

บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

ธาตุอาหารจุลภาค (จุลธาตุ) ที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบันมี 8 ธาตุ คือ เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โมลิบดีนัม (Mo) โบรอน (B) คลอรีน (Cl) และนิเกิล (Ni) ธาตุอาหารพืชกลุ่มนี้พืชมีความต้องการในปริมาณน้อย แต่มีความสำคัญไม่น้อยกว่าธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง เนื่องจากธาตุอาหารจุลภาคเป็นธาตุอาหารพืชที่มีความสำคัญต่อการดำเนินกิจกรรมของเซลล์ ตั้งแต่กระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์ กระบวนการสังเคราะห์แสง เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ กระตุ้นหรือปลุกฤทธิ์ (activator) การทำงานของเอนไซม์ เร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์หรือสลายสารต่าง ๆ และเป็นตัวพา (carrier) สารภายในเซลล์ เป็นต้น แต่เกษตรกรและนักวิชาการเกษตรให้ความสนใจธาตุอาหารจุลภาคน้อยกว่าธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง อาจเนื่องจากดินส่วนใหญ่ในประเทศไทยมีปริมาณธาตุอาหารจุลภาคในปริมาณที่เพียงพอ แต่มีดินบางสภาพเช่นกันที่ทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคลดลง เช่น ดินเนื้อปูน (calcareous soil) ที่มักพบปัญหาการขาดธาตุเหล็กและสังกะสี หรือดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมากเกินไปก็จะลดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาค โดยเฉพาะสังกะสี ปัจจุบันดินสวนไม้ผล เช่น สวนทุเรียน (พรวิน และสมิตรา, 2548) สวนลำไย (ยุทนา และคณะ, 2543) สวนลิ้นจี่ (อรุณศิริ และคณะ, 2546) และสวนลองกอง (สุรชาติ และคณะ, 2547) พบว่า ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงมากจนอาจทำให้พืชขาดธาตุอาหารจุลภาคได้ ซึ่งพบในทุเรียน (สมิตรา และคณะ, 2544) และลำไย (ยุทนา และคณะ, 2543) โดยการขาดธาตุอาหารจุลภาคจะทำให้ความสมบูรณ์ของต้น และผลผลิตลดลง เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวเกษตรกรจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์พืช เพื่อประเมินสถานะของธาตุอาหารในเนื้อเยื่อดัชนี (index tissue) โดยเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นมาตรฐานของพืชชนิดเดียวกัน ซึ่งปัจจุบันไม้ผลของไทยหลายชนิดได้มีการสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานเป็นของตัวเอง เช่น ทุเรียน (สมิตรา และคณะ, 2545) มังคุด (สมิตรา, 2549) ลำไย (ยุทนา และคณะ, 2543) มะม่วง (อัศจรรย์, 2545) และลิ้นจี่ (อรุณศิริ และคณะ, 2546) เป็นต้น และถ้าประเมินสถานะธาตุอาหารจุลภาคในพืช พบว่า อยู่ในระดับต่ำหรือขาดแคลนจำเป็นต้องมีการให้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาค เพื่อเพิ่มความเข้มข้นให้อยู่ในระดับปกติหรือระดับเพียงพอ ซึ่งทำให้พืชมีความสมบูรณ์ต้น และปริมาณผลผลิตเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับผลการศึกษาของอัศจรรย์ (2545) ซึ่งให้ธาตุอาหารจุลภาคร่วมกับธาตุอาหารหลักสามารถเพิ่มปริมาณช่อดอก และผลผลิตของมะม่วง เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ปุ๋ยธาตุอาหารหลักเพียงอย่างเดียว

สำหรับลองกองจัดเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของภาคใต้ และมีการจัดการปุ๋ยเช่นเดียวกับไม้ผลทั่วไป ทำให้ดินมีการสะสมฟอสฟอรัสในปริมาณสูงเช่นกัน โดยสวนลองกองบางแห่งพบว่าปริมาณฟอสฟอรัสสะสมสูงถึง 935 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (มณูญ, 2546) และในพื้นที่เดียวกันนี้ก็พบว่าใบลองกองที่เกิดใหม่มีขนาดเล็ก และมียี่เขี้ยวจาง โดยเฉพาะยอดที่เกิดหลังจากยอดอื่นๆ จะปรากฏลักษณะดังกล่าวเด่นชัด ซึ่งสภาพดังกล่าวคาดว่าจะเกิดจากขาดสังกะสี และทองแดง เนื่องจากมีการรายงานว่าการพ่นธาตุอาหารจุลภาคเหล่านี้ให้กับลองกอง สามารถเพิ่มพื้นที่ใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ได้ และปริมาณสารประกอบอินทรีย์ภายในเซลล์ได้ (พิรุณ, 2548) และยังช่วยให้ใบเข้าสู่ระยะเพสลาดได้เร็วขึ้น แต่การที่จะทราบสถานะของธาตุอาหารจุลภาคว่าอยู่ในระดับใด จำเป็นต้องมีการศึกษาสถานะของธาตุอาหารจุลภาคจากกลุ่มต้นลองกองที่ให้ผลผลิตสูง โดยเชื่อว่าต้นลองกองดังกล่าวมีความเข้มข้นและสัดส่วนของธาตุอาหารพืชต่างๆ อยู่ในระดับที่เหมาะสม โดยการนำความเข้มข้นของธาตุอาหารจุลภาคที่วิเคราะห์ได้มาสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานของธาตุอาหารจุลภาค และปัจจุบันพบว่าดินในสวนลองกองมีการสะสมฟอสฟอรัสสูงมาก ดังนั้นจึงได้ศึกษาการตอบสนองการให้ธาตุอาหารจุลภาคต่อการเปลี่ยนแปลงและการพัฒนาของใบ ความสมบูรณ์ของต้น และการออกดอกของลองกอง ในสภาพที่ต้นลองกองเจริญเติบโตในดินที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสะสมอยู่สูง เพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการปุ๋ยและธาตุอาหารจุลภาคสำหรับลองกองต่อไป

2. ตรวจสอบเอกสาร

2.1 ลองกอง

2.1.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ลองกองมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Aglaia dookoo* Griff. เป็นพืชสกุลเดียวกับ ลางสาด และตุง (วิจิตร และคณะ, 2537) สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาพอากาศแบบร้อนชื้น และมีแสงแดดรำไร ลักษณะลำต้นของลองกองค่อนข้างกลม ผิวเปลือกลำต้นเรียบ ใบเป็นใบประกอบ แต่ละใบประกอบมีใบย่อยเรียงสลับกัน 5-9 ใบ แผ่นใบมีสีเขียว เป็นคลื่นเล็กน้อย ผิวใบเป็นมัน และเมื่อลองกองอายุ 5-6 ปี จะเริ่มให้ผลผลิต โดยการออกดอกของลองกองจะออกดอกกระจายบนก้านที่ยืดยาวออกมาจาก ลำต้นหรือกิ่ง และในช่วงนี้ลองกองจะมีการแตกยอดอ่อนพร้อมกันด้วย โดยการออกดอกของลองกองในแต่ละพื้นที่จะไม่พร้อมกัน ขึ้นอยู่กับความพร้อมของต้นและสภาพแวดล้อม โดยลองกองที่ปลูกบริเวณภาคใต้ตอนบนจะให้ดอกก่อนภาคใต้ตอนล่าง สำหรับดอกลองกองเป็นดอกสมบูรณ์เพศ แต่เกสรตัวผู้ไม่มีชีวิต (อุไรวรรณ, 2542) ดังนั้นเมล็ดของลองกองจึงเป็นเมล็ดที่ไม่ได้เกิดจากการผสมเกสร และเมื่อลองกองติดผลประมาณ 13 สัปดาห์ ก็สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ (นพรัตน์, 2528; มุทิตา และคณะ, 2547)

2.2.2 สถานการณ์การผลิตและการใช้ปุ๋ยของลองกอง

ลองกองเป็นไม้ผลที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของภาคใต้ เนื่องจากพื้นที่ปลูกลองกองร้อยละ 78.94 ของพื้นที่ปลูกทั่วประเทศอยู่ในภาคใต้ และเป็นไม้ผลที่ปลูกมากอันดับที่ 3 ของภาคใต้ (160,837 ไร่) รองจากทุเรียนและมังคุด (ดัดแปลงจาก กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550) และในปี 2549 ลองกองในภาคใต้ได้ให้ผลผลิตประมาณ 56,526 ตัน (สำนักส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5 จังหวัดสงขลา, 2550) หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 1.87 พันล้านบาท สำหรับการใส่ปุ๋ยลองกองที่ให้ผลผลิตแล้วจะใส่เหมือนกับไม้ผลทั่วไป โดยแบ่งการใส่ปุ๋ยออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะหลังเก็บผลผลิต ระยะก่อนออกดอก และระยะผลผลิตกำลังพัฒนา ซึ่งแต่ละระยะก็จะมี การให้ปุ๋ยผสมที่มีสูตรแตกต่างกัน โดยระยะหลังเก็บเกี่ยวจะใส่ปุ๋ยสูตรเสมอ เช่น 15-15-15 หรือ 16-16-16 เป็นต้น ระยะก่อนออกดอกเกษตรกรจะใส่ปุ๋ยสูตรที่มีฟอสฟอรัสสูง เช่น 12-24-12 หรือ 8-24-24 เป็นต้น และระยะผลผลิตกำลังพัฒนาจะใส่ปุ๋ยที่มีโพแทสเซียมสูง เช่น 13-13-21 หรือ 12-12-19 เป็นต้น และในระยะนี้เกษตรกรบางรายจะใส่ปุ๋ยสูตร 0-0-60 ร่วมด้วย โดยจะใส่เมื่อผลผลิตอายุ 10 สัปดาห์ (ผลมีการเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีเหลือง) การใส่ปุ๋ยในทุกระยะจะใส่ในอัตรา 1-3 กิโลกรัมต่อต้น (กลุ่มงานวิจัยดินและปุ๋ยพืชสวน, 2539)

2.2 ค่าความเข้มข้นมาตรฐานของธาตุอาหารพืช

ค่าความเข้มข้นมาตรฐาน (standard concentration value) หรือระดับธาตุอาหารที่เพียงพอ (nutrient element sufficiency range, sufficiency range: SR) หรือระดับธาตุอาหารที่เหมาะสม (optimal level) หรือระดับปกติ (normal range) เป็นความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ทำให้พืชให้ผลผลิต 80 - 90 % ของผลผลิตสูงสุด (จำเป็น และคณะ, 2549ก) ซึ่งค่าความเข้มข้นมาตรฐานดังกล่าวที่ได้ จะใช้สำหรับเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์พืช โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบอกสถานะของธาตุอาหารนั้นในพืชว่าอยู่ระดับต่ำ (low) เพียงพอ (sufficient) หรือสูง (high)

การสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐาน โดยทั่วไปเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ต้องการศึกษากับปริมาณผลผลิต โดยการให้ธาตุอาหารที่ต้องการศึกษาระดับต่าง ๆ กับพืช และเก็บข้อมูลผลผลิตที่ได้รับจากการให้ธาตุอาหารในระดับต่าง ๆ ซึ่งการศึกษาลักษณะนี้เหมาะสำหรับพืชอายุสั้น เช่น พืชตระกูลถั่ว พืชตระกูลข้าว หรือพืชตระกูลแตง เป็นต้น และนิยมศึกษาในเรื่องนี้เพราะ เนื่องจากพืชมีอายุสั้นจึงสามารถติดตามผลการศึกษาดูผลผลิตได้ อีกทั้งการศึกษานี้ในเรื่องนี้ยังสามารถควบคุมปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ ได้ง่าย แต่สำหรับไม้ผลหรือไม้ยืนต้นไม่สามารถศึกษาเช่นเดียวกับพืชอายุสั้นได้ เนื่องจากต้นมีลักษณะสูงใหญ่ จึงทำให้ต้องใช้พื้นที่ในการศึกษาค่อนข้างมาก อีกทั้งระยะเวลาในการเตรียมต้นเพื่อศึกษา

ผลผลิตยาวนาน ดังนั้นการสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานของไม้ผลหรือไม้ยืนต้น จึงนิยมใช้วิธีการสำรวจความเข้มข้นของธาตุอาหารที่ศึกษาจากต้นที่ให้ผลผลิตสูงจำนวนหลายต้น โดยไม้ผลหรือไม้ยืนต้นที่จะนำมาศึกษาต้องได้รับการคัดเลือกจากสวนที่มีประวัติการจัดการสวนที่ดี จากหลายสภาพพื้นที่ และต้องเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาติดต่อกันหลายปี จึงจะสามารถนำมาสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานเบื้องต้น (tentative standard) และเมื่อได้ค่าความเข้มข้นมาตรฐานเบื้องต้น ต้องมีการทดสอบความถูกต้องของค่าความเข้มข้นมาตรฐานเบื้องต้นดังกล่าว เพื่อปรับปรุงค่าความเข้มข้นให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (Leece, 1968) โดยการปรับปรุงค่าความเข้มข้นมาตรฐานนั้น คือ การวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุอาหารพืชในเนื้อเยื่อต้นนี้ และนำค่าวิเคราะห์ไปเปรียบเทียบกับค่าความเข้มข้นมาตรฐาน เพื่อประเมินปริมาณผลผลิต และทำการเก็บข้อมูลผลผลิต เพื่อคำนวณหาความถูกต้องของการประเมินผลผลิต ซึ่งการวิเคราะห์ความเข้มข้นธาตุอาหารของเนื้อเยื่อต้นนี้ ประเมินปริมาณผลผลิต เก็บข้อมูลผลผลิต และคำนวณหาความถูกต้องนั้น ต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบจำนวนมาก เพื่อให้ได้ค่าความเข้มข้นมาตรฐานที่ถูกต้อง และนำค่าความเข้มข้นเหล่านั้นมาสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐาน ซึ่งความเข้มข้นนี้จะถูกนำไปใช้ประเมินสถานะธาตุอาหารของพืชต่อไป

ปัจจุบันการสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานมีด้วยกัน 4 วิธี คือ การสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานจากต้นที่ให้ผลผลิตสูง (high yield method) การสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานจากเส้นขอบเขต (boundary line method) การสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานจากวิธีดริส (diagnosis and recommendation integrated system: DRIS)(จำเป็น, 2547ก; สุมิตรรา และ วิเชียร, 2547; Beverly, 1991) และการสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานด้วยการใช้คะแนนมาตรฐานการวิเคราะห์พืช (plant analysis with standardized scores approaches: PASS)(วิเชียร และ สุมิตรรา, 2547; Baldock and Schulte, 1996) ซึ่งแต่ละวิธีจะมีจุดด้อยและจุดแข็งแตกต่างกัน โดย Baldock และ Schulte (1996) ได้สรุปจุดด้อยและจุดแข็งของแต่ละวิธีไว้ (ตารางที่ 1) โดยการสรุปได้แบ่งกลุ่มค่าความเข้มข้นมาตรฐานออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่มีการแปลผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชแต่ละธาตุอย่างอิสระต่อกัน ซึ่งเรียกว่า การอ้างอิงธาตุอาหารพืชแบบอิสระ (independent nutrient index, INI) ได้แก่ ค่าความเข้มข้นมาตรฐานจากต้นที่ให้ผลผลิตสูง และค่าความเข้มข้นมาตรฐานจากวิธีเส้นขอบเขต และ 2) กลุ่มที่แปลผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารพืชแต่ละธาตุไม่อิสระต่อกัน โดยเป็นการเปรียบเทียบระดับธาตุอาหารตั้งแต่ 2 ธาตุขึ้นไป ซึ่งเรียกว่า การอ้างอิงธาตุอาหารพืชแบบไม่อิสระ (dependent nutrient index, DNI) ได้แก่ การสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานด้วยวิธีดริส โดยจากตารางที่ 1 เห็นได้ว่าจุดด้อยของการอ้างอิงวิธีหนึ่งจะเป็นจุดแข็งของการอ้างอิงอีกวิธีหนึ่ง

ตารางที่ 1 จุดด้อยและจุดแข็งของการแปลผลการวิเคราะห์พีชแบบอิสระ และไม่อิสระต่อกัน¹

เกณฑ์	การอ้างอิงธาตุอาหารพีช แบบอิสระต่อกัน	การอ้างอิงธาตุอาหารพีช แบบไม่อิสระต่อกัน
ที่มาของค่าความเข้มข้นมาตรฐาน	แปลงทดลอง	ข้อมูลการสำรวจ
วิธีการคำนวณค่าความเข้มข้นมาตรฐาน	ง่าย	ยาก
จำนวนข้อมูล ²	มาก	มาก (>1000)
ความอิสระของค่าความเข้มข้นมาตรฐาน	มี	ไม่มี
ลำดับความรุนแรงของการขาดธาตุอาหาร	ไม่มี	มี
ความต่อเนื่องของค่าความเข้มข้นมาตรฐาน	ไม่มี	มี
ดัชนีความสมดุลของธาตุอาหารทั้งหมด	ไม่มี	มี
การแปลความหมายค่าวิเคราะห์	พอใช้	ง่าย
อิทธิพลของอายุพีชต่อความเข้มข้นธาตุอาหาร	มี	มี

¹ Baldock และ Schulte (1996)

² จำเป็น (2547ก)

2.2.1 ค่าความเข้มข้นมาตรฐานธาตุอาหารจุลภาค

ค่าความเข้มข้นมาตรฐานธาตุอาหารจุลภาคที่มีการรายงานกันอย่างกว้างขวางเป็นค่าความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอน โดยพีชแต่ละชนิดจะมีความต้องการธาตุอาหารเหล่านี้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะทางพันธุกรรม อายุของพีช สภาพแวดล้อม และวัตถุประสงค์ในการผลิต เช่น พีชที่บริโภคผลและเป็นพีชที่มีการผสมเกสร ย่อมมีความต้องการทองแดงและโบรอนมากกว่าพีชที่ไม่มีการผสมเกสร เนื่องจากทองแดงเกี่ยวข้องกับการเกิดและพัฒนาของเรณู (pollen) และโบรอนเกี่ยวข้องกับความพร้อมของเกสรตัวเมีย และการงอกของหลอดเรณู (pollen tube) เป็นต้น พีชบางชนิดมีความต้องการธาตุอาหารจุลภาคบางชนิดมากเป็นพิเศษ เช่น ต้นพีแคน (pecan) ถ้าต้องการให้การเจริญทางด้านกิ่งใบที่ดีและการให้ผลผลิตที่มีคุณภาพดี ต้องมีความเข้มข้นของสังกะสีในใบประมาณ 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม (Sparks, 1993) เป็นต้น ค่าความเข้มข้นมาตรฐานธาตุอาหารจุลภาคมีความสำคัญไม่น้อยกว่าค่าความเข้มข้นมาตรฐานของธาตุอาหารมหภาค เพราะความเข้มข้นของธาตุอาหารพีชทุกธาตุมีผลต่อความสมบูรณ์ของต้นพีชและผลผลิต ปัจจุบันไม้ผลหลายชนิด เช่น ทูเรียน มังคุด ลำไย เงาะ ลิ้นจี่ และมะม่วง เป็นต้น มีการสร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานของธาตุอาหารจุลภาคเพื่อใช้สำหรับประเมินสถานะของธาตุอาหารจุลภาคในพีช ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นมาตรฐานของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอนในใบของไม้ผลบางชนิด

พืช	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)					ที่มา
	เหล็ก	แมงกานีส	สังกะสี	ทองแดง	โบรอน	
เงาะ	77 - 98	104 - 150	43 - 54	16 - 25	43 - 54	Lim และคณะ (1997)
ส้ม	60 - 120	25 - 100	25 - 100	5 - 10	31 - 100	Vock (1997)
ลิ้นจี่*	50 - 100	100 - 250	15 - 30	10 - 25	25 - 60	Menzela และคณะ (1992)
ลำไย	68 - 87	47 - 80	17 - 20	15 - 18	22 - 46	ยุทธนา และคณะ (2543)
มะม่วง*	48 - 247	86 - 455	4 - 15	14 - 69	18 - 84	อัศจรรย์ (2545)
มังคุด	50 - 150	60 - 250	5 - 15	15 - 30	25 - 60	สุมิตรา (2549)
ทุเรียน	40 - 150	50 - 120	10 - 30	10 - 25	30 - 70	สุมิตรา และคณะ (2544)
มะนาว	117 - 194	21 - 63	25 - 50	9-15	-	Indian Institute of Horticultural Research (2005)
กล้วย	53 - 196	112 - 417	8 - 38	10 - 32	-	Indian Institute of Horticultural Research (2005)
ทับทิม	71 - 214	29 - 89	14 - 72	29 - 72	-	Indian Institute of Horticultural Research (2005)
องุ่น**	31 - 50	31 - 150	30 - 50	5 - 15	25 - 50	Dami และคณะ (2005)
แอปเปิล	40 - 400	15 - 200	25 - 150	5 - 20	20 - 50	Washington State University (2005)
ราสป์เบอร์รี่	25 - 200	20 - 200	15 - 100	5 - 20	20 - 60	Kessel (2003)
พืชทั่วไป	50 - 250	30 - 400	15 - 150	5 - 20	10 - 100	Bennett (1993)

* ค่าความเข้มข้นมาตรฐานเบื้องต้น

** ใช้ส่วนของก้านใบนำมาวิเคราะห์หาความเข้มข้น

2.2.2 การนำค่าความเข้มข้นมาตรฐานมาใช้ประโยชน์ เพื่อแนะนำการใช้ปุ๋ย

จากที่กล่าวมาแล้วว่า ค่าความเข้มข้นมาตรฐานเป็นความเข้มข้นที่ใช้เปรียบเทียบเพื่อบอกสถานะของธาตุอาหารในพืช ซึ่งถ้าผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารต่ำกว่าความเข้มข้นมาตรฐาน เกษตรกรมีความจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยที่มีธาตุอาหารพืชที่ขาดในอัตราเพิ่มขึ้นมากกว่าฤดูกาลผลิตที่ผ่านมา ถ้าผลการเปรียบเทียบพบว่าค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชสูงกว่าความเข้มข้นมาตรฐาน เกษตรกรสามารถใส่ปุ๋ยธาตุอาหารพืชดังกล่าวลดลงกว่าฤดูกาลผลิตที่ผ่านมา หรือถ้าเปรียบเทียบพบว่าค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารพืชสูงกว่าความเข้มข้นมาตรฐานมาก อาจไม่จำเป็นต้องใส่ปุ๋ยธาตุอาหารดังกล่าว และถ้าผลการเปรียบเทียบพบว่าความเข้มข้นของธาตุอาหารดังกล่าวอยู่ในระดับเพียงพอ เกษตรกรก็สามารถใส่ปุ๋ยในปริมาณเดิมที่ใช้ในฤดูกาลผลิตที่ผ่านมา ซึ่งการใส่ปุ๋ยตามผลการวิเคราะห์พืชมีการปฏิบัติกันอย่างแพร่หลายในไม้ผลหลายชนิดในต่างประเทศ สำหรับไม้ผลในประเทศเริ่มมีการนำการจัดการแบบนี้มาใช้เพื่อปรับปรุงการใช้ปุ๋ยบ้างแล้ว เช่น ทุเรียน (นุจรี และคณะ, 2548) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการ

วิเคราะห์พืชเพียงอย่างเดียว เพื่อใช้ประกอบการพิจารณาการใส่ปุ๋ยในปัจจุบันคงจะไม่เพียงพอ เนื่องจากปัจจุบันพบว่าดินสวนไม้ผล เช่น ลองกอง (สุรชาติ และคณะ, 2547) ทูเรียน (พรทิวา และสุมิตรา, 2548) ลำไย (ยุทธนา และคณะ, 2543) และลิ้นจี่ (อรุณศิริ และคณะ, 2546) พบว่า ดินมีการสะสมฟอสฟอรัสในปริมาณสูง จนอาจทำให้รากพืชดูดธาตุอาหารจุลภาคได้ลดลง โดยเฉพาะสังกะสี (ยงยุทธ, 2546; Marschner, 1995) อีกทั้งสวนไม้ผลในภาคใต้ส่วนใหญ่มีปริมาณเหล็กในดินสูง ทำให้การดูดทองแดง และแมงกานีสของรากพืชลดลงด้วย (ยงยุทธ และ สุขวัญ, 2546; Havlin *et al.*, 2005) ดังนั้นการพิจารณาการใส่ปุ๋ยจึงควรวิเคราะห์ดินควบคู่กับการวิเคราะห์ธาตุอาหารในใบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใส่ปุ๋ยของเกษตรกร

2.3 หน้าทีของธาตุอาหารจุลภาคในพืช

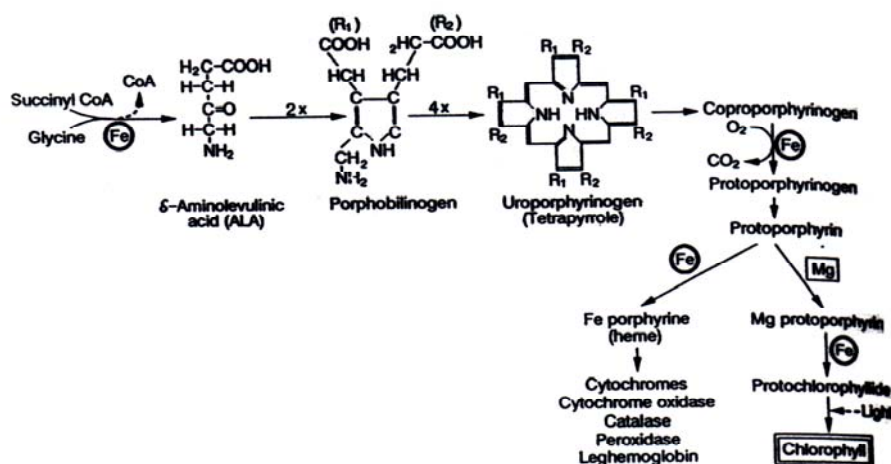
ธาตุอาหารจุลภาคเป็นธาตุอาหารที่พืชมีความต้องการน้อยถึงน้อยมาก แต่ขาดไม่ได้ ถ้าพืชได้รับในปริมาณที่ไม่เพียงพอกับความต้องการจะทำให้การเจริญเติบโต การออกดอก การติดผล และการพัฒนาของผลลดลง ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตของพืชลดลงตามไปด้วย และในกรณีที่พืชขาดธาตุอาหารจุลภาคอย่างรุนแรง อาจทำให้พืชตายได้ ปัจจุบันธาตุอาหารจุลภาคที่ได้รับการยอมรับมี 8 ธาตุ คือ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง โบรอน โมลิบดินัม คลอรีน และนิกเกิล ธาตุอาหารจุลภาคที่พืชมีความต้องการมาก และมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง คือ เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอน ซึ่งธาตุอาหารจุลภาคดังกล่าว ยงยุทธ (2546) สำเนา (2535) Jones (2002) และ Marschner (1995) ได้กล่าวถึงหน้าที่ไว้ ดังนี้

2.3.1 หน้าทีของเหล็ก

เหล็กเป็นธาตุอาหารจุลภาคประจวบที่พืชมีความต้องการมาก แต่ยังมีน้อยกว่าธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง โดยทั่วไปพบว่าระดับความเข้มข้นของเหล็กในเนื้อเยื่อต้นนี้ที่เพียงพอกับความต้องการจะอยู่ในช่วง 50 - 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพืชและสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโต และถ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง มีแนวโน้มว่าพืชจะขาดเหล็กได้ แต่ถ้ามีความเข้มข้นมากกว่า 300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ก็จะแสดงอาการเป็นพิษได้เช่นกัน สำหรับการดูดเหล็กจากดินรากพืชจะดูดเหล็กในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) เฟอริกไอออน (Fe^{3+}) หรือคีเลต (เหล็กที่เกิดปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ในธรรมชาติ) และเมื่อเหล็กเคลื่อนที่เข้าสู่รากและเคลื่อนที่มาสู่ใบ จะทำหน้าที่หลายอย่างด้วยกัน แต่ที่จัดว่ามีความสำคัญมากในการทำหน้าที่ของเหล็ก คือ

2.3.1.1 การสร้างคลอโรฟิลล์ พืชที่ขาดธาตุเหล็กจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดต่ำลง โดย Ranieri และคณะ (2001) รายงานว่าทานตะวันที่ขาดธาตุเหล็กมีปริมาณคลอโรฟิลล์ต่ำกว่าปกติ เนื่องจากในกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์จำเป็นต้องอาศัยเอนไซม์ที่มีเหล็กเข้าไปเกี่ยวข้องอยู่ด้วยกัน 3 ขั้นตอน คือ การรวมตัวกันของ succinyl coA กับ glycine เพื่อสร้าง δ -

amino levulinic acid (ALA), การเปลี่ยน coproporphyrinogen เป็น protoporphyrinogen และการเปลี่ยน Mg protoporphyrin เป็น protochlorophyllide (รูปที่ 1) โดยขั้นตอนการสร้าง δ -amino levulinic acid เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด เนื่องจากถ้าไม่มีสารดังกล่าวก็ไม่สามารถสร้างสารอื่นๆ ต่อไปได้ ดังนั้นอาจพบว่าตำราหรือบทความบางเล่มจะกล่าวเพียงว่า เหล็กมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ที่สร้าง δ -amino levulinic acid (ALA) และเนื่องจากเหล็กเป็นธาตุที่เคลื่อนย้ายจากใบแก่สู่ใบอ่อนได้น้อย ดังนั้นจึงสังเกตได้ว่าเมื่อพืชมีการขาดธาตุเหล็กใบอ่อนของพืชจะมีสีเขียวซีดผิดปกติ เนื่องจากการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ของพืชลดลง และเรียกอาการนี้ว่า คลอโรซิส (chlorosis) โดยอาการนี้บริเวณแผ่นใบจะมีสีเขียวก่อนเส้นใบ แต่ถ้าพืชขาดเหล็กอย่างรุนแรงใบอ่อนจะมีสีขาวซีดทั้งใบ



รูปที่ 1 บทบาทของเหล็กในการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์

ที่มา: Marschner (1995)

2.3.1.2 องค์ประกอบของฮีโมโพรตีน ซึ่งฮีโมโพรตีนเป็นสารเชิงซ้อนของพอร์ไฟรินที่มีเหล็กอยู่ในโครงสร้าง โดยฮีโมโพรตีนที่มีความสำคัญในพืช เช่น ไซโตโครม (cytochrome) เป็นฮีโมโพรตีนที่มีบทบาทสำคัญในกระบวนการรีดอกซ์ของคลอโรพลาสต์ และของไมโทคอนเดรีย อีกทั้งยังมีฮีโมโพรตีนที่ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์ในกระบวนการต่างๆ เช่น ไซโตโครมออกซิเดส เป็นเอนไซม์ที่มีกิจกรรมในขั้นตอนสุดท้ายของการหายใจ และคาทาเลส (catalase) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงให้กลายเป็นน้ำ และก๊าซออกซิเจน (O_2) เป็นต้น

2.3.1.3 องค์ประกอบของเอนไซม์ ซึ่งเอนไซม์ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด เช่น ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ (superoxide dismutase isozyme Fe: Fe-SOD) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่เรียกว่า

ซูเปอร์ออกไซด์ (free radical superoxide: O_2^-) ให้เป็นไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ และจะเปลี่ยนเป็นน้ำด้วยเอนไซม์คาทาลาส โดยถ้าเซลล์มีซูเปอร์ออกไซด์และไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ในปริมาณมาก จะทำให้ผนังเซลล์บางลงและจำนวนของพลาสต์ (plastid) ภายในเซลล์ลดลง (Ranieri *et al.*, 2001) เหล็กยังเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase (ACC oxidase) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนเมโทอินินให้เป็นเอธิลีน (Gibson *et al.*, 1998; Finlayson *et al.*, 2004) โดยบทบาทหนึ่งของเอธิลีนที่น่าสนใจคือ กระตุ้นการเกิดดอกของไม้ผลบางชนิด (พีรเดซ, 2537) และยังมีเอนไซม์อื่นอีกหลายชนิดที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เช่น อะโคนิตาส (aconitase) ไนโตรจินเนส (nitrogenase) และไลพอกซี-จีเนส (lipoxygenase) เป็นต้น

2.3.2 หน้าทีของแมงกานีส

แมงกานีสเป็นธาตุอาหารที่พบในพืชมากรองจากเหล็ก โดยพบว่าความเข้มข้นในเนื้อเยื่อต้นนี้ที่เพียงพอกับความต้องการจะอยู่ในช่วง 20 - 250 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพืชและสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโต พืชทั่วไปจะแสดงอาการขาดเมื่อมีความเข้มข้นต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง แต่ถ้าความเข้มข้นในใบพืชสูงกว่า 550 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง อาจแสดงอาการเป็นพิษได้ สำหรับการดูดแมงกานีสจากดิน รากพืชจะดูดแมงกานีสในรูปของแมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) และเนื่องจากแมงกานีสเป็นธาตุที่สามารถเคลื่อนย้ายได้น้อยมากในพืช ดังนั้นจึงมักจะพบว่าใบแก่จะมีการสะสมแมงกานีสมากกว่าใบอ่อน และเมื่อพืชดูดยืดยืดแมงกานีสจากดินและเคลื่อนย้ายเข้าสู่ท่อลำเลียงน้ำ (xylem) เพื่อเคลื่อนที่ไปยังใบ และจะเข้าไปทำหน้าที่ต่างๆ ภายในเซลล์ กล่าวคือ

2.3.2.1 กระตุ้นการปลดปล่อยออกซิเจนจากโมเลกุลของน้ำ โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์แสง ระบบแสง II การกระตุ้นนี้จะทำงานร่วมกับคลอไรด์ไอออน (Cl^-) และแสง โดยเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ฮิลล์รีแอคชัน (Hill reaction) ซึ่งการแตกตัวของโมเลกุลน้ำระบบจะได้รับอิเล็กตรอน (e^-) และไฮโดรเจนไอออน (H^+) เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ระบบแสง II โดย Polle และคณะ (1992) อ้างโดย ยงยุทธ (2546) รายงานว่า เมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสในใบอ่อนลดลงจะทำให้ปฏิกิริยาฮิลล์รีแอคชันลดลง 50 %

2.3.2.2 องค์ประกอบของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทส ซึ่งเป็นเอนไซม์ชนิดเดียวกับเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทส ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เพียงแต่ในรูปนี้เอนไซม์จะมีโมเลกุลของแมงกานีสทำหน้าที่แทนโมเลกุลของเหล็ก และเรียกเอนไซม์นี้ว่า ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทส ที่มีแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ (superoxide dismutase isozyme Mn: Mn-SOD) โดยเมื่อพืชได้รับแมงกานีสที่ไม่เพียงพอจะทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ชนิดนี้ลดลง (Yu *et al.*, 1999) สำหรับหน้าที่ของเอนไซม์นี้มีหน้าที่เช่นเดียวกับเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดีสมิวเทส ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ

2.3.2.3 โคแฟกเตอร์และตัวปลูกฤทธิ์ของเอนไซม์ พบว่าแมงกานีสเป็นโคแฟกเตอร์และตัวปลูกฤทธิ์ของเอนไซม์ได้ 35 ชนิด (ยงยุทธ, 2546) เช่น ปลูกฤทธิ์เอนไซม์มาลิก (malic enzyme) ฟอสโฟอินอลไพรูเวตคาร์บอกซิโคเนส (phosphoenolpyruvate (PEP) carboxykinase) และไอโซซิเทรตดีไฮโดรจีเนส (isocitrate dehydrogenase) เป็นต้น โดยเอนไซม์ที่มีแมงกานีสเป็นโคแฟกเตอร์หรือตัวปลูกฤทธิ์ส่วนมากจะทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน, ดีคาร์บอกซิเลชัน และไฮโดรไลซิส ในวัฏจักรของกรดคาร์บอกซิลิก (tricarboxylic acid cycle: TCA)

เมื่อพืชได้รับปริมาณแมงกานีสมากเกินไป (Robson, 1988 อ้างโดย Murata, 2003) หรือได้รับแมงกานีสไม่เพียงพอ (Marschner, 1995) จะทำให้ปริมาณของกรดอินโดล-แอซีติก (indolacetic acid: IAA) ลดลง เนื่องจากเมื่อพืชได้รับแมงกานีสมากเกินไป จะไปทำลายสารที่มีฤทธิ์ยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์อินโดลแอซีติกแอซิดออกซิเดส (indolacetic acid oxidase: IAA oxidase) ทำให้เอนไซม์อินโดลแอซีติกแอซิดออกซิเดสมีกิจกรรมที่สูงขึ้น (ยงยุทธ, 2546) ส่งผลให้มีการทำลายอินโดลแอซีติกแอซิดมากกว่าปกติหรือทำลายเร็วกว่าปกติ แต่ถ้าพืชขาดแมงกานีสจะทำให้กิจกรรมของเอนไซม์อินโดลแอซีติกแอซิดออกซิเดสสูงขึ้นเช่นกัน (Marschner, 1995)

2.3.3 หน้าทีของสังกะสี

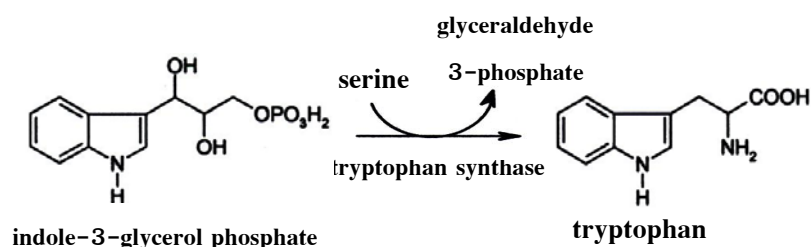
สังกะสีเป็นธาตุอาหารจุลภาค โดยพืชทั่วไปพบว่าระดับความเข้มข้นของสังกะสีในเนื้อเยื่อต้นที่เพียงพอกับความต้องการจะอยู่ในช่วง 20 - 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพืชและสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโต และถ้ามีความเข้มข้นต่ำกว่า 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง มีแนวโน้มว่าพืชจะแสดงอาการขาดสังกะสี แต่ถ้าสูงกว่า 200 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง จะทำให้เป็นพิษได้ สำหรับรูปของสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะอยู่ในรูปไดวาเลนซ์แคตไอออน (Zn^{2+}) แต่ถ้าดินมีสภาพเป็นด่างสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะอยู่ในรูปโมโนวาเลนซ์แคตไอออน ($Zn(OH)^+$) โดยการเคลื่อนย้ายสังกะสีในพืชส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์หรือคีเลต และแคตไอออนอิสระ เนื่องจากสังกะสีเป็นธาตุที่ไม่มีรูปของการถูกออกซิไดซ์และรีดิวส์ ดังนั้นหน้าที่ของสังกะสีจึงไม่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน แต่จะทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์โดยตรง ซึ่งสรุปหน้าที่ได้ดังนี้

2.3.3.1 องค์ประกอบของเอนไซม์ เอนไซม์ที่มีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ เช่น เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส ที่มีสังกะสีและทองแดงอยู่ในโมเลกุล (superoxide dismutase isozyme Zn-Cu: Zn-CuSOD) โดยมีสังกะสีอยู่ในโมเลกุล 1 อะตอม (Marschner, 1995) โดยเอนไซม์นี้ทำหน้าที่เช่นเดียวกับเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสที่มีเหล็กหรือแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ โดย Yu และ Rengel (1999) รายงานว่า เมื่อพืชได้รับสังกะสีที่ไม่เพียงพอจะทำให้กิจกรรมของเอนไซม์นี้ลดลง และอนุมูลอิสระของซูเปอร์ออกไซด์จะมีปริมาณสูงขึ้น (Cakmak and Marschner, 1988) หรือเอนไซม์คาร์บอนิกแอนไฮเดรส (carbonic anhydrase) ซึ่งมีสังกะสีเป็น

องค์ประกอบอยู่ 6 อะตอม (พีชใบเลี้ยงคู่)(Marschner, 1995) เอนไซม์นี้ทำหน้าที่ช่วยให้คาร์บอนไดออกไซด์ละลายในสโตรมาของคลอโรพลาสต์ และละลายในไซโทซอลของมีโซพิลล์ได้เพิ่มขึ้น (Heldt, 2005) ทำให้พีชมีคาร์บอนและออกซิเจนเพียงพอสำหรับการสังเคราะห์น้ำตาลในกระบวนการสังเคราะห์แสง และยังเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ชนิดอื่นอีก เช่น แอลกอฮอล์ดีไฮโดรจีเนส (alcohol dehydrogenase) แอลคาไลน์ฟอสฟาเทส (alkaline phosphatase) คาร์บอกซีเพปติเดส (carboxy peptidase) อาร์เอ็นเอพอลิเมอร์เรส (RNA polymerase) และฟอสโฟไลเพส (phospholipase) เป็นต้น

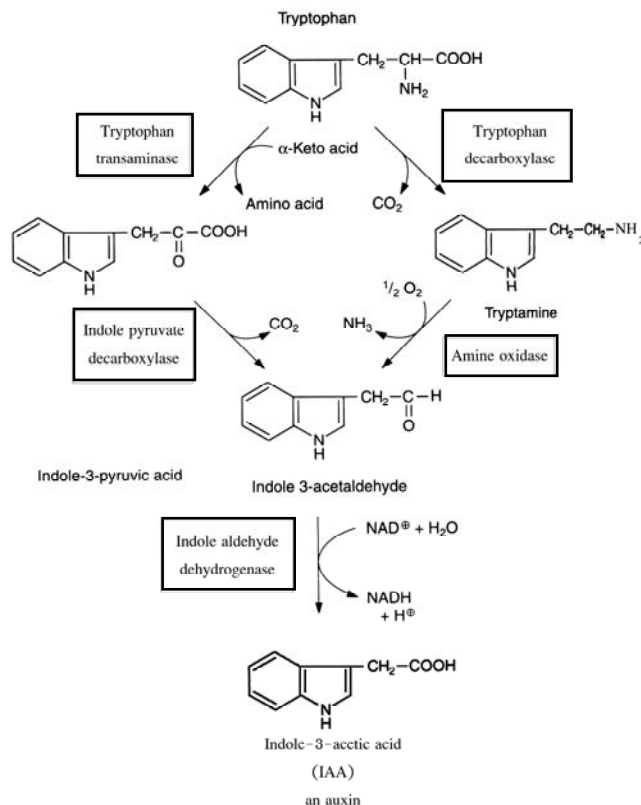
2.3.3.2 กระบวนการทำงานของเอนไซม์เอนไซม์ที่สังกะสีเป็นตัวกระตุ้นการทำงาน มีหลายชนิด เช่น เอนไซม์ไพโรฟอสฟาเทส (inorganic pyrophosphatases: PP_{ases}) เอนไซม์แอลโดเลส (aldolase) เอนไซม์ไอโซเมอเรส (isomerase) เอนไซม์ทรานสฟอสฟอรีเลส (transphosphorylase) เอนไซม์อินออกแกนิคไพโรฟอสฟาเทส (inorganic pyrophosphatase) และเอนไซม์คาร์บอกซีเพปติเดส (carboxypeptidase) เป็นต้น

บทบาทหนึ่งของสังกะสีที่สำคัญอย่างยิ่ง คือ ช่วยในการสังเคราะห์ทริปโทเฟน (tryptophan)(รูปที่ 2) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรดอินโดลแอซิดิก (indoleacetic acid, IAA)(ยงยุทธ, 2546; Heldt, 2005; Marschner, 1995)(รูปที่ 3) โดย Durzan (1995) รายงานว่า พีชที่ขาดสังกะสีปริมาณทริปโทเฟนจะลดลงตามระดับความรุนแรงของการขาดสังกะสี โดยกรดอินโดลแอซิดิกเป็นฮอร์โมนพืชในกลุ่มออกซิน (auxin) มีหน้าที่ขยายขนาดของเซลล์ การเจริญเติบโตของใบ การยืดยาวของราก และการติดผลของไม้ผลบางชนิด เป็นต้น ดังนั้นเมื่อพืชสังเคราะห์กรดอินโดลแอซิดิกได้ลดลง จะทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง การขยายขนาดของใบลดลง ส่งผลให้พื้นที่ในการสังเคราะห์แสงของพืชลดลง ทำให้ปริมาณโครงสร้างคาร์บอนซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของสารประกอบอินทรีย์มีปริมาณลดลง อีกทั้งยังทำให้ปริมาณอาหารสะสมในพืชลดลง



รูปที่ 2 การสังเคราะห์ทริปโทเฟน

ที่มา: ดัดแปลงจาก ยงยุทธ (2546) และ Heldt (2005)



รูปที่ 3 การสังเคราะห์กรดอินโดลอะซีติก
ที่มา: Heldt (2005)

2.3.4 หน้าทีของทองแดง

โดยทั่วไปพบว่า ระดับความเข้มข้นของทองแดงในเนื้อเยื่อต้นที่เพียงพอกับความต้องการจะอยู่ในช่วง 5 - 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดพืชและสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโต โดยรูปของทองแดงในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชคือ คิวพริกไอออน (Cu²⁺) และคิวปรัสไอออน (Cu⁺) และเมื่อทองแดงเคลื่อนที่สู่ใบแล้ว พบว่าร้อยละ 70 ของทองแดงทั้งหมดจะพบในคลอโรพลาสต์ โดยเป็นองค์ประกอบของโปรตีนที่มีชื่อว่า พลาสโทไซยานิน ซึ่งโปรตีนชนิดนี้ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนระหว่างการสังเคราะห์แสงของระบบแสง I และระบบแสง II ในคลอโรพลาสต์ และทองแดงยังเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ เช่น เอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทส ที่มีสังกะสีและทองแดงอยู่ในโมเลกุล (super-oxide dismutase isozyme Zn-Cu: Zn-CuSOD) โดย 1 โมเลกุลของเอนไซม์จะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบอยู่ 1 อะตอม (Marschner, 1995) โดยมีหน้าที่เช่นเดียวกับเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซด์ดิสมิวเทสที่มีเหล็กหรือแมงกานีสเป็นองค์ประกอบ สอดคล้องรายงานของ Yu และ Rengel (1999) รายงานว่า เมื่อพืชได้รับทองแดงไม่เพียงพอจะทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ชนิดนี้ลดลง และ

Graham (1980) อ้างโดย Marschner (1995) รายงานว่า เมื่อพืชขาดทองแดงจะทำให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ต่ำกว่าปกติ และยังพบอีกว่าเมื่อพืชได้รับทองแดงในระดับที่ไม่เพียงพอ ทำให้การติดผลของพริกลดลง

2.3.5 หน้าทีของโบรอน

โบรอนเป็นธาตุที่มีความสำคัญกับพืชชั้นสูง (ยงยุทธ, 2546) โดยทั่วไปพบว่าระดับความเข้มข้นของโบรอนในเนื้อเยื่อพืชที่เพียงพอกับความต้องการจะอยู่ในช่วง 10 - 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง (Bennett, 1993) แต่สำเนา (2535) กล่าวว่าระดับเพียงพอในพืชทั่วไปจะอยู่ในช่วง 15-40 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนของพืช ชนิดพืช และสภาพแวดล้อมที่พืชเจริญเติบโต โดยรูปของโบรอนในดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชจะอยู่ในรูปของกรดบอริก (H_3BO_3) (สำเนา, 2535) และเนื่องจากโบรอนเป็นที่เคลื่อนย้ายในพืชได้น้อย ดังนั้นจึงมักพบว่าส่วนล่างของพืชจะมีการสะสมโบรอนสูงกว่าส่วนบน สำหรับการทำหน้าที่ของโบรอนในพืชยังไม่สามารถสรุปได้อย่างเด่นชัด เนื่องจากโบรอนเป็นธาตุที่ไม่ได้เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ชนิดใดชนิดหนึ่งโดยเฉพาะ ดังนั้นบทบาทของโบรอนจึงสรุปจากการเปลี่ยนแปลงทางสรีระของพืช เมื่อพืชขาดโบรอน (ยงยุทธ, 2546) ซึ่งสรุปบทบาทได้ดังนี้

2.3.5.1 บทบาทต่อผนังเซลล์ บทบาทนี้โบรอนจะเข้าไปเกี่ยวข้องกับกระบวนการยึดโยงเพกติกในผนังเซลล์ให้เป็นโครงข่ายที่มีความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่น ซึ่งจากการตรวจเอกสารของ Matoh (1997) ได้รายงานไว้ว่า พืชที่ขาดโบรอนจะมีผนังเซลล์คอลเลจิม (collenchyma) ส่วนมุมไม้หนา และผนังเซลล์ส่วนพาเรงคิมมีการจัดเรียงตัวของไมโครไฟบริลอย่างหลวม ๆ และเมื่อได้วิเคราะห์องค์ประกอบต่าง ๆ ของผนังเซลล์อย่างละเอียด พบว่า โบรอนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีชื่อว่า แรมโนกาแลกทูรอน II (rhamnogalacturonan II, RGII) ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนนี้ทำหน้าที่เชื่อมโยงเพกติกภายในเซลล์ให้เป็นโครงข่าย ซึ่งจะเพิ่มความแข็งแรงและมีความยืดหยุ่นให้กับผนังเซลล์

2.3.5.2 บทบาทต่อการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารเข้าสู่เซลล์ โดยคาดว่ามิบทบาทในการควบคุมช่องผ่านของไอออนในเยื่อ (Cakmak *et al.*, 1995) เนื่องจาก Goldbach และคณะ (1990) รายงานว่า พืชที่ขาดโบรอนจะมีกิจกรรมของเอนไซม์ ATPase ลดต่ำลง ซึ่งเอนไซม์ชนิดนี้มีหน้าที่ในการขับโปรตรอนระหว่างเยื่อ เพื่อให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างด้านทั้งสองของเยื่อ ซึ่งจะทำให้เกิดการดูดไอออนของเซลล์ และเมื่อมีการให้โบรอนพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์จะกลับสู่ระดับปกติภายใน 1 ชั่วโมง และสอดคล้องกับ Pollard และคณะ (1977) รายงานว่า ถั่วปากอ้าที่ขาดโบรอนจะทำให้อัตราการดูดรูบีเดียม (เป็นธาตุที่ใช้ศึกษาแทนโพแทสเซียม, ยงยุทธ, 2546) และฟอสเฟตของปลายรากลดลง แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อรากได้รับโบรอน

2.3.5.3 บทบาทในการเคลื่อนย้ายสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่จะกล่าวถึงคือน้ำตาล เนื่องจากมีการรายงานไว้ว่าพืชที่ได้รับโบรอนที่เพียงพอ จะทำให้การเคลื่อนย้ายน้ำตาลในรูปของ

สารประกอบบอเรตทั้งในระยะใกล้และระยะไกลได้ดี เนื่องจากสามารถเคลื่อนย้ายซึมผ่านเยื่อของโพลีเอมได้ง่ายกว่าน้ำตาลในรูปอื่น (ยงยุทธ, 2546)

2.3.5.4 บทบาทในการตรึงไนโตรเจน โบรอนมีบทบาทในการตรึงไนโตรเจนอยู่ 2 ส่วนด้วยกัน คือ 1) บำรุงสภาพของปมราก และ 2) กิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรจีเนส โดยบัพรุงสภาพของปมราก พบว่า การขาดโบรอนทำให้โครงสร้างของผนังเซลล์ และเยื่อหุ้มเซลล์ของปมราก และเยื่อหุ้มแบคทีเรียที่เชื่อมสภาพเร็วกว่าปกติ (Bolanos *et al.*, 1996) และกิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรจีเนส พบว่า เมื่อพืชขาดโบรอนทำให้กิจกรรมของเอนไซม์ลดลง เนื่องจากในการตรึงไนโตรเจนระบบต้องอยู่สภาพที่ไม่มีออกซิเจน ดังนั้นเมื่อขาดโบรอนทำให้เยื่อที่ควบคุมไม่ให้ออกซิเจนเข้าสู่กระบวนการตรึงไนโตรเจนเสื่อมสภาพ ทำให้มีออกซิเจนเข้าไปในกระบวนการตรึงไนโตรเจน ซึ่งออกซิเจนนี้จะขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ไนโตรจีเนส ทำให้ปมรากพืชตรึงไนโตรเจนลดลง (Cakmak and Romheld, 1997)

2.3.5.6 บทบาทต่อการเจริญพันธุ์ การขาดโบรอนมีผลต่อการเจริญพันธุ์มากกว่าการเจริญทางด้านกิ่งใบ โดยบางครั้งอาจพบว่าพืชให้ผลผลิตลดลงแต่พืชยังไม่แสดงอาการขาดโบรอน โดยพืชที่ขาดโบรอนพบว่าละอองเรณูจะเป็นหมัน ยอดเกสรตัวเมียไม่มีความพร้อมสำหรับการรับละอองเรณู ละอองเรณูไม่งอกหลอดเรณู หรือถ้าละอองเรณูที่ตกลงบนยอดเกสรตัวเมียมีการงอกของหลอดเรณูก็จะมีสภาพไม่สมบูรณ์จึงทำให้ไม่มีการปฏิสนธิ ดังนั้นเมล็ดจึงไม่มีการพัฒนา (เมล็ดลีบ) และเมล็ดได้จากต้นที่ขาดโบรอนมีอัตราการงอกต่ำ (Dell and Huang, 1997) เห็นได้ว่าสิ่งต่างๆ ที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่ละอองเรณูเป็นหมันและเกสรตัวเมียไม่มีความพร้อมในการสืบพันธุ์

2.4 บทบาทของธาตุอาหารจุลภาคต่อการเจริญและการพัฒนาของพืช

2.4.1 ปริมาณคลอโรฟิลล์

คลอโรฟิลล์เป็นรงควัตถุ (pigment) ที่มีสีเขียวทำหน้าที่สำคัญในการดูดคลื่นแสงเพื่อใช้กระตุ้นปฏิกิริยาแสงในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งคลอโรฟิลล์นี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิดคือ คลอโรฟิลล์เอ (chlorophyll A) คลอโรฟิลล์บี (chlorophyll B) คลอโรฟิลล์ซี (chlorophyll C) และคลอโรฟิลล์ดี (chlorophyll D) ซึ่งแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างและคุณสมบัติที่แตกต่างกัน สำหรับคลอโรฟิลล์ที่พบมากในพืชชั้นสูง คือ คลอโรฟิลล์เอ และคลอโรฟิลล์บี (สมบุญ, 2536) และจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าพืชที่ขาดเหล็กจะทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลง ซึ่ง Wallihan และ Sharpless (1970) รายงานว่าความเข้มข้นของเหล็กในใบอ่อนของอะโวคาโดมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณคลอโรฟิลล์ Pestana และคณะ (2001) รายงานว่า ความเข้มข้นของเหล็กในดอกช่วงดอกบานเต็มต้น มีความสัมพันธ์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบส้มเมื่ออายุ 60 และ 120 วัน หลังดอกบาน และยังมีรายงานว่า การได้รับสังกะสีที่เพิ่มขึ้นของมะเขือเทศ (Kaya and Higgs,

2001) และ พืชทาชิโอ (Durzan, 1995) และการได้รับทองแดงที่เพิ่มขึ้นของซูการ์บีท (Droppa *et al.*, 1984) ในสภาวะที่ขาดแคลนธาตุดังกล่าว สามารถเพิ่มคลอโรฟิลล์ได้เช่นกัน

2.4.2 พื้นที่ใบ

ใบเป็นส่วนที่พืชใช้รับแสงและเกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังนั้นถ้าพืชมีพื้นที่ใบมากย่อมมีพื้นที่รับแสงและมีการสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (ในสภาวะที่ได้รับธาตุอาหารพืชต่างๆ อย่างเพียงพอ) แต่พบว่าเมื่อพืชขาดสังกะสีจะทำให้พื้นที่ใบลดลงอย่างเด่นชัด โดย Durzan (1995) ได้รายงานว่า ต้นพืชทาชิโอที่มีใบขนาดเล็กผิดปกติ เนื่องจากขาดสังกะสี และเมื่อได้รับสังกะสี (พ่นสังกะสีซัลเฟต ($ZnSO_4$) ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร) พบว่า ใบอ่อนที่เกิดใหม่มีพื้นที่ใบเพิ่มขึ้น และ Ruehle (1940) และสัมฤทธิ์ (2538) ได้รายงานว่าอาการใบเล็กของอะโวคาโดและส้ม (ตามลำดับ) เกิดขึ้นเนื่องจากการขาดสังกะสีเช่นกัน เนื่องจากสังกะสีเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ทรिพโทเฟน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์อินโดลอะซิติก-แอซิด ซึ่งสารดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการขยายขนาดของเซลล์ และ Kosegarten และคณะ (1998) รายงานว่าเมื่อพืชขาดเหล็กจะทำให้ใบของต้นทานตะวันมีขนาดลดลงเช่นกัน

2.4.3 การออกดอกและจำนวนช่อดอก

ปัจจุบันเชื่อว่า การออกดอกของไม้ผลเกิดจากความสมดุลของฮอร์โมน ทำให้ตาใบเปลี่ยนเป็นตาดอกและพัฒนาจนกลายเป็นดอก โดยช่วงออกดอกพบว่าปริมาณของจิบเบอเรลลินจะลดลง และมีการสร้างเอธิลีนเพิ่มมากขึ้น (พีรเดช, 2537) โดยมะม่วง ส้ม สตรอเบอร์รี่ ท้อ แอปเปิล เชอร์รี่ และอัลมอนด์ จะออกดอกได้ก็เมื่อปริมาณจิบเบอเรลลินในต้นอยู่ในระดับต่ำ (นภดล, 2537) จากการศึกษาของวันทนา และธนะชัย (2544) พบว่า ก่อนออกดอก 2 สัปดาห์ ลำใยพันธุ์ต้อ จะมีปริมาณเอธิลีนในยอดสูงขึ้น โดยเอธิลีนที่พืชผลิตขึ้นมาต้องอาศัยเอนไซม์ 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid oxidase ซึ่งมีเหล็กเป็นองค์ประกอบ เพื่อเปลี่ยนเมไทโอนีนให้เป็นเอธิลีน (Gibson *et al.*, 1998; Finlayson *et al.*, 2004) สอดคล้องกับอัศจรรย์ (2545) ที่ได้ทดลองให้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคเชิงเดี่ยวชนิดต่างๆ กับมะม่วง พบว่า การให้เหล็กอีดีทีเอ (Fe-EDTA) สามารถเพิ่มการออกดอกได้ดีกว่าการใส่ธาตุอาหารจุลภาคชนิดอื่น สำหรับจำนวนช่อดอกนั้นพิรุณ (2546) รายงานว่าเมื่อความเข้มข้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง ในใบระยะก่อนออกดอก น้อยหรือมากเกินไป จะทำให้ปริมาณช่อดอกลดลง

2.4.4 คาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้าง (Total non-structural carbohydrate)

ปัจจุบันทฤษฎีเกี่ยวกับการออกดอกของไม้ผลได้เปลี่ยนไป โดยให้ความสำคัญกับฮอร์โมนพืชมากกว่าสัดส่วนระหว่างคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้าง (TNC) กับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หรือที่เรียกว่า สัดส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C: N ratio) อย่างไรก็ตามการออกดอกของไม้ผลก็ยังต้องอาศัยอาหารสะสมในเนื้อเยื่อ ถ้าอาหารสะสมในเนื้อเยื่อพืชมีปริมาณที่ไม่เพียงพอจะทำให้การออกดอกและติดผลไม่ดีเท่าที่ควรหรืออาจจะไม่ออกดอก ดังนั้นอาหารสะสมในเนื้อเยื่อจึงมีความสำคัญเช่นกัน โดยอาหารสะสมในเนื้อเยื่อที่ได้รับความสนใจส่วน

ใหญ่จะเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้าง โดย Stephenson และคณะ (1989) ได้สรุปว่าระดับคาร์โบไฮเดรตเป็นข้อจำกัดในการแตกยอดและการออกดอกของต้นมะคาตาเมีย สอดคล้องกับการศึกษาในลองกองของประเสริฐ (2545) และเงาะพันธุ์โรงเรียนของสมเกียรติ (2538) โดยเฉพาะเงาะพันธุ์โรงเรียน พบว่า คาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างมีความสัมพันธ์กับการออกดอกถึง 0.95 ($r=0.95$) และจากผลการศึกษาหลายการศึกษา พบว่า พืชจะมีการสะสมคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างในเนื้อเยื่อ โดยเฉพาะในระยะก่อนแทงยอดอ่อนและระยะก่อนออกดอก พืชจะมีการสะสมคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างสูงสุด ทั้งนี้เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับการแทงยอดอ่อนหรือการออกดอก เห็นได้จากการศึกษาของวันทนา และธนะชัย (2544) และ Bates และคณะ (2002) พบว่า ในช่วงก่อนการออกดอกของลำไยพันธุ์ตอ และองุ่นพันธุ์คอนคอร์ด (ตามลำดับ) จะมีการสะสมคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่ง 14 วัน (ลำไย) และ 44 วัน (องุ่น) ก่อนออกดอกปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างจึงลดลงอย่างรวดเร็ว หรือในระยะก่อนการแตกใบอ่อน 8 สัปดาห์ของลำไย ลินจี และมะปราง คาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างก็ลดลงเช่นกัน โดยเฉพาะมะปรางจะลดลงอย่างเด่นชัด (ศิริเพ็ญ และธนะชัย, 2544) และจากการศึกษาความเข้มข้นของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ในรูปโครงสร้างของเปลือกกิ่ง (กานดา, 2535) และเปลือกลำต้น (ญณงค์, 2546; มนูญ, 2546) ของลองกอง พบว่า มีความสัมพันธ์กับการออกดอกของลองกอง โดยระยะก่อนออกดอกเปลือกกิ่งและเปลือกลำต้นของลองกองจะมีการสะสมคาร์โบไฮเดรตในปริมาณที่สูงขึ้น และเมื่อต้นลองกองออกดอกปริมาณคาร์โบไฮเดรตในเปลือกกิ่งและเปลือกต้นก็จะลดต่ำลงอย่างเด่นชัด

2.5 ปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคในดิน

พืชสามารถนำธาตุอาหารจุลภาคไปใช้ประโยชน์ได้ ก็ต่อเมื่อธาตุอาหารจุลภาคละลายออกมาอยู่ในสารละลายดิน แต่การที่ธาตุอาหารจุลภาคจะละลายออกมาสู่สารละลายดินได้มีหลายปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาค (เหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอน) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

2.5.1 ปฏิกริยาดิน

ปฏิกริยาดิน (soil reaction: pH) บางครั้งอาจเรียกว่า ความเป็นกรดต่างของดิน หรือค่าพีเอชดิน (soil pH) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาค (Mortvedt *et al.*, 2001) โดยดินทั่วไปพบว่า เมื่อมีค่าปฏิกริยาดินต่ำ (สภาพที่เป็นกรด) ความสามารถในการละลายได้และกิจกรรม (activity) ของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดงจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อค่าปฏิกริยาดินเพิ่มขึ้นการละลายได้ก็จะลดลง (Havlin *et al.*, 2005) โดยเมื่อค่าปฏิกริยาดินเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ทำให้การละลายได้ของเหล็กลดลง 100 เท่า (Lindsay, 1979; Havlin *et al.*, 2005) แมงกานีสลดลง 100 เท่า (Havlin *et al.*, 2005; Whitehead, 2000)

สังกะสีลดลง 100 เท่า (Catlett *et al.*, 2002; Havlin *et al.*, 2005) และทองแดงลดลง 100 เท่า (Havlin *et al.*, 2005) เนื่องจากเมื่อค่าปฏิกิริยาดินสูงขึ้นธาตุประจุบวกเหล่านี้จะเปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ ซึ่งเป็นรูปที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าดินเหนียว ซึ่งเป็นดินที่มีค่าปฏิกิริยาดินสูง พืชที่ปลูกหรือเจริญเติบโตบริเวณดังกล่าว ใบส่วนยอดจะแสดงอาการใบเหลือง หรือในบางครั้งจะมีสีขาวซีด ซึ่งอาการดังกล่าวเป็นลักษณะของการขาดธาตุอาหารจุลภาค โดยเฉพาะธาตุเหล็ก

2.5.2 สภาพออกซิเดชันและรีดักชัน

สภาพออกซิเดชันและรีดักชัน เป็นสภาพที่ธาตุอาหารจุลภาคได้รับออกซิเจน (ออกซิเดชัน) และสูญเสียออกซิเจน (รีดักชัน) จากโมเลกุล โดยธาตุเหล็ก แมงกานีส และทองแดง สามารถพบได้ทั้ง 2 สภาพ ซึ่งแต่ละสภาพก็จะมีรูปของธาตุอาหารจุลภาคที่แตกต่างกัน เช่น สภาวะน้ำท่วมขัง (การสูญเสียออกซิเจน) เหล็กและแมงกานีสจะอยู่ในรูปของเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) และแมงกานีสไอออน (Mn^{2+}) ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ง่าย ทำให้ความเป็นประโยชน์ของเหล็กและแมงกานีสเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเข้าสู่สภาวะแล้ง (ได้รับออกซิเจน) เหล็กและแมงกานีสจะอยู่ในรูปออกไซด์ ซึ่งเป็นรูปที่ละลายน้ำได้น้อย (ไพบูลย์, 2546) โดยสภาวะที่ธาตุอาหารจุลภาคได้รับออกซิเจนในปริมาณที่มากหรือเพียงพอสำหรับออกซิไดซ์ จะทำให้การละลายได้ของธาตุอาหารจุลภาคลดลง ถึงแม้ดินจะมีค่าปฏิกิริยาดินต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากธาตุอาหารจุลภาคได้เปลี่ยนรูปเป็นสารประกอบออกไซด์ซึ่งละลายน้ำได้น้อย ทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคลดลงเช่นกัน แต่ถ้าอยู่ในสภาพที่สูญเสียออกซิเจนหรือสภาพน้ำขัง และมีค่าปฏิกิริยาดินต่ำจะทำให้การละลายได้ของธาตุอาหารจุลภาคเพิ่มขึ้น

2.5.3 ปฏิกิริยากับสารอินทรีย์

การเกิดปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ของธาตุอาหารจุลภาค จะเกิดกับอินทรีย์วัตถุและอิมัลส์ในดิน ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน (organic complex) สารประกอบเชิงซ้อนนี้มีทั้งที่ละลายน้ำได้ดีและละลายน้ำได้น้อย โดยโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก (คีเลต) จะมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่ เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีค่าคงตัวด้านเสถียรภาพสูงมาก อีกทั้งธาตุอาหารจุลภาคประจุบวกยังมีค่าความสามารถดูดซับกับสารประกอบอินทรีย์ที่มีสภาพไฟฟ้าเป็นลบ (pauling electronegativity) ได้ดีกว่าธาตุอาหารพืชประจุบวกชนิดอื่น เช่น โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม เป็นต้น จึงทำให้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนลดลง (Mckay and Porter, 1997) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการใส่อินทรีย์วัตถุที่ยังไม่มีการย่อยสลายตัว หรือมีการย่อยสลายตัวไม่สมบูรณ์ จะมีความสามารถในการดูดซับธาตุอาหารจุลภาคที่มีประจุบวกเอาไว้ได้ ซึ่งไม่เป็นประโยชน์กับพืช โดยพบว่าธาตุอาหารจุลภาคที่สามารถถูกดูดซับได้ดี และถูกแลกเปลี่ยนออกมาให้เป็นประโยชน์กับพืชได้ยาก คือ ทองแดง รองลงมาคือ สังกะสี เหล็ก และแมงกานีส ตามลำดับ (สุชาติ, 2530) ดังนั้นจึงพบว่าดินอินทรีย์จะมีปริมาณทองแดงที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำถึงต่ำมาก หรืออาจกล่าวได้ว่า ดินอินทรีย์เป็นดินที่ขาดทองแดง สอดคล้องกับ

การศึกษาของทัศนีย์ และคณะ (2535) ที่ได้ศึกษาการให้ปุ๋ยทองแดงกับข้าวที่ปลูกในดินอินทรีย์ (ชุดดินราธิวาส) พบว่า การให้ปุ๋ยทองแดงสามารถลดปริมาณข้าวเมล็ดลีบได้อย่างเด่นชัด เนื่องจากทองแดงมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการเกิด การพัฒนาของละอองเรณู และการแตกของอับเรณู (ยงยุทธ, 2546) อีกทั้งจากการศึกษาของ Bolan และคณะ (2003) พบว่า การใช้วัสดุปรับปรุงดินที่เป็นอินทรีย์ (organic amendment) จะเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับทองแดงในรูปที่ละลายน้ำยาก ทำให้ความสามารถในการละลายน้ำลดลง

2.5.4 ปฏิกริยากับสารอนินทรีย์

การเกิดปฏิกริยากับสารอนินทรีย์ของธาตุอาหารจุลภาคส่วนใหญ่ มักเกิดกับฟอสฟอรัสในดิน ซึ่งมีที่มาจาก การใส่ปุ๋ยเคมีที่มีฟอสฟอรัสเป็นองค์ประกอบของเกษตรกร โดยฟอสฟอรัสจะลดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาค ซึ่งกระบวนการลดความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคเหมือนกับการลดความเป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัสในดิน กล่าวคือ เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตลงไปในดินจะมีการแตกตัวให้ไฮโดรเจนฟอสเฟต (HPO_4^{2-}) ซึ่งไฮโดรเจนฟอสเฟต จะทำปฏิกริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ในดิน ซึ่งมีมากในดินกรดเขตร้อนทั่วไป เกิดเป็นไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (H_2PO_4^-) และทำปฏิกริยากับแคตไอออนต่างๆ ในดิน (ไพบูลย์, 2546) โดยส่วนหนึ่งของแคตไอออนที่เกิดปฏิกริยากับไดไฮโดรเจนฟอสเฟต คือ ธาตุอาหารจุลภาคประจุบวก ซึ่งจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ยาก เช่น FeHPO_4 , FeHPO_4^+ , $\text{FeH}_2\text{PO}_4^+$, $\text{FeH}_2\text{PO}_4^{2+}$, MnHPO_4 , $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)$, $\text{ZnH}_2\text{PO}_4^+$, ZnHPO_4 , $\text{CuH}_2\text{PO}_4^+$, CuHPO_4 , $\text{CuH}_2\text{P}_2\text{O}_7$, $\text{CuHP}_2\text{O}_7^-$, $\text{CuP}_2\text{O}_7^{2-}$ และ $\text{Cu}_2\text{P}_2\text{O}_7$ เป็นต้น (Lindsay, 1979) โดยสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นในช่วงแรก ยังสามารถละลายและปลดปล่อยธาตุอาหารจุลภาคออกมาให้กับพืชได้ เนื่องจากยังมีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนยากแก่การละลาย แต่เมื่อผ่านไประยะหนึ่งความสามารถในการละลายก็จะลดลง จนไม่สามารถที่จะละลายออกมาได้ เนื่องจากสารประกอบเริ่มมีการโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้การละลายเป็นไปได้ยาก และจากการศึกษาของ Li และคณะ (2003) พบว่า เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ปริมาณสังกะสีในรากและส่วนเหนือดินของข้าวบาร์เลย์ลดลง โดยเฉพาะส่วนเหนือดินพบว่า ความเข้มข้นของสังกะสีจะลดลงตามปริมาณของปุ๋ยฟอสเฟตที่เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด หรือบางครั้งอาจพบว่าธาตุอาหารจุลภาคก็จะทำให้ปฏิกริยากับออกไซด์ของแคตไอออนในดินได้เป็นสารประกอบออกไซด์เช่นเดียวกับสภาวะออกซิเดชัน ซึ่งสารประกอบนี้จะละลายน้ำยาก ทำให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสังกะสี และทองแดง ซึ่งมีอยู่น้อยในดินธรรมชาติ

สำหรับโบรอนปัจจัยที่ควบคุมความเป็นประโยชน์นั้นมีอยู่หลายปัจจัย แต่มีบางปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเป็นประโยชน์ค่อนข้างเด่นชัด คือ

1. ชนิดและปริมาณของแร่ดินเหนียว โบรอนเป็นธาตุที่เคลื่อนที่ได้ดีในดินเหนียว แต่จะเคลื่อนที่ได้น้อยในดินเนื้อละเอียด (Fleming, 1980; Kubota *et al.*, 1948) แสดงว่า ดินทรายจะเกิดการชะละลายโบรอนออกจากหน้าตัดดินได้ง่ายกว่าดินเนื้อละเอียด โดยดินเนื้อ

ละเอียดแต่ละชนิดก็จะมีความสามารถในการดูดซับโบรอนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ดินเหนียว ซึ่งจากการตรวจเอกสารของ Goldberg และ Glaubig (1986) และ Goldberg (1997) รายงาน แร่ดินเหนียวชนิดอิลไลต์ (illite) มีความสามารถในการดูดซับโบรอนได้ดีที่สุด รองลงมาคือ แร่ดินเหนียวชนิดมอนต์มอริลโลไนต์ (montmorillonite) และแร่ดินเหนียวชนิดเคโอลิไนต์ (kaolinite) มีความสามารถในการดูดซับโบรอนได้ต่ำสุด ดังนั้นจึงพบว่าดินกรดเขตร้อนซึ่งมีแร่ดินเหนียวชนิดเคโอลิไนต์เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ จะมีปริมาณโบรอนสะสมในดินต่ำ

2. ชนิดและปริมาณของแร่ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของโลหะในดิน ซึ่งออกไซด์และไฮดรอกไซด์ที่กล่าวถึงนี้เป็นออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียม เนื่องจากเป็นออกไซด์และไฮดรอกไซด์ที่พบได้มากในกรดเขตร้อนทั่วไป โดยจากการศึกษาของ Sims และ Bingham (1968) เกี่ยวกับการดูดโบรอนของเหล็กและอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ พบว่า อลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มีความสามารถในการดูดโบรอนได้ดีกว่าเหล็กออกไซด์ สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Jim (1985) พบว่ากลุ่มตัวอย่างดินในรัฐเวอร์จิเนียของสหรัฐอเมริกา มีความสามารถในการดูดยึดโบรอน โดยการดูดยึดนี้มีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับปริมาณของเหล็กและอลูมิเนียมในดิน ที่สกัดด้วยแอมโมเนียออกซาลेट (pH 3.25) ภายใต้แสงอุลตราไวโอเล็ต โดยรูปของไฮดรอกไซด์จะมีความสามารถในการดูดยึดโบรอนได้ดีกว่ารูปออกไซด์ และถ้าไฮดรอกไซด์อยู่ในรูปของอลูมิเนียมจะมีความสามารถในการดูดยึดได้ดีกว่าอยู่ในรูปของเหล็กไฮดรอกไซด์ และถ้าออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์อยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous) คือ ยังไม่มีการสร้างผลึกของอลูมิเนียมหรือเหล็กไฮดรอกไซด์เกิดขึ้น ก็ยังมีความสามารถในการดูดยึดโบรอนได้ดีขึ้น (Goldberg and Glaubig, 1985; Sims and Bingham, 1968) แต่อย่างไรก็ตามการดูดซับโบรอนจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเมื่ออยู่สภาพที่เป็นด่าง (pH > 7)

3. อินทรีย์วัตถุ มีความสามารถในการดูดยึดโบรอนเอาไว้ในดิน (Yermiyaho *et al.*, 1988) โดยการดูดยึดนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อดินมีปริมาณอินทรีย์วัตถุเพิ่มขึ้น (Yermiyaho *et al.*, 1995) และ Parks และ White (1952) พบว่า ฮิวมัสมีความสามารถดูดยึดโบรอนได้ในปริมาณสูง และ Yermiyaho และคณะ (1988) และ Hou (1995) พบว่าอินทรีย์วัตถุมีความสามารถในกาดูดยึดโบรอนได้ดีกว่าแร่ดินเหนียว โดยการดูดยึดของอินทรีย์วัตถุจะมีอิทธิพลของ pH เข้าเกี่ยวข้องด้วย โดยเมื่อ pH เพิ่มขึ้นความสามารถในการดูดยึดโบรอนของอินทรีย์วัตถุก็จะสูงตามไปด้วย (Yermiyaho *et al.*, 1988)

4. ค่าปฏิกิริยาดิน หรือค่าพีเอช (pH) เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการดูดยึดโบรอนของดิน โดยสภาพที่ส่งเสริมให้มีการดูดยึดโบรอนได้ดีจะมีค่าปฏิกิริยาดินที่สูง (pH > 7) โดย Goldberg และ Glaubig (1986) ได้รายงานค่าปฏิกิริยาดินที่ 8-10 ดินในรัฐแคลิฟอร์เนียสามารถดูดยึดโบรอนได้ดีที่สุด แต่ถ้าค่าปฏิกิริยาดินสูงกว่านี้การดูดยึดโบรอนของดินจะลดลง ออกไซด์และไฮดรอกไซด์ของเหล็กและอลูมิเนียมสามารถดูดยึดโบรอนได้ดี เมื่อมีค่าปฏิกิริยาของ

สารละลายประมาณ 7-9 (Goldberg and Glaubig, 1985) สำหรับอินทรีย์วัตถุสามารถดูดยึดโบรอนได้ดีเมื่อมีค่าปฏิกิริยาของสารละลายประมาณ 8.5-9.5 (Yermiyaho *et al.*, 1988)

2.6 ปัญหาการขาดธาตุอาหารจุลภาคในไม้ผลและการแก้ไข

ปัจจุบันการใช้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคในการผลิตไม้ผลยังไม่แพร่หลายในกลุ่มของเกษตรกรรายย่อย ทั้งนี้เนื่องจาก 1) พืชที่ปลูกในดินกรดเขตร้อนมักไม่ค่อยแสดงอาการขาดธาตุอาหารจุลภาค 2) เกษตรกรขาดความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความสำคัญของธาตุอาหารจุลภาค และ 3) ขาดทุนทรัพย์ในการผลิต อีกทั้งธาตุอาหารจุลภาคเป็นธาตุอาหารที่พืชมีความต้องการน้อย ดังนั้นเมื่อพืชได้รับเพียงเล็กน้อยก็จะเพียงพอกับความต้องการ โดยการได้รับธาตุอาหารจุลภาคของพืชส่วนใหญ่จะได้มาจากดิน เนื่องจากธาตุอาหารจุลภาคเป็นองค์ประกอบของดินในพื้นที่ที่ทำการเพาะปลูก หรือติดไปกับปุ๋ยและวัสดุปรับปรุงดินชนิดต่างๆ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยมูลสัตว์ หินฟอสเฟต (phosphate rock) เป็นต้น หรือติดมากับปุ๋ยเคมีที่เกษตรกรใช้เป็นประจำ (ออมทรัพย์, 2540) และในบางครั้งก็จะเป็นองค์ประกอบของยากำจัดศัตรูพืช เช่น ยากำจัดเชื้อราที่ใช้กับองุ่นจะมีทองแดงเป็นองค์ประกอบ เป็นต้น แต่บางครั้งพบว่าสวนไม้ผลบางแห่ง ไม้ผลจะมีการแสดงอาการขาดธาตุอาหารจุลภาคเช่นกัน

2.6.1 สาเหตุการขาดเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอน

การขาดเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอน ของสวนไม้ผล เป็นปัญหาหนึ่งในการจัดการธาตุอาหารให้กับไม้ผล และปัจจุบันปัญหาดังกล่าวเริ่มที่จะสามารถพบได้ทั่วไปกับสวนไม้ผลซึ่งมีสาเหตุจาก

2.6.1.1 ดินมีค่าปฏิกิริยาดินสูงกว่า 7 ส่งผลให้ความสามารถในการละลายของธาตุอาหารจุลภาคลดลง ทำให้พืชไม่สามารถดูดธาตุอาหารจุลภาคไปใช้ประโยชน์ได้ ดินที่มีลักษณะเช่นนี้ คือ ดินเนื้อปูน หรือดินที่ใส่ปูนมากเกินไปจนเกิดสถานะเกินปูน (over liming)

2.6.1.2 ดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูง จนทำให้ความเป็นประโยชน์ของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง ลดลงทั้งในพืชและในดิน ซึ่งจากการตรวจเอกสารของ Sumner และ Farina (1986) พบว่า พื้นที่ที่มีการทำการเกษตรติดต่อกันระยะยาว เช่น แปลงข้าวโพด ถั่วเหลือง และข้าวฟ่าง เป็นต้น ดินจะมีการสะสมฟอสฟอรัสในปริมาณสูง ส่งผลให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคลดลง และผลผลิตของพืชลดลงตามไปด้วย ซึ่งการลดลงของความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคในดิน เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยากับฟอสฟอรัสในดิน เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำยาก ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในเรื่องปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ (ข้อ 2.5.4) สำหรับการลดลงของความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาคในพืชนั้น เกิดจากธาตุอาหารจุลภาคไม่สามารถเคลื่อนที่จากรากสู่ส่วนเหนือดินได้ ซึ่งจากการศึกษาของ Youngdahl และคณะ (1977) พบว่า รากข้าวโพดที่เจริญในสารละลายธาตุอาหารพืชที่มีฟอสฟอรัสสูง

(> 124 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) การเคลื่อนย้ายของสังกะสีจากรากสู่ส่วนเหนือดินลดลง โดยพบว่า รากพืชจะมีการดูดซับสังกะสีไว้ที่ผนังเซลล์ของราก ในรูปของสารประกอบเพคเตต (pectate) ซึ่งสารนี้จะไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายในเอทานอล (ethanol) ดังนั้นจึงทำให้การเคลื่อนย้ายสังกะสีจากรากสู่ส่วนเหนือดินลดลง จากผลการศึกษาของเริงศักดิ์ และคณะ (2532) พบว่า เมื่อมีการใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสให้กับถั่วลิสงในอัตราที่เพิ่มขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของทองแดงในใบอ่อนซึ่งเปิดเต็มที่ (youngest fully expanded leaves) ลดลงอย่างเด่นชัด เนื่องจากมีปริมาณของมายคอไรซาที่อาศัยภายในราก (Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza, VA mycorrhiza) ลดลง แต่อาจเป็นไปได้ว่าทองแดงไม่สามารถเคลื่อนย้ายจากรากสู่ส่วนเหนือดินได้เช่นเดียวกับสังกะสี

สำหรับโบรอนยังไม่มีผลการรายงานผลปุ๋ยฟอสฟอรัสต่อความเป็นประโยชน์ของโบรอนอย่างเด่นชัด แต่ก็มีผลการรายงานเช่นกันว่า การให้ปุ๋ยฟอสเฟตในอัตราสูงกับยาสูบจะทำให้ยาสูบขาดโบรอน แต่ในทางกลับกันผักกาดหัวสามารถดูดโบรอนได้เพิ่มขึ้น (ยงยุทธ, 2535)

ปัจจุบันปัญหาการลดลงของความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาค สามารถพบได้ในสวนไม้ผลบางชนิด เช่น ทูเรียน (สุมิตรา และคณะ, 2544) และลำไย (ยุทธนา และคณะ, 2543) ซึ่งปัญหานี้มีสาเหตุมาจากการใส่ปุ๋ยฟอสเฟตในอัตราสูงติดต่อกันหลายปี สำหรับลองกองเริ่มพบปัญหาดินมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์สูงมากเช่นกัน ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปัญหาการขาดธาตุอาหารจุลภาคได้

2.6.1.3 การเคลื่อนย้ายผลผลิตออกจากพื้นที่ เป็นการเคลื่อนย้ายธาตุอาหารจุลภาคออกจากพื้นที่ปลูก ทำให้มีธาตุอาหารจุลภาคติดไปกับผลผลิต ซึ่งถ้ามีการเคลื่อนย้ายผลผลิตติดต่อกันหลายปี โดยไม่มีการให้ธาตุอาหารจุลภาคกลับคืนสู่ดิน อาจทำให้ดินเกิดสภาวะขาดธาตุอาหารจุลภาคได้

ดังนั้นเมื่อพืชแสดงอาการขาดธาตุอาหารจุลภาค จำเป็นต้องมีการแก้ไข เพื่อลดความรุนแรงของอาการขาดธาตุอาหารจุลภาค ซึ่งการแก้ไขก็คือการให้ธาตุอาหารจุลภาคชดเชยกับพืช

2.6.2 การแก้ปัญหการขาดธาตุอาหารจุลภาคของไม้ผล

การแก้ไขปัญหการขาดธาตุอาหารจุลภาคในสวนไม้ผล โดยทั่วไปสามารถแก้ปัญหได้โดยการให้ปุ๋ยที่มีธาตุอาหารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบกับไม้ผล เช่น ปุ๋ยคอก ปุ๋ยอินทรีย์ วัสดุปรับปรุงดิน หรือแม้กระทั่งปุ๋ยเคมีก็มีธาตุอาหารดังกล่าวเป็นองค์ประกอบ แต่ถ้าพืชมีการขาดธาตุอาหารจุลภาคอย่างรุนแรง การให้ปุ๋ยที่กล่าวมาแล้วไม่สามารถตอบสนองได้ทันทั่วทั้ง จึงมีความจำเป็นต้องให้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคโดยเฉพาะ สำหรับวิธีการให้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคกับไม้ผลนั้นมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ 1) การให้ปุ๋ยทางดิน คือ การใส่ปุ๋ยลงไปบนดิน เพื่อให้ดินเป็นสิ่งดูดซับธาตุอาหารที่ปุ๋ยปลดปล่อยออกมา จากนั้นรากพืชก็จะดูดธาตุอาหารจากดินไปใช้ ซึ่งการให้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคทางดินเหมาะสำหรับอาการขาดธาตุอาหารที่ไม่รุนแรง หรือ เป็นการแก้ปัญหการขาดธาตุอาหารจุลภาคในระยะยาว 2) การให้ปุ๋ยทางใบ คือ การพ่นปุ๋ยให้กับใบ

พืชโดยตรง นิยมใช้เมื่อพืชมีอาการขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรง การให้ธาตุอาหารพืชโดยวิธีนี้สามารถแก้ไขปัญหาการขาดธาตุอาหารได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากพืชสามารถนำธาตุอาหารไปใช้ได้ทันที แต่มีข้อควรระวังเช่นกันในการใช้ปุ๋ยทางใบ เนื่องจากเป็นการให้ปุ๋ยกับใบพืชโดยตรง ดังนั้นถ้าความเข้มข้นที่ใช้สูงเกินไปจะทำให้เกิดการใบไหม้ได้ง่าย

ปัจจุบันการผลิตไม้ผลเศรษฐกิจเริ่มประสบปัญหาการขาดธาตุอาหารจุลภาค ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการจัดการธาตุอาหารหลัก หรือการเลือกพื้นที่ทำสวนไม้ผลที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นการให้ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคจึงเริ่มมีความสำคัญกับการจัดการธาตุอาหารให้กับไม้ผลมากขึ้น โดยไม้ผลบางชนิดได้มีการแนะนำหรือทดลองการจัดการธาตุอาหารจุลภาค ดังนี้

2.6.2.1 ทุเรียน ที่มีอาการต้นโทรมที่ไม่รุนแรง ใบทุเรียนเมื่อโตเต็มที่แล้วจะมีสีเขียวจาง ผิวใบด้านไม่เป้นมัน สามารถแก้ไขได้โดยการใส่ปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาคร่วมกับปุ๋ยธาตุอาหารรองทางดิน โดยแนะนำให้ใช้ปุ๋ยไมโครเมตคอมเพล็กซ์ อัตรา 100 - 200 กรัมต่อต้น ให้โดยการหว่านบริเวณใต้ทรงพุ่ม ห่างจากโคนต้นประมาณ 75 - 100 เซนติเมตร จำนวน 1 ครั้ง หรืออาจใส่ปุ๋ยสูตร 15-30-15, 20-20-20 หรือ 10-20-30 ที่มีธาตุอาหารรองและธาตุอาหารจุลภาคอัตรา 60 กรัม ผสมกับกรดฮิวมิก (humic acid) อัตรา 100 - 200 มิลลิลิตร ผสมกับน้ำ 20 ลิตร ราดใต้ทรงพุ่มทุกสัปดาห์ ติดต่อกัน 3 - 4 ครั้ง แต่ถ้าใบทุเรียนเมื่อโตเต็มที่ที่มีสีเหลืองแสดงว่ามีอาการขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงแนะนำให้มีการพ่นธาตุอาหารจุลภาคทางใบร่วมกับสารประกอบคาร์โบไฮเดรต เรียกสูตรนี้ว่า ทางด่วน ซึ่งประกอบด้วยปุ๋ยสูตร 15-30-15, 20-20-20 หรือ 10-20-30 ที่มีธาตุอาหารรองและธาตุอาหารจุลภาค อัตรา 40 - 60 กรัม ผสมกับกรดฮิวมิก 20 มิลลิลิตร สารอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ครอบใจแอน โพลีเซคมอลตานิค และฟลอริเจน อัตรา 20-30 มิลลิลิตร หรือใช้น้ำตาล กลูโคสหรือเด็กซ์โตรส 600 กรัม ผสมสารกำจัดเชื้อราและสารจับใบ ผสมน้ำ 20 ลิตร พ่นให้ทั่วต้น ติดต่อกัน 3 - 4 ครั้ง ห่างกันครั้งละ 1 สัปดาห์ (หิรัญ และคณะ, 2542; ยงยุทธ และสุขวัฒน์, 2546)

2.6.2.2 องุ่น ที่แสดงอาการต้นโทรม คือ ใบในระยะเพสลาดจะมีสีเหลืองซีด ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาด้านโทรม แนะนำโดยกรมส่งเสริมการเกษตรได้แนะนำให้มีการพ่นธาตุอาหารจุลภาคร่วมกับธาตุอาหารรอง ซึ่งใช้สูตรเดียวกับที่ใช้กับที่ใช้กับทุเรียน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2548) สำหรับการเพิ่มจำนวนดอกบานขององุ่น Brase (2001) ได้แนะนำให้พ่นสังกะสีในช่วงก่อนออกดอกประมาณ 2 สัปดาห์ สามารถเพิ่มปริมาณดอกบานได้ 10 %

2.6.2.3 ลำไย ที่แสดงอาการต้นโทรม ซึ่งเกษตรกรทางภาคเหนือเรียกอาการนี้ว่า โรคหงอย ยุทธาน และคณะ (2543) ได้แนะนำการจัดการธาตุอาหารพืช โดยให้เกษตรกรควรลดปริมาณการใช้ปุ๋ยฟอสฟอรัส เนื่องจากดินมีการสะสมฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารจุลภาค ดังนั้น ยุทธาน และคณะ (2543) ได้เสนอให้มีการใส่ปุ๋ยสังกะสี โดยใช้สังกะสีซัลเฟต ($ZnSO_4$) ใส่ปุ๋ยโบรอน โดยใช้บอแรกซ์ และใส่

ปุ๋ยทองแดง โดยใช้คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) อัตรา 25, 2 และ 3 กรัม (ตามลำดับ) ต่อพื้นที่ ใต้ทรงพุ่ม 1 ตารางเมตร โดยใส่ให้กับต้นลำไยปีละครั้ง

2.6.2.4 มะม่วง อัจฉรย์ (2545) ได้ทดลองให้ปุ๋ยต่อการออกดอกของมะม่วง พบว่า การใส่ปุ๋ยธาตุอาหารหลักสูตร 13-13-21 ร่วมกับธาตุอาหารจุลภาค สามารถเพิ่มปริมาณ การออกดอกให้กับมะม่วง เมื่อเปรียบเทียบกับการให้ปุ๋ยธาตุอาหารหลักเพียงอย่างเดียว โดย เทคนิคการให้ปุ๋ยที่ต่างกัน คือ ให้ทางดินร่วมกันเพียงครั้งเดียว และแบ่งใส่ 2 ครั้ง และให้ปุ๋ยธาตุ อาหารหลักทางดินและพ่นด้วยปุ๋ยธาตุอาหารจุลภาค ไม่มีอิทธิพลต่อการออกดอก และดินที่มี ปริมาณสังกะสีที่เป็นประโยชน์ต่ำ (0.3-0.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยมีสังกะสีสะสมในใบเพียง 13.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม การพ่นสังกะสีในรูปของสังกะสีซัลเฟต ความเข้มข้น 1% สามารถเพิ่ม สังกะสีในใบให้อยู่ระดับที่เพียงพอได้ (20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) และสามารถเพิ่มขนาดทรงพุ่ม และความสูงของต้นได้ แต่ไม่สามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตได้ (Bahadur *et al.*, 1998)

2.6.2.5 ขนุน ที่ปลูกในดินชุดเขาหินซ้อน ซึ่งเป็นดินเนื้อปูน จะแสดงอาการ ขาดธาตุเหล็ก ดังนั้น Grange และ Choodee (2000) ได้ทดลองให้เหล็กในรูปต่าง ๆ ทุก 2 สัปดาห์ จำนวน 7 ครั้ง พบว่า การให้ธาตุเหล็กสามารถลดอาการขาดเหล็กได้ โดยเหล็กที่มี ประสิทธิภาพในการลดอาการขาดเหล็ก คือ เหล็กซัลเฟต (FeSO_4) ที่ความเข้มข้น 0.25 %

2.6.2.6 แอปเปิล ใบแอปเปิลที่วิเคราะห์ความเข้มข้นของแมงกานีสต่ำกว่า 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม แสดงว่าแอปเปิลขาดแมงกานีส ดังนั้น OMAFRA Staff (2004) ได้แนะนำ ให้พ่นปุ๋ยแมงกานีสซัลเฟต ความเข้มข้น 1.3 กรัมแมงกานีสต่อลิตร และถ้าวิเคราะห์สังกะสีในใบ ได้ต่ำกว่า 15 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม OMAFRA Staff (2004) ได้แนะนำให้มีการพ่นปุ๋ยสังกะสี ความเข้มข้น 3.6 กรัมสังกะสีต่อลิตร โดยฉีดพ่นในระยะแตกใบอ่อน

3. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 3.1 สร้างค่าความเข้มข้นมาตรฐานเบื้องต้นของเหล็ก แมงกานีส สังกะสี ทองแดง และโบรอน ของใบลองกอง
- 3.2 ศึกษาผลของธาตุอาหารจุลภาคต่อพื้นที่ใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์ น้ำหนักแห้งต่อใบ และ ความเข้มข้นของธาตุอาหารจุลภาค ของใบลองกอง
- 3.3 ศึกษาการให้ธาตุอาหารจุลภาคทางดินและทางใบต่อการสะสมคาร์โบไฮเดรตที่ไม่อยู่ใน รูปโครงสร้าง การแตกยอดอ่อน ปริมาณช่อดอก และความสมบูรณ์ของต้นลองกอง