

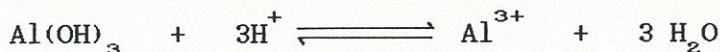
การตรวจเอกสาร

1. การละลายของอะลูมิเนียมในดิน

อะลูมิเนียมเป็นธาตุที่มีอยู่มากในดินประมาณ 7.1 % เป็นที่สองรองจากซิลิกอน เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบของแร่ต่าง ๆ ที่อยู่ในดิน ทั้งแร่อลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) แร่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่พวกซิลิเกต (nonsilicate) และพวกอสัณฐาน (amorphous) นอกจากนี้ยังอยู่ในรูป ลิแกนด์ (ligand) ของอินทรีย์วัตถุในดิน และส่วนที่ถูกดูดซับอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนของทั้งอินทรีย์และอินทรีย์ผสมกันอยู่ ภายใต้ภาวะที่เหมาะสม (pH ต่ำ) อะลูมิเนียมส่วนใหญ่ในสารละลายดินจะอยู่ในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ อีออน อย่างไรก็ตามความเข้มข้น และชนิดอีออนของอะลูมิเนียมในสารละลายดินจะอยู่ในสภาพสมดุลกับส่วนที่เป็นของแข็ง (solid phase) กรณีที่เป็นแร่อสัณฐานอะลูมิเนียมมักจะละลายได้ดีกว่าแร่ที่อยู่ในรูปผลึกซึ่งจะขึ้นกับค่า pH ของดินด้วย ดังจะพิจารณาจากปฏิกิริยาสมดุลในระบบต่าง ๆ ดังนี้ (Lindsay, 1979)

1.1 ระบบของ $Al_2O_3 - H_2O$

โดยทั่วไปแอกติวิตี (activity) ของ Al^{3+} อีออนจะถูกควบคุมโดยแร่ที่เป็นองค์ประกอบหลายชนิดในรูปออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ของอะลูมิเนียม เช่น Al_2O_3 (corundum), $\alpha-Al(OH)_3$ (bayerite), $\gamma-AlOOH$ (boehmite) เป็นต้น แต่แร่ดังกล่าวมักจะมึน้อย ในดินส่วนใหญ่จะพบในรูป $Al(OH)_3$ ออสัณฐานหรือผลึกของแรวกิบbsite โดยที่แร่อสัณฐานจะมีการเปลี่ยนรูปไปเป็นแร่อื่นได้ง่าย ดังนั้นในระบบนี้ แร่ที่เป็นตัวควบคุมการละลายของอะลูมิเนียมคือ $Al(OH)_3$ ซึ่งสามารถอธิบายโดยปฏิกิริยา ดังนี้

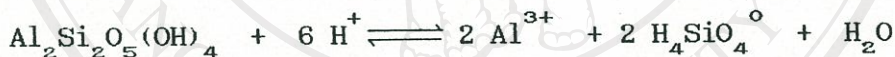


สำหรับค่าคงที่สมดุล (K° , Equilibrium constants) ของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) และในรูปที่เป็นผลึกแรกกับมีค่าเท่ากับ $10^{9.66}$ และ $10^{8.04}$ ตามลำดับ แต่กับมีค่าที่เป็นแร่ที่มีความเสถียรภาพมาก การประเมินถึงขีดจำกัดของแอกติวิตีของ Al^{3+} ที่ละลายในดินมักจะถูกรบกวนโดยแร่อสัณฐานและค่า pH ดังสมการ

$$\log (\text{Al}^{3+}) = 8.04 - 3 \text{ pH}$$

1.2 ระบบของ $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$

ในระบบนี้ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ $\text{Al}(\text{OH})_3$ เป็นองค์ประกอบส่วนหนึ่งในแร่อะลูมิเนียมซิลิเกต เช่น คาโอลินไนท์ (Kaolinite) และมอนต์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) เป็นต้น ค่าคงที่สมดุลจะขึ้นกับชนิดของแร่ ดังเช่น ปฏิกิริยาสมดุลของแร่ คาโอลินไนท์ ซึ่งมี $K^{\circ} = 10^{5.45}$



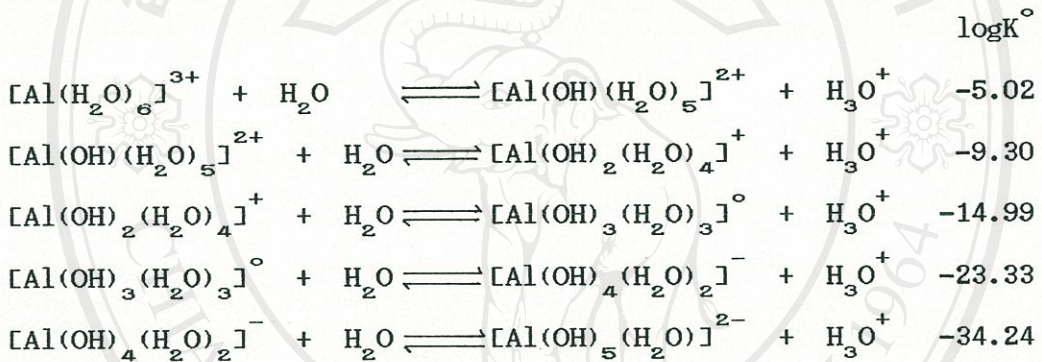
จากปฏิกิริยาดังกล่าว แอกติวิตีของ Al^{3+} นอกจากจะขึ้นกับ pH แล้ว ยังขึ้นกับแอกติวิตีของ $\text{H}_4\text{SiO}_4^{\circ}$ ด้วย ดังสมการ

$$\log (\text{Al}^{3+}) = 2.73 - \log (\text{H}_4\text{SiO}_4^{\circ}) - 3 \text{ pH}$$

ในกรณีของมอนต์มอริลโลไนท์ซึ่งมักจะมี Ca และ Mg ในหลักระหว่างชั้น (Interlayer) ดังนั้นแอกติวิตีของ Al^{3+} ที่ได้จากการละลายของแร่มอนต์มอริลโลไนท์นั้น นอกจากจะขึ้นกับ pH และ $(\text{H}_4\text{SiO}_4^{\circ})$ แล้ว ยังขึ้นกับความเข้มข้นของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} ในสารละลายดินอีกด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินประกอบด้วยแร่อะลูมิเนียมซิลิเกตหลายชนิด (Dixon และ Weed, 1977 อ้างโดย Lindsay, 1979) ดังนั้นการพิจารณาแอกติวิตีของ Al^{3+} ต้องคำนึงถึงแอกติวิตีของแร่องค์ประกอบอื่น ๆ ร่วมกับ pH ด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับ

ความทนทานของแร่ประกอบ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการสลายตัว (Tan, 1986 อ้างโดย Jersak และ MaColl, 1989)

Al^{3+} ที่ได้จากการสลายตัวของแร่ต่าง ๆ เมื่ออยู่ในสารละลายที่มี pH ต่ำจะถูกโมเลกุลของน้ำล้อมรอบทำให้อยู่ในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ อีออน (Jackson, 1960 อ้างโดย ไพบูลย์, 2530) ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส(Hydrolysis)กับน้ำได้ ดังสมการ (Bohn et al., 1979 และ Lindsay, 1979)



ปฏิกิริยาในแต่ละขั้นตอน เมื่อดำเนินไปทางขวาจะมีการปลดปล่อย H_3O^+ (hydronium) อีออนออกมา ทำให้ pH ลดลง ในกรณีที่ pH ของดินต่ำ (ต่ำกว่า 5) จะทำให้อะลูมิเนียมในสารละลายส่วนใหญ่อยู่ในรูป $Al(H_2O)_6^{3+}$ อีออน แต่ถ้า pH สูงขึ้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปทางขวามากขึ้น เนื่องจาก OH^- (hydroxide) อีออนไปทำปฏิกิริยาสะเทินกับ H_3O^+ กลายเป็นโมเลกุลของน้ำ(H_2O) และเมื่อ pH ใกล้เคียงกลาง จะทำให้เกิดการตกตะกอนของอะลูมิเนียมในรูปของกิบbsite ($Al(OH)_3(H_2O)_3^0$) (ไพบูลย์, 2530) จากการแตกตัวของ $Al(H_2O)_6^{3+}$ ดังกล่าว จะมีลักษณะคล้ายกับการแตกตัวของกรดอ่อนและเป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าคุณสมบัติของดินในการต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH เป็นผลเนื่องมาจากพฤติกรรมและธรรมชาติของอะลูมิเนียมดังปฏิกิริยาข้างต้น จากรายงานของ Coleman และ Thomas (1967 อ้างโดย ไพบูลย์, 2530) ที่ให้เห็นว่าในช่วงความเป็นกรดเป็นด่างของดินทางเกษตรทั่วไป (pH 5-8) pH-dependent charge และ Buffer capacity ของดินส่วนใหญ่จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของ Hydroxy aluminum ที่อยู่ตามพื้นผิว และในช่องว่าง

ระหว่างชั้นของแร่แลเยอร์ซิลิเกต (layersilicate) ต่าง ๆ

ดังนั้นความสามารถในการละลายได้ของอะลูมิเนียมในดินโดยทั่วไปจะขึ้นกับ pH ของดินเป็นสำคัญโดยเฉพาะอย่างยิ่งดินที่มีความเป็นกรดสูง ($\text{pH} < 5$) จะทำให้สารละลายดินมีปริมาณอะลูมิเนียมที่ละลายออกมาได้มากขึ้น (Marion *et al.*, 1976 อ้างโดย Bohn, *et al.*, 1979) ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของแร่องค์ประกอบในดิน และ ปริมาณอินทรีย์วัตถุด้วย (Walker *et al.*, 1990) ดินชนิดที่มีอินทรีย์วัตถุอยู่สูง อะลูมิเนียมในสารละลายดินส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน ซึ่งเป็นเหตุให้การละลายตัวของอะลูมิเนียมที่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ (Lindsay, 1979) ถูกเบี่ยงเบนไป

2. ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดหรือรูปแบบ (species) ของอะลูมิเนียมต่อการเจริญของพืช

ตามที่กล่าวมาแล้วในข้อ 1 อะลูมิเนียมในสารละลายดิน สามารถอยู่ในหลายรูปแบบของสารประกอบเชิงซ้อนโมโนเมอร์ เช่น $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3^0$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ เป็นต้น จากการรายงานของ Marion *et al.* (1976 อ้างโดย Bohn *et al.*, 1979) พบว่า Al^{3+} เป็นไอออนที่พบมากที่สุดเมื่อ pH ต่ำกว่า 4.7 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ เป็นไอออนรองที่พบมากที่สุดระหว่าง pH 4.7 - 6.5 $\text{Al}(\text{OH})_3^0$ พบมากที่สุดที่ pH 6.5 - 8 และ $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ จะพบมากที่สุดเมื่อ pH มากกว่า 8 ขณะเดียวกันก็จะมี การตกตะกอนของ $\text{Al}(\text{OH})_3$ เมื่อ pH สูงขึ้นและอยู่ในสภาพสมดุลกับอะลูมิเนียมในสารละลาย อย่างไรก็ตาม สารประกอบเชิงซ้อนโมโนเมอร์ที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสดังกล่าว สามารถจัดเรียงตัวเป็นโพลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็วกลายเป็นโมเลกุลใหญ่ที่มีประจุขึ้น การเกิดโพลิเมอร์เช่นนี้จะพบมากตามบริเวณผิวของคอลลอยด์ดิน (Colloid) โดยที่อะลูมิเนียมที่เกิดโพลิเมอร์นั้นจะใช้หมู่ไฮดรอกซิล (OH) เชื่อมโยงร่วมกันสามารถเขียนเป็นสูตรทั่ว ๆ ไป คือ $[\text{Al}(\text{OH})_x (\text{H}_2\text{O})_{6-x}^{(3-x)+}]_n$ เมื่อ n เป็นจำนวนเฉลี่ยในอะลูมิเนียมไอออนของโพลิเมอร์นั้น โพลิเมอร์เหล่านี้จะมีแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงบนผิวคอลลอยด์ และมักจะไม่สามารถแลกเปลี่ยนกันได้ (Unexchangeable) การเกิดโพลิเมอร์นี้มักจะเกิดในสภาพที่มี OH^- ไอออนสูง

(Hsu, 1968 อ้างโดย Blamey *et al.*, 1983) ส่วน Wada และ Wada (1980) พบว่าการเกิดอะลูมิเนียม โพลีเมอร์ในสารละลายจะเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรงจาก 2 % เป็น 95 % เมื่ออัตราส่วนระหว่าง OH:Al เป็น 0 และ 2.7 ตามลำดับ นอกจากนี้ Hsu (1968 อ้างโดย Blamey *et al.*, 1983) ยังพบอีกว่าการเติมฟอสเฟตลงไปในสารละลายที่มีอะลูมิเนียมสามารถทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้ของอะลูมิเนียมฟอสเฟต รวมทั้งเกิดการตกตะกอนได้ง่ายในรูปที่เป็นโพลีเมอร์ ซึ่งทั้งโมโนเมอร์และโพลีเมอร์นี้ไม่ได้อยู่ในสภาวะที่สมดุลกัน Blamey *et al.* (1983) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียม โพลีเมอร์ในสารละลายมีมากขึ้น จะมีผลทำให้ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อความยาวของรากแก้วเหลืองลดลง โดยที่อะลูมิเนียมโมโนเมอร์เป็นตัวการทำให้การเจริญของรากแก้วเหลืองลดลง ต่อมา Alva *et al.* (1986b) ได้ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่าง การเจริญของรากแก้วเหลืองกับอะลูมิเนียมโมโนเมอร์ พบว่าความสัมพันธ์จะลดลงจาก Al-monomer $Al(OH)^{2+}$, $AlSO_4^+$, $Al(OH)_2^+$, Al^{3+} , $Al(OH)_3^{\circ}$ ตามลำดับ แต่ในปี 1988 Noble *et al.* ได้ทดลองปลูกแก้วเหลืองในสารละลายพบว่า ความยาวของรากมีความสัมพันธ์กับแอกติวิตี Al^{3+} มากที่สุดตามด้วย $AlOH^{2+}$, $Al(OH)_2^+$ และ $AlSO_4^+$ ตามลำดับ เช่นเดียวกับการทดลองของ Pavan และ Bingham (1982) ที่ทดลองกับกาแฟที่ปลูกในสารละลาย พบว่าความเป็นพิษของอะลูมิเนียมมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับแอกติวิตีของ Al^{3+} มากกว่าไอออนชนิดอื่น ๆ ของอะลูมิเนียมในสารละลาย และ Alva *et al.* (1986 b) พบว่า $AlSO_4^+$ ที่มีในสารละลายเป็นตัวลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมลง นอกจากนั้น Carmeron *et al.* (1986) และ Lindsay (1979) ได้รายงานว่า Al^{3+} ในสารละลายทำปฏิกิริยากับ SO_4^{2-} และ F^- ในสารละลายเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูป $AlSO_4^+$, $Al(SO_4)_2^-$, AlF_3° , AlF_2^+ และ AlF^{2+} ทำให้ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อความยาวของรากบาร์เลย์ลดลง จากพฤติกรรมดังกล่าวทำให้การวิเคราะห์หาอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนรูปได้ง่าย (Labile Al) ในการจำแนกความเป็นพิษของอะลูมิเนียม ในดินเกิดความยุ่งยาก ไม่น่าแน่นอนเมื่อมีสารประกอบเชิงซ้อนเหล่านี้ร่วมอยู่ด้วย นอกจากนี้ Carmeron *et al.* (1986) และ Lindsay (1979) ยังพบอีกว่าการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมจะเกิดได้ง่ายกับ F^- เมื่อเทียบกับ SO_4^{2-} (90 และ 0.5 % ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามในดินโดยทั่วไปมักจะมี SO_4^{2-} อยู่มากกว่า F^- ทำให้

ประสิทธิภาพในการลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมในดินมีไม่มากนัก เนื่องจากความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของซิลเฟตกับอะลูมิเนียมมีน้อยกว่าฟลูออไรด์ (Ritchre, 1986 อ้างโดย Carmeron et al., 1986) ส่วนชนิดของอะลูมิเนียมที่มีผลต่อทางชีววิทยาจากการศึกษาพบว่าส่วนใหญ่จะเป็นพวก Al^{3+} และสารเชิงซ้อนโมโนเมอร์ไฮดรอกซี (Alva et al., 1986b, Pavan และ Bingham, 1982) ซึ่งรูปของอะลูมิเนียมที่สามารถละลายน้ำได้นี้จะพบมากในสารละลายดิน เมื่อ pH ต่ำกว่า 5.0

นอกจากนี้ในดินกรดที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงพบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมีอิทธิพลทำให้ปริมาณอะลูมิเนียมที่สกัดได้จาก 1 M KCl ลดลง (Thomas, 1975) เช่นเดียวกับการทดลองของ Evans และ Kamparth (1970) ที่พบว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงจะมีความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในสารละลายดินต่ำ และทำให้ผลผลิตของข้าวโพดและถั่วเหลืองเพิ่มขึ้น จากการทดลองของ Rodriguez และ Schaefer (1971) โดยใช้ดินภูเขาไฟในประเทศชิลีที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง พบว่าพืชที่ขึ้นตามธรรมชาตินั้น ไม่แสดงอาการเป็นพิษของอะลูมิเนียม ทั้งนี้เนื่องจากว่าดินมีอินทรีย์วัตถุสะสมอยู่เป็นปริมาณมาก จากการศึกษพบว่า Fulvic acid ในดินดังกล่าวเกิดการจับตัวเป็นคีเลต (Chelated) ในอัตราส่วนอะตอม C:Al ประมาณ 8:1 ดังนั้นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินกรดจัด (pH 4 ถึง 5.5) สามารถลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมในดินได้ (Hoyt และ Turner, 1975 และ Seripong, 1989)

3. ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อการเจริญเติบโตของพืช

จากการศึกษาของนักวิจัยหลายท่าน ที่ได้ศึกษาถึงความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อพืชชนิดต่าง ๆ รวมทั้งถั่วเหลือง พบว่าอาการที่แสดงออกอันดับแรกที่สุดมองเห็นได้ชัดเจนจะเกิดขึ้นบริเวณราก (Klimashevskii และ Malysheva, 1977, Alam และ Adams, 1979, 1980, Pavan และ Bingham, 1982, Sapar et al., 1982, Paulino et al., 1986 และ Hecht Buchholz และ Schuster, 1987) กล่าวคืออาการเจริญของรากจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น รากมีลักษณะอ้วนสั้น แกร่น การเจริญของรากแขนงและรากกิ่งลดลง ทำให้รากขาดกิ่งก้านสาขาที่จำเป็นต่อการดูดซับ

ธาตุอาหารและน้ำ (Wilcox, 1987) ทั้งนี้เนื่องจากอะลูมิเนียมมีผลยับยั้งการยืดตัว (elongation) ของเซลล์ราก (Wilcox, 1987 อ้างจากการทดลองของ Mutsumoto *et al.*, 1977, Wallace และ Aderson, 1984) และมีผลต่อการแบ่งเซลล์แบบ mitosis ของเซลล์ราก (Wilcox, 1987 อ้างจากการทดลองของ Clarkson, 1965, Horst *et al.*, 1983, Matsumoto และ Morimurra, 1980 และ Buchholz และ Schuster, 1987) ซึ่งสาเหตุของการยับยั้งการแบ่งเซลล์นี้เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างอะลูมิเนียมกับกรดนิวคลีอิก (nucleic acids) (Wilcox, 1987 อ้างจากการทดลองของ Trim, 1958) และเกิดการเสื่อมตัวของเซลล์รากในส่วน of epidermal และ cortical (Paganelli *et al.*, 1987 อ้างจากการทดลองของ Abrahamsen, 1984, Foy *et al.*, 1978, McCormick และ Amendola, 1983, Schier, 1985) สำหรับในพืชตระกูลถั่ว การเกิดปรอทถั่วจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมสูงขึ้น (Sartain และ Kamprath, 1975 อ้างโดย Wilcox, 1987, Mayz *et al.*, 1984, Munus, 1978 อ้างโดย Paulino *et al.*, 1986 และ Franco และ Munus, 1982)

อาการเป็นพิษของอะลูมิเนียม นอกจากจะสังเกตได้ชัดเจนจากการเจริญเติบโตของ รากแล้ว อาการอาจจะแสดงออกให้เห็นได้ในส่วนต้นและใบของพืช อาการทั่ว ๆ ไป คือ ใบจะมีขนาดเล็กกลางและมีสีเขียวเข้ม ต้นแคระเตี้ย การแกตัวช้าลง ใบอาจมีสีม่วง เกิดอาการเหี่ยวเฉาและเกิดก้านใบหุบลง (petiole collaps) (Foy, 1978 อ้างโดย Wilcox, 1987 และ Foy, 1976) จากการศึกษาพบว่า ประเภทและพันธุ์พืชแต่ละชนิด มีความอ่อนแอและความต้านทานต่อการเป็นพิษของอะลูมิเนียม ได้แตกต่างกัน (Pavan และ Bingham, 1982) ดังรายงานต่อไปนี้

ถั่วเหลือง

ในปี 1969 Foy *et al.* ได้ศึกษาความทนทานของถั่วเหลืองต่อความเป็นพิษของ อะลูมิเนียมพบว่าพันธุ์ Perry ทนทานกว่าพันธุ์ Chief โดยที่ปริมาณ Ca ของพันธุ์ Perry

ทั้งในต้นและรากจะลดลง และเกิดอาการการหุบลงของก้านใบ (petiole collapse) บางครั้งจะพบจุดเหลืองประและกาตายของเซลล์ใบ (chlorosis และ necrosis) และจะพบมากในพันธุ์ที่อ่อนแอต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Al sensitive) จากการทดลองของ Sapra *et al.* (1982) ได้ผลเช่นเดียวกับ Foy *et al.* (1969) และยิ่งพบว่าความเป็นพิษของอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในสารละลายเพิ่มขึ้นเป็น 8 ppm โดยที่การเจริญของรากจะลดลงมาก นอกจากนั้นความสูง และความกว้างของใบจะลดลงด้วย รวมทั้งการเกิด Chlorosis ที่ใบ ส่วน Alva *et al.* (1986b) ทดลองกับถั่วเหลืองพันธุ์ Lee ในสารละลายที่ pH 4.4 พบว่าการเพิ่มอะลูมิเนียมจาก 0.27 ppm เป็น 1.08 ppm ทำให้ความยาวของรากลดลงจาก 180 เป็น 59 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งคล้ายคลึงกับการทดลองของ Lund (1970) ที่พบว่าความยาวของรากจะลดลง 50 % เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในสารละลายเพิ่มจาก 1.0 ppm (ความเข้มข้นของ Ca ในสารละลาย 10 ppm) เป็น 2.0 ppm (Ca ในสารละลาย 40 ppm) นอกจากนั้น Kamprath (1971) อ้างโดย Foy, 1976) พบว่า ถั่วเหลืองที่ปลูกในดินสามารถทนความเป็นพิษของอะลูมิเนียมได้ เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในดินน้อยกว่า 20 %

ข้าว

การศึกษาข้าว 30 พันธุ์ ในสารละลายธาตุอาหาร โดย Fageria และ Carvalho (1982) พบว่าช่วงวิกฤตของอะลูมิเนียมในสารละลายที่ทำให้ต้นข้าวแสดงความเป็นพิษคือ 100 - 140 ppm และอะลูมิเนียมมีผลทำให้ข้าวดูดใช้ธาตุอาหารอื่นลดลง ซึ่งก็สอดคล้องกับการทดลองของ Abraham *et al.* (1981) ที่ไม่พบอาการแสดงออกของความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อส่วนบนของต้นข้าว โดยที่ผลผลิตของข้าวไม่แตกต่างกันในระดับความเข้มข้นของอะลูมิเนียมตั้งแต่ 0 - 50 ppm แต่การเจริญและการแตกกิ่งของรากข้าวกลับลดลงอย่างมากในช่วงความเข้มข้น 20 - 50 ppm และการเกิด vascular traces ในส่วน Cortex ของรากมีมากขึ้น ส่วน Tang Van Hai *et al.* (1989) พบว่าข้าวพันธุ์ที่อ่อนแอต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียมจะมีการสะสมอะลูมิเนียมในส่วนลำต้น ได้มากกว่าพันธุ์

ที่ทนทาน ในระดับความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเดียวกัน โดยที่การสะสมจะมากขึ้น เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น และที่ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมประมาณ 4 ppm พบว่าทำให้น้ำหนักแห้งของต้นข้าวสาลีลดลง แต่เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเป็น 10 ppm หรือมากกว่า จะทำให้น้ำหนักแห้งของข้าวพันธุ์ก่อนแอต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Trang Lun) ลดลงอย่างรวดเร็ว ส่วนพันธุ์ที่ทนทานต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม (Radin Str) น้ำหนักแห้งจะไม่แตกต่างกันมากนัก

ไม้ป่า

Keltjens และ Loenen (1989) ทดลองปลูกพืชป่า 5 ชนิดคือ โอ๊ก (oak), ต้นเบิร์ช (birch), douglas-fir, scots pine และ larch พบว่าอัตราการตายของต้นไม้มากกว่า 5 ชนิดดังกล่าวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มในสารละลายที่มีระดับอะลูมิเนียมต่าง ๆ กันคือ พวกที่ไม่มีการตาย เช่น oak, birch และ scots pine ขณะที่พวก larch และ douglas-fir จะมีการตายเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมสูงกว่า 10 ppm โดยที่ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมต่อน้ำหนักแห้งของราก และส่วนต้นใน birch และ scots pine ไม่แตกต่างกัน แต่ใน douglas-fir พบว่าที่ 5 ppm ของอะลูมิเนียมจะทำให้รากและส่วนต้นตายได้ผลสูงสุด เมื่อเพิ่มอะลูมิเนียมมากกว่า 5 ppm (10 - 30 ppm) จะทำให้น้ำหนักแห้งของรากลดลงมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อน้ำหนักแห้งของส่วนต้นสำหรับต้น larch และ oak นั้น พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ทั้งน้ำหนักแห้งของต้นและรากจะไม่มี ความแตกต่างกันและจะให้ผลสูงสุดเมื่อมีอะลูมิเนียม 25 ppm

Schier (1985 อ้างโดย Paganelli *et al.*, 1987) พบว่า สนแดง (red spruce) และ balsam fir จะแสดงอาการเป็นพิษของอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 50 ppm ส่วน Steiner (1978 อ้างโดย Paganelli *et al.*, 1987) ทดลองกับต้นไม้ 11 ชนิด พบว่าอะลูมิเนียมมีผลต่อการเจริญของรากต้น hybrid poplar และ autumnolive ที่ 10-40 ppm สำหรับพืชชนิดอื่นเช่น yellow birch, gray birch, paper birch, virginia pine, pitch pine, scots pine, pin oak,

northern red oak และ European black alder นั้น มีความทนทานต่ออะลูมิเนียม โดยที่พบว่าความเข้มข้นอะลูมิเนียมที่ทำให้พืชพวกนี้แสดงอาการเป็นพิษได้ั้น สูงถึง 80-160 ppm แต่สำหรับการทดลองของ McCormick และ Amerdola (1983 อ้างโดย Paganelli, 1987) ที่ปลูก paper birch และ hybrid polar ในดิน พบว่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในสารละลายดินเพียง 1 - 2 ppm มีผลทำให้การเจริญของรากของพืชทั้งสองลดลงมาก เช่นเดียวกับการทดลองของ Ulrich et al. (1980) ที่ทดลองกับ European beech ส่วนพวก Loblolly-pine นั้นอ่อนแอต่อความเป็นพิษของอะลูมิเนียม โดยที่ความเข้มข้น 5 ppm ในสารละลายก็ทำให้การเจริญของรากลดลงอย่างมาก (Paganelli et al., 1987) ในทางตรงกันข้าม Asp et al. (1987) พบว่า spruce จะเริ่มแสดงอาการเป็นพิษอะลูมิเนียมที่ความเข้มข้น 27 ppm โดยบริเวณรากจะมีสีน้ำตาล แกรนสั้น รากแขนงหนาสั้น บริเวณปลายรากตาย ปลายใบเริ่มเกิด chlorosis และ necrosis เล็กน้อย โดยที่อาการจะรุนแรงมากที่ความเข้มข้นอะลูมิเนียม 270 ppm อย่างไรก็ตามระดับความเข้มข้นนี้ไม่มีผลต่อการเจริญของลำต้นส่วนบน

ได้มีการศึกษาต้น Honeylocust โดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน เช่น Sucoff et al. (1989) พบว่าอะลูมิเนียมทำให้การเจริญทางด้านความสูง น้ำหนัก จำนวนใบ จำนวนรากแขนง และการแตกสาขาของรากลดลง โดยที่การเจริญของรากจะเริ่มถูกยับยั้งตั้งแต่ความเข้มข้นของอะลูมิเนียม 2.30 ppm จำนวนรากแขนงจะลดลง 72 % เมื่อความเข้มข้นในสารละลายดินเพิ่มขึ้นเป็น 22.44 ppm แต่ Thornton et al. (1986a อ้างโดย Sucoff et al., 1989) พบว่า น้ำหนักแห้งทั้งหมดและจำนวนรากแขนงจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นอะลูมิเนียมในสารละลายเป็น 4.05 ppm และปริมาณรากกิ่งลดลง 60 % ที่ความเข้มข้นอะลูมิเนียมเป็น 1.35 ppm นอกจากนี้ Wolfe และ Joslin (1989) ปลูก honeylocust ในดินที่มีการปรับ pH ต่าง ๆ กันโดยใช้ HCl ร่วมกับ CaSO_4 และ HCl เพียงอย่างเดียว จากการศึกษาพบว่า ความยาวของราก น้ำหนักแห้งของรากและการแตกสาขาของรากจะลดลง เมื่อ pH ดินลดลง แต่ดินที่มีการเติม HCl อย่างเดียวจะลดลงมากกว่า อย่างไรก็ตามเขาพบว่าการใช้อัตราส่วน $\text{Ca} : \text{Al}$ ในสารละลายดินใช้คาดคะเนการเจริญของรากได้ดีกว่าการใช้ความเข้มข้นอะลูมิเนียมอย่างเดียว

ชา

ชาปลูกได้ดีในดินกรดที่อาจจะมีระดับของอะลูมิเนียมสูง ใบชาแก่สามารถสะสมอะลูมิเนียมได้ในปริมาณมากกว่า 30,000 ppm โดยไม่แสดงอาการเป็นพิษ (Matsumoto *et al.*, 1976 อ้างโดย Owuor และ Cheruiyot, 1989) แต่ต้นกล้าชาแสดงอาการเป็นพิษต่ออะลูมิเนียมเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในใบมีเพียง 50 ppm และมีผลทำให้ยับยั้งการเจริญของชาได้ (Ishigaki, 1984 อ้างโดย Owuor และ Cheruiyot, 1989) เป็นที่น่าสังเกตว่าการเติมอะลูมิเนียมลงในดินสามารถทำให้ pH ของดินลดลง และมีผลโดยทางอ้อมทำให้การเจริญเติบโตของต้นชาเพิ่มขึ้น (Kinoshi *et al.*, 1985 และ Matsumoto *et al.*, 1976 , Ishigaki, 1984 อ้างโดย Owuor และ Cheruiyot, 1989) นอกจากนี้อะลูมิเนียมยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการดึงดูดธาตุ P ในต้นชาได้แต่ประสิทธิภาพในการให้ K และ Ca ในดินจะลดลง (Kinorhi *et al.*, 1985 , Ishigaki *et al.*, 1984 อ้างโดย Owuor และ Cheruiyot, 1989)

ทานตะวัน

จากการทดลองของ Hortenstine และ Fiskell (1961) พบว่าความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในสารละลายที่มากกว่า 4 ppm ทำให้ความสูง น้ำหนักแห้งของต้นและรากลดลง และลักษณะรากจะสั้นแฉกรวม มีสีน้ำตาลอ่อน เมื่อความเข้มข้นเพิ่มเป็น 10-16 ppm ทำให้ใบมีสีน้ำตาลและใบแรกที่เกิดจากเมล็ดจะตายไป

4. ผลของอะลูมิเนียมต่อการดูดใช้ (uptake) และการเคลื่อนย้าย (translocation) ของธาตุอาหารอื่น ๆ ของพืช

4.1 ธาตุอาหารหลัก (N, P, K)

ไนโตรเจน (N)

จากการทดลองของ Tang Van Hai *et al.* (1989) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมิเนียมไม่มีผลต่อการดูดใช้ N โดยข้าว โดยที่ความเข้มข้นของ N ในใบข้าวอยู่ในระดับสูงถึง $3.42 \pm 0.31 \%$ และไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อความเข้มข้นอะลูมิเนียมอยู่ในช่วง 0-30 ppm อย่างไรก็ตามการดูดใช้ N ในรูปของ NH_4^+ จะมามากกว่าในรูป NO_3^- แต่การดูดใช้ NH_4^+ มีแนวโน้มลดลง เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกันการดูดใช้อะลูมิเนียมจะลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อมีการเติมปุ๋ยแอมโมเนียมแก๊พซ์ (Owuor และ Cheruiyot, 1989) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการแก่งแย่งกันในการดูดใช้ระหว่างแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และ อะลูมิเนียมไอออน (Al_3^+) (Kotze *et al.* 1977 อ้างโดย Owuor และ Cheruiyot, 1989) นอกจากนี้พบว่าการเติมปุ๋ยแอมโมเนียมทำให้ความเป็นกรดของดินเพิ่มขึ้น (Bhattachavya และ Dey, 1983, Sivasubramanium และ Talibudeen, 1972 อ้างโดย Owuor และ Cheruiyot, 1989) ซึ่งมีผลทำให้สารละลายดินมีอะลูมิเนียมที่สามารถแลกเปลี่ยนกันได้มากขึ้น (Owuor และ Cheruiyot, 1989)

ฟอสฟอรัส (P)

อะลูมิเนียมในดินเป็นตัวการสำคัญอันหนึ่งในการดูดซับ (adsorption) และยึดเหนี่ยว (retention) ปุ๋ยฟอสเฟตในดินกรด ขณะเดียวกันบนผิวของผลึกแร่อะลูมิเนียม (aluminous minerals) ก็เป็นตัวดูดซับ P ที่ดี (Helyar *et al.*, 1976, Muljadi *et al.*, 1972) ในปี 1985 Bolan *et al.* รายงานว่า อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์

(Al(OH)₃) ในดินจะสามารถดูดซับ P ได้มากกว่าเหล็กไฮดรอกไซด์ (Fe(OH)₃) และการดูดซับนี้จะสูงขึ้นเมื่อปริมาณ P สูงขึ้น ส่วน Yamasaku (1985 อ้างโดย Tang Van Hai, 1989) พบว่าการเติมฟอสเฟตลงในสารละลายทำให้เกิดการตกตะกอนกับอะลูมิเนียมในรูปของ AlH₂PO₄(OH)₂ ทำให้ลดความเข้มข้นของฟอสฟอรัสและอะลูมิเนียมในสารละลายลง (Bloom, 1981) เช่นเดียวกับการทดลองของ Blamey *et al.* (1983) ที่พบว่าเมื่อเติมสารละลาย NaH₂PO₄ ลงไปในสารละลายธาตุอาหารจะลดความเข้มข้นของ monomeric Al ในสารละลายลง เนื่องจากฟอสเฟตเกิดการตกตะกอนหรือเกิด โพลีเมอร์ กับอะลูมิเนียม และมีผลทำให้ความยาวของรากแก้วเหลืองเพิ่มขึ้น ส่วน Alva *et al.* (1986) พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่าง P/Al ในสารละลายสูงขึ้นทำให้ความยาวของรากแก้วเหลืองตามตะวัน และ subterranean clover เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับการลดลงของ monomeric Al ในสารละลาย การลดลงจะมีนัยสำคัญ เมื่อ P/Al มากกว่า 0.2 (Kim *et al.*, 1986 อ้างโดย Alva *et al.*, 1986) แต่ Tang Van Hai *et al.* (1989) ได้ทดลองกับข้าวพบว่าที่ความเข้มข้นของอะลูมิเนียม 1-5 ppm จะเป็นตัวส่งเสริมการดูดใช้ P แต่เมื่ออะลูมิเนียมเข้มข้นมากกว่า 5 ppm การดูดใช้ของ P จะลดลง ทั้งนี้เป็นผลสืบเนื่องจากการศึกษาการดูดใช้ P ผ่านรากในรูปของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีประจุบวกสุทธิต่ำ (Low net positive charge) (White, 1976, Maclead และ Sackson, 1965 และ Mullette, 1975) นอกจากนี้ฟอสเฟตยังถูกดูดซับได้ โดยสารประกอบเชิงซ้อนของอะลูมิเนียมกับอินทรีย์วัตถุ (Al-organic mater-phosphate complex) เช่น R(COO)₃AlH₂PO₄⁻, R(COO)₂AlHPO₄ (Bloom, 1981)

โพแทสเซียม (K)

จากการทดลองของ Tang Van Hai *et al.* (1989) ที่ทดลองกับข้าวพบว่า พันธุ์ที่มีความทนทานต่ออะลูมิเนียมมีการดูดใช้ K ได้ดีกว่าพันธุ์ที่อ่อนแอต่ออะลูมิเนียมในทุกๆ ระดับความเข้มข้นของอะลูมิเนียม การดูดใช้ K จะเริ่มลดลงเมื่ออะลูมิเนียมมีความเข้มข้น 5 ppm สำหรับ Asp *et al.* (1988) พบว่าความเข้มข้นของ K ในใบ ต้น และ รากเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจาก 0 - 27 ppm แต่เมื่อความเข้มข้นอะลูมิเนียม

สูงถึง 270 ppm การดูดใช้ K^+ ($86 Rb^+$) ในรากจะลดลงเนื่องจากการลดระดับของ ATP (Pfeffer *et al.*, 1986 อ้างโดย Asp *et al.*, 1988) โดยที่ ATP จะรวมตัวกับอะลูมิเนียมเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนในรูป Al-ATP มีผลทำให้ปริมาณของ ATP ที่จะใช้ในขบวนการดูดใช้ของ K ลดลง (Womack และ Colowic, 1979 อ้างโดย Asp *et al.*, 1988)

4.2 ธาตุอาหารรอง (Ca, Mg)

แคลเซียม (Ca)

ความเป็นพิษของอะลูมิเนียมต่อการเจริญเติบโตของพืช มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการดูดใช้ Ca โดยพืช ทำให้ลักษณะอาการที่แสดงออกถึงความเสียหายของอะลูมิเนียมหลายอย่าง โดยเฉพาะการเจริญของรากมีลักษณะคล้ายกับการขาด Ca (Johnson และ Jackson, 1964 อ้างจากผลการทดลองของ Hallsworth *et al.*, 1957 และ Rorison, 1958) รวมทั้งอาการก้านใบหุบลง (Petiole collapse) ของถั่วเหลือง พันธุ์ที่ไม่ทนทานต่ออะลูมิเนียม (Foy *et al.*, 1969) ทั้งนี้เนื่องจาก Al^{3+} จะครอบครองบริเวณที่เป็นประจุลบในผนังเซลล์ของราก (Hanson, 1984 อ้างโดย Asp *et al.*, 1988) ทำให้การดูดใช้ของ Ca^{2+} ในรากลดลง (Hortenstine และ Fiskell, 1961 และ Johnson และ Jackson, 1964) โดยที่ Ca มักจะถูกจำกัดอยู่บริเวณภายนอกราก (Johnson และ Jackson, 1964) ทำให้มีการสะสมของ Ca ภายในรากลดลง (Hortenstine และ Fiskell, 1961 และ Asp *et al.*, 1988) ส่วนการเคลื่อนย้าย Ca จากรากไปสู่ลำต้นมักจะถูกจำกัดโดย Al เช่นกัน (Johnson และ Jackson, 1964) มีผลทำให้การสะสมของ Ca บริเวณใบและต้นของถั่วเหลืองลดลงไปด้วย (Foy *et al.*, 1969) อย่างไรก็ตาม Hortenstine และ Fiskell (1961) พบว่าไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ในปริมาณของ Ca ในต้น เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมสูงขึ้น แต่ในรากปริมาณ Ca จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพันธุ์พืชด้วย ดังเช่นการทดลองของ Foy *et al.*, (1969) พบว่าถั่วเหลืองพันธุ์ที่อ่อนแอต่ออะลูมิเนียมจะมีการ

สะสมของ Ca ในทั้งส่วนต้นและราก ลดลงอย่างมีนัยสำคัญมากกว่าพันธุ์ที่ทนทานต่ออะลูมิเนียม

ในบางกรณีจะพบความขัดแย้งในส่วนที่เกี่ยวข้องกับระดับวิกฤตของความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเหมือนกัน ดังเช่น Thornton et al., (1986 a) พบว่าน้ำหนักรากของ honeylocust จะลดลงเมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมในดินที่สกัดด้วยน้ำเป็น 60 μM แต่ Sucoff et al., (1989) ไม่พบอาการเป็นพิษของอะลูมิเนียม ถึงแม้ว่าปริมาณของอะลูมิเนียมจะสูงถึง 85 และ 260 μM ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากอิทธิพลร่วมของ Ca ในดินกรด ซึ่ง Wolfe และ Joslin (1989) ได้ใช้อัตราส่วน Ca : Al ในการคาดคะเนผลของการลดลงน้ำหนักของรากได้ดีกว่าการใช้ Al หรือ Ca อย่างเดียว ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเมื่ออัตราส่วนของ Ca : Al ในสารละลายดินต่ำกว่า 0.2 จะยังผลให้พืชส่วนใหญ่ได้รับความเสียหาย (Kazda และ Zvacek, 1989) ดังนั้นการเติม Ca หรือปล่อยให้ในดินกรดจะทำให้ประสิทธิภาพของการใช้ Ca โดยพืชดีขึ้น และ ลดความเป็นพิษของอะลูมิเนียมลงได้ (Noble et al., 1988) อย่างไรก็ตาม เมื่อผลรวมทั้งหมดของโมโนเมอร์อะลูมิเนียม มากกว่าหรือเท่ากับ 18 μM (0.49 ppm) การเพิ่มความเข้มข้นของ Ca ไม่สามารถบรรเทาความเป็นพิษของอะลูมิเนียมลงได้ (Alva et al., 1986 a)

แมกนีเซียม (Mg)

ความสัมพันธ์ระหว่าง Al และ Mg มีลักษณะคล้ายคลึงกับของ Al และ Ca ดังที่ได้กล่าวข้างต้น Asp et al. (1988) พบว่าเมื่ออะลูมิเนียมสูงขึ้นทำให้ความเข้มข้นของ Mg ในรากลดลง แต่ความเข้มข้นของ Mg ในส่วนใบและต้นมีความแตกต่างกัน และการเพิ่ม Mg ในสารละลายช่วยทำให้ความยาวรากเพิ่มขึ้น (Tang Van Hai et al., 1989) ส่วนการทดลองของ Sucoff et al. (1988) พบว่าเมื่อปริมาณอะลูมิเนียมในสารละลายสูงขึ้น ทำให้ความเข้มข้นของ Mg ในใบและต้นลดลง และการเจริญเติบโตของ honeylocust จะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของ Al:Mg เพิ่มขึ้น

4.3 ธาตุอาหารพวกจุลธาตุ

จากการทดลองของ Tang Van Hai et al. (1989) ไม่พบว่าอิทธิพลของอะลูมิเนียมต่อความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุพวก Fe, Cu, Zn, B และ Mo จะมี แต่เฉพาะกับ Mn เท่านั้นที่มีการลดลงเมื่ออะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น กล่าวคืออะลูมิเนียมมีผลต่อการดูดใช้ของ Mn ในต้นข้าวลดลง แต่จากการทดลองกับกาแฟ Pavan และ Bingham (1982) พบว่า Mn และ Zn จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้น ส่วน Asp et al. (1988) รายงานว่า Mn ในรากสนไม่มีความแตกต่างกัน แต่ในต้นและใบจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมในสารละลายเพิ่มขึ้น และสำหรับธาตุ B นั้น Hortenstine และ Fiskell (1961) พบว่าอะลูมิเนียมไม่มีผลต่อการดูดใช้ หรือการเคลื่อนย้ายสู่ลำต้นในทานตะวัน