีความหนาแน่นรวมของดินบน ระหว่าง 1.17 - 1.73 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และดินล่างระหว่าง 1.17 - 1.93 เมกะกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (นุชนารถ และคณะ, 2556)

**2.1.1.3 ความชื้นในดิน (soil moisture)** เป็นสมบัติที่แสดงถึงปริมาณน้ำในดิน ดินปลูกยางพาราภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีความชื้นในดินต่ำ โดยมีค่าเฉลี่ยของดินบนระหว่างร้อยละ 8.5 - 29.8 ภาคเหนือมีค่าเฉลี่ยความชื้นในดินบนระหว่างร้อยละ 15.34 - 40.88 ภาคตะวันออกมีค่าเฉลี่ยความชื้นของดินบนระหว่างร้อยละ 8.19 - 25.12 สำหรับดินปลูกยางพาราภาคใต้มีความชื้น

ของดินบนร้อยละ 5.23 - 25.64 (นุชนารถ และคณะ, 2556) ดินที่มีความชื้นดินต่ำพืชอาจเกิดการขาดน้ำได้ ดังนั้น จึงต้องให้น้ำแก่พืชเพิ่มเติม โดยมีรายงานพบว่า การให้น้ำแก่ต้นยางพาราในเดือนมีนาคม ซึ่งเป็นช่วงฤดูแล้งทำให้ต้นยางพาราใบร่วง การแตกใบใหม่ช้าใน 10 - 20 วันแรกของเดือน สำหรับในช่วงกลางของเดือน พบว่า ความหนาแน่นรวมของใบยางพาราและผลผลิตน้ำยางสดเพิ่มขึ้น และยางพารามีแนวโน้มค่าศักย์น้ำในใบและค่าการชักนำปากใบในรอบวันสูงกว่ายางพาราที่ไม่ให้น้ำ (สุเมธ และคณะ, 2550)

**2.2.2 สมบัติทางชีวภาพของดิน**

เป็นสมบัติที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตในดิน แต่โดยส่วนใหญ่จะเป็นพวกจุลินทรีย์ดินที่มีบทบาทเด่น จุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย *Corynebecterium* sp. และ *Chromobecterium* sp. มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแมงกานีสในดิน โดยออกซิไดซ์แมงกานัสเป็นแมงกานีสออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ (Bromfield, 1956) ทำให้ลดความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสในดิน แต่หากดินมีเชื้อราไมคอร์ไร-ซ่า (mycorrhyza) ทำให้เหล็กและแมงกานีสในดินเพิ่มขึ้น เนื่องจากเชื้อราไมคอร์ไรซ่าส่งเสริมให้แบคทีเรียที่รีดิวซ์แมงกานีส และลดแบคทีเรียที่ออกซิไดซ์แมงกานีส (Nogueira *et al*., 2007) การดำเนินกิจกรรมของสิ่งมีชีวิตในดิน เช่น การขุดคุ้ยเพื่อหาอาหารหรือเป็นที่อยู่อาศัย รวมถึงการกัดย่อยชิ้นส่วนของราก หรือเศษซากต่าง ๆ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของดินได้ ยกตัวอย่างเช่น การสร้างรังและการขุดคุ้ยไชชอนดินของมด ปลวก แมลง หรือไส้เดือนดินทำให้เกิดการพลิกดิน การผสมคลุกเคล้าอินทรียวัตถุในดินหรือการผสมคลุกเคล้าดินบนกับดินล่าง เกิดการนำธาตุอาหารจากดินล่างขึ้นมาสู่ดินบน และทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ในดิน ซึ่งทำให้การระบายน้ำและถ่ายเทอากาศดีขึ้น นอกจากนี้ ปลวกและไส้เดือนยังมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายเศษซากพืชและซากสัตว์ให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ดินต่อไป จำนวนของประชากรและความหนาแน่น รวมถึงชนิดของสิ่งมีชีวิตในดินแต่ละนิเวศแตกต่างกัน จากการศึกษาความหลาก หลายของประชากรไส้เดือนในสวนยางพาราประเทศอินเดีย พบว่า มีความหลากหลายของไส้เดือนไม่น้อยกว่า 20 ชนิด และส่วนใหญ่อาศัยอยู่ภายใต้สภาพอุณหภูมิดินเฉลี่ย 25.9 องศาเซลเซียส ความชื้นร้อยละ 24 pH 4.85 และอินทรียวัตถุร้อยละ 1.8 โดย *Pontoscolex corethrurus* เป็นชนิดที่พบมากที่สุด ซึ่งมีมวลชีวภาพและความหนาแน่นต่อพื้นที่คิดเป็นร้อยละ 61.5 และ 72 ของประชากรไส้เดือนทั้งหมด ตามลำดับ (Chaudhuri *et al*., 2008)

### 2.2.3 สมบัติทางเคมีของดิน

เป็นสมบัติที่ใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน และมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช สมบัติทางเคมีดินหลัก ๆ มีความเกี่ยวข้องกับความเป็นกรดเป็นด่าง อินทรียวัตถุ และธาตุอาหารในดิน สำหรับสมบัติทางเคมีของดินที่เหมาะสมสำหรับยางพาราได้สรุปไว้ในตารางที่ 1.1

**ตารางที่ 1.1** สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารพืชตามเขตปลูกยางพารา

| สมบัติทางเคมี และธาตุอาหารพืช | หน่วย | เขตปลูกยางเดิม | เขตปลูกยางใหม่ | ระดับความเหมาะสม |
|---|---|---|---|---|
| $pH_{(ดิน:น้ำ\ 1:5)}$ | - | 4.3 - 5.0 | 4.3 - 6.4 | 4.5 - 5.5 |
| OM (Walkley & Black) | g $kg^{-1}$ | 10.3 – 28.7 | 7.9 – 25.2 | 10.0 – 25.0 |
| Total N (Kjeldhal) | % | 0.06 - 0.14 | 0.04 - 0.13 | 0.11 - 0.25 |
| Avai. P (Bray 2) | mg $kg^{-1}$ | 12.0 - 46.0 | 12.0 - 45.0 | 11.0 - 30.0 |
| Avai. K (1 M $NH_4OAc$) | mg $kg^{-1}$ | 20.0 - 77.0 | 20.0 - 69.0 | > 40 |
| Ca (1 M $NH_4OAc$) | $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 0.08 - 1.73 | 0.24 - 7.97 | > 0.30 |
| Mg (1 M $NH_4OAc$) | $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 0.10 - 0.85 | 0.21 - 1.67 | > 0.30 |
| Extra. Fe (0.005 M DTPA) | mg $kg^{-1}$ | 17.61 - 133.6 | 15.35 - 125.68 | 30.0 - 35.0 |
| Extra. Mn (0.005 M DTPA) | mg $kg^{-1}$ | 2.23 - 31.91 | 6.36 - 44.74 | 2.0 - 4.0 |
| Extra. Zn (0.005 M DTPA) | mg $kg^{-1}$ | 0.18 - 2.08 | 0.15 - 0.80 | 0.4 - 0.6 |
| Extra. Cu (0.005 M DTPA) | mg $kg^{-1}$ | 0.08 - 1.97 | 0.16 - 0.55 | 0.8 - 1.0 |

ที่มา : ดัดแปลงจากนุชนารถ (2550)

**2.2.3.1 ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH)** เป็นสิ่งที่ควบคุมปฏิกิริยาต่าง ๆ ในดิน ดังนั้น จึงเรียกว่า ปฏิกิริยาดิน (soil reaction) ซึ่งแสดงด้วยค่าพีเอช (pH) ในทางปฐพีวิทยาดินที่มีสภาพเป็นกลาง คือ ดินที่มี pH 6.6 - 7.3 ถ้าดินที่มี pH น้อยกว่า 6.6 จัดว่าเป็นดินกรด ในขณะที่ดินที่มี pH สูงกว่า 7.3 จัดเป็นดินด่าง pH ดินเป็นสมบัติเคมีที่เกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช และการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตภูมิอากาศร้อนชื้นจึงทำให้ดินส่วนใหญ่ของประเทศอยู่ในอันดับอัลทิซอลส์ (Ultisols) ซึ่งเป็นดินที่มีการพัฒนาการสูงเนื่องจากผ่านกระบวนการผุพังสลายตัวมายาวนาน โดยมีแร่ดินเหนียวที่มีกิจกรรมต่ำ คือ เคโอลิ-ไนต์ (kaolinite) เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ และที่สำคัญมีสภาพเป็นกรด

ดินกรดเขตร้อนโดยทั่วไปมีปริมาณธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองต่ำ เนื่องจากมีการสูญเสียโดยการชะละลาย แต่สำหรับจุลธาตุบางธาตุ เช่น เหล็กและแมงกานีสกลับมีมากจนอาจเป็นพิษต่อพืชได้ เนื่องจากทั้งสองธาตุนี้ละลายได้ดีในดินกรด มีรายงานพบว่า ในสภาพที่ดินเป็นกรดทำให้ปริมาณแมกนีเซียมที่เป็นประโยชน์ในดินลดลงในขณะที่แมงกานีสเพิ่มขึ้น (Heenan and Campbell, 1981) การที่ดินมีปริมาณแมงกานีสสูงอาจทำให้ธาตุอาหารอื่นในดินเกิดความไม่สมดุลกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง กับธาตุแคตไอออนประจุบวกสอง เช่น แมกนีเซียมไอออนและแคลเซียมไอออน (Stêpniewska *et al*., 2010) ดินกรดนอกจากมีปัญหาความเป็นพิษของแมงกานีสแล้ว ยังพบปัญหาความเป็นพิษของอะลูมินัมอีกด้วย ซึ่งมีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช โดยยับยั้งการยืดยาวของราก มีรายงานพบว่า ความยาวของรากถั่วเหลืองในสารละลายที่มีอะลูมินัม 15 ไมโครโมลาร์สั้นกว่าในสารละลายที่ไม่มีอะลูมินัม โดยเฉพาะรากแขนงที่มีผลแตกต่างอย่างชัดเจน (Silva *et al*., 2005)

ดินในเขตปลูกยางใหม่มี pH 4.3 - 6.4 ส่วนในเขตปลูกยางเดิมมี pH 4.3 - 5.0 (นุชนารถ, 2550) โดยในจังหวัดชุมพร สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช มีค่า pH อยู่ในช่วง 4.4 - 5.5 (สายใจ และคณะ, 2554) จังหวัดสงขลามีค่าอยู่ในช่วง 5.12 - 5.98 (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2556) และมีค่ากรดที่แลกเปลี่ยนในสารละลายดินเฉลี่ยอยู่ที่ 11.2 มิลลิโมล (+) ต่อกิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณกรดในดินทั้งไฮโดรเจนไอออนและอะลูมินัมไอออน (สายใจ, 2554) โดยทั่วไป ยางพาราสามารถเจริญเติบโตได้ในดินที่มี pH ระหว่าง 3.8 - 6.0 แต่ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 4.5 - 5.5 (นุชนารถ, 2550)

**2.2.3.2 อินทรียวัตถุในดิน** เป็นสมบัติหนึ่งที่ใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของดิน มีความสำคัญอย่างมากต่อสมบัติดินอื่น ๆ ทั้งทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ยกตัวอย่างเช่น อินทรียวัตถุมีความสามารถในการดูดซับแคตไอออนและแอนไอออน และยังช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ของดิน ในทางกายภาพอินทรียวัตถุมีความสามารถในการดูดซับน้ำไว้ได้มาก คือประมาณ 6 - 20 เท่าของน้ำหนัก (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548) การใส่อินทรียวัตถุลงไปในดิน จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินทรายหรือดินเนื้อหยาบ อินทรียวัตถุมีสมบัติเป็นสารเชื่อมช่วยให้โครงสร้างของดินดี มีสภาพร่วนซุย การซาบซึมน้ำและการระบายอากาศดี นอกจากนี้ ยังเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชได้อีกด้วย ในอินทรียวัตถุโดยทั่วไปมีธาตุองค์ประกอบ ดังนี้ คือ คาร์บอนร้อยละ 58 ไฮโดรเจนร้อยละ 10 ออกซิเจนร้อยละ 20 ไนโตรเจนร้อยละ 5 ฟอสฟอรัสร้อยละ 1 กำมะถันร้อยละ 1 และธาตุอื่น ๆ อีก ดังนั้น การเติมอินทรียวัตถุยังเป็นการเพิ่มธาตุอาหารให้แก่ดินอีกทางหนึ่ง แต่โดยทั่วไปอินทรียวัตถุในดินเขตร้อนมีปริมาณต่ำ

ได้มีการศึกษาจำแนกความอุดมสมบูรณ์ของดินปลูกยางพาราตามปริมาณอินทรีย-วัตถุในดินพบว่า ดินส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำ (อินทรียวัตถุ 1 - 1.5 %) ดินปลูกยางพาราประมาณร้อยละ 35 มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลางถึงค่อนข้างสูง (อินทรียวัตถุ 2.3 - >3.5 % ) และดินปลูกยางพาราส่วนน้อยที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำมาก (อินทรียวัตถุ < 1.00 %) (สมยศ และคณะ, 2536) ในพื้นที่ปลูกยางพาราอำเภอพระยืน จังหวัดขอนแก่น พบว่า ดินมีอินทรียวัตถุอยู่ในระดับต่ำ (ศรัทธา และคณะ, 2552) สำหรับภาคใต้ในจังหวัดสงขลามีอินทรียวัตถุ 9 - 13 กรัมต่อกิโลกรัม ในดินบน ส่วนดินล่างมีเพียง 3 - 5 กรัมต่อกิโลกรัม (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2556) ดังนั้นเกษตรกรควรเพิ่มอินทรียวัตถุในดินโดยการใส่ปุ๋ยอินทรีย์ การใส่ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในแปลงกล้ายางพารา พบว่า ทำให้ต้นยางพาราเจริญเติบโตดี ติดตาได้เร็วขึ้น และผลสำเร็จการติดตาสูง และเมื่อใส่กับยางพาราอ่อน พบว่า ทำให้ต้นยางพาราเจริญเติบโตได้ดีและเปิดกรีดได้เร็วก่อนกำหนด นอกจากนี้ ช่วยเสริมให้การใช้ปุ๋ยเคมีมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น สามารถประหยัดปุ๋ยเคมีที่ใช้บำรุงต้นยางพาราลงได้ร้อยละ 25 - 50 ของอัตราปกติ (โสภา, 2545) โดยการใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 30-5-18 อัตรา 1,000 กรัมต่อต้นต่อปี (อัตราแนะนำปี 2541 กับต้นยางหลังเปิดกรีด) ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ (ในรูปของปุ๋ยหมักอุตสาหกรรม) 3 กิโลกรัมต่อต้นต่อปี เป็นอัตราปุ๋ยที่ทำให้ต้นยางพารามีผลผลิตสูงที่สุด แต่หากคำนึงถึงผลตอบแทนทางเศรษฐกิจจากการใส่ปุ๋ยปรากฏว่า การใส่ปุ๋ยเคมีครึ่งอัตราแนะนำ (500 กรัม/ต้น/ปี) ร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์อัตรา 3 กิโลกรัมต่อต้นต่อปี ให้ผลตอบแทนคุ้มค่าต่อการลงทุน (โสภา และคณะ, 2546)

**2.2.3.3 ธาตุอาหารในดิน** เป็นสมบัติสำคัญที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช โดยเฉพาะธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก โดยไนโตรเจนมีหน้าที่สำคัญในกระบวนการเมตาโบลิซึมของพืช เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโน โปรตีน คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์บางชนิด ทำให้พืชมีสีเขียวและแข็งแรง ฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิกและนิวคลีโอโปรตีน มีความสำคัญต่อการแบ่งเซลล์ และการสร้างเซลล์ในพืช ช่วยในการเจริญเติบโตของราก จำเป็นสำหรับการออกดอก การติดเมล็ด และการพัฒนาของเมล็ดหรือผล สำหรับโพแทสเซียมช่วยในการลำเลียงแป้งและน้ำตาล ควบคุมและรักษาความเป็นกรด-ด่างในพืช ควบคุมการเปิด-ปิดของปากใบ ช่วยให้ทุกส่วนของต้นพืช และระบบรากแข็งแรง ทนทานต่อโรคและแมลง ดังนั้น ธาตุโพแทส-เซียมจึงเป็นอีกธาตุที่ช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผลผลิต

ดินในประเทศไทยเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำขาดธาตุอาหารหลายธาตุพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม การที่ธาตุอาหารจะขาดแคลนนั้น ส่วนหนึ่งขึ้นอยู่กับชนิดพืชด้วย เพราะพืชแต่ละชนิดมีความต้องการธาตุอาหารต่าง ๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน จากการประเมินธาตุอาหารที่จำกัด

การเจริญเติบโตของยางพาราและข้าวโพด โดยวิธี Omission trial ในชุดดินท่าศาลา พบว่า ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และทองแดง จำกัดการเจริญเติบโตทั้งในข้าวโพดและยางพารา (ปราโมทย์ และคณะ, 2554) และผลจากการสำรวจข้อมูลดิน สามารถจำแนกชุดดินที่ใช้ปลูกยางพาราได้ 35 ชุดดิน พบว่า ดินปลูกยางพาราภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำกว่าดินปลูกยางพาราภาคตะวันออกและภาคเหนือ (นุชนารถ และคณะ, 2556) สอดคล้องกับการศึกษาของพิเชษฐ และคณะ (2547) ที่พบว่า ระดับธาตุอาหารในชุดดินกบินทร์บุรีที่เป็นตัวแทนของดินภาคตะวันออก สูงกว่าชุดดินโคราชที่เป็นตัวแทนของดินในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จึงทำให้การเจริญเติบโต ผลผลิต ตลอดจนองค์ประกอบอื่น ๆ ของยางพาราภาคตะวันออกสูงกว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

จากการสุ่มเก็บตัวอย่างดินในสวนยางพาราในจังหวัดสุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช พบว่า ดินส่วนใหญ่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่ำมากจนถึงไม่เพียงพอ (1 - 2 mg $kg^{-1}$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.3 - 28.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ (13 - 39 mg $kg^{-1}$) มีค่าอยู่ในช่วง 18 - 113 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (สายใจ และคณะ, 2554) สำหรับในจังหวัดสงขลามีไนโตรเจนทั้งหมด 0.47 - 0.79 กรัมต่อกิโลกรัม ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 8 - 15 และ 29 - 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (จักรฤษณ์ และคณะ, 2556) โดยธาตุเหล่านี้มีค่าต่ำกว่าค่าเหมาะสมของสถาบันวิจัยยาง เช่นเดียวกับดินปลูกยางพาราในอำเภอพระยืน จังหวัดขอนแก่น (ศรัทธา และคณะ, 2552) จากการสำรวจการขาดธาตุอาหารของยางพาราจำนวน 200 สวน ในภาคใต้ตอนล่าง พบว่า ยางพาราที่แสดงอาการขาดธาตุอาหารมี 68 สวน คิดเป็นร้อยละ 34 ของจำนวนสวนทั้งหมด โดยจังหวัดที่พบสวนยางแสดงอาการขาดธาตุอาหารมากที่สุด คือ ปัตตานี รองลงมา คือ ตรัง สงขลา และพัทลุง ส่วนใหญ่แสดงอาการขาดธาตุไนโตรเจน รองลงมา คือ แมกนีเซียม สวนยางพาราที่เป็นดินทราย และดินร่วนปนทราย เช่น ดินชุดคอหงส์ ชุดท่าแซะ และชุดระยอง มักแสดงอาการขาดธาตุดังกล่าว (ศุภมิตร, 2544)

ปริมาณธาตุอาหารรองและจุลธาตุในดินปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราชและสุราษฎร์ธานี พบว่า ดินมีแคลเซียม เหล็ก และแมงกานีสอยู่ในระดับที่เพียงพอ ยกเว้นบางแปลงที่มีปริมาณแมงกานีส และเหล็กสูงมากจนอาจเป็นพิษ แต่พบการขาดธาตุแมกนีเซียม สังกะสี และทองแดง เนื่องจากไม่ใส่ธาตุเหล่านี้เพิ่มเติมให้แก่พืช (นุชนารถ และคณะ, 2551) และดินปลูกยางพาราในชุดดินคอหงส์ ท่าแซะ และรือเสาะ ขาดแมกนีเซียมทั้งในดินบนและดินล่าง โดยมีปริมาณต่ำกว่าค่าวิกฤติ (< 0.30 $cmol_c$ $kg^{-1}$) (โสภา และคณะ, 2536) การศึกษาของสายใจ และคณะ (2554) ในดินปลูกยางพาราจังหวัดนครศรีธรรมราช ชุมพร และสุราษฎร์ธานี พบว่า มีความสอด คล้องกับผลของนุชนารถ และคณะ (2556) โดยมีแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เฉลี่ย 30.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เหล็ก

ที่สกัดได้เฉลี่ย 47.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แมงกานีสที่สกัดได้เฉลี่ยเท่ากับ 27.9 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สังกะสีที่สกัดได้อยู่ในช่วง 0.14 - 1.40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยกเว้น แคลเซียมที่พบว่า ส่วนใหญ่ต่ำมาก สำหรับในจังหวัดสงขลามีแคลเซียมและแมกนีเซียมต่ำ ในขณะที่แคลเซียมในดินที่ลุ่มที่มีค่าสูงกว่าค่าเหมาะสมของสถาบันวิจัยยาง (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2556)

จากรายงานการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น สรุปได้ว่า ดินปลูกยางพาราส่วนใหญ่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ขาดธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ทั้งนี้เนื่องจาก ดินมีสภาพเป็นกรดและเกิดการชะละลายมานาน ประกอบกับการใส่ปุ๋ยของเกษตรกรที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของยางพารา สำหรับจุลธาตุนั้นมีการศึกษาค่อนข้างน้อย แต่โดยทั่วไปมีอย่างเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของต้นยางพารา มีเพียงบางชุดดินเท่านั้นที่เกิดความเป็นพิษของแมงกานีส อย่างไรก็ตามพืชจะดูดแมงกานีสมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณและรูปของแมงกานีสในดิน

### 2.3.1 แมงกานีสในดิน

เปลือกโลกมีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบเฉลี่ย 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al*., 2005) โดยแมงกานีสทั้งหมดในดินอาจแบ่งได้ออกเป็น 4 รูป ประกอบด้วย 1) อนินทรีย์แมงกานีส 2) แมงกานีสที่เป็นองค์ประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ (organically complexed manganese) 3) แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ และ 4) แมงกานีสในสารละลายดิน แมงกานีสในสารละลายดินอาจเป็นได้ทั้งแมงกานัสไอออน ($Mn^{2+}$) หรือแมงกานีสที่เป็นองค์ประกอบร่วมกับสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ (Barber, 1984) โดยความสมดุลของแมงกานีสทั้ง 4 รูป ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของ pH ดินและสภาพรีดอกซ์

อนินทรีย์แมงกานีส พบมากที่สุดในแร่เฟร์โรแมกนีเซียม เมื่อแร่ปฐมภูมิเหล่านี้ผุพังสลายตัวจะปลดปล่อยแมงกานีสออกมา และจะรวมกับออกซิเจนเป็นแร่ทุติยภูมิในรูปแมงกานีสออกไซด์ ซึ่งประกอบด้วย ไพโรลูไซต์ (pyrolusite; $MnO_2$) เฮาส์มันไนต์ (hausmanite; $Mn_3O_4$) และแมงกาไนต์ (manganite; MnOOH) แร่ทั้ง 3 นี้แตกต่างกันตามการแทนที่ของออกซิเจนเข้าไปแทนที่ไฮดรอกไซด์ไอออน ไพโรลูไซต์และแมงกาไนต์เป็นแร่ที่พบได้มากที่สุดในเปลือกโลก นอกจากนี้ แมงกานีสออกไซด์อาจเกิดขึ้นในลักษณะการเคลือบบนแร่อื่น ๆ ได้อีกด้วย และบางดินอาจมีสารมวลพอก (concretion) ของเหล็กและแมงกานีส (Barber, 1984)

แมงกานีสที่เป็นองค์ประกอบเชิงซ้อนกับสารอินทรีย์ เกิดจากแมงกานัสไอออน สร้างโครงสร้างเชิงซ้อนกับสารประกอบอินทรีย์ในดิน ซึ่งอาจมีทั้งที่ละลายน้ำได้และไม่ได้ ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนแมงกานีสมีความผันแปรอย่างมากจากไม่มีเลยถึง 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเติมปูนเป็นการเพิ่มระดับ pH ในดินให้สูงขึ้นทำให้ปริมาณสารประกอบเชิงซ้อนแมงกานีสลดลง

อย่างมาก และสารประกอบเชิงซ้อนของแมงกานีสยังมีความสัมพันธ์กับแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ (Barber, 1984)

แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ เป็นแมงกานีสที่ถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์ดิน โดยหลัก ๆ อยู่ในรูปแมงกานัสไอออน ในดินกรดมีปริมาณแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้มากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่ดินอินทรีย์ pH สูง อาจมีค่าน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Barber, 1984) การเพิ่มแมงกานัสไอออนในดินอาจไม่เพิ่มแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ เนื่องจากแมงกานัสไอออนพร้อมที่จะถูกออกซิไดซ์เป็นแมงกานิกไอออน ($Mn^{4+}$) และตกตะกอนเป็นแมงกานีสออกไซด์ โดยแบคทีเรียจำพวก *Corynebecterium* sp. และ *Chromobecterium* sp. (Bromfield, 1956) แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้จะลดลงเมื่อดินมี pH เพิ่มขึ้น สำหรับแมงกานีสในสารละลายดินมีสภาวะสมดุลกับแร่ไพโรลูไซต์และแมงกาไนต์ (Barber, 1984) แมงกานัสไอออนเป็นรูปที่พบโดยทั่วไปในสารละลายดิน โดยความเข้มของแมงกานัสจะลดลง 100 เท่า เมื่อ pH ของดินเพิ่มขึ้น 1 หน่วย (ยงยุทธ, 2552)

ดินโดยทั่วไปมีปริมาณแมงกานีสทั้งหมดอยู่ในช่วง 20 - 3,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al*., 2005) ดินปลูกยางพาราในทุกภาคของประเทศไทยส่วนใหญ่ร้อยละ 65 - 100 มีปริมาณแมงกานีสอยู่ในระดับสูงกว่าค่าที่เหมาะสม โดยดินปลูกยางพาราภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าแมงกานีส 0.26 - 134 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แต่โดยส่วนใหญ่แล้วมีค่าเฉลี่ยในดินอยู่ในระดับที่เหมาะสม (2 - 4 mg $kg^{-1}$) ยกเว้น ชุดดินเชียงคาน โชคชัย และวังสะพุง ที่มีปริมาณแมงกานีสอยู่ในระดับสูงมากเฉลี่ย 105, 93 และ 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (นุชนารถ และคณะ, 2556) ภาคเหนือมีปริมาณแมงกานีสในดิน 4.6 - 215 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยทุกแปลงมีปริมาณแมงกานีสในระดับสูงถึงสูงมากจนอาจเป็นพิษ ดินภาคตะวันออกมีแมงกานีส 0.95 - 60 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยทุกแปลงมีปริมาณแมงกานีสในระดับที่สูงมากจนอาจเป็นพิษ เช่นเดียวกับดินปลูกยางพาราในภาคใต้ที่มีแมงกานีส 0.61 - 180 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยทุกชุดดินมีปริมาณแมงกานีสสูงกว่าระดับที่เหมาะสม (นุชนารถ และคณะ, 2556)

ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในดินมีอิทธิพลต่อสถานะออกซิเดชันของแมงกานีส โดยดินที่ระบายอากาศดีมีแมงกานิกไอออนมากกว่าแมงกานัสไอออน (Barber, 1984) แต่สำหรับดินที่มีน้ำขังหรือขาดออกซิเจนจะทำให้ระดับ pH และแมงกานีสในสารละลายดินเพิ่มขึ้น (Khabaz-Saberi *et al*., 2006) และลดระดับค่าศักยภาพการเกิดออกซิเดชัน รีดักชัน (oxidation reduction potential, Eh) โดยค่า Eh ถูกควบคุมโดยปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงจาก $MnO_2$ เป็นแมงกานัสไอออน (Porter *et al*., 2004) ดินที่มีน้ำขังอาจมีค่า Eh ต่ำกว่า -300 มิลลิโวลล์ โดยเป็นผลมาจากการขาดออกซิเจนและมีกิจกรรมของแบคทีเรียที่ไม่อาศัยออกซิเจน (anaerobic becteria) ค่า Eh ลดลงเมื่อมี

การปลดปล่อยแมงกานีสจากอินทรียวัตถุเข้าสู่สารละลายดิน (Stêpniewska *et al*., 2010) ดังนั้น จึงอาจสรุปได้ว่า แมงกานีสในรูปแมงกานัสไอออน เป็นรูปที่เป็นพิษต่อพืชหากพืชได้รับในปริมาณที่มากเกิน โดยดินกรดและดินที่มีน้ำขังเป็นสภาพที่ส่งเสริมให้แมงกานัสไอออนละลายออกมามาก ความเป็นพิษของแมงกานีสเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่จำกัดการเจริญเติบโตและผลผลิตของยางพารา ดังนั้น จึงควรศึกษาให้ชัดเจนถึงผลกระทบจากความเป็นพิษของแมงกานีสต่อยางพารา และแนวทางในการจัดการแก้ไขที่มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับยางพารา

### 2.4 บทบาทของแมงกานีสต่อพืช

ธาตุอาหารเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของพืช ปัจจุบันธาตุอาหารจำเป็นต่อพืชมีทั้งหมด 14 ธาตุ โดยไม่คำนึงถึงธาตุไฮโดรเจน ออกซิเจน และคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุที่พืชได้รับอย่างเพียงพอจากอากาศและน้ำ ธาตุอาหารทุกธาตุต่างมีความสำคัญและมีหน้าที่ที่แตกต่างกัน รวมถึงปริมาณที่พืชต้องการด้วย การที่พืชจะเจริญเติบโตและให้ผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพนั้น ทุกธาตุควรมีปริมาณที่เพียงพอและเหมาะสม

#### 2.4.1 ความสำคัญของแมงกานีส

พืชดูดแมงกานีสในรูปแมงกานัสไอออนและสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนโมเลกุลต่ำ โดยแมงกานัสไอออนเข้าสู่เซลล์พืชผ่านเยื่อหุ้มเซลล์อาศัยโปรตีนเคลื่อนย้ายจำเพาะ ซึ่งสร้างแรงขับเคลื่อนโปรตอนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ในขณะที่ผนังเซลล์มีโปรตอนมากกว่าภายในเซลล์ โดยทั่วไปในพืชมีความเข้มข้นแมงกานีสอยู่ในช่วง 20 - 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al*., 2005) แม้ว่าแมงกานีสมีสถานะออกซิเดชันได้หลายแบบ แต่ในชีวระบบ (biological system) มีเพียง 3 แบบ คือ Mn (II), Mn (III) และ Mn (IV) โดย Mn (II) และ Mn (IV) ค่อนข้างเสถียร แต่ Mn (III) ไม่เสถียร (ยงยุทธ, 2552) แมงกานีสมีบทบาทสำคัญเกือบทุกกระบวนการของการเจริญเติบโตของพืช เช่น ปฏิกิริยาสังเคราะห์ด้วยแสง กิจกรรมเอนไซม์ โดยมีหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ต่าง ๆ เช่น Mn-superoxide dismutase, Pyruvate carboxylase, Phosphoenolpyruvate carboxykinase และ Mn-catalase (Ducic and Polle, 2005) และการเจริญเติบโตของราก เป็นต้น โดยบทบาทของแมงกานีสบางประการที่สำคัญจะได้อธิบายอย่างละเอียด ดังต่อไปนี้

**2.4.1.1 การสังเคราะห์ด้วยแสง** เป็นกระบวนการที่พืชเปลี่ยนพลังงานแสงให้มาอยู่ในรูปของพลังงานเคมีที่อยู่ในโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่สร้างขึ้น ในขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอน เมื่อระบบแสง II (photosystem II) ดูดซับพลังงานแสงจะทำให้อิเล็กตรอนถูกลำเลียงและสร้างพลังงานในรูป ATP และ NADPH เพื่อใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และสร้างคาร์โบไฮ-

เดรต เมื่อระบบแสง II สูญเสียอิเล็กตรอนไป ก็จะรับอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาแยกตัวของน้ำ (photo lysis) เข้ามาแทนที่โปรตีนในระบบแยกตัวของน้ำทำงานโดยอาศัยการเปลี่ยนสถานะออกซิเดชันของแมงกานีส โดยดึง 4 อิเล็กตรอนออกมาจากน้ำ เมื่อให้อิเล็กตรอนแล้วโปรตีนแมงกานีสจะออกซิไดซ์น้ำเป็นออกซิเจน ออกซิเจนที่อยู่ในบรรยากาศส่วนใหญ่มีจุดเริ่มต้นจากการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนแมงกานีสในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ดังนั้น แมงกานีสจึงจำเป็นในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Havlin *et al*., 2005)

**2.4.1.2 เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (superoxide dismutase; SOD)** ในกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ที่ใช้ออกซิเจนจะมีอนุมูลอิสระเป็นผลพลอยได้ โดยตัวรีดิวซ์ที่ถูกสร้างจากปฏิกิริยาภายในเซลล์มีการให้อิเล็กตรอนแก่ออกซิเจนเกิดเป็นซูเปอร์ออกไซด์ของอนุมูลอิสระ อนุมูลอิสระ (free radical) เช่น อนุมูลซูเปอร์ออกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และอนุมูลไฮดรอกซิลสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับสารชีวโมเลกุลต่าง ๆ ทำให้เกิดความเสียหายแก่องค์ประกอบต่าง ๆ ภายในเซลล์ ไม่ว่าจะเป็น การทำลายโครงสร้างดีเอ็นเอ (DNA) การเปลี่ยนสภาพโปรตีน หรือการสลายตัวของคลอโรฟิลล์ เป็นต้น โดยหนึ่งในปฏิกิริยาที่เกิดมากที่สุด คือ ทำให้ DNA เกิดการกลายและเป็นจุดเริ่มต้นปฏิกิริยาลูกโซ่ของไลพิดเปอร์ออกซิเดส (lipid peroxidase) (Bowler *et al*., 1991) ดังนั้น พืชจึงได้พัฒนาระบบต้านทานอนุมูลอิสระขึ้น ซึ่งมีความเกี่ยวข้องทั้งการจำกัดการสร้างและการกำจัดอนุมูลอิสระโดยตรง สารต้านอนุมูลอิสระมีอยู่มากมาย เช่น เอนไซม์คาทาเลส (catalase) กลูทาไธโอน เพอร์ออกซิเดส (glutathaione peroxidase) และหนึ่งในนั้น คือ ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิเทส

ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส เป็นหนึ่งในเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ โดยทำหน้าที่เปลี่ยนซูเปอร์ออกไซด์เป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($H_2O_2$) เอนไซม์นี้มีถึง 3 ไอโซไซม์ (isozyme) คือ Fe-SOD, CuZn-SOD และ Mn-SOD โดยแหล่งที่พบในเซลล์แตกต่างกัน Fe-SOD ปรากฏในคลอโรพลาสต์ Mn-SOD ปรากฏในไมโทคอนเดรียและเพอรอกซิโซม (peroxisome) และ CuZn-SOD ปรากฏในคลอโรพลาสต์ ไซโทซอล และอาจปรากฏในช่องเซลล์ภายนอก (extracellular space) ด้วย (Alscher *et al*., 2002) การป้องกันความเครียดออกซิเดชันของ Mn-SOD มีมากในพวกโปรคาร์ริโอต (prokaryotic) และในไมโทคอนเดรียของยูคาร์ริโอต (Eukaryotic) เอนไซม์นี้จะไม่เสื่อมจากปฏิกิริยาสร้าง $H_2O_2$ (Bowler *et al*., 1991) การทำงานของเอนไซม์นี้สภาพแวดล้อมภายนอกเข้ามามีอิทธิพลด้วย มีรายงานพบว่า กิจกรรมของเอนไซม์ SOD เพิ่มขึ้นในใบยาสูบที่ได้รับแสงเป็นเวลานาน โดยเฉพาะที่ความเข้มแสงสูงร่วมกับอุณภูมิต่ำ (8 ºC) นอกจากนี้ SOD ยังเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์โปรตีน โดย SOD ไวต่อสารยับยั้ง Cycloheximide ในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีน (Mishra *et al*., 1993)

$$O_2^- + O_2^- + 2H^+ \xrightarrow[SOD]{} H_2O_2 \text{ (hydrogen peroxide)} + O_2 \quad (1)$$

ในสภาวะปกติการสร้างและกำจัดอนุมูลอิสระมีความสมดุลกัน แต่เมื่อใดที่มีอนุมูลอิสระเกิดขึ้นในปริมาณมากเกินกว่าที่ระบบป้องกันจะยับยั้งได้หมด จะทำให้เกิดสภาวะที่เรียกว่า Oxidative stress โดยทั่วไป สภาวะนี้เกิดขึ้นในสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช เช่น แห้งแล้ง ดินเค็ม โรค การขาดธาตุอาหาร รวมถึงความเป็นพิษของธาตุอาหารด้วย เช่น ความเป็นพิษของแมงกานีส เป็นต้น

**2.4.1.3 การสังเคราะห์ลิกนิน** ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบที่โมเลกุลเป็นวงแหวน และจัดเป็นสารประกอบที่มีความซับซ้อนมากที่สุด ในวัสดุแต่ละชนิดมักพบลิกนินเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 20 - 35 โดยทำหน้าที่รวมมัดของเส้นใยของพอลิแซ็กคาไรด์ไว้ด้วยกัน ฟี-นิลอะลานีน (phenylalanine) และไทโรซีน (tyrosine) เป็นกรดอะมิโนที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตลิกนิน ในกระบวนการสังเคราะห์กรดอะมิโนและฟีนอลเหล่านี้มีแมงกานีสเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ Phynylalanine ammonialyase และ Cinnamic acid hydroxylase และอาจเกี่ยวข้องในการควบคุมฮอร์โมนของการสังเคราะห์ฟีนอล ได้มีรายงานว่า การขาดแมงกานีสทำให้กรดอะมิโนอิสระส่วนใหญ่เพิ่มขึ้น แต่กรดอะมิโนอะโรมาทิก (ฟีนิลอะลานีนและไทโรซีน) ลดลง (Ebeid *et al*., 1979 อ้างโดย Brown *et al*., 1984) และการทดลองของ Brown และคณะ (1984) พบว่า การขาดแมงกานีสทำให้ปริมาณฟีนอลและลิกนินในข้าวสาลีลดลง เป็นการยืนยันให้เห็นว่า แมงกานีสสำคัญต่อการผลิตลิกนิน กรดอะมิโนและฟีนอลนอกจากใช้ผลิตลิกนินแล้ว ยังใช้ในการสังเคราะห์กรดฟีโนลิกและแอลกอฮอล์ ซึ่งให้ความต้านทานต่อการติดเชื้อโรคของพืช (Havlin *et al*., 2005)

นอกจากบทบาทที่สำคัญข้างต้นแล้ว แมงกานีสยังเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์บางชนิดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหายใจของพืช และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์ของไนโตรเจนและการสร้างคลอโรฟิลล์ จะเห็นได้ว่า แมงกานีสมีบทบาทอย่างมากต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชจึงไม่อาจขาดแมงกานีสได้

### 2.4.2 การขาดแมงกานีสในพืช

การขาดแมงกานีสโดยทั่วไปปรากฏในดินด่าง ดินเค็ม ดินเนื้อปูน ดินเนื้อหยาบ ต้นหม่อนที่ขาดแมงกานีสทำให้ความสูง อัตราการขยายของพื้นที่ใบ น้ำหนักแห้ง และคลอโรฟิลล์ลดลง แต่ SOD, CAT และ $H_2O_2$ เพิ่มขึ้น (Tewari *et al*., 2013) เช่นเดียวกับข้าวโพดที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ และน้ำหนักแห้งทั้งส่วนเหนือดินและรากลดลง เมื่อขาดแมงกานีส (Shenker *et al*., 2004)

สำหรับอาการขาดแมงกานีสที่เป็นลักษณะเด่นของพืชใบเลี้ยงคู่ คือ มีสีเหลืองซีดระหว่างเส้นใบของใบอ่อน สำหรับพืชใบเลี้ยงเดี่ยวจะพบจุดสีเทาแกมเขียว (gray speck) ที่ใบล่าง ๆ (ยงยุทธ, 2552) ในยางพาราเมื่อขาดแมงกานีสจะปรากฏอาการใบซีดและกลายเป็นสีเหลืองทั้งใบ ยกเว้นที่เส้นกลางใบและเส้นใบที่มีสีเขียวเหลืออยู่ แตกต่างกับอาการขาดธาตุแมกนีเซียมอย่างเห็นได้ชัด ต้นยางพาราที่ยังไม่แตกกิ่งจะแสดงที่ใบชั้นล่างของฉัตรที่อยู่กลาง ๆ หรือกึ่งกลางลำต้น ถ้าขาดแมงกานีสอย่างรุนแรงใบที่ฉัตรบนก็จะแสดงอาการให้เห็นด้วย สำหรับต้นยางพาราที่แตกกิ่งแล้วอาการที่ขาดแมงกานีสจะเกิดกับใบในร่มกับกิ่งที่อยู่ต่ำของลำต้น โดยปกติปริมาณแมงกานีสของใบในร่มจะน้อยกว่าใบที่ถูกแสงแดด แต่หากขาดธาตุแมงกานีสอย่างรุนแรงใบที่ถูกแสงแดดก็แสดงอาการให้เห็นได้เช่นเดียวกัน (สถาบันวิจัยยาง, 2556) โดยทั่วไปไม่พบการขาดธาตุแมงกานีสในดินปลูกยางพาราของไทย เนื่องจากดินส่วนใหญ่เป็นกรด แต่ในบางพื้นที่พบธาตุแมงกานีสในดินและใบยางพาราในปริมาณสูง จนอาจเกิดอาการเป็นพิษแก่ต้นยางพาราได้ และยังทำให้ยางพาราดูดธาตุเหล็กลดลง (สถาบันวิจัยยาง, 2556)

### 2.4.3 ความเป็นพิษของแมงกานีสในพืช

พืชต้องการแมงกานีสในปริมาณน้อย หากพืชได้รับมากเกินอาจก่อให้เกิดพิษได้ โดยทั่วไปเกิดในดินที่มี pH ต่ำกว่า 5.5 (Foy, 1984) และยังสามารถเกิดในดินที่ระบายน้ำเลวหรือมีการอัดแน่น เนื่องจากเป็นสภาพที่มีการรีดิวซ์แมงกานีสให้อยู่ในรูปแมงกานัสไอออน ซึ่งพืชสามารถดูดไปใช้ได้ (Foy, 1984) พืชแต่ละชนิดมีความต้านทานต่อแมงกานีสได้แตกต่างกัน เช่น ผักกาดขาวมีความต้านทานที่ความเข้มข้นแมงกานีสไม่เกิน 300 ไมโครโมลาร์ (Lee *et al*., 2011) มะเขือเทศจะแสดงอาการเป็นพิษเมื่อสะสมแมงกานีสในใบอ่อน 450 - 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 900 - 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สำหรับใบแก่ ต้นทานตะวันจะแสดงอาการเป็นพิษเมื่อได้รับแมงกานีสสูงถึง 5,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 1.2) (Foy, 1984) โดยผลความเป็นพิษของแมงกานีสต่อพืชแยกเป็นประเด็นได้ ดังนี้

**2.4.3.1 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อลักษณะอาการของพืช** ลักษณะอาการเป็นพิษเนื่องจากแมงกานีสที่พืชแสดงออกมานั้นแตกต่างกันตามชนิดและสายพันธุ์ของพืช ต้นเบิร์ชขาวญี่ปุ่น (Japanese white birch) ที่ได้รับแมงกานีส 50 และ 100 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อลิตร จะแสดงอาการเหลือง (chlorosis) ที่ใบอ่อนทั้งหมด ส่วนที่ใบแก่จะแสดงอาการเป็นจุดสีน้ำตาล (brown speckle) ที่ขอบและระหว่างเส้นกลางใบ เมื่อได้แมงกานีสมากกว่า 1 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อลิตร

(Kitao *et al*., 2001) ต้นชาที่เจริญเติบโตในดินที่มีแมงกานีส 7,000 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อกิโลกรัม แสดงอาการเป็นจุดสีน้ำตาล (brown spot) ทั่วทั้งผิวใบ เริ่มจากก้านใบขึ้นไปสู่ปลายใบ โดยเริ่มแรกปรากฏที่ผิวหลังใบก่อน (Venkatesan *et al*., 2007) ผักกาดขาวที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นแมงกานีส 1.5 มิลลิโมลาร์ แสดงอาการตายของเนื้อเยื่อเป็นหย่อม ๆ (necrosis) และจุดสีน้ำตาล ที่ใบนอกหลังจากปลูกได้ 12 วัน (Lee *et al*., 2011) เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของแมงกานีสที่มากเกินทำให้เกิดการสะสมสารอนุมูลอิสระ และแมงกานีสยังได้เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันของฟีโนลิก แล้วท้ายที่สุดก็ก่อให้เกิดอาการเป็นพิษของแมงกานีสในพืช สำหรับในแตงไทยจะแสดงอาการใบเป็นจุดจากการตายของเนื้อเยื่อ (chlorotic spot) ที่ผิวหลังใบและเกิดอาการชุ่มน้ำรอบ ๆ จุดนิโครซิสที่ผิวท้องใบ โดยอาการจะปรากฏที่ใบแก่ สำหรับในแตงโมเกิดเป็นปื้นสีน้ำตาลดำที่ผิวใบล่างและจะเกิดเป็นสีน้ำตาล (browning) ที่เส้นใบเมื่ออาการรุนแรง (Simon *et al*., 1986)

**ตารางที่ 1.2** ระดับความเป็นพิษแมงกานีสของพืชชนิดต่าง ๆ

| พืช | ชิ้นส่วน | ค่าความเป็นพิษ (mg $kg^{-1}$) | ผู้ทดลอง (ค.ศ.) |
|---|---|---|---|
| แอปเปิ้ล | ใบ | 120-600 | Mask และ Wilson (1978) |
| มะเขือเทศ | ใบอ่อน | 450-500 | Ward (1977) |
| | ใบแก่ | 900-1,000 | |
| ทานตะวัน | | 5,300 | Edward และ Asher (1982) |
| ข้าวโพด | | 2,500-6,500 | Tanner (1977) |
| | | 200 | Edward และ Asher (1982) |
| ข้าวฟ่างหวาน | ใบบน | 445 | Malavolta และคณะ (1979) |
| | ใบล่าง | 1,440 | |

ที่มา: Foy (1984)

**2.4.3.2 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต** มีรายงานพบว่า มะเขือเทศที่มีแมงกานีสมากเกิน ทำให้ลดการเจริญเติบโตของราก (Shenker *et al*., 2004) ระดับแมงกานีสที่มากเกินมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและส่วนเหนือดินของแตงกวา เนื่องจากแมงกานีสทำให้เกิดความผิดปกติในเมทาบอลิซึม และการเกิด Lipid peroxidation ที่รากมากขึ้น โดยเฉพาะที่ pH ต่ำ (Qing-hua *et al*., 2006) แต่โดยทั่วไปจะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของส่วน

เหนือดินมากกว่าราก (Foy, 1984) ในข้าวสาลีการเจริญเติบโตลดลงเมื่อสัดส่วน Mg : Mn ต่ำกว่า 20 : 1 (Le Bot *et al*., 1990) การเพิ่มแมงกานีสทำให้สัดส่วน Mg : Mn ลดลง (Davis, 1996) ต้นชาที่เจริญเติบโตในดินที่ให้แมงกานีส 7,000 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อกิโลกรัม มีการตายภายใน 13 วัน และที่ให้แมงกานีส 5,000 และ 3,000 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อกิโลกรัม มีการตายภายใน 18 และ 23 วัน ตามลำดับ (Venkatesan *et al*., 2007) และได้มีรายงานถึงการเจริญเติบโตของผักกาดขาวที่ปลูกในสารละลายแมงกานีส 15 มิลลิโมลาร์ พบว่า ความกว้างและพื้นที่ใบมีแนวโน้มลดลง ส่วนความยาวใบ น้ำหนักส่วนเหนือดินและราก ทั้งที่เป็นน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลดลงอย่างเห็นได้ชัด (Lee *et al*., 2011) โดยความเข้มข้นแมงกานีสในใบมีความสัมพันธ์เป็นลบกับความสูงและน้ำหนักพืช (Davis, 1996)

**2.4.3.3 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อปริมาณธาตุอาหารในพืช** การสะสมแมงกานีสในต้นอัลฟาฟาพบมากในใบและบริเวณที่กำลังเจริญเติบโต (Graven *et al*., 1965) ในต้นชาสะสมในใบสูงกว่าในลำต้นและราก (Venkatesan *et al*., 2007) เช่นเดียวกับในถั่วลิสงที่มีความเข้มข้นแมงกานีสสูงสุดในใบส่วนบน (Davis, 1996) ความเข้มข้นแมงกานีสในใบแตงโมและแตงไทยที่แสดงอาการเป็นพิษมีค่าอยู่ในช่วง 994 - 6,250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Simon *et al*., 1986) การที่ดินมีแมงกานีสสูงมีผลต่อสมดุลของธาตุอาหารอื่น ๆ โดยพบว่า ปริมาณฟอสฟอรัสในดินและที่ต้นชาดูดไปใช้สะสมในใบ ลำต้น และรากลดลง เมื่อความเข้มข้นแมงกานีสเพิ่มขึ้น อาจเป็นเพราะมีการสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้น้อยระหว่างฟอสฟอรัสและแมงกานีส นอกจากนี้การเพิ่มความเข้มข้นแมงกานีสทั้งในดินและใบทำให้ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และเหล็กลดลง เนื่องจากแมงกานีสมีส่วนร่วมในการแข่งขันของแคตไอออน โดยเฉพาะแคตไอออนประจุสองบวก เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก ดังนั้น การเพิ่มจำนวนไอออนแมงกานีสจะลดการดูดซึมแคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี และเหล็กของพืช และการที่ธาตุอาหารเข้าสู่รากโดยการแพร่อาจถูกขัดขวางโดยแมงกานีส เนื่องจากแมงกานีสยับยั้งการผลิตขนรากและลดขนาดของปากใบ สำหรับโซเดียมการเพิ่มแมงกานีสมีลักษณะที่เสริมกัน จึงทำให้ปริมาณโซเดียมสูงขึ้น (Venkatesan *et al*., 2007)

ปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสีในใบผักกาดขาวลดลง เมื่อใส่แมงกานีสที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 15 ไมโครโมลาร์ ขึ้นไป สำหรับฟอสฟอรัสให้ผลกลับกัน โดย

มีผลเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของแมงกานีสที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณโพแทสเซียมในใบส่วนใน แต่ในใบส่วนนอกมีปริมาณลดลง (Lee *et al*., 2011) ทั้งนี้เนื่องจาก แมงกานีสที่มากเกินเข้าไปเกี่ยวข้องกับการดูดซึม การเคลื่อนย้าย และการใช้ประโยชน์ของธาตุอื่น เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม และเหล็ก (Lee *et al*., 2011) การขาดแคลเซียมและแมกนีเซียมมีสาเหตุจากการแข่งขันบริเวณจับซับสเทรต (binding site) ระหว่างแมกนีเซียมกับแมงกานีส โดยแมงกานีสยับยั้งการดูดแมกนีเซียมและแข่งขันได้มีประสิทธิภาพมากกว่าแมกนีเซียม (Lee *et al*., 2011)

**2.4.3.4 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อรงควัตถุของพืช** ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง คลอโรพลาสต์เป็นออร์แกเนลล์ที่ทำหน้าที่นี้ ภายในคลอโรพลาสต์จะมีรงควัตถุที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงประกอบด้วย คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน (phycobilin) มีรายงานพบว่า มะเขือเทศที่มีแมงกานีสมากเกินทำให้ลดความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ (Shenker *et al*., 2004) เช่นเดียวกับในข้าวโพดที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงเช่นเดียวกัน (Doncheva *et al*., 2009) ต้นชาที่เจริญเติบโตในดินที่ใส่แมงกานีสอัตรา 1,000 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อกิโลกรัม ขึ้นไปทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ลดลงอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากแมงกานีสไปยับยั้งการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ ในกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์จะมีเหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง หากมีแมงกานีสสูงจึงเกิดการยับยั้งการทำงานของเหล็ก (Venkatesan *et al*., 2007) สำหรับผักกาดขาวปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบลดลงเมื่อความเข้มข้นแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารมากกว่า 15 ไมโครโมลาร์ (Lee *et al*., 2011) โดยปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ทั้งหมด และแคโรทีนอยด์ลดลงที่ความเข้มข้นแมงกานีส 1.5 มิลลิโมลาร์ ส่วนคลอโรฟิลล์ บี เพิ่มขึ้น การที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงอาจเนื่องจากกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ถูกยับยั้ง หรือใบเกิดอาการนิโครซิสจากความเป็นพิษของแมงกานีส (Lee *et al*., 2011) การเพิ่มความเข้มข้นของแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารเป็นเหตุให้ความหนาของแผ่นใบเพิ่มขึ้น โดยมีสาเหตุหลักจากการที่เซลล์พาลิเสดพาเรงไคมา (palisade parenchyma cell) มีความยาวเพิ่มขึ้น และภายใต้ความเข้มข้นแมงกานีส 686 ไมโครโมลาร์ ความหนาของสปอนจิพาเรงไคมา (spongy parenchyma) เพิ่มขึ้นด้วย (Papadakis *et al*., 2007) คลอโรพลาสต์ในมีโซฟิลล์เซลล์ถูกรบกวนโดยไทลาคอยด์ที่มีอย่างหนาแน่น และในสโตรมา (stroma) มีเม็ดแป้งด้วย (Papadakis *et al*., 2007)

แมงกานีสมีผลต่อขนาดและรูปร่างของคลอโรพลาสต์ ภายใต้สภาพที่ไม่เติมแมงกานีส คลอโรพลาสต์จะสั้นและบางกว่าในความเข้มข้นแมงกานีส 2 - 686 ไมโครโมลาร์ และจากการดูด้วยกล้องจุลทรรศอิเล็กตรอน พบว่า จำนวนคลอโรพลาสต์ต่อหน่วยพื้นที่ของเซลล์ภายใต้ความเข้มข้นแมงกานีส 0, 2 - 98 และ 686 ไมโครโมลาร์ มีน้อย ปานกลาง และมาก ตามลำดับ (Papadakis *et al*., 2007)

**2.4.3.5 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อกิจกรรมเอนไซม์** แตงกวาที่ได้รับแมงกานีสมากเกินทำให้กิจกรรม Mn-SOD และ Fe-SOD ในแตงกวาเพิ่มขึ้น ยกเว้น CuZn-SOD ที่ลดลง อาจเป็นไปได้ว่า ในแตงกวาเอนไซม์ CuZn-SOD ไม่จำเป็นในการสลายซูเปอร์ออกไซด์ เช่นเดียวกับกิจกรรมของ Glutathione peroxidase (GPX), Ascorbate peroxidases (APX), Dehydroascorbate reductase (DHAR) และ Glutathione reductase (GR) ที่เพิ่มขึ้น แต่กิจกรรมคาทาเลส *(Catalase;* CAT) ลดลง ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นเอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญในการรีดิวซ์ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($H_2O_2$) การลดลงของกิจกรรม CAT อาจเป็นไปได้ว่า ในแตงกวา CAT อาจไม่ใช่เอนไซม์ที่สำคัญในการเปลี่ยนสภาพ $H_2O_2$ ภายใต้สภาพที่มีแมงกานีสสูง (Qing-hua *et al*, 2006) แต่ในต้นชากิจกรรมเพอร์ออกซิเดส (peroxidase) และ CAT เพิ่มขึ้น โดยอาจมีสาเหตุจากผลการกระตุ้นของแมงกานีสต่อการผลิต $H_2O_2$ (Venkatesan *et al*., 2007) นอกจากนี้ แมงกานีสที่มากเกินทำความเสียหายต่อ Indole-3-acetic acid (IAA) โดยการเพิ่มกิจกรรมของ IAA ในฝ้ายและผักบุ้งญี่ปุ่น (Japanese morning glory) (Foy, 1984)

**2.4.3.6 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อสมบัติอื่น ๆ** การเพิ่มแมงกานีสมีผลไปลดปริมาณกรดอะมิโนในใบชา (Venkatesan *et al*., 2007) และการเพิ่มแมงกานีสจนถึงอัตรา 1,000 มิลลิกรัม แมงกานีสต่อกิโลกรัม ทำให้ปริมาณแคทีชิน (catechin) และโพลีฟีนอล (polyphenol) ในใบชาเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเกินอัตราดังกล่าว ทำให้ทั้งแคทีชินและโพลีฟีนอลลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากการออกซิเดชันของพอลีฟีนอลตอบสนองต่อการเกิดจุดน้ำตาลของใบ และการสร้างสารอนุมูลโพลิฟีนอล (Venkatesan *et al*., 2007) ในผักกาดขาวพบว่า ปริมาณของกรดอะมิโนอิสระทั้งหมด (total free amino acids) ในใบลดลงตามความเข้มข้นของแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น (Lee *et al*., 2011) การลดลงของกรดอะมิโนอาจมีผลจากการที่รากดูดไนเทรตลดลง จึงมีผลระงับผลผลิตปลายทางของกระบวนการเมทาบอลิซึม เช่น กรดอะมิโน (Lee *et al*., 2011)

จะเห็นได้ว่า ความเป็นพิษแมงกานีสมีผลกระทบต่อพืช โดยจำกัดปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้น เพื่อลดข้อจำกัดนี้จึงจำเป็นต้องหาแนวทางแก้ไข

### 2.5 แนวทางการแก้ไขความเป็นพิษของแมงกานีส

พืชเจริญเติบโตได้ดีและให้ผลผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้ปัจจัยที่เหมาะสม หนึ่งในปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของพืช คือ ธาตุอาหารพืช หากพืชได้รับธาตุอาหารอย่างเพียงพอจะทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดี แต่หากพืชขาดหรือได้รับมากจนเป็นพิษทำให้การเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืชไม่เต็มที่ แมงกานีสเป็นธาตุที่มีรายงานถึงปัญหาความเป็นพิษกันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะพืชที่ปลูกในดินกรด (Foy, 1984) สำหรับผลกระทบจากความเป็นพิษแมงกานีสต่อพืชได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.4.3 ดังนั้น จึงต้องมีการแก้ไขปัญหาความเป็นพิษเนื่องจากแมงกานีสเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว แนวทางแก้ไขมีหลายวิธี ดังต่อไปนี้

#### 2.5.1 การเพิ่มระดับ pH ในดิน

ค่า pH ในดินเป็นดัชนีที่สำคัญมากอันหนึ่ง ที่มีอิทธิพลสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการทางเคมีและชีวภาพของดิน เช่น กิจกรรมจุลินทรีย์ ความเป็นประโยชน์และการเป็นพิษของธาตุอาหารต่าง ๆ ต่อพืช โดยทั่วไปในดินกรด ($pH < 6.5$) มีแคตไอออนสภาพเบสต่ำ แต่แมงกานีสกลับละลายได้ดีจนเป็นพิษกับพืชได้ โดยระดับวิกฤตของ pH ที่สามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษของแมงกานีสต่อพืชนั้นต่างกัน เช่น ถั่วลิสงมีค่าระหว่าง 5.2 - 5.5 (Davis, 1996) สำหรับแตงไทยและแตงโมมีค่า 4.4 - 5.4 ที่วัด pH ดินในน้ำ และต่ำกว่า 5.0 ที่วัดในโพแทสเซียมคลอไรด์ (Simon *et al*., 1986) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณแมงกานีสในดินด้วย การละลายของแมงกานีสจะลดลงเมื่อ pH ของดินสูงขึ้น โดยความเป็นประโยชน์และระดับความเป็นพิษของแมงกานีสมีความสัมพันธ์เชิงลบกับ pH ในดิน (Davis, 1996; Simon *et al*., 1986) หากค่า pH ของดินเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ความเข้มข้นของแมงกานัสไอออนในสารละลายดินลดลง 100 เท่า (ยงยุทธ, 2552)

การเพิ่ม pH ในดินโดยทั่วไปใช้วิธีการใส่ปูน เช่น ปูนขาว ปูนโดโลไมต์ ปูนเผา เป็นต้น การเติมปูนในดินกรดทำให้แมงกานีสที่ละลายได้และแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง เนื่องจากแมงกานีสทั้งสองรูปเกิดการตกตะกอนเป็น $MnO_2$ การเติมปูนโดโลไมต์ทำให้แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลง และยังทำให้ผลผลิตและร้อยละความอยู่รอดของอัลฟาฟาที่ถูกตัดเพิ่มขึ้น และการเติมปูนโซเดียมคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ทำให้แมกนีเซียมที่สกัดได้เพิ่มขึ้น (Davis, 1996) นอกจากนี้ ยังทำให้ปริมาณแมงกานีสในอัลฟาฟาลดลง แต่ปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น (Graven *et al*.,

1965) ถึงแม้ว่าการเติมปูนทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้น แต่ผลข้างเคียงของ pH ที่เพิ่มขึ้น คือ ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่รีดิวซ์แมงกาเนต (manganate) เปลี่ยนเป็นแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้แมงกานีสในดินเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกัน การเติมปูน ($CaCO_3$) ในดินกรดที่มีสภาพน้ำขังทำให้แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาที่น้ำท่วมขัง เมื่อเทียบกับการไม่ใส่ปูน เนื่องจากการเติมปูนเป็นการเพิ่ม pH ในดินให้เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยที่ pH 5.5 - 6.5 จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการรีดิวซ์แมงกาเนตเปลี่ยนเป็นรูปที่แลกเปลี่ยนได้ (Graven *et al*., 1965)

ในดินที่มี pH สูง ดินเนื้อปูน หรือดินที่มีสภาพเกินปูน มักจะพบการขาดแมงกานีสหรือความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสต่ำ มีรายงานพบว่า ข้าวฟ่างที่ปลูกในดินที่มีระดับแคลเซียมคาร์บอเนตสูงทำให้ความเข้มข้นแมงกานีสในพืชลดลง เนื่องจากแมงกานีสตกตะกอนและเกิดออก-ซิเดชัน รวมถึงถูกดูดซับที่ผิวแคลเซียมคาร์บอเนต (Patil and Patil, 1981) ในสวนยางพาราที่มีการระบาดของโรครากขาว วิธีนี้ไม่ค่อยเหมาะสมในการลดแมงกานีสในดิน เพราะพบว่า เชื้อรา *R. microporus* ซึ่งเป็นสาเหตุโรครากขาวเจริญได้ดีตามระดับ pH ของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ pH 6 - 7 และที่ pH 3 เชื้อไม่สามารถเจริญได้ (อารมณ์ และคณะ, 2541)

**2.5.2 การเติมอินทรียวัตถุ**

อินทรียวัตถุในดินเป็นสมบัติที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ที่มีความสัมพันธ์ต่อสมบัติอื่นในดิน โดยทั่วไปดินทำการเกษตรในเขตร้อนชื้นมีปริมาณอินทรียวัตถุต่ำ เนื่องจากมีสภาพอุณหภูมิสูงและความชื้นเหมาะสมต่อการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน โดยจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายอินทรียวัตถุ และใช้อินทรียวัตถุเป็นแหล่งอาหาร ทำให้อินทรียวัตถุในดินสูญเสียไปอย่างรวดเร็ว ดังนั้น ปริมาณจุลินทรีย์ที่มีมากในดินมีผลต่อความเป็นประโยชน์ของอินทรียวัตถุและออกซิเจนอย่างมาก (Brady and Weil, 2008) ผลผลิตที่ได้จากการย่อยอินทรียวัตถุ คือ กรดอินทรีย์ โพลีแซกคาไรด์ (polysaccharide) และกรดฟูลวิก สารเหล่านี้สามารถดูดไอออนของเฟอรัส ทองแดง สังกะสี และแมงกานัสจากโครงสร้างแร่และคีเลต หรือสารประกอบเชิงซ้อน (Brady and Weil, 2008) ในดินกรดเขตร้อนมักมีปัญหาความเป็นพิษของแมงกานีส การเติมอินทรียวัตถุทำให้ความเข้มข้นแมงกานีสในต้นกล้าข้าวฟ่างลดลง (Patil and Patil, 1981) การที่อินทรียวัตถุสามารถลดความเป็นพิษของแมงกานีสได้นั้น อาจเนื่องจากมีการสร้างสารคีเลตกับแมงกานัสไอออนที่มากเกิน (Foy, 1984)

ในดินที่มีอินทรียวัตถุสูงมีแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ต่ำ เนื่องจากพืชและมัคในดินจะสร้างสารประกอบแมงกานีสคีเลตที่ไม่เป็นประโยชน์ (Havlin *et al*., 2005) ในทางตรงกันข้าม การ

เติมวัสดุอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น พีทมอส ปุ๋ยหมัก และเศษฟางข้าวสาลีและพืชตระกูลถั่วจะเพิ่มแมงกานีสที่ละลายได้และแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน และการเพิ่มฟางข้าวโอ๊ตในดินที่มีสภาพน้ำขังก็มีผลในลักษณะเดียวกัน โดยเฉพาะ 15 วันแรกของน้ำท่วมขัง เนื่องจากการเพิ่มวัสดุดังกล่าวเป็นการเพิ่มแหล่งอาหารให้จุลินทรีย์ ส่งเสริมให้การเจริญเติบโตและปริมาณของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น และจุลินทรีย์ทำการรีดิวซ์แมงกานีสไปเป็นรูปที่แลกเปลี่ยนได้ จึงส่งผลให้แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในดินเพิ่มขึ้น (Graven *et al*., 1965) ในดินอินทรีย์มีการปลดปล่อยแมงกานีสออกมา โดยเฉพาะชั้นดินบนที่ปลดปล่อยแมงกานีสมากที่สุด และการปลดปล่อยจะลดลงตามระดับความลึกของดิน (Stêpniewska *et al*., 2010) การเติมปุ๋ยอินทรีย์อัตราสูงในดินที่มีน้ำขังทำให้ปริมาณแมงกานีสในดินละลายออกมามากชักนำให้เกิดพิษในถั่วเหลือง มีผลลดการเจริญเติบโตร้อยละ 10 แต่หากเติมอินทรียวัตถุในอัตราที่เพิ่มขึ้นในดินที่ระบายอากาศดีทำให้การปลดปล่อยแมงกานีสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (Porter *et al*., 2004) แมงกานีสละลายได้ดีในดินที่อินทรียวัตถุสูง เนื่องจากการสลายตัวของอินทรียวัตถุจะให้อิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์แมงกาเนตเป็นแมงกานัสซึ่งละลายได้ง่ายกว่า (ยงยุทธ, 2552)

### 2.5.3 การลดสภาพรีดักชันในดิน

แมงกานีสในดินทุกรูปถูกควบคุมโดยกระบวนการออกซิเดชัน-รีดักชันของดิน ในสภาพรีดักชัน คือ เมื่อดินมีน้ำขังทำให้ปริมาณออกซิเจนลดลงและปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นต่ำ แมงกานิกไอออนจึงถูกรีดิวซ์เป็นแมงกานัสไอออนซึ่งละลายน้ำได้ง่ายขึ้น (สมการที่ 2) (ยงยุทธ, 2552) โดยเฉพาะในดินกรด ที่ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสจะเพิ่มขึ้น เมื่อดินมีอากาศน้อยและมีการสะสมคาร์บอนไดออกไซด์รอบ ๆ รากพืชและอนุภาคดินสูง ในดินกรดที่มีน้ำขัง แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการขังน้ำ และการเติมปูนและฟางข้าวโอ๊ตที่บดละเอียดทำให้แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วง 15 วันแรก โดยฟางข้าวโอ๊ตที่เติมลงไปทำให้เพิ่มกิจกรรมจุลินทรีย์ในการรีดิวซ์แมงกานิก ส่วนปูนเป็นการเพิ่ม pH ในดินให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ (Graven *et al*., 1965)

$$Mn^{4+} + H_2O \longrightarrow Mn^{2+} + HCO_3^- + 2H^+ \qquad (2)$$

### 2.5.4 การเติมธาตุอาหารที่มีสภาพปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส

พืชแต่ละชนิดมีความต้องการปริมาณธาตุอาหารแต่ละชนิดแตกต่างกัน การที่ธาตุอาหารชนิดใดชนิดหนึ่งมีความเข้มข้นมากกว่าธาตุอาหารอื่น ๆ จะทำให้พืชดูดธาตุอาหารอื่น ๆ ได้น้อยลง เนื่องจากธาตุอาหารหนึ่งไปรบกวน หรือแข่งขันต่อการดูดธาตุอาหารของพืช อัตรกิริยา (interaction) ระหว่างธาตุอาหารมีทั้งที่เป็นปฏิปักษ์ (antagonist) ต่อกันและส่งเสริมกัน อันตรกิริยาของธาตุอาหารถูกควบคุมโดยกระบวนการคัดเลือกที่เกี่ยวข้องกับการดูดธาตุอาหารของพืช และจะมีส่วนสำคัญมากอย่างยิ่ง เมื่อปริมาณของธาตุทั้งสองใกล้ช่วงที่ขาดแคลน (Ranademalvi, 2011) ในดินที่มีแมงกานีสสูงจนเป็นพิษต่อพืชอาจแก้ไขโดยใช้หลักการปฏิปักษ์ของธาตุอาหารได้ แมงกานีสมีอันตรกิริยากับเหล็ก โมลิบดินัม ฟอสฟอรัส แคลเซียม ซิลิกอน (Foy, 1984) และแมกนีเซียม (ยง-ยุทธ, 2552) ในดินที่มีทองแดง เหล็ก หรือสังกะสีสูงสามารถลดการดูดแมงกานีสของพืชได้ (Havlin *et al*., 2005) การเพิ่มเหล็กในดินทำให้ความเข้มข้นแมงกานีสในข้าวฟ่างลดลง (Patil and Patil, 1981) เช่นเดียวกับการเพิ่มความเข้มข้นของเหล็กในสารละลายแมงกานีสทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสในลำต้น ราก และใบของถั่วเหลืองลดลง และยังลดน้ำหนักแห้งของถั่วเหลืองด้วย เนื่อง จากเหล็กและแมงกานีสมีภาวะแข่งขันต่อพาหะที่มีขนาดใกล้เคียงกันและอันตรกิริยาต่อผิวรากพืช ธาตุทั้งสองมีความเกี่ยวข้องในปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชัน ดังนั้น เหล็กไปลดอัตราการดูด หรือ และการกักเก็บแมงกานีสในราก ในขณะเดียวกันการเพิ่มความเข้มข้นของแมงกานีสก็ไปลดความเข้มข้นของเหล็กในใบและมีแนวโน้มลดในลำต้นด้วย แต่ในรากมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Heenan and Campbell, 1983)

การเพิ่มแคลเซียมมีผลลดแมงกานีสในลำต้น และยังพบว่า แคลเซียมในดินมีความสัมพันธ์เชิงลบกับแมงกานีสในใบ (Davis, 1996) โพแทสเซียมเป็นอีกธาตุหนึ่งที่เป็นปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส การเพิ่มระดับโพแทสเซียมมีผลบรรเทาความเป็นพิษของแมงกานีส โดยโพแทสเซียมลดความเข้มข้นแมงกานีสในใบและลดอัตราการดูดแมงกานีสของราก (Heenan and Campbell, 1981) นอกจากนี้ การเพิ่มความเข้มข้นแมกนีเซียมในพืชทำให้พืชมีความต้านทานต่อความเป็นพิษแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยแมกนีเซียมไปเพิ่มสัดส่วน Mg : Mn ในพืช สัดส่วน Mg : Mn ที่แสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีสในเนื้อเยื่อมะเขือเทศ คือ ตั้งแต่ 1.13 ถึงค่าระหว่าง 3.53 และ 6.54 และในใบแก่ตั้งแต่ 0.82 ถึงค่าระหว่าง 2.27 และ 3.51 (Le Bot *et al*., 1990) แอมโมเนียมเป็นปฏิปักษ์ต่อการดูดแมงกานีสของข้าวบาร์เลย์ แต่การใส่ปุ๋ยแอมโมเนียมทำให้ข้าวบาร์เลย์สะสมแมงกานีสสูงกว่าการ

ใส่ปุ๋ยไนเทรต ถึงแม้ว่า แอมโมเนียมเป็นปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส แต่เมื่อแอมโมเนียมถูกออกซิไดซ์เป็นไนเทรต (nitrification) จะปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออนออกมา (สมการที่ 3) โดยแมงกานีสออกไซด์ ($MnO_2$) เมื่อทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออนได้แมงกานัสไอออน ($Mn^{2+}$) เป็นผลผลิต (สมการที่ 4) ซึ่งพืชสามารถดูดไปใช้ได้ และเช่นเดียวกับการใส่ปุ๋ยไธโอซัลเฟต ($S_2O_3$) ที่ทำให้แมงกานีสในพืชสะสมสูงกว่าที่ใส่ปุ๋ยซัลเฟต ($SO_4^{2-}$) ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับปุ๋ยแอมโมเนียม (Husted *et al*., 2005) ดังสมการที่ 5 และ 6

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + H_2O + 2H^+ \quad (3)$$

$$MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \longrightarrow Mn^{2+} + 2H_2O \quad (4)$$

$$S_2O_3^{2-} + 2O_2 + H_2O \longrightarrow 2SO_4^{2-} + 2H^+ \quad (5)$$

$$2S_2O_3^{2-} + MnO_2 + 4H^+ \longrightarrow Mn^{2+} + S_4O_6^{2-} + 2H_2O \quad (6)$$

นอกจากนี้ ซิลิคอน (ธาตุกึ่งจำเป็น) เป็นอีกธาตุหนึ่งที่สามารถเพิ่มความต้านทานให้พืชต่อความเป็นพิษแมงกานีส โดยพบว่า ข้าวโพดที่เติมซิลิคอนร่วมด้วยมีดัชนีความต้านทานสูงขึ้น และยังเพิ่มความหนาของเซลล์เอพิเดอร์มิส (epidermis cell) และความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ในใบ (Doncheva *et al*., 2009) บทบาทของซิลิคอนที่ช่วยให้พืชทนต่อแมงกานีสได้ดีขึ้น ไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องจากซิลิคอนไปลดการดูดแมงกานีส แต่ซิลิคอนช่วยให้แมงกานีสกระจายในใบอย่างสม่ำเสมอ ไม่สะสมบริเวณใดบริเวณหนึ่งมากเกินไป แต่ถ้าพืชไม่ได้รับซิลิคอนจะพบแมงกานีสสะสมอยู่ในใบบางบริเวณมากจนเป็นพิษและเกิดจุดสีน้ำตาล หรือการตายของเนื้อเยื่อเป็นหย่อม ๆ เรียกว่า นิโครซิส (necrosis) (ยงยุทธ, 2552)

### 2.5.5 อื่น ๆ

เช่น การเติมกรดซาลิกไซลิกสามารถลดอาการเป็นพิษของแมงกานีสในแตงกวาได้ โดยกรดซาลิไซลิกลดการเคลื่อนย้ายของแมงกานีสจากรากสู่ส่วนเหนือดิน และเพิ่มการดูดสังกะสี แคลเซียม และแมกนีเซียมของแตงกวา (Shi and Zhu, 2008) การใช้จุลินทรีย์บางชนิดก็สามารถลดความเป็นพิษของแมงกานีสได้ โดยการใช้เชื้อราไมคอร์ไรซ่าทำให้ถั่วเหลืองดูดแมงกานีสลดลง และบรรเทาอาการเป็นพิษของแมงกานีสหลังปลูก 40 วัน (Nogueira *et al*., 2007) และทำให้ดูดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การใช้แบคทีเรียพวก *Corynebecterium* sp. และ *Chromobecterium*

sp. ทำให้แมงกานัสไอออนถูกออกซิไดซ์เป็นแมงกานีสออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำ (Bromfield, 1956) ซึ่งพืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

**2.6 การใช้แมกนีเซียมลดความเป็นพิษของแมงกานีส**

ความเป็นพิษของแมงกานีสมีผลจำกัดการเจริญเติบโตของพืชในหลาย ๆ ส่วน ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.4 ดังนั้น จึงต้องมีการแก้ไขหรือลดผลกระทบจากข้อจำกัดนี้ สำหรับแนวทางแก้ไขความเป็นพิษของแมงกานีสได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.5 นั้นมีอยู่หลายวิธี แต่โดยทั่วไปนิยมวิธีเพิ่มระดับ pH ในดินให้สูงขึ้นโดยการเติมปูน แต่วิธีนี้ไม่ค่อยเหมาะสมในดินปลูกยางพารา โดยเฉพาะสวนยางพาราที่มีการระบาดของโรครากขาว เนื่องจากเชื้อสาเหตุโรครากขาวเจริญได้ดีเมื่อ pH ดินเพิ่มขึ้น ได้มีรายงานถึงการระบาดของโรครากขาวในพื้นที่ปลูกยางพาราของภาคใต้ตอนบนทั้งหมด ในช่วงปี พ.ศ. 2551 - 2553 มีพื้นที่เสียหายจากโรครากขาวประมาณ 31,413 ไร่ หรือคิดความเสียหายต่อพื้นที่ปลูกร้อยละ 0.57 และคิดเป็นมูลค่าผลผลิตยางพาราที่สูญเสียประมาณ 848 ล้านบาท ในพื้นที่ภาคใต้ตอนล่างสวนยางพาราที่เป็นโรครากขาว คิดเป็นพื้นที่ร้อยละ 3.41 (อารมณ์ และคณะ, 2553) จึงควรใช้วิธีการอื่นแทน นั่นคือ การใช้ธาตุอาหารที่เป็นปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส ซึ่งมีอยู่หลายธาตุ ได้แก่ เหล็ก แคลเซียม โพแทสเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น

ในการศึกษานี้เลือกใช้แมกนีเซียมในการลดความเป็นพิษของแมงกานีส ด้วยเหตุผลที่ว่า แมกนีเซียมเป็นแคตไอออนประจุสองบวกขนาดเล็กและมีขนาดใกล้เคียงกับไอออนของแมงกานีส โดยแมกนีเซียมมีหน้าที่ในพืชหลายอย่าง และพืชต้องการแมกนีเซียมในปริมาณมาก แต่ดินโดยทั่วไปมักมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช โดยเฉพาะดินกรดเขตร้อน ประกอบกับปุ๋ยสูตรแนะนำของสถาบันวิจัยยางมีเพียงธาตุอาหารหลักอย่างเดียว การใส่ปุ๋ยธาตุอาหารหลักในปริมาณมาก โดยเฉพาะโพแทสเซียมทำให้พืชดูดแมกนีเซียมได้น้อยลง ยิ่งส่งเสริมให้พืชขาดแมกนีเซียมมากขึ้น และการขาดแมกนีเซียมในดินมีสัมพันธ์เชิงลบกับความเข้มข้นแมงกานีสในใบ (Davis, 1996) และการเกิดความเป็นพิษของแมงกานีส (Simon *et al*., 1986)

ถึงแม้ว่า แมกนีเซียมร้อยละ 1.93 จะเป็นองค์ประกอบของเปลือกโลก และในสาร ละลายดินมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมอยู่ในช่วง 5 - 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Havlin *et al*., 2005) แต่ในดินปลูกยางพาราภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่ร้อยละ 88 และ 64 ตามลำดับ มีแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable magnesium) อยู่ในระดับต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (0.30 $cmol_c\ kg^{-1}$) (นุชนารถ และคณะ, 2556) ดินปลูกยางพาราในจังหวัดสงขลามีแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 9-35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทั้งดินที่ดอนและลุ่ม โดยต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (> 36 $mg\ kg^{-1}$) (จักรกฤษณ์ และคณะ, 2556) ทั้งนี้เนื่องจาก ภาคใต้ปลูกยางพาราติดต่อกันเป็นระยะเวลานานและ

ขาดการจัดการธาตุอาหารอย่างเหมาะสม โดยเกษตรกรจะให้ปุ๋ยตามคำแนะนำของสถาบันวิจัยยาง คือ ปุ๋ยผสมสูตร 20-8-20, 20-10-12 และ 29-5-18 ซึ่งมีธาตุอาหารหลักเพียงอย่างเดียว แต่การนำผลผลิตของยางพาราออกจากพื้นที่จะมีแมกนีเซียมติดไปด้วย โดยการเก็บเกี่ยวผลผลิตน้ำยาง 1 ตัน ดินจะสูญเสียธาตุแมกนีเซียม 5 กิโลกรัม (นุชนารถ และคณะ, 2556) สำหรับภาคตะวันออกเฉียงเหนือส่วนใหญ่มีแมกนีเซียมอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากพื้นที่เป็นดินร่วนปนทรายและดินทรายปนร่วน ประกอบกับแมกนีเซียมเป็นธาตุที่ถูกชะละลายได้ง่าย โดยพบปัญหาการชะละลายของแมกนีเซียมในดินทรายและดินกรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งหลังใส่ปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ หรือโพแทสเซียมซัลเฟต (Havlin *et al*., 2005)

ภาคเหนือและภาคตะวันออกส่วนใหญ่มีแมกนีเซียมในดินร้อยละ 61 และ 58 อยู่ในระดับสูงกว่าค่าที่เหมาะสม โดยดินภาคเหนือมีปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในช่วง 0.05 - 3.90 เซนติโมล (+) ต่อกิโลกรัม สำหรับภาคตะวันออกมีปริมาณแมกนีเซียมอยู่ในระดับที่ต่ำมากถึงสูง โดยมีค่า 0.05 - 0.98 เซนติโมล (+) ต่อกิโลกรัม แต่ส่วนใหญ่อยู่ในระดับที่เหมาะสม (นุชนารถ และคณะ, 2556) จะเห็นได้ชัดว่า ในภาคใต้มีปริมาณแมกนีเซียมต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับภาคอื่น ๆ โดยมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม ดังนั้น ควรเพิ่มธาตุแมกนีเซียมในดินปลูกยางพาราภาคใต้ อย่างไรก็ตาม เมื่อดินขาดแมกนีเซียมทางสถาบันวิจัยยางแนะนำให้ใส่ปุ๋ยคีเซอไรต์อัตรา 80 กรัมต่อต้นต่อปี (สถาบันวิจัยยาง, 2547)

การเติมแมกนีเซียมจะเป็นการส่งเสริมให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น เป็นเพราะว่า แมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ (ยงยุทธ, 2552) ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และยังสร้างพันธะร่วมกับอินทรีย์แอนไอออน เช่น มาเลต ซิเทรต เพกเทต และออกซาเลต ตลอดจน อนินทรีย์แอนไอออน (Clark, 1984) นอกจากนี้ แมกนีเซียมทำหน้าที่เป็นส่วนประกอบโครงสร้างในไรโบโซม ซึ่งมีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์โปรตีน และแมกนีเซียมเกี่ยวข้องกับกิจกรรมการถ่ายโอนพลังงาน โดยมีหน้าที่เป็นโคเฟกเตอร์ของเอนไซม์ในกระบวนการสร้าง ATP ในเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต และยังเป็นโคเฟกเตอร์ของเอนไซม์อื่น ๆ อีกหลายชนิด ดังนั้น แมกนีเซียมจึงมีความสำคัญตลอดกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช

สำหรับยางพารา แมกนีเซียมเป็นธาตุอาหารรองที่สำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการเพิ่มผลผลิต โดยแมกนีเซียมทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์ Rubber transferase ซึ่งใช้ในการสังเคราะห์น้ำยาง โดยมีรายงานพบว่า การสังเคราะห์ยางและน้ำหนักโมเลกุลของยางขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแมกนีเซียมไอออน (Da Costa *et al*., 2006) อย่างไรก็ตาม ยางพาราที่มีแมกนีเซียมในน้ำยางสูงจะมีผลต่อความไม่คงตัวของน้ำยาง (latex instability) อาจเนื่องจากแมกนีเซียมไอออน

ที่มากเกินยับยั้งกิจกรรมเอนไซม์ Rubber transferase (Da Costa *et al*., 2005) นอกจากนี้ เอนไซม์ Rubber transferase ยังต้องการ Allylic pyrophosphate (APP) เพื่อใช้ในการเริ่มต้นโมเลกุลยาง และ Isopentenyl pyrophosphate (IPP) ในการทำให้โมเลกุลยางยืดยาว ทั้ง APP และ IPP มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบ หากสัดส่วนระหว่างแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสในต้นยางพาราไม่สมดุลกัน อาจส่งผลต่อการผลิตและคุณภาพของยาง สำหรับความสมดุลของแมกนีเซียมและฟอสฟอรัสในน้ำยางที่เหมาะสมควรมีค่าสัดส่วนของแมกนีเซียม : ฟอสฟอรัส เป็น 0.7 : 1.3 (สถาบันวิจัยยาง, 2556)

ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในพืชโดยทั่วไปอยู่ระหว่างร้อยละ 0.1 - 0.4 (Havlin *et al*., 2005) หากพืชขาดแมกนีเซียมจะแสดงลักษณะอาการที่ใบแก่ก่อนแล้วไปสู่ใบอ่อน เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ในพืช เมื่อพืชได้รับแมกนีเซียมไม่เพียงพอจะเคลื่อนย้ายแมกนีเซียมที่สะสมอยู่ที่ใบแก่ไปยังใบอ่อน สอดคล้องกับปริมาณแมกนีเซียมในใบแก่ที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด หลังจากที่พริกขาดแมกนีเซียมเกิน 30 วัน (Anza *et al*., 2005) สำหรับในต้นหม่อนอาการแรกเริ่มเป็นจุดเหลืองเกิดระหว่างเส้นกลางใบ (interveinal chlorotic mottling) หากอาการรุนแรงขึ้นพื้นที่บริเวณเส้นกลางใบพัฒนาเป็นจุดสีน้ำตาลเล็ก ๆ (brown necrotic spots) แล้วขยายวงกว้างขึ้นและเชื่อมติดกัน จนทำให้เกิดเป็นรูปทรงของจุดสีน้ำตาลและแผ่นใบไหม้ ท้ายที่สุดใบก็จะแห้ง นอกจากนี้ การขาดแมกนีเซียมยังทำให้น้ำหนักแห้งของผลผลิตลดลง โดยรากได้รับผลกระทบรุนแรงกว่าส่วนเหนือดิน (Tewari *et al*., 2006) และทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ในใบอ่อนลดลง (Tewari *et al*., 2006 ; Anza *et al*., 2005) แต่ในใบแก่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วง 60 วันแรกของการขาดแมกนีเซียมในพริก (Anza *et al*., 2005) ในแตงไทยที่ขาดแมกนีเซียม อาการเริ่มแรกปรากฏที่ใบโตเต็มที่ โดยใบมีสีบรอนซ์ระหว่างเส้นกลางใบ จากนั้นก็เกิดอาการเหลือง (chlorosis) และเป็นสีน้ำตาล (browning) (Simon *et al*., 1986)

ในส่วนของเอนไซม์พบว่า การขาดแมกนีเซียมทำให้ Malondialdehyde (MAD) ลดลง แต่ทว่า ความเข้มข้นของ $H_2O_2$ เพิ่มขึ้น โดยการสะสมของ $H_2O_2$ มีผลไปยับยั้งเอนไซม์ใน วัฏจักรเคลวิน (Calvin cycle enzyme) (Kaiser, 1976 อ้างโดย Tewari *et al*., 2006 ) และยังเหนี่ยวนำให้เกิดการปิดปากใบอีกด้วย (Desikan *et al*., 2004 อ้างโดย Tewari *et al*., 2006) และกิจกรรม SOD และ Glutathione reductase เพิ่มขึ้น (Tewari *et al*., 2006) หลังจาก 20 วันของการขาดแมกนีเซียม (Anza *et al*., 2005) ส่วน Ascorbate peroxidase, Dehydroascorbatse, Ascorbate และ Glutathione ทั้งหมดเพิ่มขึ้นหลังจากขาดแมกนีเซียม 30 วัน (Anza *et al*., 2005) และทำให้ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์

(reducing sugar) และแป้งในใบอ่อนลดลง ในขณะที่น้ำตาลไม่รีดิวซ์ (non-reducing sugar) เพิ่มขึ้น (Tewari *et al*., 2006)

ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในใบยางพาราที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 0.20-0.25 โดยภาคใต้มีแมกนีเซียมในใบอยู่ในช่วงร้อยละ 0.13 - 0.42 เฉลี่ยร้อยละ 0.24 (สถาบันวิจัยยาง, 2556) ยางพาราที่ขาดแมกนีเซียม จะแสดงอาการที่ขอบใบและพื้นที่ระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองเห็นได้ชัด แต่เส้นใบยังเขียวอยู่ อาการขาดเริ่มแรกจะเป็นจุดประสีเขียวซีดระหว่างเส้นใบ (lateral vein) แล้วจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง และแผ่ไปที่ขอบใบ รูปร่างคล้ายก้างปลา (herringbone) การขาดที่รุนแรงใบจะเป็นสีเหลือง ระหว่างเส้นใบและขอบใบเป็นสีน้ำตาล ใบร่วง และทำให้การเจริญเติบโตลดลง และใบมีขนาดเล็ก ในต้นยางพาราที่ยังไม่แตกกิ่ง มักพบที่ใบแก่หรือใบของฉัตรล่าง ส่วนยางพาราที่เปิดกรีดแล้วมักพบอาการขาดในใบที่สัมผัสแสงแดด (สถาบันวิจัยยาง, 2556)

การเติมแมกนีเซียม นอกจากส่งเสริมให้พืชเจริญเติบโตดีขึ้นแล้ว ยังสามารถลดความเป็นพิษของแมงกานีสได้อีกด้วย มีหลายงานวิจัยเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อพืชชนิดต่าง ๆ แต่โดยทั่วไปเป็นพืชล้มลุกอายุสั้น มีส่วนน้อยมากที่ศึกษากับไม้ยืนต้น โดยมีรายงานพบว่า การเติมแมกนีเซียมทำให้เกิดการยับยั้งการดูดแมงกานีสของพืชได้ เนื่องจากแมกนีเซียมไอออนเหนี่ยวนำให้เกิดการแลกเปลี่ยนของตัวนำประจุ (Maas *et al*., 1969) และความเข้มข้นแมงกานีสในใบมีความสัมพันธ์เชิงลบกับแมกนีเซียมในดิน (Davis, 1996) สำหรับสัดส่วนระหว่างแมกนีเซียมต่อแมงกานีส (Mg : Mn) ในพืชมีความสัมพันธ์กับความเป็นพิษของแมงกานีส และได้พิสูจน์แล้วว่า มีความสัมพันธ์กับความสูงและน้ำหนักของพืชด้วย นอกจากนี้ สัดส่วน Mg : Mn มีความสัมพันธ์เชิงลบกับระยะออกดอกของถั่วลิสง (Davis, 1996) ดังนั้น การเพิ่มความเข้มข้นแมกนีเซียมในพืชทำให้พืชมีความต้านทานต่อความเป็นพิษแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยแมกนีเซียมไปเพิ่มสัดส่วน Mg : Mn ในพืช โดยสัดส่วน Mg : Mn ที่แสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีสในเนื้อเยื่อมะเขือเทศ คือ ตั้งแต่ 1.13 ถึงค่าระหว่าง 3.53 และ 6.54 และในใบแก่ตั้งแต่ 0.82 ถึงค่าระหว่าง 2.27 และ 3.51 (Le Bot *et al*., 1990) สำหรับกลไกการบรรเทาความเป็นพิษของแมงกานีสโดยแมกนีเซียมที่ได้มีรายงานมี 2 ประการ คือ 1) แมกนีเซียมลดการดูดแมงกานีสของรากพืช และ 2) แมกนีเซียมทำให้สัดส่วน Mg : Mn ในเนื้อเยื่อพืชสูงขึ้น

การเคลื่อนย้ายธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์รากพืชส่วนใหญ่ใช้วิธี Active transport ซึ่งเป็นการเคลื่อนย้ายไอออนเข้าสู่เซลล์ผ่านโปรตีนพาหะ (carrier protein) โดยต้องอาศัยพลังงาน ATP เมื่อไอออนประจุแบบเดียวกัน (บวกด้วยกันหรือลบด้วยกัน) หลายชนิดอยู่ในสารละลายเดียวกัน ไอออนชนิดหนึ่งในที่นั้นอาจมีผลต่อการดูดไอออนอีกชนิดหนึ่งของพืชเป็นแบบใดแบบหนึ่งใน 3 แบบนี้ คือ ไอออนชนิดหนึ่งอาจทำให้พืชดูดไอออนชนิดที่สองช้าลง เร็วขึ้น หรือไม่มีผลกระทบต่อ

การดูดไอออนชนิดที่สองเลย แต่แมกนีเซียมและแมงกานีสมีผลเป็นแบบแรก คือ เมื่อใส่แมกนีเซียมมีผลลดการดูดแมงกานีส สำหรับกลไกการขนส่งของธาตุทั้งสองนี้โดยรากยังไม่มีความชัดเจน เชื่อกันว่าธาตุที่เป็นแคตไอออนจะใช้ช่องผ่านที่จำเพาะต่อไอออนหรืออาจใช้พาหะในการขนส่งก็ได้ การขนส่งโดยใช้พาหะที่จำเพาะนี้จะแข่งขันในการเข้าจับกับพาหะ (binding site) ของไอออนที่มีขนาดใกล้เคียงกัน

แมงกานัสไอออนเป็นรูปของแมงกานีสที่พืชดูดจากดิน โดยมีรัศมีไอออนเท่ากับ 0.075 นาโนเมตร มีขนาดอยู่ระหว่างแมกนีเซียมไอออน (0.065 นาโนเมตร) กับแคลเซียมไอออน (0.099 นาโนเมตร) (ยงยุทธ, 2552) สำหรับแมกนีเซียมพืชดูดในรูปแมกนีเซียมไอออน ($Mg^{2+}$) โดยปกติพืชดูดได้น้อยกว่าแคลเซียมไอออน ($Ca^{2+}$) หรือ โพแทสเซียมไอออน ($K^{+}$) (Clark, 1984) การที่พืชดูดแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นมีผลต่อสัดส่วนแมกนีเซียมต่อแมงกานีส (Mg : Mn ratio) สัดส่วนของธาตุอาหารในพืชเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณาถึงสมบัติต่าง ๆ เช่น อาการขาดธาตุอาหาร เป็นต้น มาก กว่าพิจารณาความเข้มข้นที่แท้จริงของธาตุอาหารแต่ละธาตุเพียงอย่างเดียว (Ranade-malvi, 2011) การใช้แมกนีเซียมเพื่อให้ลดความเป็นพิษแมงกานีส โดยปราศจากการเพิ่ม pH ของดิน ต้องใช้แมกนีเซียมในปริมาณมาก แต่การที่ดินมีแมกนีเซียมในปริมาณมากมีผลเสียต่อผลผลิตและคุณภาพของถั่วลิสง เนื่องจากแมกนีเซียมทำให้การดูดใช้แคลเซียมของพืชลดลง (Davis, 1996)

นอกจากนี้ แมกนีเซียมยังสามารถลดความเป็นพิษของอะลูมินัมได้อีกด้วย โดยพบว่าการเติมแมกนีเซียมในสารละลายที่มีอะลูมินัมสูงทำให้ถั่วเหลืองมีความยาวรากเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติมแมกนีเซียม และในสารละลายที่ไม่มีอะลูมินัมการเติมแมกนีเซียมอัตรา 2 ไมโครโมลาร์ มีความยาวรากสูงกว่าที่อัตรา 10 ไมโครโมลาร์ แต่ในสารละลายที่มีอะลูมินัม 15 ไมโครโมลาร์ การเติมแมกนีเซียมอัตรา 10 ไมโครโมลาร์ ให้ความยาวสูงที่สุด (Silva *et al*., 2005) ชี้ให้เห็นว่า อัตราแมกนีเซียมที่เติมในดินที่มีอะลูมินัมสูงจนเป็นพิษควรสูงกว่าในดินที่ปกติ ซึ่งอาจรวมถึงดินที่มีความเป็นพิษของแมงกานีสด้วย

## 3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

**3.1** ศึกษาผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสของยางพารา

**3.2** ศึกษาผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

**3.3** ศึกษาผลของอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสของยางพารา

**3.4** ศึกษาผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

## 4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

4.1 สามารถทราบผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสในยางพารา

4.2 สามารถทราบผลของอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีสในยางพารา

4.3 เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการดินปลูกยางพาราที่มีระดับแมงกานีสสูง

# 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 กรดอะซีติก (glacail acetic acid: 99.5 % $CH_3COOH$)

1.6 กรดแอสคอร์บิก (ascorbic acid: $C_6H_8O_6$)

1.7 กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric: HCl)

1.8 กัวไอเอคอล (guaiacol)

1.9 คอปเปอร์ซัลเฟต (copper sulfate: $CuSO_4 \cdot 5H_2O$)

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

1.11 ซิงค์ซัลเฟต (zinc sulfate: $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)

1.12 โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (sodium dihydrogen phosphate: $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$)

1.13 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide: NaOH)

1.14 ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (disodium hydrogen phosphate: $Na_2HPO_4$)

1.15 ไดเมทิลฟอร์มเอไมด์ (dimethylformamide: $C_3H_7NO$)

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

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

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

1.19 ไนโตรบลูเทตระโซเลียม (nitro blue tetrazolium: NBT)

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

1.21 โพแทสเซียมซัลเฟต (potassium sulfate: $K_2SO_4$)

1.22 โพแทสเซียมไดโครเมต (potassium dicromate: $K_2Cr_2O_7$)

1.23 โพลีไวนิลไพโรลไอโดน (polyvinyl pyrolidone: PVP)

1.24 ฟีนอล์ฟธาลีนอินดิเคเตอร์ (phenolphthalein indicator)

1.25 เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตเฮกซาไฮเดรต (ferrous ammonium sulfate hexahydrate: $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)

1.26 เฟอรัสซัลเฟต (ferrous sulfate: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

1.27 เฟอโรอินอินดิเคเตอร์ (ferroin indicator)

1.28 เมไธโอนีน (methionine)

1.29 แมกนีเซียมซัลเฟต (magnesium sulfate: $MgSO_4 \cdot 7H_2O$)

1.30 แมงกานีสซัลเฟต (manganese sulfate monohydrate: $MnSO_4 \cdot H_2O$)

1.31 ยูเรีย (urea: 46-0-0)

1.32 ไรโบฟลาวิน (riboflavin)

1.33 สทรอนเทียมคลอไรด์ (strontium chloride: $SrCl_2 \cdot 6H_2O$)

1.34 สารผสมเร่งปฏิกิริยา (catalyst mixture)

1.35 สารละลายโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl)

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

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

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

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

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

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

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

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

1.44 สารละลายเอธานอล (ethanol)

1.45 อะลูมินัมซัลเฟต ($AlSO_4 \cdot 18H_2O$)

1.46 อินดิเคเตอร์ผสม (mixed indicator)

1.47 เอธิลลีนไดเอมีนเททาอะซีติกแอซิต (ethylenediaminetetraacetic-acid: EDTA)

1.48 แอนทิโมนีโพแทสเซียมทาร์เทรต (antinomy potassium tartrate: $KSbO \cdot C_4H_4O_6$)

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

1.50 แอมโมเนียมฟลูออไรด์ ( ammonium fluoride: $NH_4F$)

1.51 แอมโมเนียมเมทาวาเนเดต (ammonium metavanadate: $NH_4VO_3$)

1.52 แอมโมเนียมโมลิบเดต (ammonium molybdate: $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)

1.53 แอมโมเนียมอะซีเทต (ammonium acetate: $NH_4OAc$)

1.54 แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ammonium hydroxide: $NH_4OH$)

1.55 ไฮโดรควิโนน (hydroquinone)

1.56 ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide: $H_2O_2$)

## 2. อุปกรณ์

2.1 กระดาษกรองวัตแมนเบอร์ 1 และ 5

2.2 กระถางทดลองขนาด 30 ลิตร

2.3 กล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600

2.4 โกรงบดดินและตะแกรงร่อนดิน

2.5 เครื่องกลั่นไนโตรเจน (nitrogen distillation apparatus)

2.6 เครื่องแก้ว อุปกรณ์ตวงวัดชนิดต่าง ๆ และวัสดุสิ้นเปลือง

2.7 เครื่องเขย่า (shaker)

2.8 เครื่องเขย่าผสมสารละลาย (vortex mixer)

2.9 เครื่องชั่งความละเอียด 0.01 กรัม และ 0.0001 กรัม

2.10 เครื่องบดตัวอย่างพืช (grinder)

2.11 เครื่องมือสำหรับเก็บตัวอย่างดินและกล้ายางพารา

2.12 เครื่องวัด pH (pH meter)

2.13 เครื่องวิสิเบิลสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (visible spectrophotometer)

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

2.15 เครื่องอะตอมมิกแอบซอบชันสเปกโทรโฟโทมิเตอร์ (atomic absorption spectrophotometer: AAS)

2.16 เครื่องอิเล็กทริคอลคอนดักทิวิทีมิเตอร์ (electrical conductivity meter)

2.17 ตู้อบตัวอย่างพืช (hot air oven)

2.18 เตาย่อยตัวอย่าง (digestion block)

2.19 เตาให้ความร้อน (hot plate)

2.20 ถุงดำพลาสติก

2.21 โถดูดความชื้น (desiccator)

2.22 เทปวัดระยะ

*2.23* เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (vernier caliper)

2.24 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (water bath)

## 3. วิธีการทดลอง

การศึกษานี้ ประกอบด้วย 2 การทดลองย่อย คือ ผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีส และผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและการดูดธาตุอาหารของยางพารา

### 3.1 การทดลองผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสของยางพารา

ทำการทดลองปลูกต้นยางพาราชำถุงพันธุ์ RRIM 600 ระยะหนึ่งฉัตร ในเรือนกระจก คณะทรัพยากรธรรมชาติ ทดลองแบบ 2x3 แฟคทอเรียล โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomized Design, CRD) ปัจจัยในการทดลองประกอบด้วยดินที่เติมแมงกานีส ($MnSO_4 \cdot H_2O$) 2 ระดับ คือ 0 และ 50 มิลลิกรัม Mn ต่อกิโลกรัม และแมกนีเซียม 3 ระดับ คือ 0, 2 และ 10 เซนติโมลประจุต่อกิโลกรัม โดยใส่ในรูปปุ๋ยคีเซอไรต์ ($MgSO_4 \cdot H_2O$) อัตรา 0, 38 และ 193.05 กรัม ตามลำดับ รวมเป็น 6 ตำรับการทดลอง แต่ละตำรับทำจำนวน 3 ซ้ำ โดยนำดินที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ใส่ลงกระถางขนาด 30 ลิตร ให้มีน้ำหนักดินเท่ากับ 27 กิโลกรัม จากนั้นเติมธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม ในรูปปุ๋ยยูเรีย 18.34 กรัม (312.46 mg N $kg^{-1}$) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (DAP) 8.7 กรัม (64.72 mg $P_2O_5$ $kg^{-1}$) และโพแทส-เซียมคลอไรด์ (KCl) 16.67 กรัม (308.70 mg $K_2O$ $kg^{-1}$) คิดเป็นสูตร 20-8-20 อัตรา 1.85 กรัมต่อกิโลกรัมดิน ทุกตำรับการทดลอง และเติมแมกนีเซียม ($MgSO_4 \cdot H_2O$) และสารละลายแมงกานีสอัตราต่าง ๆ ตามแผนการทดลอง จากนั้นผสมคลุกเคล้ากับดินให้เข้ากัน แล้วนำต้นยางพาราลงปลูก และให้น้ำที่ระดับความชื้นสนาม ตลอดการทดลอง 8 เดือน

ระหว่างทดลองได้เก็บข้อมูลความสูงของต้นยางพาราที่วัดจากกิ่งตาถึงยอด และเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ความสูง 10 เซนติเมตร จากกิ่งตาโดยใช้เวอร์เนียคาลิปเปอร์ (vernier caliper) เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้เก็บตัวอย่างดินมาวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH) ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (Bray II) โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ (แอมโมเนียมอะซีเทต) และแมงกานีส เหล็ก ทองแดง และสังกะสีที่สกัดได้ (DTPA) ส่วนต้นยางพาราทำการแยกส่วนของใบ ก้านใบ ลำต้น รากแก้ว และรากแขนง นำมาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน และชั่งน้ำหนักแห้ง นำตัวอย่างมาบดผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เพื่อวิเคราะห์ธาตุอาหาร ประกอบด้วย

ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม แมงกานีส เหล็ก สังกะสี และทองแดง (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) นำข้อมูลการเจริญเติบโตและความเข้มข้นธาตุอาหารในดินและในต้นยางพารา มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อประเมินความแตกต่างทางสถิติ และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตำรับการทดลอง โดยวิธี DMRT

**3.1.1 การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน**

การศึกษานี้ได้เก็บตัวอย่างดินจากสวนยางพาราในอำเภอคลองหอยโข่ง จังหวัดสงขลา ที่ระดับความลึก 0 - 30 เซนติเมตร จากผิวดิน ซึ่งเป็นชุดดินคอหงส์ (Coarse-loamy, kaolinitic, iso-hyperthermic Typic Kandiudults) แยกเก็บเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเพื่อไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและธาตุอาหาร โดยนำตัวอย่างดินมาผึ่ง บด และร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาด 2 มิลลิเมตร (10 mesh) และเก็บไว้วิเคราะห์สมบัติทางเคมีและธาตุอาหาร (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) ส่วนที่สองเป็นดินเพื่อใช้ทดลองปลูกยางพารา นำดินมาผึ่งให้แห้งในที่ร่ม โดยเกลี่ยดินบนเสื่อพลาสติกเป็นชั้นบาง ๆ เมื่อดินแห้งนำมาร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องเปิดขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร ก่อนนำต้นยาง-พาราลงปลูก จะทำการผสมดินกับปุ๋ย N-P-K แมกนีเซียม และแมงกานีส แล้วสุ่มเก็บตัวอย่างดินนำไปวิเคราะห์อีกครั้ง (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) ซึ่งเป็นดินก่อนการทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองได้สุ่มเก็บตัวอย่างดินในกระถางไปวิเคราะห์อีกเช่นกัน (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) ตามวิธีดังต่อไปนี้

**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 แล้ววิเคราะห์หาไดโครเมตที่เหลือด้วยการไทเทรตกับสารละลาย FAS โดยใช้เฟอร์โรอิน (ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วคำนวณปริมาณอินทรียวัตถุ โดยใช้หลักการในอินทรียวัตถุประกอบด้วยคาร์บอนร้อยละ 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 และแมกนีเซียมที่สกัดได้ (extractable K, Ca and Mg)** สกัดดินด้วยสารละลาย 1.0 โมลาร์ $NH_4OAc$ pH 7.0 แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของแคลเซียมโพแทสเซียม 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

**3.1.2 การเก็บตัวอย่างพืช**

ทำการเก็บตัวอย่างกล้ายางพาราหลังสิ้นสุดการทดลอง โดยแยกส่วนประกอบเป็นใบ ก้านใบ ลำต้น รากแก้ว และรากแขนง นำแต่ส่วนทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน โดยลำต้นและรากแก้วจะหั่นให้เป็นชิ้นขนาดเล็กก่อนไปอบ ตัวอย่างยางพาราที่อบแห้งแล้วนำมาชั่ง โดยใช้เครื่องชั่งความละเอียด 2 ตำแหน่ง บันทึกข้อมูลน้ำหนักแห้งของแต่ส่วน แล้วจึงไปบดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืช ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เพื่อใช้วิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในแต่ละส่วน ดังนี้

**3.1.2.1 ไนโตรเจนทั้งหมดในพืช (total N)** วิเคราะห์ไนโตรเจนในพืชด้วยวิธี Kjeldahl โดยชั่งตัวอย่างพืช 0.1000 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 มิลลิลิตร และสารเร่งปฏิกิริยาที่มีทองแดง โพแทสเซียมซัลเฟต และซีลีเนียมเป็นองค์ประกอบ จากนั้นนำไปเติมด่าง และกลั่นหาแอมโมเนียมโดยมีสารละลายกรดบอริกเป็นตัวจับแก๊สแอมโมเนีย หรือแอมโมเนียมไอออน แล้วไทเทรตหาแอมโมเนียมในกรดบอริกด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอน (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

**3.1.2.2 ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมทั้งหมดในพืช (total P, K, Ca, Mg)** ย่อยตัวอย่างพืชด้วยกรดผสมไนทริกและเพอร์คลอริก ($HNO_3$ : $HClO_4$ ; 3:1) แล้ววิเคราะห์ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสด้วยวิธี Vanadomolybdate วัดด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer วิเคราะห์โพแทสเซียมด้วยวิธี Atomic Emission Spectrophotometry วิเคราะห์แคลเซียม และแมกนีเซียม ด้วยวิธี Atomic Absorption Spectrophotometry (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

**3.1.2.3 แมงกานีส เหล็ก สังกะสี และทองแดงทั้งหมด** โดยการย่อยด้วยกรดผสมระหว่างกรดไนทริกและเพอร์คลอริก ($HNO_3$-$HClO_4$) อัตรา 3 ต่อ 1 โดยชั่งตัวอย่างพืช 0.15 - 0.20 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) เติมกรดผสม 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที และนำไปย่อยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใส ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นแมงกานีส เหล็ก สังกะสี และทองแดง โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 279.8, 254.8, 213.9 และ 324.7 นาโนเมตร ตามลำดับ ด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophoto meter (AAS) (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

### 3.1.3 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต

เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของยางพารา ได้แก่ ความสูง (วัดจากรอยแตกตาถึงปลายยอด) และเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (วัดเหนือรอยเท้าช้าง 10 เซนติเมตร) วัดด้วยเวอร์เนียคาลิปเปอร์ โดยเก็บข้อมูลตั้งแต่ตอนเริ่มทดลอง หลังปลูก 3, 5 และ 8 เดือน (สิ้นสุดการทดลอง)

## 3.2 การทดลองผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและการดูดธาตุอาหารของยางพารา

ทำการปลูกยางพาราชำถุงพันธุ์ RRIM 600 ระยะ 1 ฉัตร ในถุงดำพลาสติก ภายในเรือนกระจกคณะทรัพยากรธรรมชาติ ใช้ชุดดินคอหงส์ (Coarse-loamy, kaolinitic, isohyperthermic Typic Kandiudults) แล้วเติมไนโตรเจน (urea) 0.1 กรัม N ต่อกิโลกรัม ฟอสฟอรัส (diammonium phosphate) 0.04 กรัม $P_2O_5$ ต่อกิโลกรัม และโพแทสเซียม (potassium chloride ) 0.1 กรัม $K_2O$ ต่อกิโลกรัม ในทุกตำรับการทดลอง ทดลองแบบ 2x2 แฟกทอเรียลใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ประกอบด้วย 2 ปัจจัยการทดลอง ได้แก่ อัตราของแมงกานีส ($MnSO_4 \cdot H_2O$) 2 ระดับ คือ 0 และ 50 มิลลิกรัม Mn ต่อกิโลกรัม และอัตราอะลูมินัม ($AlSO_4 \cdot 18H_2O$) 2 ระดับ คือ 0 และ 200 มิลลิกรัม Al ต่อกิโลกรัม ทำ 3 ซ้ำ เป็นระยะเวลา 5 เดือน

### 3.2.1 การเก็บตัวอย่างดินและการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดิน

การศึกษานี้ได้เก็บและวิเคราะห์ตัวอย่างดินเหมือนกับข้อ 3.1.1 โดยได้วิเคราะห์อะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มเติม

**3.2.1.1 อะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Al)** สกัดดินด้วย 1 โมลาร์โพแทสเซียมคลอไรด์ แล้วนำสารสกัดไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะได้ค่าความเป็นกรดที่แลกเปลี่ยนได้ จากนั้นเติมโซเดียมฟลูออไรด์ นำไปไทเทรตกับสารละลายมาตร-

ฐานกรดไฮโดรคลอริก เพื่อหาความเข้มข้นของอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555)

**3.2.2 การเก็บตัวอย่างพืช**

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (5 เดือน) เก็บใบยางพาราตำแหน่งใบย่อยกลาง จากก้านใบประกอบที่ 3 (นับจากล่าง) ของฉัตรที่ 1 มาวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์คาทาเลส เพอร์ออกซิเดส และซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (El-Shraiy *et al*., 2011) และเก็บใบยางพาราตำแหน่งใบย่อยกลางจากก้านใบประกอบที่ 4 (นับจากล่าง) ของฉัตรที่ 1 มาวิเคราะห์ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (กฤษดา และพิเชษฐ, 2552)

เก็บตัวอย่างยางพาราโดยแยกส่วนประกอบเป็นใบ ลำต้น และรากแขนง นำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 3 วัน นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักแห้ง และนำมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืชผ่านตะแกรงขนาด 20 เมช เก็บไว้ในถุงกระดาษขนาดเล็กและอบอีกครั้งที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อย่างน้อย 5 ชั่วโมง นำตัวอย่างพืชที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และแมงกานีส ตามข้อ 3.1.2 (จำเป็น และจักรกฤษณ์, 2555) และได้เพิ่มการวิเคราะห์อะลูมินัมทั้งหมด

**3.2.2.1 อะลูมินัมทั้งหมด** โดยการย่อยด้วยกรดผสมระหว่างกรดไนทริกและเพอร์คลอริก ($HNO_3$-$HClO_4$) อัตรา 3 ต่อ 1 โดยชั่งตัวอย่างพืช 0.15 - 0.20 กรัม (ทราบน้ำหนักที่แน่นอน) เติมกรดผสม 2 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 30 นาที และนำไปย่อยที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จนได้สารละลายใส ปรับปริมาตรเป็น 10 มิลลิลิตร และนำไปวิเคราะห์หาความเข้มข้นอะลูมินัมโดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 309.3 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง AAS

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

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

**3.2.2.2.2 เอนไซม์คาทาเลส** ใช้สารละลายผสม 2.9 มิลลิลิตร (ประกอบด้วย 20 มิลลิโมลาร์ hydrogen peroxide และ 50 มิลลิโมลาร์ sodium phosphate buffer pH 7) เติมสารสกัด

ตัวอย่าง 0.1 มิลลิลิตร นำไปวัดทันทีด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 240 นาโนเมตร (El-Shraiy *et al.*, 2011)

**3.2.2.2.3 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 และนำไปวางภายใต้แสงฟลูออเรสเซนซ์ ให้ห่างประมาณ 30 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที นำไปวัดด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร (El-Shraiy *et al*., 2011)

**3.2.2.3 คลอโรฟิลล์** สกัดตัวอย่างใบด้วย Dimethylformamide (DMF; $C_3H_7NO$) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ตัวอย่างใบละ 1 หลอด จากนั้นปิดฝาให้สนิท วางในที่มืดทันทีเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และนำสารสกัดไปวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 664 และ 647 นาโนเมตร ค่าที่ได้นำมาคำนวณหาปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด (total chlorophyll) ในใบ (หน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตร) จากสูตร (กฤษดา และพิเชษฐ์, 2552)

$$\text{ปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด} = \frac{(7.04A_{664}+20.27A_{647})}{Ar\times 10}V$$

เมื่อ $A_{664}$ และ $A_{647}$ คือค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 664 และ 647 นาโนเมตร

V คือ ปริมาตรของ DMF ที่ใช้สกัด (มิลลิลิตร)

Ar คือ พื้นที่ใบ (ตารางเซนติเมตร)

**3.2.3 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโต**

เก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของยางพาราที่ระยะเริ่มทำการทดลอง และที่ระยะสิ้นสุดการทดลอง ได้แก่ วัดความสูง (รอยแตกตาถึงปลายยอด) และเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น (เหนือรอยเท้าช้าง 10 เซนติเมตร)

## 4. การวิเคราะห์สถิติ

ทั้งสองการศึกษาได้ทดลองแบบแฟคทอเรียล โดยนำข้อมูลการเจริญเติบโต ได้แก่ ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และน้ำหนักแห้ง กิจกรรมเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ ปริมาณคลอโรฟิลล์ และความเข้มข้นธาตุอาหารทั้งในดินและในต้นยางพารา มาวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตำรับการทดลองโดยวิธี DMRT

# บทที่ 3

## ผลการทดลอง

การศึกษานี้ ประกอบด้วย 2 การศึกษาย่อย คือ ผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสของยางพารา และผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและการดูดธาตุอาหารของยาง-พารา โดยมีผลการทดลอง ดังนี้

## 1. ผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสของกล้ายางพารา

### 1.1 ค่าวิเคราะห์ดินก่อนและหลังการทดลอง

ดินก่อนการทดลองเป็นกรดเล็กน้อย โดยมีค่า pH 6.17 ค่าการนำไฟฟ้าและทองแดงที่สกัดได้ต่ำมาก อินทรียวัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ โพแทสเซียม แมกนีเซียม และสังกะสีที่สกัดได้ต่ำ แคลเซียมที่สกัดได้ปานกลาง เหล็กและแมงกานีสที่สกัดได้สูง (ตารางที่ 3.1)

**ตารางที่ 3.1** ค่าวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของดินก่อนการทดลอง

| Parameter | Value | ค่าที่เหมาะสม * |
|---|---|---|
| pH (1:5) | 6.17 | 4.5-5.5 |
| EC (1:5)(dS $m^{-1}$) | 0.014 | <2 |
| OM (%) | 0.54 | 1.0-2.5 |
| Avai. P (mg $kg^{-1}$) | 3.31 | 11.0-30.0 |
| Extr. K ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | 0.16 | >1.0 |
| Extr. Ca ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | 0.61 | >0.30 |
| Extr. Mg ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | 0.12 | >0.30 |
| Extr. Mn (mg $kg^{-1}$) | 4.58 | 2.0-4.0 |
| Extr. Fe (mg $kg^{-1}$) | 72.63 | 30.0-35.0 |
| Extr. Cu (mg $kg^{-1}$) | 0.10 | 0.8-1.0 |
| Extr. Zn (mg $kg^{-1}$) | 0.03 | 0.4-0.6 |
| Exch. Al ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | 0.80 | - |

* นุชนารถ (2550)

เมื่อเก็บตัวอย่างดินที่ได้ผสมกับปุ๋ยไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมในอัตราที่เท่ากันทุกตำรับการทดลอง และใส่แมงกานีสและแมกนีเซียมอัตราตามแผนการทดลอง พบว่า ดินที่เติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ค่า pH ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และแมงกานีสที่สกัดได้สูงกว่าตำรับไม่ได้เติมแมงกานีส (Mn 0 mg $kg^{-1}$) โดยแมงกานีสที่สกัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 38-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนเหล็กที่สกัดได้ค่ามีแนวโน้มต่ำกว่า สำหรับค่าการนำไฟฟ้า และแมกนีเซียมที่สกัดได้เพิ่มขึ้นตามอัตราแมกนีเซียมที่ใส่มากขึ้น และทองแดงที่สกัดได้เพิ่มขึ้น เมื่อเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่วนแคลเซียมที่สกัดได้มีค่าสูงสุดในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.2)

ค่าวิเคราะห์ดินหลังสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ค่า pH อยู่ในช่วงระหว่าง 5.3 - 6.6 การเติมแมกนีเซียมและแมงกานีสทำให้ pH ของดินลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตำรับควบคุม (pH 6.65) และการเพิ่มแมกนีเซียมทำให้ค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นแมกนีเซียมที่สกัดได้เพิ่มขึ้น โดยค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 1.23 - 2.29 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร เพิ่มขึ้นจาก 1.23 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร ในตำรับควบคุม (Mg0Mn0) เป็น 2.29 เดซิซีเมนส์ต่อเมตร เมื่อเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ภายใต้ตำรับไม่เติมแมงกานีส นอกจากนี้ การเติมแมกนีเซียมที่สูงขึ้นทำให้สังกะสีที่สกัดได้ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 3.3) สำหรับการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้แมงกานีสที่สกัดได้เพิ่มขึ้นจาก 14.99 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตำรับควบคุม เป็น 37.09 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับที่ไม่เติมแมกนีเซียม และภายใต้ตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม พบคราบเกลือสีขาวที่ผิวดิน (ภาพ 3.1)

**ภาพที่ 3.1** ลักษณะคราบเกลือบนผิวดินในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม

**ตารางที่ 3.2** สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารในดินเมื่อเริ่มทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | | Nutrient | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | pH | EC | OM | Avai. P | Extr. K | Extr. Ca | Extr. Mg | Extr. Mn | Extr. Fe | Extr. Zn | Extr. Cu |
| | | (1:5) | (1:5)(dS $m^{-1}$) | (%) | (mg $kg^{-1}$) | ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | | | (mg $kg^{-1}$) | | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.44 b | 0.18 d | 0.83 | 12.54 b | 3.46 ab | 0.55 bc | 0.05 c | 5.92 b | 21.44 b | 0.12 bc | 0.07 b |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.75 b | 0.42 bc | 0.90 | 40.52 ab | 1.07 c | 0.79 ab | 0.56 b | 6.69 b | 24.39 b | 0.10 c | 0.06 b |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.68 b | 1.39 a | 0.84 | 14.28 b | 1.91 abc | 0.59 abc | 1.32 a | 7.88 b | 37.98 a | 0.19 a | 0.12 a |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 6.57 a | 0.29 cd | 0.83 | 69.59 a | 2.09 abc | 0.57 abc | 0.26 c | 40.41 a | 16.79 b | 0.16 ab | 0.06 b |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 6.50 a | 0.52 b | 0.91 | 47.00 a | 3.84 a | 0.81 a | 0.58 b | 38.37 a | 12.67 b | 0.13 bc | 0.07 b |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 6.49 a | 1.36 a | 0.93 | 40.15 ab | 1.58 bc | 0.46 c | 1.16 a | 39.10 a | 12.41 b | 0.16 ab | 0.09 ab |
| *ANOVA* | Mn | ** | NS | NS | ** | NS | NS | NS | ** | ** | NS | NS |
| | Mg | NS | ** | NS | NS | NS | ** | ** | NS | * | ** | ** |
| | Mn x Mg | NS | NS | NS | ** | ** | NS | * | NS | ** | * | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

**ตารางที่ 3.3** สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารในดินหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | | Nutrient | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | pH | EC | OM | Avai. P | Extr. K | Extr. Ca | Extr. Mg | Extr. Mn | Extr. Fe | Extr. Zn | Extr. Cu |
| | | (1:5) | (1:5)(dS $m^{-1}$) | (%) | (mg $kg^{-1}$) | ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | | | (mg $kg^{-1}$) | | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 6.65 a | 1.23 c | 0.75 ab | 74.50 a | 0.60 bc | 0.32 cd | 0.51 b | 14.99 b | 43.22 a | 0.82 b | 0.21 a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.89 b | 1.39 bc | 0.70 b | 47.77 bc | 0.59 bc | 0.31 d | 1.04 ab | 11.75 bc | 31.80 ab | 0.64 c | 0.12 c |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.65 c | 2.29 a | 0.70 b | 46.92 bc | 0.62 bc | 0.47 a | 2.56 ab | 4.61 c | 23.84 bc | 0.38 d | 0.11 c |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.67 c | 1.31 bc | 0.84 a | 70.98 ab | 0.90 a | 0.35 cd | 0.38 b | 40.43 a | 20.64 bc | 0.98 a | 0.16 b |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.36 d | 1.84 abc | 0.80 ab | 44.20 c | 0.76 ab | 0.36 c | 3.57 a | 37.09 a | 13.77 c | 0.72 bc | 0.11 c |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | | 5.43 d | 1.95 ab | 0.74 ab | 41.03 c | 0.40 c | 0.41 b | 3.32 ab | 34.47 a | 12.92 c | 0.26 d | 0.12 c |
| *ANOVA* | Mn | ** | NS | ** | NS | NS | NS | NS | ** | ** | NS | * |
| | Mg | ** | ** | * | ** | * | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| | Mn x Mg | ** | NS | NS | NS | * | ** | NS | NS | NS | * | ** |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05$, $P \leq 0.01$ และ NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P>0.05

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

### 1.2 ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโต

ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพาราในช่วงระยะเวลา 8 เดือน พบว่า การเติมแมกนีเซียมที่ระดับ 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้การเจริญเติบโตทั้งในส่วนเหนือดิน (ภาพที่ 3.2) และราก (ภาพที่ 3.3) ของต้นยางพาราต่ำกว่าที่เติมแมกนีเซียม 0 และ 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และการเติมแมกนีเซียมที่ระดับ 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ต้นยางพาราตายหลังทดลองได้ 7 เดือน ส่วนที่เติมแมกนีเซียม 0 และ 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน สำหรับการเติมแมงกานีสที่ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบว่า การเจริญเติบโตของต้นยางมีผลไม่แตกต่างกับตำรับที่ไม่ได้เติมแมงกานีส

**ภาพที่ 3.2** การเจริญเติบโตของต้นยางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$)

ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของยางพาราที่ระยะ 1 เดือน มีผลไม่ต่างกันทางสถิติ โดยความสูงของยางพารามีค่าในช่วง 25 - 28 เซนติเมตร ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นมีค่าในช่วง 3.9 - 4.3 มิลลิเมตร และที่ระยะ 3 เดือน พบว่า ตำรับที่เติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ร่วมกับแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ต้นยางพารามีความสูงมากที่สุด คือ 52.67 เซนติเมตร ตามด้วยตำรับควบคุม (ไม่เติมทั้งแมกนีเซียมและแมงกานีส) ส่วนตำรับอื่นมีค่าใกล้เคียงกัน เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นเริ่มเห็นความแตกต่างที่ชัดเจนมากขึ้น โดยตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซน

ติโมลต่อกิโลกรัม มีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นน้อยที่สุด สำหรับที่ระยะ 6 เดือน ความสูงของยางพารา ในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม มีอัตราการสูงต่ำกว่าตำรับอื่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความสูง 37 - 41 เซนติเมตร เพิ่มขึ้นจากระยะ 3 เดือน ที่มีความสูงไม่เกิน 2.5 เซนติเมตร เท่านั้น เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นมีค่าเท่ากับที่ระยะ 3 เดือน (ตารางที่ 3.4)

**ภาพที่ 3.3** การเจริญเติบโตของรากยางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

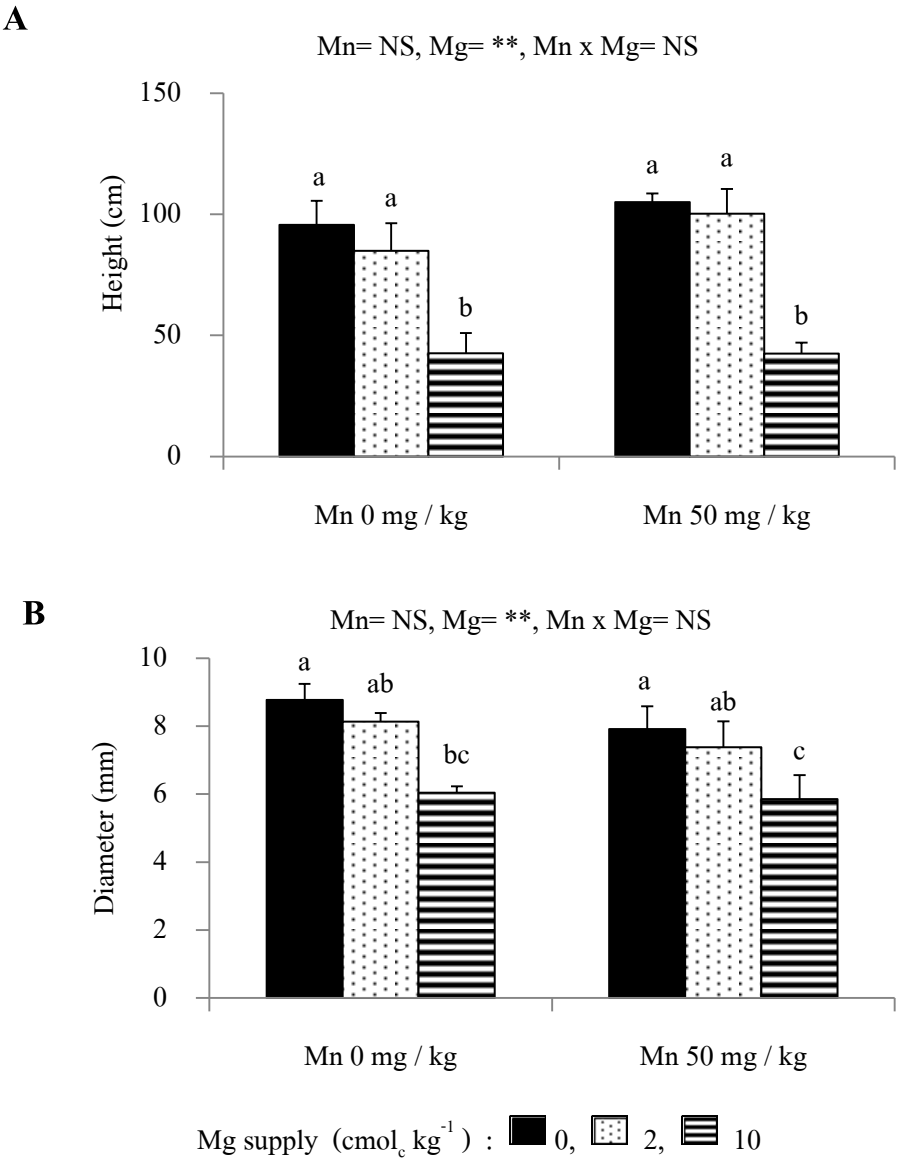
**ตารางที่ 3.4** ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นยางพาราที่ระยะเวลา 1, 3 และ 6 เดือน เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | Height (cm) | | | Diameter (mm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 month | 3 month | 6 month | 1 month | 3 month | 6 month |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 25.00 | 48.17a | 78.00b | 4.37 | 6.19a | 7.23a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 25.00 | 34.83b | 67.83c | 4.25 | 5.40ab | 6.70ab |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 26.00 | 36.57b | 37.67d | 4.33 | 4.84b | 5.78ab |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 28.17 | 36.33b | 87.50a | 3.96 | 5.54ab | 7.41a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 28.27 | 52.67a | 82.83ab | 4.17 | 5.34b | 6.62ab |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 25.83 | 39.67b | 41.83d | 4.06 | 4.73b | 5.18b |
| *ANOVA* | | | | | | |
| Mn | NS | NS | ** | NS | NS | NS |
| Mg | NS | * | ** | NS | ** | ** |
| Mn x Mg | NS | ** | NS | NS | NS | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า การเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นลดลงอย่างชัดเจน โดยในตำรับควบคุมกล้ายางมีความสูง 90 เซนติเมตร และเมื่อเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม กล้ายางมีความสูงเพียง 45 เซนติเมตร (ภาพที่ 3.4A) ส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นในตำรับควบคุมมีค่า 8 มิลลิเมตร และมีค่า 6 มิลลิเมตร ในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ภายใต้ตำรับที่เติมและไม่เติมแมงกานีส (ภาพที่ 3.4B)

การเพิ่มแมกนีเซียมทำให้น้ำหนักแห้งของยางพาราส่วนเหนือดิน (ภาพที่ 3.5) และรากแขนง (ภาพที่ 3.6B) ต่ำกว่าตำรับควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะเมื่อเติมแมกนีเซียมที่ 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม การเติมแมงกานีสที่ระดับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้น้ำหนักแห้งของต้นยาง-พาราไม่ต่างกับที่ไม่เติมแมงกานีส และการเติมแมงกานีสร่วมกับแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้น้ำหนักแห้งของก้านใบ และลำต้นมีแนวโน้มสูงขึ้น และลดลงเมื่อเติมแมกนีเซียมเพิ่มเป็น 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.5B และ 3.5C)

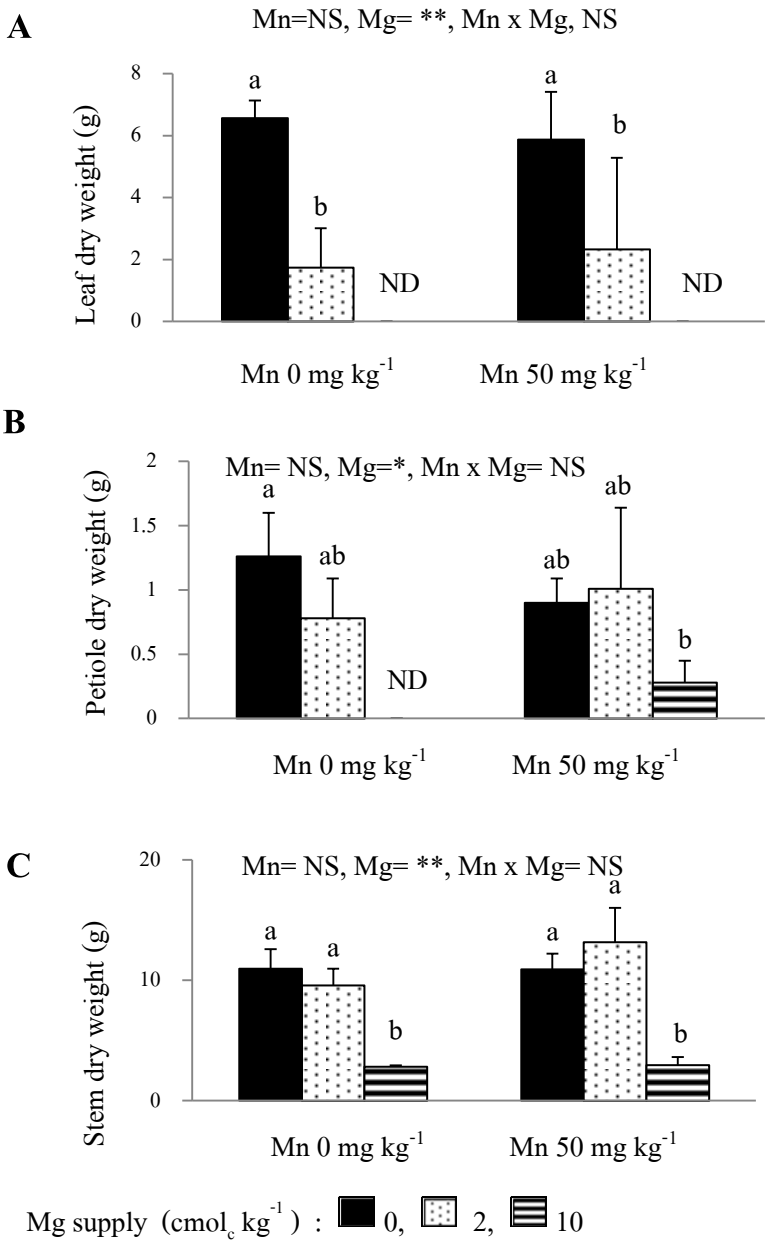



**ภาพที่ 3.4** ความสูง (A) และเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (B) ของยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีสและแมกนีเซียมระดับต่าง ๆ ที่ระยะ 8 เดือน

**หมายเหตุ :** ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ 0.01 ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ P > 0.05

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.01

| = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD)



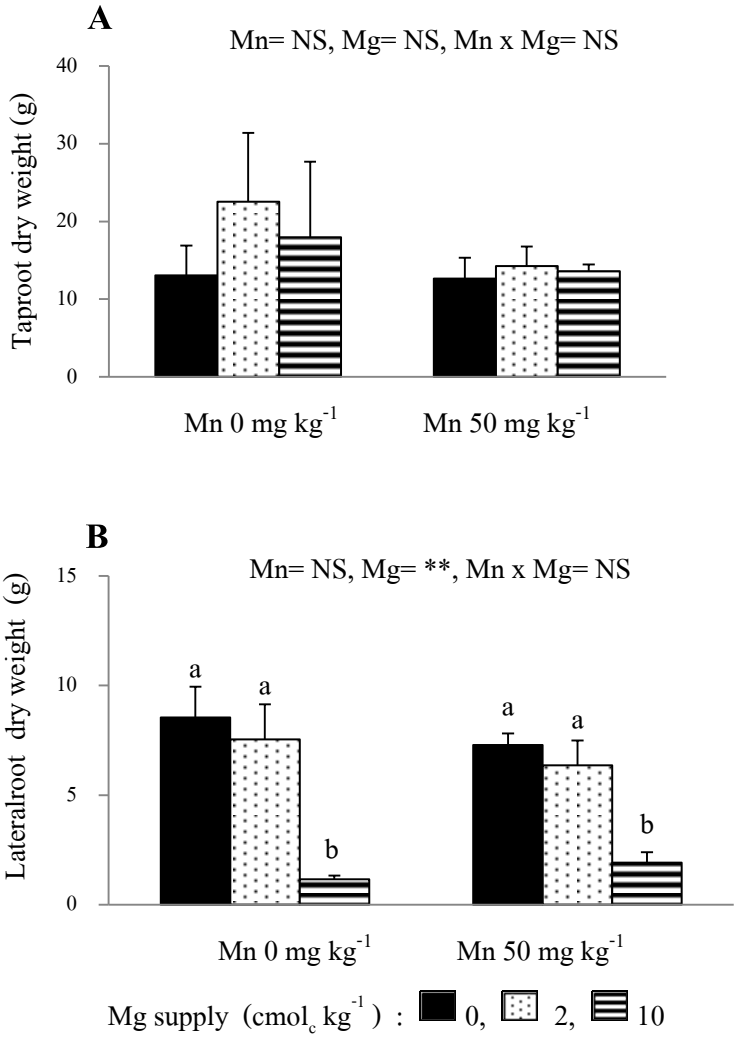

**ภาพที่ 3.5** ผลของแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$) ต่อน้ำหนักแห้งของใบ (A) ก้านใบ (B) ลำต้น (C) ยางพารา

**หมายเหตุ :** ND คือ ไม่มีข้อมูล

*, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

$\top$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD)




**ภาพที่ 3.6** ผลของแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$) ต่อน้ำหนักแห้งของรากแก้ว (A) และรากแขนง (B) ยางพารา

**หมายเหตุ :** ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.01
⎸ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD)

จำนวนใบและก้านใบของยางพาราในระยะ 3 เดือนแรก มีผลไม่ต่างกัน เมื่อเข้าเดือนที่ 6 พบว่า ตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ภายใต้การเติมแมงกานีส 0 และ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ใบและก้านใบมีจำนวนลดลง และยิ่งลดลงอีกเมื่อเข้าเดือนที่ 8 เช่นเดียวกับตำรับที่ไม่เติมแมกนีเซียมที่มีแนวโน้มลดลง แต่การเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ร่วมกับแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม จำนวนใบและก้านใบเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.5)

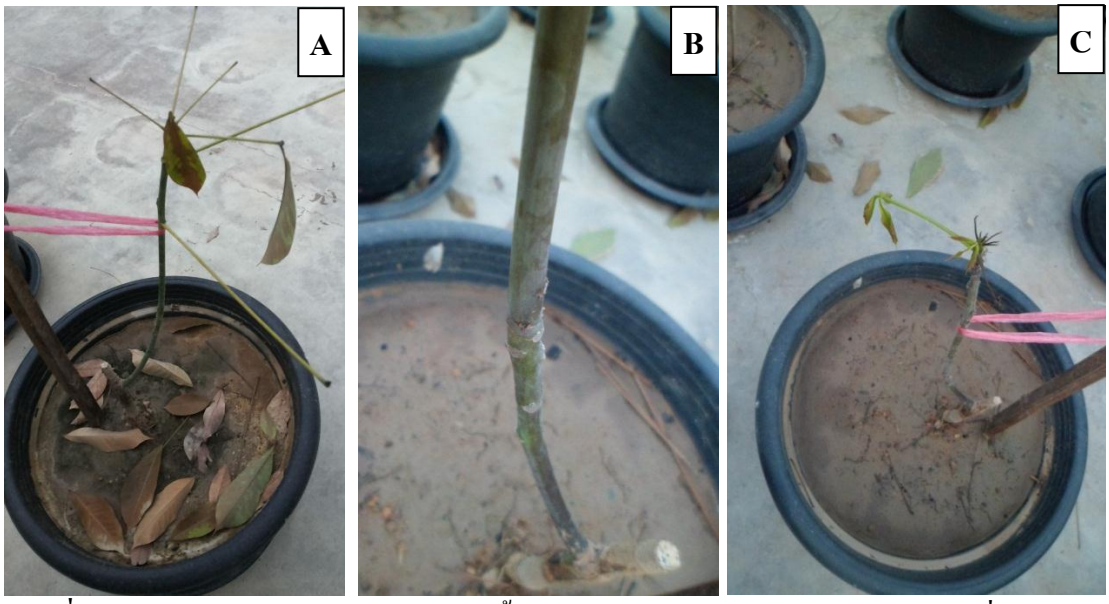
**ตารางที่ 3.5** จำนวนใบและก้านใบของกล้ายางพาราที่ระยะเวลา 1, 3, 6 และ 8 เดือน เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | No. of leaf per plant | | | | No. of petiole per plant | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 3 | 6 | 8 | 1 | 3 | 6 | 8 |
| | Month | | | | Month | | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 31.0 | 50.7 | 47.7ab | 44.0a | 10.3 | 17.7 | 16.7ab | 14.7a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 28.0 | 52.7 | 56.0a | 52.7a | 9.3 | 18.0 | 18.7a | 19.0a |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 28.0 | 51.7 | 20.3b | 0.0b | 9.3 | 17.3 | 8.0b | 0.0b |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 32.0 | 50.0 | 49.0ab | 44.7a | 10.7 | 16.7 | 17.0ab | 17.0a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 32.0 | 59.3 | 54.7a | 71.7a | 10.7 | 19.3 | 16.7ab | 24.3a |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 32.0 | 38 | 21.0b | 10.0b | 10.7 | 14.3 | 8.7ab | 3.3b |
| *ANOVA* | | | | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Mg | NS | NS | ** | ** | NS | NS | ** | ** |
| Mn x Mg | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |

**หมายเหตุ :** ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.01

การเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ยางพาราชะงักการเจริญเติบโตและตายในที่สุด โดยอาการเริ่มแรกต้นยางจะผลัดใบจนหมดต้น (ภาพที่ 3.7A) และจะแตกยอดขึ้นมาใหม่ แต่ยอดที่ผลิมาไม่พัฒนาถึงระยะใบอ่อน และมีอาการแห้งตาย (ภาพที่ 3.7B) นอกจากนี้ ยังพบลักษณะอาการลำต้นช้ำเป็นสีม่วง (ภาพที่ 3.7C)




**ภาพที่ 3.7** ลักษณะอาการใบร่วง (A) ลำต้นช้ำ (B) และยอดไม่พัฒนา (C) ของยางพาราที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม

### 1.3 ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อธาตุอาหารในยางพารา

การเติมแมกนีเซียมทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในใบยางพาราลดลง โดยลดลงจาก 4.95 กรัมต่อกิโลกรัม ในตำรับควบคุม เป็น 3.20 กรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ภายใต้ไม่เติมแมงกานีส (ตารางที่ 3.6) ส่วนความเข้มข้นของแมกนีเซียมในใบเพิ่มขึ้นตามอัตราแมกนีเซียมที่เติมสูงขึ้น โดยมีค่า 2.35 - 8.02 กรัมต่อกิโลกรัม สำหรับสังกะสีมีค่าสูงสุดในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และไม่เติมแมงกานีส ตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ไม่มีข้อมูล เนื่องจากใบร่วง

การเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของแคลเซียมในก้านใบสูงขึ้น และการเพิ่มแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโล กรัม นอกจากทำให้ความเข้มข้นแมกนีเซียมสูงขึ้นแล้ว ยังมีผลลดความเข้มข้นของโพแทสเซียม และแคลเซียมอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เมื่อเติมแมกนีเซียมและแมงกานีส ในขณะที่ฟอสฟอรัส เหล็ก สังกะสี และทองแดงมีผลไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3.7) ตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ไม่มีข้อมูลเช่นเดียวกับใบ

**ตารางที่ 3.6** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | Leaf nutrient | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Zn | Cu |
| | g $kg^{-1}$ | | | | | mg $kg^{-1}$ | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 42.75 | 2.17 | 36.01 | 4.95a | 2.35b | 112.40 | 8.66b | 1.84 |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 42.66 | 3.77 | 28.79 | 3.20b | 7.67a | 85.92 | 14.14a | 2.43 |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 39.84 | 2.62 | 28.54 | 5.35a | 2.79b | 85.19 | 9.33b | 1.37 |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 39.46 | 3.31 | 24.65 | 2.98b | 8.02a | 82.57 | 7.76b | 1.82 |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| *ANOVA* | | | | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Mg | NS | NS | NS | ** | ** | NS | NS | NS |
| Mn x Mg | NS | NS | NS | NS | NS | NS | * | NS |

**หมายเหตุ :** ND คือ ไม่มีข้อมูล เนื่องจากใบร่วงจนไม่มีตัวอย่างนำมาวิเคราะห์

*, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

การเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของเหล็กและสังกะสีในลำต้นลดลง ภายใต้ตำรับแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นแคลเซียมลดลงตามอัตราแมกนีเซียมที่เพิ่มขึ้น โดยลดลงมากอย่างชัดเจน เมื่อเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่วนโพแทสเซียมลดลงเมื่อเพิ่มแมกนีเซียมเป็น 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และการเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงขึ้น สำหรับความเข้มข้นของแมกนีเซียมและทองแดงเพิ่มขึ้น เมื่อเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.8)

**ตารางที่ 3.7** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในก้านใบหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | Petiole nutrient | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Zn | Cu |
| | g $kg^{-1}$ | | | | | mg $kg^{-1}$ | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 14.94b | 1.38 | 40.50a | 3.40b | 0.96b | 42.78 | 5.90 | 1.07 |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 33.69a | 2.81 | 29.01b | 2.05c | 7.49a | 39.46 | 7.86 | 1.61 |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 25.51a | 2.42 | 30.65b | 4.34a | 1.98ab | 40.53 | 8.23 | 1.04 |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 30.16a | 2.52 | 37.97ab | 2.40c | 6.88ab | 44.22 | 8.38 | 1.17 |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND | ND |
| *ANOVA* | | | | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | ** | NS | NS | NS | NS |
| Mg | * | NS | NS | ** | ** | NS | NS | NS |
| Mn x Mg | NS | NS | * | NS | NS | NS | NS | NS |

**หมายเหตุ :** ND คือ ไม่มีข้อมูล

*, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

การเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภายใต้แมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ลดความเข้มข้นของแคลเซียมและทองแดง ในขณะที่การเติมแมกนีเซียมเป็น 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้แมกนีเซียมในรากแก้วเพิ่มขึ้น แต่ทำให้ไนโตรเจนลดลง ความเข้ม-ข้นของโพแทสเซียมลดลงอย่างนัยสำคัญเมื่อเติมแมกนีเซียมและแมงกานีสในอัตราสูงร่วมกัน ส่วนฟอสฟอรัสมีผลที่ตรงกันข้ามกัน (ภาพที่ 3.9)

สำหรับธาตุอาหารในรากแขนง พบว่า ความเข้มข้นแมกนีเซียมเพิ่มขึ้นตามอัตราที่ใส่สูงขึ้น การเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้โพแทสเซียมและแคลเซียมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนเหล็กลดลงเมื่อเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.10) ในขณะที่

ไนโตรเจนเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของเหล็กในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม สูงกว่าที่เติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม

**ตารางที่ 3.8** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในลำต้นหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | Stem nutrient | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Zn | Cu |
| | g $kg^{-1}$ | | | | | mg $kg^{-1}$ | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 15.41b | 0.89c | 36.60a | 4.45b | 0.91c | 35.82a | 15.03abc | 1.22b |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 24.71a | 1.80a | 37.96a | 2.56c | 3.73c | 30.09ab | 16.54ab | 1.11b |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 20.10ab | 1.06bc | 25.63bc | 3.45bc | 20.75a | 32.83ab | 19.09a | 2.13a |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 15.41b | 0.89c | 32.68a | 6.07a | 0.65c | 26.53ab | 14.82abc | 0.96b |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 17.76ab | 1.36b | 38.38a | 2.51c | 3.45c | 25.14b | 11.92bc | 1.12b |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 21.14ab | 1.27b | 21.88c | 2.75c | 14.54b | 22.61b | 9.22c | 1.51ab |
| *ANOVA* | | | | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | NS | * | ** | ** | * |
| Mg | ** | ** | ** | ** | ** | NS | NS | ** |
| Mn x Mg | NS | * | NS | * | ** | NS | * | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

**ตารางที่ 3.9** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากแก้วหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$)

| Treatment | Tap root nutrient | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Zn | Cu |
| | g $kg^{-1}$ | | | | | mg $kg^{-1}$ | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 15.31a | 0.81b | 11.50ab | 3.62a | 0.59b | 485.70ab | 22.91 | 3.04a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 14.28ab | 0.81b | 14.30a | 1.52b | 2.01b | 388.96b | 16.77 | 1.69b |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 10.62b | 0.88b | 10.74bc | 1.13b | 5.10a | 507.57ab | 23.92 | 2.34ab |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 16.82a | 0.71b | 12.00ab | 3.61a | 0.50b | 369.65b | 27.44 | 2.05b |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 15.88a | 0.89b | 11.17b | 1.88b | 2.42b | 655.79a | 24.90 | 1.98b |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 13.91ab | 1.13a | 7.92c | 1.31b | 6.61a | 438.28b | 22.27 | 2.32ab |
| *ANOVA* | | | | | | | | |
| Mn | NS | * | ** | NS | NS | NS | NS | NS |
| Mg | * | ** | ** | ** | ** | NS | NS | ** |
| Mn x Mg | NS | ** | * | NS | NS | ** | NS | * |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

การเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนต่าง ๆ ของยางพาราสูงเกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยกเว้นรากแก้ว โดยค่าสูงกว่าตำรับที่ไม่ได้เติมแมงกานีสประมาณ 3 เท่า และมีค่าสูงสุด 1,776 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเติมแมกนีเซียมเห็นผลชัดว่า ทำให้ความเข้มข้นแมงกานีสในทุกส่วนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ตารางที่ 3.11) การเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นแมงกานีสในทุกส่วนลดลงมากกว่าร้อยละ 50 และเมื่อเติมแมกนีเซียมเพิ่มเป็น 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ความเข้มข้นแมงกานีสลดลงจากเดิมเพียงเล็กน้อย

**ตารางที่ 3.10** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากแขนงหลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | Lateral root nutrient | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Ca | Mg | Fe | Zn | Cu |
| | g $kg^{-1}$ | | | | | mg $kg^{-1}$ | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 29.13bc | 1.36b | 23.31a | 2.47a | 0.73d | 4,637.3ab | 35.93ab | 16.07 |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 37.49a | 1.34b | 15.80bc | 2.69a | 2.92c | 4,218.4ab | 40.43ab | 16.69 |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 25.65c | 1.64a | 13.25c | 2.51a | 9.25b | 6,916.4a | 31.62bc | 20.20 |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 29.60bc | 1.09c | 18.78abc | 2.32a | 0.53d | 3,646.2b | 44.56a | 18.07 |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 33.54ab | 1.33b | 21.93ab | 2.40a | 3.17c | 3,304.4b | 32.47bc | 13.34 |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 25.75c | 1.65a | 13.19c | 1.46b | 11.12a | 4,445.0ab | 24.67c | 14.38 |
| *ANOVA* | | | | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | ** | ** | ** | NS | NS |
| Mg | ** | ** | ** | * | ** | * | ** | NS |
| Mn x Mg | NS | * | ** | * | ** | NS | ** | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

**ตารางที่ 3.11** ความเข้มข้นของแมงกานีสในต้นยางส่วนต่าง ๆ หลังสิ้นสุดการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$)

| Treatment | Leaf | Petiole | Stem | Tap root | Lateral root |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | mg $kg^{-1}$ | | |
| Mn 0 mg $kg^{-1}$ | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 407.00 b | 602.22 c | 434.13 b | 227.86 bc | 553.98 bc |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 165.37 b | 227.12 d | 232.79 b | 81.78 c | 230.51 d |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | ND | ND | 225.07 b | 83.72 c | 328.23 cd |
| Mn 50 mg $kg^{-1}$ | | | | | |
| Mg 0 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 1,154.38 a | 1,776.10 a | 1,017.20 a | 606.58 a | 1,110.70 a |
| Mg 2 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | 455.87 b | 964.00 b | 602.00 b | 324.00 b | 503.29 bc |
| Mg 10 $cmol_c$ $kg^{-1}$ | ND | ND | 558.67 b | 133.17 c | 732.65 b |
| *ANOVA* | | | | | |
| Mn | ** | ** | ** | ** | ** |
| Mg | ** | ** | ** | ** | ** |
| Mn x Mg | NS | * | NS | ** | NS |

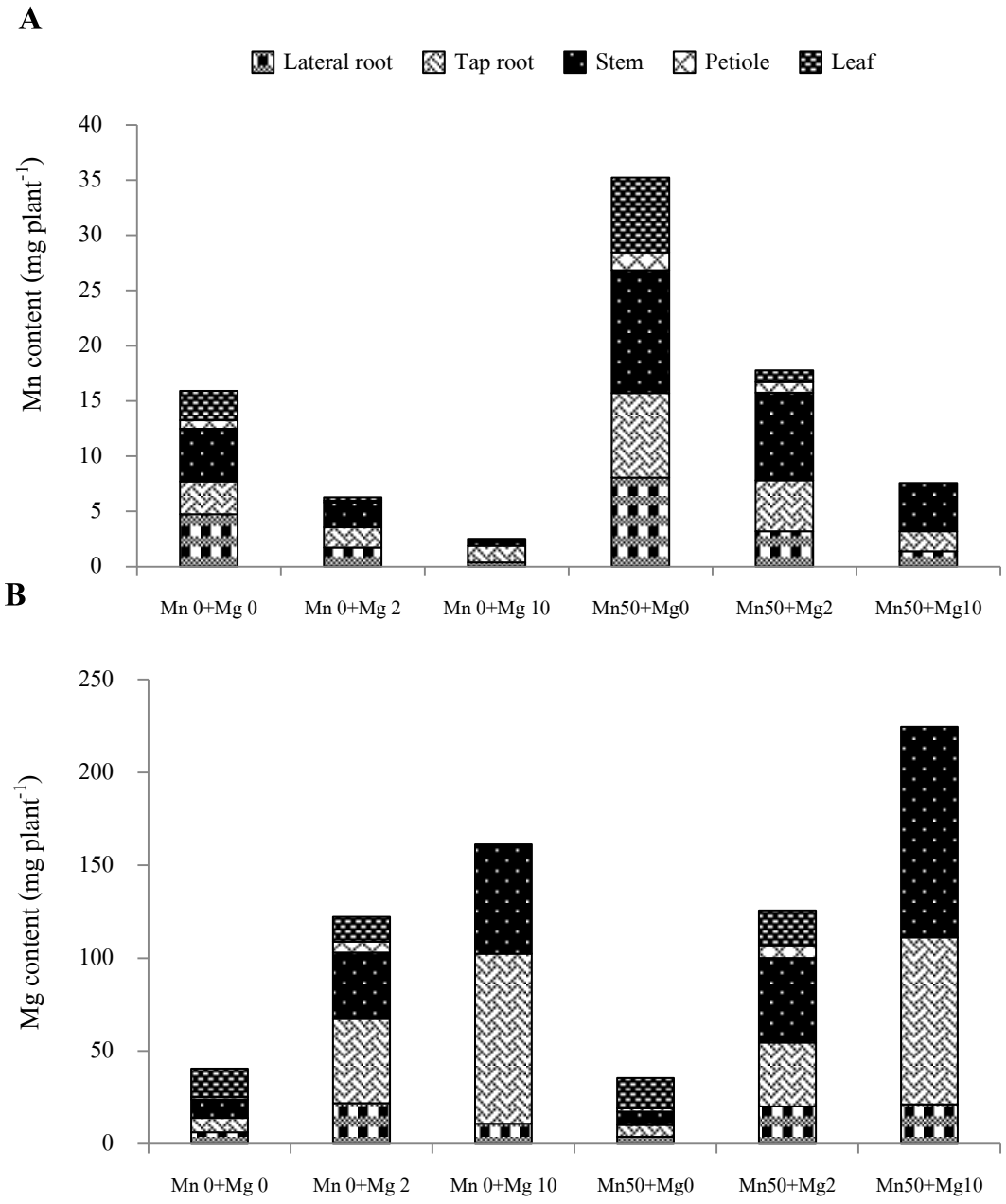
**หมายเหตุ :** ND คือ ไม่มีข้อมูล

*, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

### 1.4 ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการดูดใช้แมงกานีสและแมกนีเซียมของยางพารา

ปริมาณการดูดใช้แมงกานีสของยางพาราลดลงตามความเข้มข้นของแมกนีเซียมที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3.8A) ปริมาณแมงกานีสที่ยางพาราดูดเข้าไปจะสะสมมากในลำต้น ตามด้วยรากแก้ว โดยตำรับที่เติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภายใต้ไม่เติมแมกนีเซียม มีปริมาณแมงกานีสสูงสุด โดยมีค่า 36.81 มิลลิกรัมต่อต้น ส่วนการดูดใช้แมกนีเซียมของยางพาราเพิ่มขึ้นตามอัตราการใส่ของแมกนีเซียมที่สูงขึ้น (ภาพที่ 3.8B) โดยปริมาณแมกนีเซียมสะสมมากในลำต้นและรากแก้ว ในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ร่วมกับแมงกานีส มีปริมาณแมกนีเซียมสูงสุด โดยมีค่า 224.61 มิลลิกรัมต่อต้น




**ภาพที่ 3.8** การกระจายของแมงกานีส (A) และแมกนีเซียม (B) ในกล้ายางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และแมกนีเซียม (0, 2 และ 10 $cmol_c kg^{-1}$)

## 2. ผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและการดูดธาตุอาหารของยางพารา

### 2.1 ผลของแมงกานีสและอะลูมินัมต่อการเจริญเติบโตของกล้ายางพารา

การทดลองผลอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและการดูดธาตุอาหารของยางพารา โดยการเติมอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในระยะเวลาการทดลอง 5 เดือน พบว่า ทั้งความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่สิ้นสุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ผลต่าง (หลังทดลอง – ก่อนทดลอง) การเติมอะลูมินัมทำให้อัตราความสูงของยางพาราต่ำกว่าตำรับควบคุม (Mn0Al0) อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า 6.90 เซนติเมตร ส่วนที่เติมแมงกานีสมีทำให้ความสูงของต้นยางมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น พบว่า การเติมอะลูมินัมและแมงกานีสมีผลไม่แตกต่างทางสถิติ เมื่อเทียบกับตำรับควบคุม แต่การเติมอะลูมินัมร่วมกับแมงกานีสทำให้อัตราการเพิ่มของเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้นต่ำกว่าตำรับควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อพิจารณาที่ผลต่าง (ตารางที่ 3.12)

**ตารางที่ 3.12** ความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นของยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | Height (cm) | | | Diameter (mm) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Initial | Final | Difference | Initial | Final | Difference |
| Mn0Al0 | 22.33 | 38.00 | 16.67 ab | 4.02 | 4.68 | 0.66 ab |
| Mn0Al200 | 23.77 | 30.67 | 6.90 b | 4.33 | 4.86 | 0.53 ab |
| Mn50Al0 | 15.87 | 40.50 | 24.63 a | 4.01 | 4.91 | 0.90 a |
| Mn50Al200 | 22.33 | 28.83 | 6.50 b | 4.08 | 4.33 | 0.25 b |
| *ANOVA* | | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | NS | NS | NS |
| Al | NS | NS | * | NS | NS | * |
| Mn x Al | NS | NS | NS | NS | NS | NS |

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

การเติมแมงกานีสทำให้น้ำหนักแห้งของก้านใบ ลำต้น และรากแขนงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับตำรับควบคุม ส่วนใบและรากแก้วมีแนวโน้มลดลง สำหรับการเติมอะลูมินัม

น้ำหนักแห้งในทุกส่วน มีแนวโน้มลดลง ยกเว้นรากแก้วที่ลดลงอย่างชัดเจน การเติมแมงกานีสร่วมกับอะลูมินัมจะเห็นได้ชัดว่า น้ำหนักแห้งในทุกส่วนยกเว้นใบ ต่ำกว่าที่เติมแมงกานีสหรืออะลูมินัมเพียงอย่างเดียว และต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับตำรับควบคุม เมื่อพิจารณาที่น้ำหนักแห้งทั้งหมดจะเห็นได้ชัดว่า การเติมแมงกานีสและอะลูมินัมที่มากเกินยับยั้งการเจริญเติบโตของต้นยาง-พารา โดยมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเติมทั้งสองธาตุร่วมกัน (ตารางที่ 3.13)

**ตารางที่ 3.13** น้ำหนักแห้งส่วนต่าง ๆ ของกล้ายางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | Dry weight (g) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Leaf | Petiole | Stem | Tap root | Lateral root | Total |
| Mn0Al0 | 2.68 | 0.66 a | 2.13 a | 20.31 a | 4.18 a | 29.96 a |
| Mn0Al200 | 2.08 | 0.52 ab | 1.99 a | 9.28 b | 2.46 ab | 16.33 b |
| Mn50Al0 | 0.56 | 0.22 b | 1.18 ab | 13.22 ab | 0.91 b | 16.09 b |
| Mn50Al200 | 1.07 | 0.17 b | 0.90 b | 8.76 b | 0.77 b | 11.68 b |
| *ANOVA* | | | | | | |
| Mn | NS | * | ** | NS | ** | ** |
| Al | NS | NS | NS | ** | NS | ** |
| Mn x Al | NS | NS | NS | NS | NS | * |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$
ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

### 2.2 ผลของแมงกานีสและอะลูมินัมต่อธาตุอาหารในดินและยางพารา

การเติมอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้และค่าการนำไฟฟ้าในดินก่อนการทดลองเพิ่มขึ้น โดยอะลูมินัมมีความเข้มข้น 1.41 - 1.52 เซนติโมลต่อกิโลกรัม แต่ค่า pH โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมที่สกัดได้ลดลง ส่วนการเติมแมงกานีสทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสที่สกัดได้เพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มข้น 45.41 - 47.70 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.14)

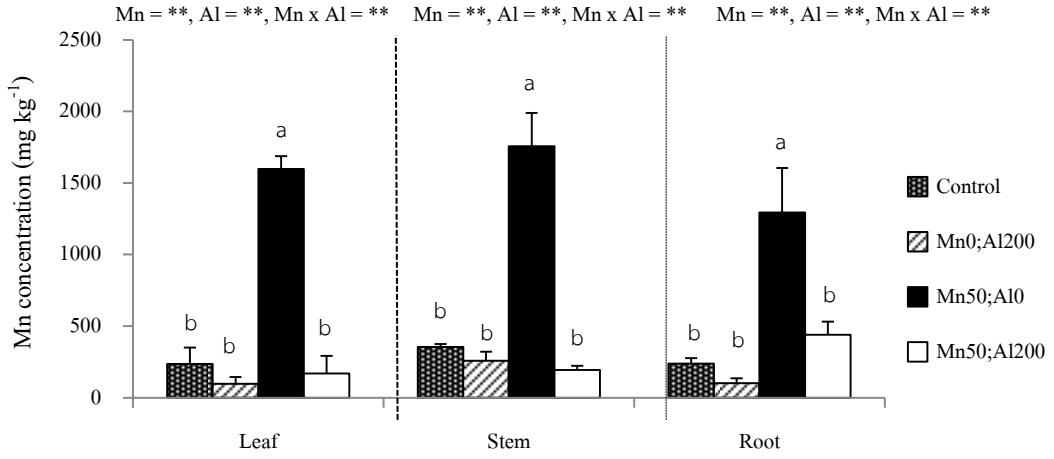
**ตารางที่ 3.14** สมบัติทางเคมีและธาตุอาหารในดินก่อนการทดลองเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | pH | $EC_{(1:5)}$ | OM | Exch. Al | Avai. P | Extr. Mn | Extr. K | Extr. Ca | Extr. Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | (soil : water; 1 : 5) | (dS $m^{-1}$) | (%) | ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | (mg $kg^{-1}$) | | ($cmol_c$ $kg^{-1}$) | | |
| Mn0Al0 | 5.08 a | 0.06 b | 0.89 | 0.71 c | 13.19 a | 5.76 b | 0.28 a | 0.15 a | 0.05 a |
| Mn0Al200 | 3.48 c | 0.88 a | 0.78 | 1.41 a | 14.84 a | 7.57 b | 0.18 b | 0.09 b | 0.03 b |
| Mn50Al0 | 4.23 b | 0.20 b | 0.85 | 0.98 b | 5.10 b | 47.70 a | 0.24 ab | 0.16 a | 0.05 a |
| Mn50Al200 | 3.49 c | 0.94 a | 0.84 | 1.52 a | 16.27 a | 45.41 a | 0.19 b | 0.09 b | 0.03 b |
| *ANOVA* | | | | | | | | | |
| Mn | ** | NS | NS | ** | NS | ** | NS | NS | NS |
| Al | ** | ** | NS | ** | ** | NS | ** | ** | * |
| Mn x Al | ** | NS | NS | * | * | ** | NS | NS | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

ผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อธาตุอาหารในยางพารา พบว่า การเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสในยางพาราเพิ่มขึ้น โดยในแต่ละส่วนมีความเข้มข้นเกิน 1,000 มิลลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นลดลงทั้งส่วนเหนือดินและรากเมื่อเติมอะลูมินัม โดยลดลงมากกว่าร้อยละ 50 (ภาพที่ 3.9) ในขณะที่การเติมอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นของอะลูมินัมในรากเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีความเข้มข้น 14.37 กรัมต่อกิโลกรัม ในส่วนเหนือดินมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มข้นในใบ และลำต้น 211.55 และ 104.47 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ภาพที่ 3.10) และความเข้มข้นอะลูมินัมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมแมงกานีส นอกจากนี้ ยังมีผลต่อความเข้มข้นของธาตุอาหารอื่นทั้งในรากและส่วนเหนือดิน การเติมอะลูมินัมทำให้ฟอสฟอรัสในใบลดลง ส่วนธาตุอาหารอื่นในใบมีผลไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 3.15) และอะลูมินัมยังทำให้ไนโตรเจน โพแทสเซียม และแคลเซียมในลำต้นลดลงด้วย (ตารางที่ 3.16) สำหรับความเข้มข้นธาตุอาหารในราก พบว่า การเติมอะลูมินัมทำให้โพแทสเซียม ไนโตรเจน แคลเซียม และแมกนีเซียมลดลง แต่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมแมงกานีสทำให้โพแทสเซียมและแมกนีเซียมลดลงด้วยเช่นกัน แต่มีผลน้อยกว่าที่เติมอะลูมินัม (ตารางที่ 3.17)

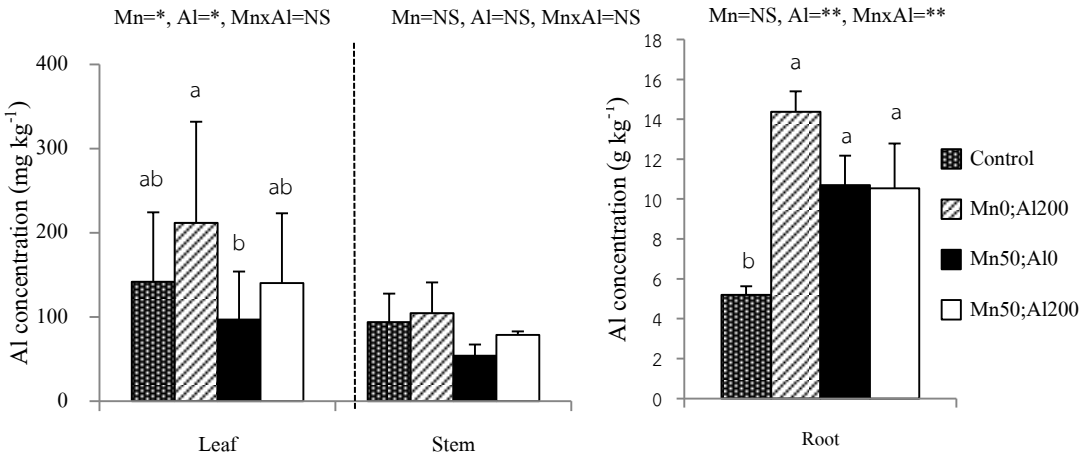



**ภาพที่ 3.9** ความเข้มข้นของแมงกานีสในใบ ลำต้น และรากแขนงกล้ายางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

**หมายเหตุ :** ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.01$

ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.01

| = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD)




**ภาพที่ 3.10** ความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบ ลำต้น และรากแขนงของยางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

$\top$ = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation: SD)

**ตารางที่ 3.15** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | Leaf nutrient (g $kg^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Mg | Ca |
| Mn0Al0 | 31.64 | 1.44 b | 25.31 | 2.07 | 4.30 |
| Mn0Al200 | 27.79 | 2.20 ab | 14.68 | 2.65 | 5.11 |
| Mn50Al0 | 37.31 | 1.69 b | 25.88 | 2.10 | 3.54 |
| Mn50Al200 | 30.26 | 2.86 a | 19.95 | 3.19 | 4.88 |
| *ANOVA* | | | | | |
| Mn | NS | NS | NS | NS | NS |
| Al | NS | * | NS | NS | NS |
| Mn x Al | NS | NS | NS | NS | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.05

**ตารางที่ 3.16** ความเข้มข้นธาตุอาหารในลำต้นยางพาราเมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | Stem nutrient (g $kg^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Mg | Ca |
| Mn0Al0 | 20.03 a | 0.76 | 19.72 a | 1.18 | 5.52 ab |
| Mn0Al200 | 8.12 b | 1.06 | 18.14 ab | 1.71 | 6.78 a |
| Mn50Al0 | 14.51 a | 0.85 | 20.68 a | 0.80 | 4.32 b |
| Mn50Al200 | 5.63 b | 0.80 | 14.05 b | 1.07 | 6.33 a |
| *ANOVA* | | | | | |
| Mn | ** | NS | NS | NS | * |
| Al | ** | NS | * | NS | ** |
| Mn x Al | NS | NS | NS | NS | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

**ตารางที่ 3.17** ความเข้มข้นของธาตุอาหารในรากแขนงยางพารา เมื่อได้รับแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | Lateral root nutrient (g $kg^{-1}$) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | Mg | Ca |
| Mn0Al0 | 32.82 a | 0.76 c | 15.41 a | 1.13 a | 2.41 a |
| Mn0Al200 | 19.39 ab | 1.39 b | 7.43 b | 0.35 b | 0.61 b |
| Mn50Al0 | 36.38 a | 0.73 c | 11.03 b | 0.55 b | 1.68 ab |
| Mn50Al200 | 12.74 b | 1.65 a | 8.19 b | 0.27 b | 0.91 b |
| *ANOVA* | | | | | |
| Mn | NS | NS | * | ** | NS |
| Al | ** | ** | ** | ** | ** |
| Mn x Al | NS | * | ** | * | NS |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT ที่ P=0.01

**2.3 ผลของแมงกานีสและอะลูมินัมต่อคลอโรฟิลล์และกิจกรรมเอนไซม์ของกล้ายางพารา**

ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์มีค่าในช่วง 0.89 - 2.42 มิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตร การเติมอะลูมินัมทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ลดลง โดยลดลงจาก 2.42 มิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตร ในตำรับควบคุม เป็น 0.89 มิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตร (ตารางที่ 3.18) การศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระเป็นตัวบ่งชี้ที่สามารถแสดงให้เห็นอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากสภาวะเครียดได้ โดยผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อกิจกรรมเอนไซม์ พบว่า การเติมแมงกานีสทำให้กิจกรรมเอนไซม์คาทาเลส (CAT) ลดลง และเมื่อเติมร่วมกับอะลูมินัม ทำให้กิจกรรมเพอร์ออกซิเดส (POD) ลดลง ในขณะที่กิจกรรมซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส (SOD) ไม่ผลแตกต่างกัน โดยการเติมอะลูมินัมและแมงกานีส ทำให้กิจกรรม SOD มีแนวโน้มลดลง (ตารางที่ 3.18)

**ตารางที่ 3.18** ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ และกิจกรรมเอนไซม์คาทาเลส (CAT) ซูเปอร์ออก-ไซด์ ดิสมิวเทส (SOD) และเพอร์ออกซิเดส (POD) ในใบกล้ายางพารา ภายใต้การเติมแมงกานีส (0 และ 50 mg $kg^{-1}$) และอะลูมินัม (0 และ 200 mg $kg^{-1}$)

| Treatment | Chlorophyll (mg $dm^{-2}$) | CAT (mmol $min^{-1}$ g $FW^{-1}$) | SOD (U g $FW^{-1}$) | POD (O.D. $min^{-1}$ g $FW^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| Mn0Al0 | 2.42 a | 2.67 a | 143.51 | 344.18 a |
| Mn0Al200 | 0.89 b | 2.61 a | 138.61 | 335.05 a |
| Mn50Al0 | 1.69 ab | 1.37 ab | 133.89 | 337.65 a |
| Mn50Al200 | 1.23 b | 1.09 b | 137.14 | 136.63 b |
| *ANOVA* | | | | |
| Mn | NS | * | NS | ** |
| Al | * | NS | NS | ** |
| Mn x Al | NS | NS | NS | ** |

**หมายเหตุ :** *, ** คือ แตกต่างทางสถิติที่ $P \leq 0.05, 0.01$ ; NS คือ ไม่แตกต่างทางสถิติที่ $P > 0.05$ ตัวอักษรที่ต่างกันมีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบโดยวิธี DMRT

# บทที่ 4

# วิจารณ์ผลการทดลอง

การศึกษาอันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีส และการเจริญเติบโตของยางพารา

## 1. สมบัติทางเคมีของดิน

การทดลองนี้ใช้ชุดดินคอหงส์ ซึ่งเป็นชุดดินที่เหมาะสมสำหรับปลูกยางพารา รองจากชุดดินภูเก็ต (ศุภมิตร, 2544) โดยชุดดินคอหงส์ ท่าแซะ และรือเสาะ ดินขาดธาตุอาหารรอง โดยเฉพาะแมกนีเซียมทั้งดินบนและดินล่าง โดยมีค่าต่ำกว่าระดับวิกฤต (0.30 $cmol_c\ kg^{-1}$) (โสภา และคณะ, 2536) สอดคล้องกับค่าวิเคราะห์ดินก่อนการทดลองที่มีแมกนีเซียมที่สกัดได้ 14.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (0.12 $cmol_c\ kg^{-1}$) (ตารางที่ 3.1) นอกจากนี้ ดินปลูกยางพาราภาคใต้ร้อยละ 88 มีแมกนีเซียมที่สกัดได้อยู่ในระดับต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (นุชนารถ และคณะ, 2556) เช่นเดียวกับดินที่ลุ่มและที่ดอนในจังหวัดสงขลาที่มีแมกนีเซียมต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม โดยเฉพาะในแปลงยางพาราที่เปิดกรีดแล้ว (หทัยกานต์, 2557) นอกจากนั้น ในดินกรดมักมีแมงกานีสละลายออกมามาก หากมีความเข้มข้นของแมงกานีสในดินเกิน 4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อาจเป็นพิษต่อยางพาราได้ (นุชนารถ, 2554) เช่นเดียวกับดินที่นำมาทดลองที่มีค่าวิเคราะห์แมงกานีสเกิน 4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เพื่อให้แน่ใจว่า ดินมีแมงกานีสสูงจนเป็นพิษต่อยางพาราจึงได้เติมสารละลายแมงกานีสความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และได้เติมแมกนีเซียมในความเข้มข้นที่สูงเกินค่าความเหมาะสม (0.3 $cmol_c\ kg^{-1}$) เพื่อศึกษาอิทธิพลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสและการเจริญเติบโตของยางพารา

จากการที่เกษตรกรปลูกยางพาราเป็นเวลานาน และไม่ได้ใส่ปุ๋ยแมกนีเซียม ประกอบกับภาคใต้มีฝนตกชุกจึงทำให้แมกนีเซียมสูญเสียได้ง่ายโดยการกร่อนและการชะละลาย จึงทำให้ดินปลูกยางภาคใต้ขาดแมกนีเซียม ดังนั้น ควรใส่ปุ๋ยแมกนีเซียมเพิ่มเติมเพื่อให้ต้นยางพาราเจริญเติบโตดีขึ้น โดยสถาบันวิจัยยาง (2547) แนะนำว่า ดินที่ขาดธาตุแมกนีเซียม (< 0.3 $cmol_c\ kg^{-1}$) ควรใส่ปุ๋ยคีเซอไรต์ (26% MgO) เพิ่มในอัตรา 80 กรัมต่อต้นต่อปี หรือโดโลไมต์อัตรา 100 กรัมต่อต้นต่อปี แต่การใส่ในอัตราที่มากเกินมีผลชะงักการเจริญเติบโตของยางพาราได้ (ภาพที่ 3.2, 3.3 และ 3.4) แต่ในสภาพสนามโอกาสจะเกิดแบบนี้น้อย เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นธาตุที่ถูกชะละลายได้ง่าย (Havlin *et al*., 2005) นอกจากนี้ การเติมแมกนีเซียมทำให้ pH และฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินต่ำกว่า

ตำรับควบคุม (ตารางที่ 3.3) เนื่องจากการใส่คีเซอไรต์มากเกิน ทำให้แมกนีเซียมไอออนไปไล่ที่ไฮโดรเจนไอออน ($H^+$) ที่ถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์ดิน ส่งผลให้ pH ของดินลดลง และแมกนีเซียมไอออนอาจเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับฟอสฟอรัส ทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสลดลง

สมบัติทางเคมีของดินมีผลต่อการดูดอะลูมินัมของพืช โดยเฉพาะ pH ที่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบชา และอะลูมินัมที่ละลายน้ำได้มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบชา (Zhong-lei *et al*., 2001) สอดคล้องกับค่า pH ในดินที่ต่ำ (ตารางที่ 3.14) และความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบ ลำต้น และรากยางพาราที่สูงกว่าตำรับควบคุม (ภาพที่ 3.10) เมื่อเติมอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เนื่องจากอะลูมินัมไอออนไปไล่ที่ $H^+$ ที่คอลลอยด์ดิน และเมื่ออะลูมินัมไอออน ($Al^{+3}$) ทำปฏิกิริยากับน้ำก็จะปลดปล่อย $H^+$ ออกมา จึงทำให้ดินมี pH ลดลง (Brady and Weil, 2008)

## 2. ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

การเจริญเติบโตของยางพาราหยุดชะงักทั้งส่วนเหนือดินและราก เมื่อเติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ซึ่งเห็นผลเด่นชัดมาก (ภาพที่ 3.2 และ 3.3) โดยทำให้ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น (ภาพที่ 3.4) และน้ำหนักแห้งของยางพาราลดลง (ภาพที่ 3.5 และ 3.6) ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากการเติมแมกนีเซียมซัลเฟตในความเข้มข้นที่สูงเกินไป ซึ่งยืนยันได้จากค่าการนำไฟฟ้าในดินก่อนและหลังการทดลองในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ที่มีค่าสูงกว่าตำรับอื่น ๆ และสูงกว่าค่าที่เหมาะสม (<2.0 dS $m^{-1}$) (ตารางที่ 3.2 และ 3.3) และพบคราบเกลือสีขาวที่ผิวดินภายใต้ตำรับดังกล่าว (ภาพที่ 3.1) จึงชักนำให้ต้นยางพาราเกิดสภาวะเครียดเนื่องจากความเค็ม (salinity stress) และเมื่อเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของระวี และคณะ (2550) ที่ได้ศึกษาโดยการปลูกกล้ายางพันธุ์ RRIM 600 ระยะ 1 ฉัตร ในเรือนกระจก ที่พบว่า ความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และน้ำหนักแห้งของกล้ายางในตำรับควบคุมสูงกว่าผลในงานทดลองนี้ (ภาพที่ 3.4, 3.5 และ 3.6)

การเพิ่มความเข้มข้นของเกลือทำให้ปริมาณน้ำในใบ และคลอโรฟิลล์ลดลง (สุริยันตร์ และคณะ, 2542) โดยดินที่มีเกลือละลายน้ำได้ (soluble salt) สูงทำให้ค่าศักย์ออสโมติก (osmotic potential) ในดินต่ำส่งผลให้พืชดูดน้ำจากดินได้ยาก เพื่อลดผลกระทบจากค่าออสโมติกในดินที่ต่ำ พืชจึงจำเป็นต้องใช้พลังงานที่สูงเพื่อปรับระดับค่าออสโมติกในเซลล์ให้ต่ำลง การสูญเสียพลังงานนี้ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง (Brady and Weil, 2008) เช่นเดียวกับกรณีการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ที่ชักนำให้เกิดความเครียดเนื่องจากความเค็มส่งผลให้น้ำหนักสด และน้ำหนัก

แห้ง ความยาวของส่วนเหนือดินและรากของข้าวฟ่างลดลง (Khare *et al*., 2012) การเติมแมกนีเซียมซัลเฟตที่มากเกินมีผลลดการเจริญเติบโตของข้าวมากกว่าการเติมแมกนีเซียมคลอไรด์ที่มากเกิน (Kobayashi *et al*., 2005) และความเสียหายเนื่องจากความเค็มจะมีผลกระทบมากที่สุดต่อพืชในระยะแรกของการเจริญเติบโต (Brady and Weil, 2008) นอกจากนี้ การที่พืชดูดใช้แมกนีเซียมในความเข้มข้นที่มากเกินมีผลชะงักการเจริญเติบโตเช่นกัน สัมพันธ์กับความเข้มข้นของแมกนีเซียมในใบในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.6) ที่เกินกว่าค่าที่เหมาะสม คือ 2.0 - 2.5 กรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ และคณะ, 2552) แสดงให้เห็นว่า ในตำรับที่แมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ยางพาราได้ดูดใช้แมกนีเซียมมากเกิน เนื่องจากความเข้มข้นแมกนีเซียมในใบจะเพิ่มตามแมกนีเซียมที่ใส่มากขึ้น ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปแมกนีเซียมร้อยละ 6 - 25 เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์ หากแมกนีเซียมในใบที่เป็นองค์ประกอบของคลอโรฟิลล์เกินกว่าร้อยละ 20 - 25 พืชจะชะงักการเจริญเติบโต (ยงยุทธ, 2552) และมีรายงานว่า เมื่อมีแมกนีเซียมในคลอโรพลาสต์เข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ การสังเคราะห์ด้วยแสงจะหยุดชะงัก เนื่องจากโพแทสเซียมเข้าสู่คลอโรพลาสต์ได้น้อยลง เมื่อได้รับแสงก็จะเกิดสภาพกรดขึ้นภายในสโตรมา (Wu *et al*., 1991) สอดคล้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ในข้าวฟ่างที่ลดลงตามความเข้มข้นของแมกนีเซียมคลอไรด์ที่เพิ่มขึ้น (Khare *et al*., 2012) ดังนั้น การลดพิษแมงกานีสด้วยวิธีนี้ ควรใส่ในอัตราที่เหมาะสม

สำหรับการเติมแมงกานีสทำให้การเจริญเติบโตของยางพารามีผลไม่ต่างกัน ระหว่างตำรับที่เติมสารละลายแมงกานีสและที่ไม่ได้เติม (ภาพที่ 3.4, 3.5 และ 3.6) ทั้งที่ในดินมีแมงกานีสความเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ภายใต้ตำรับที่เติมแมงกานีส (ตารางที่ 3.2) สูงกว่าตำรับที่ไม่เติมแมงกานีส 6 เท่า และในใบยางมีความเข้มข้นเกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.6) สูงกว่าตำรับที่ไม่เติมแมงกานีส 3 เท่า และสูงกว่าที่นุชนารถ (2554) ได้รายงานไว้ว่า แมงกานีสในดินมากกว่า 4 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในใบสูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม อาจเป็นพิษต่อยางพารา และสอดคล้องกับการทดลองในสารละลายที่พบว่า แมงกานีสในใบยางพาราพันธุ์ RRIM 600 มีความเข้มข้น 217 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยางพาราเจริญเติบโตได้ดี (สายใจ และคณะ, 2558) จากผลการศึกษานี้ แม้ยางพาราจะได้รับแมงกานีสจนดูดแมงกานีสไปสะสมมากกว่าค่าที่คาดว่าเป็นพิษ แต่ยางพาราก็ไม่แสดงอาการเป็นพิษ หรือชะงักการเจริญเติบโต แสดงให้เห็นว่า ยางพาราสามารถต้านทานต่อแมงกานีสในความเข้มข้นที่สูงได้

กลไกในการต้านทานแมงกานีสของยางพารายังไม่มีรายงานที่แน่ชัด แต่ต้น pokeweed (*Phytolacca americana*) ที่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อได้รับแมงกานีสสูงนั้นมีกลไกในการต้าน

ทานโดยการผลิต Pokeweed antiviral protein (PAP-H) ซึ่งเป็นโปรตีนที่หลั่งออกไปในบริเวณราก พืช (rhizosphere) เพื่อป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อโรคจากดิน และตอบสนองต่อสภาวะเครียดจากภายในและภายนอก (Park *et al*., 2002) ส่วนกลไกการขจัดพิษอื่น เช่น การเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะกับลิแกน ได้มีการวิเคราะห์แมงกานีสในใบของต้นที่สะสมแมงกานีสสูง พบว่าแมงกานีสอยู่ในรูปไบวาเลนซ์ แต่มากกว่าร้อยละ 90 ของแมงกานีสทั้งหมดอยู่ในรูป Mn-oxalate (Xu *et al*., 2009)

### 3. ผลของอะลูมินัมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพารา

ในดินกรดที่มี pH ต่ำกว่า 4.5 มักมีอะลูมินัมและแมงกานีสละลายออกมามากจนเป็นพิษ ส่งผลให้จำกัดการเจริญเติบโตของพืช (Foy, 1984) อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานที่แน่ชัดถึงระดับความเป็นพิษของทั้งสองธาตุนี้ต่อยางพารา การศึกษานี้ พบว่า การเติมอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้การเจริญเติบโตของต้นยางพาราหยุดชะงัก โดยเห็นได้จากความสูงและเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นที่ลดลง รวมถึงน้ำหนักแห้งในส่วนต่าง ๆ ที่มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน (ตารางที่ 3.12 และ 3.13) สอดคล้องกับอะลูมินัมที่มากเกินทำให้น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินและรากของข้าวฟ่าง (สุรศักดิ์, 2537) การเจริญเติบโตของกล้าข้าว (Singh *et al*., 2011) และถั่วฝักยาวลดลง (Taylor *et al*., 1998) โดยทั่วไปความเป็นพิษของอะลูมินัมมีผลยับยั้งการยืดยาวของราก (Ghanati *et al*., 2005; Yang *et al*., 2009; Kang *et al*., 2011; Alvarez *et al*., 2012) สอดคล้องกับน้ำหนักแห้งในส่วนของรากที่ลดลง (ตารางที่ 3.13) แสดงให้เห็นว่า การเจริญเติบโตของรากได้หยุดชะงัก และส่งผลให้ชะงักการเจริญเติบโตของส่วนเหนือดินตามมา

อะลูมินัมชักนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบของผนังเซลล์ เกิดการสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับ DNA-Al ควบคุมการถอดรหัส และรบกวนระดับของแคลเซียมในไซโท-พลาสมิก และการสร้างทิวบูลินให้ล่าช้าในกระบวนการแบ่งเซลล์ ทำให้ชะลออัตราการแบ่งเซลล์และนำไปสู่การยับยั้งการยืดตัวของราก ซึ่งมีผลต่อการดูด การเคลื่อนย้าย และการใช้ประโยชน์ของไนโตรเจน แคลเซียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม นอกจากนี้ ปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดลงเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้การเจริญเติบโตของพืชต่ำ โดยอะลูมินัมทำให้ความเข้มข้นของคลอโร-ฟิลล์ในใบยางพาราลดลง (ตารางที่ 3.18) เช่นเดียวกับความเข้มข้นคลอโรฟิลล์ในใบ และมวลชีว-ภาพส่วนเหนือดินและรากของพืชตระกูลส้มที่ลดลง เมื่อเพิ่มอะลูมินัม (Jiang *et al*., 2008)

การเติมแมงกานีสทำให้น้ำหนักแห้งของใบ ก้าน ลำต้น และรากแขนงลดลง (ตารางที่ 3.13) สอดคล้องกับรายงานว่า การเติมแมงกานีสมากเกินทำให้น้ำหนักของส่วนเหนือดินทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกาดขาว (Lee *et al*., 2011) น้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินของถั่วเหลืองลด

ลง (Yang *et al*., 2009) และทำให้การเจริญเติบโตของรากมะเขือเทศ และการเจริญเติบโตของราก และส่วนเหนือดินของแตงกวา (Shenker, 2004) และถั่วฝักยาวลดลง (Taylor *et al*., 1998) เนื่องจากเกิดความผิดปกติในเมทาบอลิซึม และมีการสะสมของอนุมูลอิสระใหม่ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างลิพิดกับออกซิเจน (lipid peroxidation) ชนิดรีแอกทีฟ (reactive oxygen species) ที่รากมากขึ้น โดยเฉพาะที่ระดับ pH ต่ำ (Qing-hua *et al*, 2006) แต่ดูเหมือนจะมีผลยับยั้งในส่วนเหนือดินมากกว่าราก (Foy, 1984) อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจากแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพาราในการศึกษานี้ยังเห็นผลไม่ชัดเท่าอะลูมินัม อาจเนื่องจากระดับแมงกานีสที่เติมยังไม่ถึงระดับที่เป็นพิษต่อยางพารา ถึงแม้ความเข้มข้นของแมงกานีสในยางพาราจะสูงเกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.9) และสูงกว่าที่มีรายงานระดับแมงกานีสในใบยางพาราที่เป็นพิษ คือ สูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (นุชนารถ, 2552) เช่นเดียวกับผลของแมกนีเซียมต่อการดูดแมงกานีสของยางพารา ที่เติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตของยางพาราไม่แตกต่างกับตำรับควบคุม (ภาพที่ 3.2, 3.3 และ 3.4)

การเติมทั้งอะลูมินัมและแมงกานีสร่วมกัน มีทั้งที่เป็นปฏิปักษ์และเสริมกัน โดยปกติความเป็นพิษของอะลูมินัมและแมงกานีสมีผลยับยั้งการยืดยาวของรากและการเจริญของส่วนเหนือดิน การเกิดความเป็นพิษของทั้งสองธาตุนี้พร้อมกันยิ่งส่งเสริมให้การยืดยาวของรากถูกยับยั้งมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับน้ำหนักแห้งในส่วนของรากยางพาราที่ลดลงมากกว่าการเติมธาตุตัวใดตัวหนึ่งเพียงอย่างเดียว (ตารางที่ 3.13) และส่งผลให้การเจริญเติบโตส่วนเหนือดินของยางพารายิ่งลดลงเช่นกัน โดยแสดงให้เห็นจากความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และน้ำหนักแห้งที่ลดลง (ตารางที่ 3.12 และ 3.13) เช่นเดียวกับน้ำหนักแห้งของรากข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) ที่ลดลง เมื่อเพิ่มอะลูมินัมและแมงกานีสในความเข้มข้นที่สูงขึ้น (Blair and Taylor, 1997) และอาการเหลืองระหว่างเส้นใบที่ปรากฏในใบประกอบที่มี 3 ใบย่อย (trifoliate leaves) ในถั่วฝักยาวมีความรุนแรงยิ่งขึ้น เมื่อเติมอะลูมินัมร่วมด้วย (Taylor *et al*., 1998) เนื่องจากแมงกานีสทำให้การสะสมอะลูมินัมในผนังเซลล์ของรากเพิ่มขึ้น (Yang *et al*., 2009) สอดคล้องกับความเข้มข้นของอะลูมินัมในรากเพิ่มขึ้น เมื่อเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ภาพที่ 3.10) และความเป็นพิษของทั้งสองธาตุทำให้เกิดอนุมูลอิสระมากขึ้น โดยแสดงให้เห็นจากกิจกรรมเอนไซม์คาทาเลสที่ลดลง (ตารางที่ 3.18)

การเติมอะลูมินัมในความเข้มข้นที่ต่ำสามารถเยียวยาความเป็นพิษแมงกานีส โดยมีหลายรายงานที่พบว่า การเติมอะลูมินัมที่ความเข้มข้นต่ำในสารละลายธาตุอาหาร มีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของถั่วฝักยาว โดยทำให้มวลของรากเพิ่มขึ้นร้อยละ 59 และลดอาการใบจุดด่าง (leaf speckling) ที่ใบจริงคู่แรก (unifoliate) (Taylor *et al*., 1998) อาการความเป็นพิษแมงกานีสลดลงเมื่อเติมอะลูมินัม (Khan and McNeilly, 1998) และผลความเป็นพิษของแมงกานีสต่อต้นหญ้า (*Phalaris*

*aquatic*) ลดลงเมื่อเพิ่มอะลูมินัม (Culvenor, 1985 อ้างโดย Khan and McNeilly, 1998) และคงระดับของน้ำหนักแห้งส่วนเหนือดินของถั่วเหลืองไม่ให้ลดตามความเข้มข้นแมงกานีสที่สูงขึ้น (Yang *et al*., 2009) อาจเนื่องจากอะลูมินัมชักนำให้เกิดการยับยั้งการดูดแมงกานีสเข้าไปสู่ส่วนเหนือดิน สอดคล้องกับความเข้มข้นของแมงกานีสในใบ ลำต้น และรากแขนงของยางพาราที่ลดลง (ภาพที่ 3.9) ดังนั้น ดินกรดที่มีแมงกานีสสูง อาจใช้อะลูมินัมในการเยียวยาผลกระทบนี้ โดยการลดการดูดและสะสมแมงกานีสในยางพารา

## 4. ผลของแมกนีเซียม อะลูมินัม และแมงกานีสต่อการดูดใช้ธาตุอาหารของยางพารา

การวิเคราะห์ความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบ เป็นการยืนยันถึงการดูดใช้ธาตุอาหารของพืชที่ได้รับอิทธิพลจากการใส่ปุ๋ย การเติมแมกนีเซียมทำให้แคลเซียมและแมงกานีสในใบลดลง สำหรับโพแทสเซียมมีแนวโน้มลดลง ส่วนแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.6 และ 3.11) สอดคล้องกับรายงานที่ว่า การใส่แมกนีเซียมทั้งในรูปโดโลไมต์และคีเซอไรต์มีผลลดปริมาณโพแทสเซียมในใบยางพารา และการใส่แมกนีเซียมในอัตราที่เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณแมกนีเซียมในใบเพิ่มขึ้น ส่วนแคลเซียมและแมงกานีสลดลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่การใส่แมกนีเซียมในรูปคีเซอไรต์ในอัตราที่ต่ำไม่มีผลต่อปริมาณแคลเซียมในใบ (Weerasuriya and Yogaratnam, 1989) การศึกษาในพืชชนิดอื่นก็มีรายงานที่ผลสอดคล้องกัน คือ ความเข้มข้นของแคลเซียมในข้าว และ *Echinochloa* oryzicola ลดลงเมื่อเติมแมกนีเซียมมากเกิน (Kobayashi *et al*., 2005) การเติมแมกนีเซียมทำให้ความเข้มข้นของแมกนีเซียมในใบข้าวสาลีเพิ่มขึ้นและแมงกานีสลดลง ในทางกลับกันการเพิ่มแมงกานีสก็ทำให้แมกนีเซียมลดลงเช่นกัน (Chattejee *et al*., 1994)

สำหรับธาตุอาหารในรากแขนงการเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้แมงกานีส (ตารางที่ 3.11) โพแทสเซียมลดลง ส่วนแมกนีเซียมและไนโตรเจนเพิ่มขึ้น การเติมแมก-นีเซียมที่ 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้โพแทสเซียม แคลเซียม และสังกะสีลดลง ส่วนฟอสฟอรัส แมกนีเซียม และเหล็กเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.10) ในงานทดลองของ Maas และคณะ (1969) พบว่า การเพิ่มแมกนีเซียมทำให้อัตราการดูดใช้แมงกานีสและแคลเซียมของรากข้าวสาลีลดลง สอดคล้องกับความเค็มที่มีผลต่อการดูดฟอสฟอรัสของเมล่อน ทั้งนี้ขึ้นกับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในแหล่งที่ปลูก โดยสารละลายที่มีฟอสฟอรัสสูงการเติมเกลือทำให้เมล่อนดูดฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การเติมเกลือในสารละลายที่มีฟอสฟอรัสต่ำทำให้เมล่อนดูดฟอสฟอรัสลดลง (Navarro *et al*., 2001) การที่ความเข้มข้นของเหล็กในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม สูงกว่าที่เติม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม เนื่องจากรากพืชดูดธาตุเหล็กจากตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม เข้าไปและไม่ได้นำไปใช้ในการพัฒนาส่วนต่าง ๆ รวมทั้งทำให้การเจริญเติบโตของราก

แขนงในตำรับดังกล่าวหยุดชะงักลง จึงทำให้เกิดการสะสมของเหล็กสูง และการที่พืชดูดธาตุที่เป็นโลหะหนักในอัตราที่สูงเกินความต้องการ พืชจะสะสมธาตุเหล่านั้นในแวคิวโอลที่ราก (ยงยุทธ, 2552)

การลดลงของแมงกานีสและแคลเซียมเนื่องจากการเติมแมกนีเซียมมีผลแข่งขันต่อแมงกานีสและแคลเซียม โดยแมกนีเซียมไอออน (0.065 นาโนเมตร) มีประจุและขนาดรัศมีไอออนใกล้เคียงกับไอออนของแคลเซียม (0.099 นาโนเมตร) และแมงกานีส (0.075 นาโนเมตร) (ยงยุทธ, 2552) จึงส่งผลให้พืชดูดใช้ธาตุทั้งสองนี้ลดลง สำหรับแมงกานีสจะเห็นได้ว่า มีการลดลงในทุกส่วนของยางพารา ได้แก่ ใบ ก้านใบ ลำต้น รากแก้ว และรากแขนง (ตารางที่ 3.11) ทั้งนี้ เนื่องจากการเติมแมกนีเซียมทำให้การดูดใช้แมงกานีสของยางพาราลดลง (ภาพที่ 3.8A) การลดลงของแมงกานีสเมื่อเติมแมกนีเซียม สามารถเป็นข้อพิสูจน์ได้ว่า การเติมแมกนีเซียมสามารถลดความเป็นพิษแมงกานีสของยางพาราได้ โดยการลดความเข้มข้นของแมงกานีสในพืช และการใส่แมกนีเซียมในอัตราที่สูงเกินทำให้ชะงักการเจริญเติบโตของต้นยางพารา

สำหรับการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ความเข้มข้นแมงกานีสสูงขึ้นแต่ไม่มีผลต่อธาตุอาหารอื่น ในขณะที่การเติมแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารที่ความเข้มข้นสูงทำให้ลดความเข้มข้นไนโตรเจน โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในรากแขนง (สายใจ และคณะ, 2558) โดยความเข้มข้นของแมงกานีสในใบเกินค่าที่เหมาะสมที่นุชนารถ (2552) รายงานไว้ว่า อาจเป็นพิษต่อยางพารา คือ สูงกว่า 150 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึงแม้ว่า ในตำรับที่เติมแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ทำให้ใบของกล้ายางร่วงจนหมดต้นจึงไม่อาจมีข้อมูลในส่วนนี้ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลธาตุอาหารในใบที่ได้แสดงในตารางที่ 3.6 เพียงพอที่จะทำนายการเปลี่ยนแปลงของธาตุอาหารที่เกิดจากอิทธิพลของแมกนีเซียมและแมงกานีส

การเติมอะลูมินัมทำให้ความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบ ลำต้น และรากแขนงเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3.10) สอดคล้องกับการดูดซึมอะลูมินัมเซลล์หัวหอมที่เพิ่มขึ้น (Achary *et al*., 2008) โดยสะสมมากในราก (ภาพที่ 3.10) เนื่องจากพืชดูดซึมอะลูมินัมอย่างรวดเร็ว และอะลูมินัมแทบจะไม่เคลื่อนย้ายสู่ส่วนเหนือดิน (Mimmo *et al*., 2009) และลดความเข้มข้นแมงกานีสทั้งในใบและลำต้น (ภาพที่ 3.9) ในถั่วเหลืองที่เติมอะลูมินัมส่งผลลดการสะสมของแมงกานีสในราก ลำต้น และใบ (Yang *et al*., 2009) ทั้งนี้ ระดับความเข้มข้นของอะลูมินัมมีผลต่อแมงกานีสเช่นกัน โดยความเข้มข้นของอะลูมินัมในสารละลายที่ต่ำ มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการสะสมแมงกานีสในรากและส่วนเหนือ

ดินของถั่วฝักยาว แต่ที่ความเข้มข้นสูง (>100 μM) ลดการสะสมของแมงกานีสในส่วนเหนือดิน (Taylor *et al*., 1998)

นอกจากนี้ อะลูมินัมยังทำให้ไนโตรเจนในลำต้นและรากแขนงลดลง (ตารางที่ 3.16 และ 3.17) เช่นเดียวกับการสะสมไนโตรเจนและร้อยละไนโตรเจนในส่วนเหนือดินของข้าวโพดที่ลดลง (Gomes *et al*., 1985) เนื่องจากอะลูมินัมลดการดูดและการเคลื่อนย้ายไนโตรเจนสู่ส่วนเหนือดิน รวมถึงความเข้มข้นของโพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียมในรากแขนงลดลงเช่นกัน แต่ในลำต้นแคลเซียมกลับเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 3.17 และ 3.16) สอดคล้องกับอะลูมินัมที่มากเกินลดความเข้มข้นแมกนีเซียมในกล้าข้าว (Singh *et al*., 2011) โดยอะลูมินัมมีผลยับยั้งกิจกรรม $H^+$-ATPase ที่เยื่อหุ้มเซลล์ ส่งผลต่อเนื่องถึงการดันโปรตอนออก การลดลงของโพแทสเซียม เนื่องจากอะลูมินัมยับยั้งการดูดโพแทสเซียมไอออนผ่านช่องโพแทสเซียม ($K^+$ chanel; $K_{in}$) ที่ขนรากและเซลล์คุม โดยการปิดกันช่องโพแทสเซียมทำให้ช่องที่ปกตินำจะเปิดได้ปิดลงและเปลี่ยนแปลงการทำงานของช่องดังกล่าว (Liu and Luan, 2001)

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในใบและรากของยางพาราเพิ่มขึ้น เมื่อเติมอะลูมินัมหรือเติมทั้งสองธาตุร่วมกัน (ตารางที่ 3.15 และ 3.17) สอดคล้องกับการเติมอะลูมินัมเพิ่มความเข้มข้นฟอสฟอรัสทั้งในส่วนเหนือดินและรากของหญ้าข้าวไรย์ (ryegrass) (Randall and Vose, 1963) การเพิ่มขึ้นนี้อาจไม่ได้มาจากอิทธิพลของอะลูมินัมโดยตรง มีรายงานว่า การเติมอะลูมินัมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการดูดฟอสเฟตของ *Phaseolus vulgaris และ Phaseolus lunature* (mimmo *et al*., 2009) และการดูดฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นจากการชักนำโดยอะลูมินัมโดยส่วนใหญ่เป็นผลจากกระบวนการเมแทบอลิซึม โดยอะลูมินัมทำให้เซลล์สังเคราะห์ไซโตโครมได้น้อยลง (Randall and Vose, 1963)

การเพิ่มแมงกานีสทำให้ความเข้มข้นอะลูมินัมในใบและลำต้นมีแนวโน้มลดลง (ภาพที่ 3.10) ส่วนในรากแขนงกลับเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3.10) เช่นเดียวกับความเข้มข้นอะลูมินัมในรากข้าวสาลี (*Triticum aestivum*) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และในส่วนเหนือดินอยู่ในระดับคงที่ เมื่อเพิ่มแมงกานีสในความเข้มข้นที่สูงขึ้น (Blair and Taylor, 1997) และเพิ่มการสะสมของอะลูมินัมในส่วนรากและเหนือดินของถั่วฝักยาว เมื่อเติมแมงกานีสในความเข้มข้นสูง (> 50 μM) ในขณะที่ความเข้มข้นต่ำมีผลต่อการสะสมอะลูมินัมเพียงเล็กน้อย (Taylor *et al*., 1998) เนื่องจากแมงกานีสทำให้การสะสมอะลูมินัมในผนังเซลล์ของรากเพิ่มขึ้น (Yang *et al*., 2009) แมงกานีสยังลดความเข้มข้นของ

แมกนีเซียมในรากแขนง (ตารางที่ 3.17) การเพิ่มความเข้มข้นแมงกานีสในดินมากกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ทำให้ปริมาณแมกนีเซียมทั้งในรากและลำต้นชา (Venkatesan *et al*., 2007) ปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมในใบผักกาดขาวลดลง (Lee *et al*., 2011) โดยระดับแมงกานีสในดินที่สูงนั้นอาจนำไปสู่ความไม่สมดุลของธาตุอาหารอื่น โดยเฉพาะธาตุอาหารที่เป็นแคตไอออนประจุสองบวก เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียม เนื่องจากแมงกานีสมีส่วนร่วมในการแข่งขันของแคตไอออนอื่น และยับยั้งการผลิตขนรากและลดขนาดของปากใบ (Venkatesan *et al*., 2007) จึงมีผลลดการดูดธาตุอาหารดังกล่าว

## 5. ผลของแมงกานีสและอะลูมินัมต่อปริมาณคลอโรฟิลล์ทั้งหมด และกิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระในใบยางพารา

ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์สามารถเชื่อมโยงถึงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และนำไปสู่การเจริญเติบโตของพืช การเติมอะลูมินัมที่มากเกินทำให้ความเข้มข้นของคลอโรฟิลล์ในใบยางพาราลดลง (ตารางที่ 3.18) สอดคล้องกับอะลูมินัมลดปริมาณคลอโรฟิลล์ในต้นบีช (Ridolfi and Garrec, 2000) และในใบข้าว (Singh *et al*., 2011) เมื่อความเข้มข้นของอะลูมินัมในใบข้าวเกิน 500 ไมโครกรัมต่อกรัม (Kuo and Kao, 2003) โดยอะลูมินัมไปทำลายลาเมลลา (lamella) ของไทลาคอยด์ และเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบไขมันและโปรตีนของผนังไทลาคอยด์ อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่า ผลของอะลูมินัมต่อการสังเคราะห์ด้วยแสงไม่ใช่ผลจากความเป็นพิษโดยตรง แต่เป็นผลมาจากการที่อะลูมินัมชักนำให้ขาดแมกนีเซียม (Ridolfi and Garrec, 2000)

การวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระสามารถเป็นตัวบ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของอนุมูลอิสระได้ ถึงแม้การเพิ่มอะลูมินัมในความเข้มข้นที่สูงทำให้เกิดอนุมูลอิสระไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ($H_2O_2$) ไฮดรอกซิล (·OH) และซูเปอร์ออกไซด์ ($O_2^{\cdot-}$) (Achary *et al*., 2008) แต่งานทดลองนี้พบว่า แมงกานีสมีอิทธิพลต่อกิจกรรมเอนไซม์ CAT และ POD ในใบยางพารามากกว่าอะลูมินัม การเติมแมงกานีสทำให้กิจกรรม CAT ลดลง สอดคล้องกับในข้าวโพด (Hai-hua *et al*., 2009) แตงกวา (Jian-peng *et al*., 2009; Shi and Zhu, 2008; Shi *et al*., 2006) ถั่วลันเตา (Gangwar *et al*., 2010) องุ่น (Mou *et al*., 2011) และ *Allium cepa* (Achary *et al*., 2008) ที่ลดลงเช่นกัน เช่นเดียวกับกิจกรรม POD ที่ลดลง เมื่อเติมร่วมกับอะลูมินัม (ตารางที่3.18) สอดคล้องกับในองุ่น (Mou *et al.,* 2011) ถั่วเขียว (Sinha *et al*., 2006) และต้น *Phytolacca americana* (Zhao et al., 2012) ที่ลดลงเมื่อได้รับแมงกานีสมากเกิน ซึ่งเอนไซม์ทั้งสองนี้ทำหน้าที่เปลี่ยนอนุมูลอิสระไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นน้ำและออกซิเจน โดยเอนไซม์จะทำงานได้ดีและมีกิจกรรมเพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง แต่หากพืชยังคงมีสภาวะเครียดเพิ่มขึ้น เช่น มีปริมาณแมงกานีสสูงเกินที่เอนไซม์จะทำลายได้ ก็จะส่งผลให้

ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ กิจกรรมเอนไซม์จึงลดลง เช่นผลการทดลองในอุ่นที่พบว่า กิจกรรม CAT และ POD เพิ่มขึ้น เมื่อมีแมงกานีสไม่เกิน 30 มิลลิโมลาร์ และเมื่อเพิ่มแมงกานีสอีกทำให้กิจกรรมเอนไซม์ลดลง (Mou *et al*., 2011) แต่ในรากชากิจกรรมเอนไซม์ CAT เพิ่มขึ้น (Ghanati *et al*., 2005) แสดงให้เห็นว่า การทำงานของกิจกรรมเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระมีการตอบสนองต่อพืชแต่ละชนิดได้แตกต่างกัน

กิจกรรมเอนไซม์ SOD มีผลไม่แตกต่างกัน สอดคล้องกับงานทดลองของสายใจ และคณะ (2558) อาจเนื่องจากการเติมทั้งสองธาตุนี้ยังไม่มากพอที่จะทำให้เกิดอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ส่วนเกินในยางพารา ประกอบกับยางพาราเป็นไม้ยืนต้นที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศเขตร้อน จึงมีความต้านทานต่อแมงกานีสและอะลูมินัม อย่างไรก็ตามในพืชชนิดอื่นพบว่า ความเป็นพิษของอะลูมินัมทำให้กิจกรรม SOD ในกล้าข้าว (Meriga *et al*., 2004) ในรากชา (Ghanati *et al*., 2005) และในหัวหอมใหญ่ (*Allium cepa*) เพิ่มขึ้น (Achary *et al*., 2008) โดย SOD ในพืชมีหน้าที่ในการควบคุมและป้องกันอันตรายจากอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นผลผลิตจากกระบวนการเมแทบอลิซึมที่ผิดปกติ หรือในสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ความแห้งแล้ง ความเค็ม รวมถึงโลหะหนัก (Gill and Tuteja, 2010) การที่กิจกรรม SOD เพิ่มขึ้น แสดงว่า พืชเกิดการสร้างอนุมูลอิสระซูเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้น ซึ่งการเกิดอนุมูลอิสระในปริมาณมากส่งผลไปทำลายโมเลกุลกรดนิวคลีอิก กรดอะมิโน กรดไขมัน โปรตีน และรงควัตถุ ทำให้เซลล์พืชได้รับความเสียหายและตายในที่สุด (Scandalios, 1993)

## 6. แนวทางการจัดการลดแมงกานีสในดินปลูกยางพารา

จากผลของทั้งสองการทดลอง เมื่อดินปลูกยางพารามีแมงกานีสที่สกัดได้ในช่วง 38-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.2) และ 47-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (ตารางที่ 3.14) ยางพารายังสามารถเจริญเติบโตได้ แสดงให้เห็นว่า ยางพาราสามารถทนต่อแมงกานีสในความเข้มข้นที่สูงได้ อย่างไรก็ตาม ดินปลูกยางพาราในประเทศไทยสามารถมีแมงกานีสได้สูงสุดถึง 60, 134, 180 และ 215 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในภาคใต้ ตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันออก และภาคเหนือ ตามลำดับ (นุชนารถ และคณะ, 2556) โดยความเข้มข้นที่สูงนี้อาจส่งผลกระทบต่อยางพาราได้ ดังนั้น จำเป็นที่ต้องมีการจัดการเพื่อเพิ่มผลิตภาพการผลิตยางพาราให้สูงขึ้น สำหรับวิธีที่ใช้โดยทั่วมีหลายวิธี ได้แก่ การเพิ่มระดับ pH การเติมอินทรียวัตถุ การลดสภาพรีดักชัน การเติมธาตุอาหารที่เป็นปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส และอื่น ๆ ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดในบทที่ 1 หัวข้อ 2.5

ดินปลูกยางพาราในประเทศไทย มีปริมาณอินทรียวัตถุและความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำ (สมยศ และคณะ, 2536) เนื่องจากอยู่เขตร้อนชื้น มีอุณหภูมิสูงและฝนตกชุก ทำให้อินทรียวัตถุ

ถูกย่อยสลายอย่างรวดเร็ว และธาตุอาหารพืชสูญเสียโดยการชะละลายได้ง่าย ประกอบกับเกษตรกรใส่ปุ๋ยให้แก่ยางพาราน้อยมากไม่เพียงพอที่จะชดเชยกับปริมาณที่สูญเสียไป แต่สำหรับค่า pH ของดินปลูกยางทั้งในเขตปลูกยางเดิมและเขตปลูกยางใหม่อยู่ในระดับที่เหมาะสม (นุชนารถ, 2550) ดังนั้น การจัดการแมงกานีสในดินปลูกยางพารา ควรเริ่มตั้งแต่เพิ่มปริมาณอินทรียวัตถุในดินให้สูงขึ้น โดยการใส่วัสดุอินทรีย์ หรือปุ๋ยอินทรีย์ การเพิ่มอินทรียวัตถุในดินนอกจากจะช่วยปรับปรุงดินทั้งสมบัติทางกายภาพ และเคมีแล้ว ยังสามารถลดแมงกานีสในดินที่มีแมงกานีสมากเกินได้ โดยอินทรียวัตถุที่ย่อยสลายจะเกิดสารคีเลตกับแมงกานัสไอออนที่มากเกิน (Foy, 1984)

การใส่ปุ๋ยให้ยางพารา ทำให้ดินปลูกยางมีความอุดมสมบูรณ์เพิ่มขึ้น เมื่อต้นยางพาราได้รับธาตุอาหารอย่างเพียงพอ การเจริญเติบโตและการให้น้ำยางมีประสิทธิภาพสูงขึ้น รวมถึงเพิ่มความแข็งแรงทำให้สามารถต้านทานต่อสภาวะเครียดที่เข้ามาได้ เช่น โรค ความเค็ม ความแห้งแล้ง รวมถึงโลหะหนัก เช่น แมงกานีส เป็นต้น นอกจากนี้ การใส่ปุ๋ยทำให้ปริมาณธาตุอาหารที่มีสภาพเป็นปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเพิ่มขึ้น ทำให้สามารถลดการดูดใช้แมงกานีสของพืชได้ เนื่องจากสูตรปุ๋ยที่ใส่แก่ยางพาราไม่มีแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบ ทำให้แมกนีเซียมในดินมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของยางพารา ทางสถาบันวิจัยยางแนะนำให้ใส่ปุ๋ยคีเซอร์ไรต์อัตรา 80 กรัมต่อต้นต่อปี การใส่แมกนีเซียมจะเห็นได้ชัดว่า สามารถลดการดูดใช้แมงกานีสของยางพารา โดยทำให้มีความเข้มข้นแมงกานีสในทุกส่วนของพาราลดลง (ตารางที่ 3.11) ทั้งนี้ทั้งนั้น อัตราการใส่ และสัดส่วนที่เหมาะสมของธาตุอาหารเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งที่ต้องคำนึง การใส่ธาตุอาหารในอัตราที่สูงเกินทำให้จำกัดการเจริญเติบโตของพืช ดังการใส่แมกนีเซียมในอัตรา 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ที่ทำให้ยางพาราชะงักการเจริญเติบโตและตายในสุด (ภาพที่ 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 และ 3.6) เนื่องจากการใส่ธาตุอาหารในอัตราที่มากเกินทำให้ดินมีเกลือสะสมสูง และทำให้เกิดการขาดดุลกับธาตุอาหารอื่น

ดินปลูกยางพารามี pH อยู่ในระดับที่เหมาะสม (ตารางที่ 1.1) และในช่วง pH นี้ ทำให้แมงกานีสละลายออกมาได้ดี การเพิ่มระดับ pH ในดิน ทำให้ลดความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสในดินได้ อย่างไรก็ตาม การใส่ปูนในปริมาณที่มากเกินเพื่อปรับระดับ pH ของดินปลูกยางพาราไม่ค่อยเหมาะสม เนื่องจากการใส่ปูนทำให้แคลเซียมเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดใช้ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แมกนีเซียม และสังกะสีลดลง และทำให้สัดส่วนของธาตุอาหารในดินเปลี่ยนแปลง โดยเฉพาะแคลเซียมกับแมกนีเซียม (อิสริยาภรณ์ และคณะ, 2557) วัสดุปูนที่ใช้โดยทั่วไปเพื่อเพิ่มระดับ pH ในดิน ได้แก่ หินปูน ปูนขาว ปูนเผา ปูนโดโลไมต์ เป็นต้น การใช้โดโลไมต์นอกจากช่วยเพิ่มระดับ pH ดินแล้ว ยังให้ธาตุแมกนีเซียมด้วย ซึ่งเป็นธาตุปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส จึงเป็นวัสดุปูนที่แนะนำให้ใส่เพื่อลดแมงกานีสที่มากเกินในดิน มีรายงานว่า การใส่ปุ๋ยเคมีตามค่าวิเคราะห์ดินร่วม

กับโดโลไมต์ ทำให้ความเข้มข้นแมกนีเซียมเพิ่มขึ้น และลดความเข้มข้นของแมงกานีสในใบยางที่เปิดกรีดแล้วหลังจากปรับปรุงดินสองปี และยังส่งผลให้การเจริญเติบโตของยางพาราเพิ่มขึ้นด้วย (Damrongrak *et al*., 2015)

ในปัจจุบันเกษตรกรได้ขยายพื้นที่ปลูกยางพาราเพิ่มขึ้น โดยใช้พื้นที่นาร้าง ซึ่งเป็นพื้นที่ลุ่มมาปลูกยางพารา การปลูกยางพาราในพื้นที่ลุ่มทำให้การเจริญเติบโตของต้นยางช้า และเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ (อิสริยาภรณ์ คณะ, 2558) ในพื้นที่ดังกล่าวมีความเสี่ยงต่อการมีแมงกานีสมากเกิน เนื่องจากสภาพรีดักชันแมงกานิกไอออนจะถูกรีดิวซ์เป็นแมงกานีสไอออน ซึ่งละลายน้ำได้ง่าย (ยงยุทธ, 2552) ดังนั้น การจัดการแมงกานีสในดินปลูกยางพาราควรดำเนินหลาย ๆ วิธีร่วมกัน ทั้งการใส่อินทรียวัตถุ ปุ๋ย และปูน และหลีกเลี่ยงการใช้พื้นที่ลุ่มที่มีแมงกานีสสูงมาปลูกยางพารา การใส่ธาตุอาหารที่เป็นปฏิปักษ์ควรคำนึงถึงอัตราและสัดส่วนที่เหมาะสม

# บทที่ 5

## สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาอันตรกิริยาของแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อการดูดแมงกานีส และการเจริญเติบโตของยางพารา สรุปผลการทดลองได้ ดังนี้

1. **ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตของยางพารา** ยางพาราที่ได้รับแมกนีเซียม 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตหยุดชะงักทั้งในส่วนเหนือดินและราก ทำให้มีความสูงต่ำกว่าตำรับอื่น ส่วนการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยางพาราเจริญเติบโตไม่ต่างจากตำรับควบคุม
2. **ผลของแมกนีเซียมและแมงกานีสต่อการดูดธาตุอาหารของยางพารา** ยางพาราดูดใช้แมงกานีสลดลงทั้งส่วนเหนือดินและราก เมื่อเติมแมกนีเซียม 2 เซนติโมลต่อกิโลกรัม และลดการดูดแคลเซียมในส่วนเหนือดิน ส่วนฟอสฟอรัสในรากเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแมกนีเซียมเป็น 10 เซนติโมลต่อกิโลกรัม ส่วนการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยางพาราสะสมแมงกานีสเพิ่มขึ้น โดยมีความเข้มข้นมากเกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม
3. **ผลของแมงกานีสและอะลูมินัมต่อการเจริญเติบโตของยางพารา** ยางพาราที่ได้รับอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การเจริญเติบโตหยุดชะงัก ทั้งความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางลำต้น และน้ำหนักแห้งทั้งส่วนเหนือดินและราก ส่วนการเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยางพารามีการเจริญเติบโตไม่ต่างจากตำรับควบคุม
4. **ผลของแมงกานีสและอะลูมินัมต่อการดูดธาตุอาหารของยางพารา** ยางพาราดูดใช้และสะสมแมงกานีสในส่วนเหนือดินและรากเกิน 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม เมื่อเติมแมงกานีส 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และความเข้มข้นแมงกานีสลดลง เมื่อเติมอะลูมินัม 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และทำให้ยางพาราดูดอะลูมินัมเพิ่มขึ้น โดยสะสมมากในราก และยังลดไนโตรเจน แคลเซียม โพแทสเซียม แมกนีเซียมในราก แต่ฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น

กล่าวโดยสรุป การเติมแมกนีเซียมและอะลูมินัมสามารถลดความเข้มข้นของแมงกานีสในยางพาราได้ โดยอะลูมินัมมีผลต่อความเข้มข้นของแมงกานีสในส่วนเหนือดินมากกว่าส่วนราก ทั้งนี้ ความเข้มข้นของธาตุทั้งสอง (Mg และ Al) ที่เหมาะสมสามารถลดแมงกานีสได้สูงสุด และการเติมธาตุทั้งสองในความเข้มข้นที่มากเกินไป (Mg 10 $cmol_c\ kg^{-1}$) นอกจากทำให้แมงกานีสลดลงเล็กน้อย ยังทำให้ยางพาราชะงักการเจริญเติบโต ในขณะเดียวกัน การเติมแมงกานีสลดความเข้มข้นของธาตุแมกนีเซียมและอะลูมินัมเช่นกัน และแมงกานีสที่ระดับ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ที่เติมลงไปหรือ 1,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในยางพารา ยังไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของยางพารา แสดงให้เห็นว่า ยางพาราสามารถทนต่อสภาพที่ดินมีแมงกานีสสูงได้ และการใช้วิธีเพิ่มธาตุอาหารที่เป็นปฏิปักษ์ต่อแมงกานีส เพื่อลดแมงกานีสนั้น สามารถทำได้ นอกจากทำให้ความเข้มข้นของแมงกานีสลดลงแล้ว ยังเป็นการเพิ่มปุ๋ยแมกนีเซียมด้วย ทั้งนี้เพื่อให้ลดการดูดแมงกานีสอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และไม่ทำให้ยางพาราชะงักการเจริญเติบโต ควรต้องศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างแมกนีเซียมและอะลูมินัมต่อแมงกานีสในยางพารา รวมถึงรูปของแมกนีเซียมอื่นที่ใส่ ได้แก่ โดโลไมต์ และควรมีการศึกษาภายใต้สภาพแปลงจริง เพื่อสามารถนำไปส่งเสริมให้แก่เกษตรกรได้

# เอกสารอ้างอิง

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

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

จักรกฤษณ์ พูนภักดี, จำเป็น อ่อนทอง, ขวัญตา ขาวมี และสุพรรณี ดวงทอง. 2556. รูปของโพแทสเซียมในดินที่ดอนและที่ลุ่มที่ใช้ปลูกยางพาราในจังหวัดสงขลา. แก่นเกษตร 41 ฉบับพิเศษ 2 : 21-32.

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

นุชนารถ กังพิศดาร. 2550. การใช้ปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพกับยางพาราหลังเปิดกรีดตามค่าวิเคราะห์ดิน. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

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.

ปราโมทย์ ทิมขำ, สมศักดิ์ มณีพงศ์, มนตรี อิสรไกรศีล และกฤษดา สังข์สิงห์. 2554. การประเมินสถานะธาตุอาหารโดยวิธี Omission trial เพื่อจัดการดินปลูกยางพารา. (แผ่นบันทึกข้อมูล) การประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติ ครั้งที่ 2 ณ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 11-13 พฤษภาคม 2554.

ปราโมทย์ สุวรรณมงคล และสมเจตน์ ประทุมมินทร์. 2530. การปลูกยางพาราในดินที่ระบายน้ำเลว. ว.ยางพารา 8 : 18-30.

พิเชษฐ ไชยพานิชย์, จำนงค์ คงศิลป์, อารักษ์ จันทุมา, ธีรชาต วิชิตชลชัย และยุทธกร ธรรมศิริ. 2547. ระดับธาตุอาหารในดินและในต้นยางพาราในเขตปลูกยางใหม่. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2552. ธาตุอาหารพืช. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ระวี เจียรวิภา, อิบรอเฮง ยีดำ และวัชรีพร นาคทุ่งเตา. 2550. ผลของการให้ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์และสารปรับปรุงดินต่อการเจริญเติบโต และมวลชีวภาพของต้นกล้ายางพารา. ว. วิทย์. กษ. 38 : 314-317.

ศรัทธา บุญรอด, สมชัย อนุสนธิ์พรเพิ่ม, วัญเพ็ญ วิริยะกิจนทีกุล, อัญชลี สุทธิประการ และ C. Hammecker. 2552. ความอุดมสมบูรณ์และศักยภาพของดินปลูกยางพาราในพื้นที่ อำเภอพระยืน จังหวัด ขอนแก่น. แก่นเกษตร 37 : 121-130.

ศุภมิตร ลิมปีชัย. 2544. การเพิ่มประสิทธิภาพการปลูกสร้างสวนยางในเขตปลูกยางเดิม. การประชุมวิชาการยางพารา ประจำปี 2544 ณ โรงแรมเชียงใหม่ฮิลล์ อ.เมือง จ.เชียงใหม่ 20-22 กุมภาพันธ์ 2544 หน้า 159-178.

สถาบันวิจัยยาง. 2547. การใช้ปุ๋ยและการปรับปรุงดินในสวนยาง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

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

สถาบันวิจัยยาง. 2556. การจัดการสวนยางอย่างยั่งยืน. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

สมยศ สิธุระหัส, พิเชษฐ ไชยพานิชย์ และสุทัศน์ ด่านสกุลผล. 2536. การจำแนกดินปลูกยางพาราตามความอุดมสมบูรณ์ของดิน. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

สายใจ สุชาติกูล. 2554. การจัดทำค่ามาตรฐานเพื่อการวินิจฉัยสถานะธาตุอาหารในดินและในสำหรับยางพาราก่อนเปิดกรีด. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยวลัย-ลักษณ์.

สายใจ สุชาติกูล, สมศักดิ์ มณีพงศ์ และมนตรี อิสรไกรศีล. 2554. การจัดทำค่ามาตรฐานเพื่อการประเมินธาตุอาหารของยางพาราก่อนเปิดกรีด. การประชุมวิชาการดินและปุ๋ย ครั้งที่ 2 ณ ศูนย์การศึกษาและฝึกอบรมนานาชาติ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 11-13 พฤษภาคม 2554 หน้า 38-39.

สายใจ หมื่นภักดี, จำเป็น อ่อนทอง และขวัญตา ขาวมี. 2558. ผลของแมงกานีสต่อการเจริญเติบโตและการดูดใช้ธาตุอาหารของต้นกล้ายางพารา. (แผ่นบันทึกข้อมูล) การประชุมวิชาการดินและปุ๋ยแห่งชาติ ครั้งที่ 4 ณ โรงแรมหรรษา เจบี อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 2-4 กรกฎาคม 2558.

สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2555. ข้อมูลการผลิตสินค้าเกษตร. กรุงเทพฯ : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

สุเมธ ลิ่มมณีธร, สายัณห์ สดุดี และอิบรอเฮม ยีดำ. 2550. ผลการให้น้ำต่อการตอบสนองทางสรีรวิทยาและผลผลิตน้ำยางของยางพารา (*Havea brasiliensis*) ช่วงฤดูแล้ง. ว. สงขลานครินทร์ วทท. 29 : 601-613.

สุรศักดิ์ เสรีพงศ์. 2537. อิทธิพลของปุ๋ยคอกต่อความเป็นพิษของอะลูมินัมในข้าวฟ่าง. วารสารเกษตร 10 : 216-225.

สุริยันตร์ ฉะอุ่ม, กัลยาณี สามิภักดิ์, เกรียงไกร โมสาลียานนท์, รื่นฤดี วนัสสกุล, กัณยารัตน์ สุไพบูลย์วัฒน และเฉลิมพล เกิดมณี. 2542. ผลของความเค็มต่อการเจริญเติบโต ปริมาณน้ำในใบ และปริมาณคลอโรฟิลล์ของต้นยูคาลิปตัสในสภาพการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช. การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 37 ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 3-5 กุมภาพันธ์ 2542 หน้า 205-210.

โสภา โพธิวัตถุธรรม, เวท ไทยนุกูล, ชูจิตต์ สงวนทรัพยากร, ปูลิ นิลพรหม, ออมสิน ศรีทองใส และลิขิต นวลศรี. 2536. ปริมาณธาตุอาหารรองในดินปลูกยางบางชุด. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

โสภา โพธิวัตถุธรรม. 2545. การใช้ปุ๋ยอินทรีย์ร่วมกับปุ๋ยเคมีในสวนยาง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

โสภา โพธิวัตถุธรรม, พิเชษฐ ไชยพานิชย์ และอนุสรณ์ แรมลี. 2546. อิทธิพลของปุ๋ยอินทรีย์อัตราต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพของปุ๋ยเคมีกับต้นยางหลังเปิดกรีดในเขตแห้งแล้ง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

หทัยกานต์ นวลแก้ว. 2557. สถานะธาตุอาหารหลักและการใช้ปุ๋ยกับยางพาราที่ปลูกในพื้นที่ลุ่มและที่ดอนในจังหวัดสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

อารมณ์ โรจน์สุจิตร, เก็บ หนูศรี และสมยศ สินธุระหัส. 2541. ผลของ pH และธาตุอาหารพืชบางชนิดต่อการเจริญ และความรุนแรงของเชื้อราโรครากขาวของยางพารา. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

อารมณ์ โรจน์สุจิตร, อุไร จันทรประทิน, พเยาว์ ร่มรื่นสุขารมย์, นริสา จันทร์เรือง, สโรชา กรีธาพล, วันเพ็ญ พฤกษ์วิวัฒน์, สุเมธ พฤกษวรุณ, วลัยพร ศศิประภา, ปราโมทย์ คาพุทธ และประภาพงษ์อุธา. 2553. ประเมินความสูญเสียทางเศรษฐกิจของยางพาราสาเหตุจากโรครากขาวในพื้นที่ปลูกยางของประเทศไทย. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร.

อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์, จำเป็น อ่อนทอง และชัยรัตน์ นิลนนท์. 2557. ผลของความเป็นกรดเป็นด่างของดินและจุลธาตุบางชนิดต่อการเจริญเติบโตและการดูดดึงธาตุอาหารพืชในยางพารา. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า 32 : 36-44.

อิสริยาภรณ์ ดำรงรักษ์, ประยูร ดำรงรักษ์ และศศิธร พังสุบรรณ. 2558. สมบัติของดิน สถานะธาตุอาหารพืชในใบ และการเจริญเติบโตของยางพาราที่ปลูกในพื้นที่นาร้าง. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ 2 : 17-22.

Achary, V.M.M., Jena, S., Panda, K.K. and Panda, B.B. 2008. Aluminium induced oxidative stress and DNA damage in root cells of *Allium cepa* L. Ecotoxicology and Environmental Safety 70 : 300-310.

Alscher, R.G., Erturk, N. and Heath, L.S. 2002. Role of superoxide dismutases (SODs) in controlling oxidative stress in plants. Journal of experimental botany 53 : 1331-1341.

Alvarez, I., Sam, O., Reynaldo, I., Testillano, P., Risueno, C.M. and Arias, M. 2012. Morphological and cellular changes in rice roots (*Oryza sativa* L.) caused by Al stress. Botanical Studies 53 : 67-73.

Anza, M., Riga, P. and Garbisu, C. 2005. Time course of antioxidant responses of *Capsicum annuum* subjected to a progressive magnesium deficiency. Annals of applied biology 146 : 123-134.

Barber, S.A. 1984. Soil Nutrition Bioavailability. New York : A Wiley-Interscience Publication.

Blair, L.M. and Taylor, G.J. 1997. The nature of interaction between aluminum and manganese on growth and metal accumulation in *Triticum aestivum*. Environmental and Experimental Botany 37 : 25-37.

Bowler, C., Slooten, L., vandenbranden, S., Rycke, R.D., Botterman, J., Cybesma, C., Montagu, M.V. and Inze, D. 1991. Manganese superoxide dismutase can reduce cellular damage mediated by oxygen radicals in transgenic plants. The EMBO Journal 10 : 1723-1732.

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

Bromfield, S.M. 1956. Oxidation of manganese by soil microorganisms. Australian Journal of Biological Sciences 9 : 238-252.

Brown, P.H., Graham, R.D. and Nicholas, D.J.D. 1984. The effects of manganese and nitrate supply on the levels of phenolics and lignin in young wheat plants. Plant and Soil 81 : 437-440.

Chatterjee, C., Nautiyal, N. and Agarwala, S.C. 1994. Influence of changes in manganese and magnesium supply on some aspects of wheat physiology. Soil Science and Plant Nutrition 40 : 191-197.

Chaudhuri, P.S., Nath, S. and Paliwal, R. 2008. Earthworm population of rubber plantations (*Hevea brasiliensis*) in Tripura, India. Tropical ecology 49 : 225-234.

Clark, R.B. 1984. Physiological aspects of calcium, magnesium and molybdenum deficiencies in plants. *In* Soil Acid and Liming. (ed. F. Adams) pp. 99-170. Madison : Wisconsin USA.

Da Costa, B.M.T., Keasling, J.D. and Cornish, K. 2005. Regulation of rubber biosynthetic rate and molecular weight in *Hevea brasiliensis* by metal cofactor. Biomacromolecules 6 : 279-289.

Da Costa, B.M.T., Keasling, J.D., McMahan, C.M. and Cornish, K. 2006. Magnesium ion regulation of in vitro rubber biosynthesis by *Parthenium argentatum* Gray. Phytochemistry 67 : 1621-1628.

Damrongrak, I., Onthong, J. and Nilnond, C. 2015. Effect of fertilizer and dolomite applications on growth and yield of tapping rubber trees. Songklanakarin Journal of Science and Technology 37 : 643-650.

Davis, J.G. 1996. Soil pH and magnesium effects on manganese toxicity in peanuts. Journal of plant nutrition 19 : 535-550.

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.

Ducic, T. and polle, A. 2005. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. Brazilian Journal of plant physiology 17 : 103-112.

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.

Foy, C.D. 1984. Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicities in acid soil. *In* Soil Acid and Liming. (ed. F. Adams) pp. 57-97. Madison : Wisconsin USA.

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 Horticulturae 126 : 467-474.

Ghanati, F., Morita, A. and Yokota, H. 2005. Effects of aluminum on the growth of tea plant and activation of antioxidant system. Plant and Soil 276 : 133-141.

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.

Gomes, M.M.S., Cambraia, J., Sant'anna, R. and Estevão, M.M. 1985. Aluminum effects on uptake and translocation of nitrogen in sorghum (*Sorghum bicolor*, L. Moench). Journal of Plant Nutrition 8 : 457-465.

Graven, E.H., Attoe, O.J. and Smith, D. 1965. Effect of liming and flooding on manganese toxicity in alfalfa. Soil Science Society of America Journal 29 : 702-706.

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.

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.

Heenan, D.P. and Campbell, L.C. 1981. Influence of potassium and manganese on growth and uptake of magnesium by soybeans (*Glycine max* (L.) Merr. cv. Bragg). Plant and Soil 61 : 447-456.

Heenan, D.P. and Campbell, L.C. 1983. Manganese and iron interaction on their uptake and distribution in soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). Plant and Soil 70 : 317-326.

Jiang, H.X., Chen, L.S., Zheng, J.G., Han, S., Tang, N. and Smith, B.R. 2008. Aluminum-induced effects on Photosystem II photochemistry in *Citrus* leaves assessed by the chlorophyll a fluorescence transient. Tree Physiology 28 : 1863-1871.

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.

Kang, D., Seo, Y., Futakuchi, K., Vijarnsorn, P. and Ishii, R. 2011. Effect of aluminum toxicity on flowering time and grainyield on rice genotypes differing in Al-tolerance. Journal of Crop Science and Biotechnology 14 : 305-309.

Khabaz-Saberi, H., Setter, T.L. and Waters, I. 2006. Waterlogging induces high to toxic concentrations of iron, aluminum, and manganese in wheat varieties on acidic soil. Journal of Plant Nutrition 29 : 899-911.

Khan, A.A. and McNeilly, T. 1998. Variability in aluminium and manganese tolerance among maize accessions. Genetic Resources and Crop Evolution 45 : 525-531.

Khare, T., Desai, D. and Kumar, V. 2012. Effect of $MgCl_2$ stress on germination, plant growth,chlorophyll content, proline content and lipid peroxidation in sorghum cultivars. Journal of Stress Physiology & Biochemistry 8 : 169-178.

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.

Kobayashi, H., Masaoka, Y. and Sato, S. 2005. Effects of excess magnesium on the growth and mineral content of rice and *Echinochloa*. Plant Production Science 8 : 38-43.

Kuo, M.C. and Kao, C.H. 2003. Aluminum effects on lipid peroxidation and antioxidative enzyme activities in rice leaves. Biologia plantarum 46 : 149-152.

Le Bot, J., Goss, M.J., Carvalho, M.J.G.P.R., Van Beusichem, M.L. and Kirkby, E.A. 1990. The significance of the magnesium to manganese ratio in plant tissues for growth and alleviation of manganese toxicity in tomato (*Lycopersicon esculentum*) and wheat (*Triticum aestivum*) plants. Plant and Soil 124 : 205-210.

Lee, T.J., Luitel, B.P. and Kang, W.H. 2011. Growth and physiological response to manganese toxicity in chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *campestris*). Horticulture, Environment, and Biotechnology 52 : 252-258.

Liu, K. and Luan, S. 2001. Internal aluminum block of plant inward $k^+$ channels. The Plant Cell 13 : 1453-1465.

Maas, E.V., Moore, D.P. and Mason, B.J. 1969. Influence of calcium and magnesium on manganese absorption. Plant physiology 44 : 796-800.

Meriga, B.B., Reddy, B.K., Rao, K.R., Reddy, L.A. and Kishor, P.B.K. 2004. Aluminium-induced production of oxygen radicals, lipid peroxidation and DNA damage in seedlings of rice (*Oryza sativa*). Journal of plant physiology 161 : 63-68.

Mimmo, T., Sciortino, M., Ghizzi, M., Gianquinto, G. and Gessa, C.E. 2009. The influence of aluminium availability on phosphate uptake in *Phaseolus vulgaris* L. and *Phaseolus lunatus* L. Plant Physiology and Biochemistry 47 : 68-72.

Mishra, N.P., Mishra, R.K., and Singhal, G.S. 1993. Changes in the activities of anti-oxidant enzymes during exposure of intact wheat leaves to strong visible light at different temperatures in the presence of protein synthesis inhibitors. Plant Physiology 102 : 903-910.

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.

Navarro, J.M., Botella, M.A., Cerdá, A., and Martinez, V. 2001. Phosphorus uptake and translocation in salt-stressed melon plants. Journal of Plant Physiology 158 : 375-381.

Nogueira, M.A., Nehls, U., Hampp, R., Poralla, K., and. Cardoso, E.J.B.N. 2007. Mycorrhiza and soil bacteria influence extractable iron and manganese in soil and uptake by soybean. Plant Soil 298 : 273-284.

Papadakis, I.E., Giannakoula, A., Therios, I.N., Bosabalidis, A.M., Moustakas, M. and Nastou, A. 2007. Mn-induced changes in leaf structure and chloroplast ultrastructure of *Citrus volkameriana* (L.) plants. Journal of plant physiology 164 : 100-103.

Park, S.W., Lawrence, B.C., Linden, C.J. and Vivanco, M.J. 2002. Isolation and characterization of a novel ribosome-inactivating protein from root cultures of pokeweed and its mechanism of secretion from roots. Plant physiology 130 : 164-178.

Patil, J.D. and Patil, N.D. 1981. Effect of calcium carbonate and organic matter on the growth and concentration of iron and manganese in sorghum (*Sorghum bicolor*). Plant and Soil 60 : 295-300.

Porter, G.S., Bajita, J.B., Hue, N.V. and Strand, D. 2004. Manganese solubility and phytotoxicity affected by soil moisture, oxygen levels, and green manure additions. Communication in soil science and plant analysis 35 : 99-116.

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.

Ranade-malvi**,** U. 2011. Interaction of micronutrients with major nutrients with special reference to potassium. Karnataka Journal of Agricultural Sciences 24 : 106-109.

Randall, P.J. and Vose, P.B. 1963. Effect of aluminum on uptake & translocation of phosphorus by perennial ryegrass. Plant physiology 38 : 403-409.

Ridolfi, M. and Garrec, J. 2000. Consequences of an excess Al and a deficiency in Ca and Mg for stomatal functioning and net carbon assimilation of beech leaves. Annals of forest science 57 : 209-218.

Scandaliios, J.G. 1993. Oxygen stress and superoxide dismutases. 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., Zue, Z., Xu, M., Qian, Q. and Yu, J. 2006. Effect of excess on the antioxidant system in *Cucumis sativus* L. under two light intensities. Environmental and Experimental Botany 58 : 197-205.

Shi, Q. and Zhu, Z. 2008. Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber. Environmental and experimental botany 63 : 317-326.

Silva, I.R., Ferrufino, A., Sanzonowicz, C., Smith, T.J., Israel, D.W. and Junior, T.E.C. 2005. Interactions between magnesium, calcium and aluminum on soybean root elongation. Revista Brasileira de Ciência do Solo 29 : 747-754.

Simon, J.M., Wilcox, G.E., Simini, M., Elamin, O.M. and Decoteau, D.R. 1986. Ideintification of manganese toxicity and magnesium deficiency on melons grown in low-pH soils. HortScience 21 : 1383-1386.

Singh, V.P., Tripathi, D.K., Kumar, D. and Chauhan, D.K. 2011. Influence of exogenous silicon addition on aluminium tolerance in rice seedlings. Biological trace element research 144 : 1260-1274.

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.

Stêpniewska, Z., Sochaczewska, A., Woliñska, A., Szafranek-Nakonieczna, A. and Paszczyk, M. 2010. Manganese release from peat soils. International Agrophysics 24 : 369-374.

Taylor, G.J., Blamey, F.P.C. and Edwards, D.G. 1998. Antagonistic and synergistic interactions between aluminum and manganese on growth of *Vigna unguiculata* at low ionic strength. Physiologia Plantarum 104 : 183-194.

Tewari, R.K., Kumar, P. and Sharma, P.N. 2006. Magnesium deficiency induced oxidative stress and antioxidant responses in mulberry plants. Scientia horticulturae 108 : 7-14.

Tewari, R.K., Kumar, P. and Sharma, P.N. 2013. Oxidative stress and antioxidant responses of mulberry (*Morus alba*) plants subjected to deficiency and excess of manganese. Acta Physiologiae Plantarum 35 : 3345-3356.

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.

Weerasuriya, S.M. and Yogaratnam, N. 1989. Effects of potassium and magnesium on leaf and bark nutrient contents of young *Hevea brasiliensis*. Journal of the Rubber Research Institute of Sri Lanka 69 : 1-20.

Wu, W., Peters, J. and Berkowitz, G.A. 1991. Surface charge-mediated effects of $Mg^{2+}$ on $K^{+}$ flux across the chloroplast envelope are associated with regulation of stromal pH and photosynthesis. Plant Physiology 97 : 580-587.

Xu, X., Shi, J., Chen, X., Chen, Y. and Hu, T. 2009. Chemical forms of manganese in the leaves of manganese hyperaccumulator *Phytolacca acinosa* Roxb. (Phytolaccaceae). Plant Soil 318 : 197-204.

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 and 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.

Zhong-lei, X., De-ming, D., Guo-zhang, B., Sheng-tian, W., Yao-guo, D. and Li-min, Q. 2001. Aluminum content of tea leaves and factors affecting the uptake of aluminum from soil into tea leaves. Chinese geographical science 11 : 87-91.

# ประวัติผู้เขียน

**ชื่อ สกุล** นายสูซัน บือราเฮง

**รหัสประจำตัวนักศึกษา** 5610620032

**วุฒิการศึกษา**

| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|---|---|---|
| วิทยาศาสตรบัณฑิต (เกษตรศาสตร์) | มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2556 |

**ทุนการศึกษา**

ทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ทุนโครงการเรียนดีสำหรับนักศึกษาปริญญาโท คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลา-นครินทร์

**การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน**

สูซัน บือราเฮง, จำเป็น อ่อนทอง และขวัญตา ขาวมี. 2559. อันตรกิริยาระหว่างอะลูมินัมและแมงกานีสที่มากเกินในกล้ายางพาราพันธุ์ RRIM 600. วารสารพืชศาสตร์สงขลานครินทร์ 3 : 19-27.