ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การทดลองในสารละลายอาหารธาตุ (Nutrient solution)

1.1 ลักษณะอาการเป็นพิษของอะลูมินั่มในถั่วเหลือง

จากการทดลองพบว่า อาการที่แสดงออกถึงความเป็นพิษของอะลูมินั่มในถั่วเหลืองพันธุ์ สจ.5 จะแสดงให้เห็นเด่นชัดในระบบรากซึ่งจะสามารถสังเกตุได้ภายใน 2 วัน หลังจากการย้ายกล้าปลูกในสารละลาย โดยจะพบว่าในสารละลายที่มีการเติมอะลูมินั่ม 20, 25 และ 30 ppm นั้นรากแก้วจะสั้น และบริเวณผิวรากแก้วจะมีตุ่มสีน้ำตาลอ่อน ส่วนสารละลายที่มีการเติมอะลูมินั่มเพียง 0, 10 และ 15 ppm รากแก้วยังสามารถยืดยาวออกมาได้ แต่ความยาวจะสั้นลงตามลำดับความเข้มข้นของอะลูมินั่ม หลังจากย้ายกล้าได้ 10 วัน พบว่าอัตราการยืดยาวของรากแก้ว (ซม./วัน) และความยาวของรากแก้วจะลดลงเมื่อความเข้มข้นอะลูมินั่มสูงขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยที่ทั้งความยาวราก และอัตราการยืดยาวของรากลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับอะลูมินั่ม 0, 10, 15 และ 20 ppm แต่ที่ระดับอะลูมินั่ม 20, 25 และ 30 ppm นั้น การลดลงดังกล่าวไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ และในช่วงระยะการทดลอง 30 วัน การแตกรากแขนงจะเป็นไปด้วยดีที่ระดับการเติมอะลูมินั่ม 0 และ 10 ppm และจะเริ่มชะงักงันที่ระดับอะลูมินั่ม 15 และ 20 ppm ส่วนที่ระดับ 25 และ 30 ppm ของอะลูมินั่มนั้น การแตกรากแขนงจะช้ามาก และลักษณะรากที่งอกออกมาจะอ้วนสั้น หยิกงอ แคระแกรน ดังรูปที่ 1

1.2 อิทธิพลของอะลูมินั่มต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของถั่วเหลือง

การเจริญเติบโตของรากและลำต้นของถั่วเหลือง 30 วันหลังการย้ายกล้า โดยการเปรียบเทียบที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันของอะลูมินั่มในสารละลาย ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4 ความยาวสัมพัทธ์ของรากแก้ว (Relative root length) จะสูงสุดเมื่อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 3 ความยาวและอัตราการยืดยาวโดยเฉลี่ยของรากแก้ว ของถั่วเหลืองในระยะ 10 วันแรกที่ย้ายลงปลูกในสารละลายที่มีการเติม Al ระดับต่าง ๆ กัน

ความเข้มข้น Al (ppm)	ความยาวรากแก้ว (ซม.)	อัตราการยืดยาวของรากแก้ว (ซม./วัน)
0	43.0	3.70
10	35.1	2.90
15	20.5	1.60
20	10.1	0.56
25	9.7	0.51
30	9.3	0.45
L.S.D. 0.05	5.03	0.50
CV (%)	15.66	16.77

ความเข้มข้นของอะลูมินั่มในสารละลายอยู่ในช่วง 0-10 ppm และความยาวจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเป็นลำดับ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมินั่มเป็น 15, 20 และ 25 ppm โดยที่ความยาวสัมพัทธ์ลดลงประมาณ 45 และ 70 % ที่ระดับอะลูมินั่ม 20 และ 25 ppm ตามลำดับ ความยาวของรากมีแนวโน้มลดลงไปอีกเมื่อเพิ่มอะลูมินั่มเป็น 30 ppm แต่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับการเจริญเติบโตที่ระดับ 25 ppm

ผลผลิตทางด้านน้ำหนักแห้งของราก และ ลำต้นที่ระดับต่าง ๆ กันของอะลูมินั่มมีลักษณะคล้ายคลึงกันกับความยาวของรากดังที่กล่าวข้างต้น กล่าวคือน้ำหนักแห้งของลำต้นและรากจะสูงสุดเมื่อความเข้มข้นของอะลูมินั่มอยู่ในช่วง 0-10 ppm (ตารางที่ 4) และน้ำหนักแห้งจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมินั่มในสารละลายสูงขึ้น โดยที่น้ำหนักแห้งจะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 1 การเจริญเติบโตของรากถั่วเหลือง เมื่อปลูกได้ 30 วัน ในสารละลายที่มี Al ระดับต่าง ๆ กัน

ลดลงมากกว่า 50 % ที่ความเข้มข้นของอะลูมินั่ม 20 ppm

องค์ประกอบของผลผลิตในด้านอื่น ๆ เช่นความสูง จำนวนใบ และกิ่ง ที่ระดับต่าง ๆ กันของอะลูมินั่ม ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับความยาวของราก น้ำหนักแห้งของราก และลำต้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของนักวิทยาศาสตร์โดยทั่วไป กล่าวคือ อาการที่แสดงออกอย่างเด่นชัดถึงความเป็นพิษของอะลูมินั่มจะเกิดขึ้นเป็นอันดับแรกกับบริเวณส่วนราก และความยาวรากจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมินั่มสูงขึ้น (Alam และ Adams, 1980, Pavan และ Bingham, 1982, Sapar et al., 1982 และ Palino et al., 1986) เป็นที่น่าสังเกตุว่าการทดลองของ Foy et al. (1969) ที่ทดลองกับถั่วเหลืองพันธุ์ Perry ซึ่งมีความทนทานต่ออะลูมินั่มมากกว่าพันธุ์ Chief นั้น พันธุ์ Perry จะแสดงลักษณะอาการรากอ้วนสั้น และบริเวณระหว่างเส้นใบมีสีเหลืองรวม

ตารางที่ 4 ความยาวสัมพัทธ์ของราก (Relative root length) และน้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ (Relative dry weight) ของต้น และรากถั่วเหลือง (30 วันหลังย้ายกล้า) ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ กันของ Al ในสารละลาย โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย เปรียบเทียบกับต้นถั่วในกระถางที่มีความยาวของราก และน้ำหนักแห้งสูงสุดตามลำดับ

ความเข้มข้น Al (ppm)	ความยาวสัมพัทธ์ของราก (%)	น้ำหนักแห้งสัมพัทธ์ (%)	
		ต้น	ราก
0	88.1	64.5	56.1
10	91.1	89.1	79.1
15	76.1	60.9	49.4
20	55.0	37.9	33.5
25	30.2	26.1	21.4
30	24.2	27.2	28.9
L.S.D. 0.05	12.26	15.60	18.40
C.V. (%)	12.98	19.69	27.32

ทั้งอาการหุบลงของก้านใบ ที่ระดับความเข้มข้นของอะลูมินั่มสูงกว่าพันธุ์ Chief แต่อาการของก้านใบดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นกับทั้งสองพันธุ์ เมื่อความเข้มข้นของ Ca ในสารละลายมีมากกว่า 16 ppm อย่างไรก็ตามจากการศึกษาถั่วเหลืองพันธุ์ ส.จ.5 ในการทดลองนี้ไม่พบอาการที่แสดงออกถึงความเป็นพิษของอะลูมินั่มทางใบ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความทนทานต่ออะลูมินั่มได้สูง ของถั่วเหลืองพันธุ์ ส.จ.5 อีกทั้งความเข้มข้นของ Ca ในสารละลายที่ใช้ในการทดลองมีสูงถึง 80 ppm จึงทำให้พืชไม่แสดงอาการขาด Ca ถึงแม้จะมีความเข้มข้นของอะลูมินั่มในสารละลายสูงถึง 30 ppm ก็ตาม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อิทธิพลของอะลูมินั่มต่อองค์ประกอบของผลผลิตที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ สอดคล้องกับผลการทดลองในพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ถั่วเหลือง (Foy et al., 1969, Alva et al., 1986 และ Lund, 1970) Honeylocust (Sucoff et al., 1989) และสนประเภทต่าง ๆ (Paganelli et al., 1987)

ตารางที่ 5 ค่าเฉลี่ยความสูง ความยาวราก จำนวนใบแท้ จำนวนกิ่ง และน้ำหนักแห้งของทั้งต้นและราก เมื่อปลูกในสารละลายที่มีการเติม Al ระดับต่างกัน 30 วัน

Al ที่เติมในสารละลาย (ppm)	ความสูงต้น (ซม.)	ความยาวราก (ซม.)	จำนวนใบแท้	จำนวนกิ่ง	น้ำหนักแห้ง ต้น (กรัม)	ราก (กรัม)
0	118.5	79.25	8.0	2.25	5.14	0.86
10	116.5	82.00	8.5	2.25	7.09	1.21
15	111.7	68.50	7.5	2.25	4.85	0.76
20	84.0	49.50	6.7	0.75	3.02	0.51
25	70.9	27.13	5.7	0.62	2.00	0.44
30	82.7	21.75	6.0	0.25	2.26	0.33
L.S.D 0.05	20.12	11.04	6.90	0.79	1.24	2.82
C.V. (%)	13.43	12.98	6.44	36.41	19.69	27.32

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1.3 อิทธิพลของอะลูมินั่มต่อความเป็นประโยชน์ของอาหารธาตุต่าง ๆ

จากการวิเคราะห์อาหารธาตุต่าง ๆ ในใบ เมื่อถั่วเหลืองอายุได้ 30 วัน (ตารางที่ 6) ผลปรากฏว่าความเข้มข้นของ N และ K ในใบ อยู่ในระดับสูงถึงสูงมาก และที่ระดับต่าง ๆ กันของอะลูมินั่ม ถึงแม้ว่า P ในใบจะมีแนวโน้มลดลงเมื่ออะลูมินั่มในสารละลายเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นของ P นับว่าอยู่ในระดับที่สูงพอเพียงกับความต้องการของพืช สำหรับ Ca, Mg และ Mn ในพืช ที่ระดับต่าง ๆ กันของอะลูมินั่มก็เช่นเดียวกัน อาหารธาตุดังกล่าวอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของธาตุทั้งสามในใบพืชมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณของอะลูมินั่มที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออะลูมินั่มในสารละลายสูงกว่า 20-25 ppm ความเข้มข้นของ Mg และ Mn ในใบจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนความเข้มข้นของอะลูมินั่มในใบถั่วเหลืองจะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออะลูมินั่มในสารละลายมีมากกว่า 20 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายที่ไม่ได้เติมอะลูมินั่ม (0 ppm) ดังตารางที่ 6

การทดลองครั้งนี้ให้ผลคล้ายกันกับการทดลองของ Tang Van Hai et al. (1989) ที่ทดลองกับข้าวโดยได้รายงานว่าการเพิ่มความเข้มข้นของอะลูมินั่มในสารละลายไม่มีอิทธิพลต่อการดูดใช้ N และ K และการดูดใช้ P มีแนวโน้มลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมินั่มในสารละลายสูงมากกว่า 5 ppm ในกรณีของ Ca การดูดใช้และการเคลื่อนย้ายของ Ca ไปสู่ลำต้น และใบ มักจะถูกจำกัดให้อยู่บริเวณภายนอกราก (Johnson และ Jackson, 1964) โดยที่ปริมาณของ Ca ในส่วนใบและลำต้นของถั่วเหลืองจะขึ้นกับชนิดของพันธุ์ พันธุ์ที่ไวต่อความเป็นพิษของอะลูมินั่ม ปริมาณ Ca ในพืชจะลดต่ำลง มากกว่าพันธุ์ที่ทนทานต่ออะลูมินั่ม ซึ่งอิทธิพลของอะลูมินั่มต่อการดูดใช้ของ Ca จะคล้ายกันกับของ Mg ดังเช่นการทดลองของ Sucoff et al. (1989) และ Asp. et al. (1988) ที่พบว่าเมื่อความเข้มข้นของอะลูมินั่มในสารละลายมากขึ้น จะทำให้ความเข้มข้นของ Mg ในใบและต้นพืชลดลง ส่วนการดูดใช้ของ Mn นั้น จะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมินั่ม ในสารละลายเพิ่มขึ้น ดังเช่นการทดลองของ Tang Van Hai et al (1989) ในข้าว Pavan และ Bingham (1982) ในกาแฟ และ Asp et al. (1988) ในต้นสน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความเข้มข้นธาตุต่าง ๆ ในใบถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายที่มีการเติม Al ในระดับต่าง ๆ กัน หลังการย้ายกล้า 30 วัน

Al ที่เติมในสารละลาย	ความเข้มข้นของธาตุในใบถั่ว						
	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Al
(ppm)	----------		(%)	----------		----(ppm)-----	
0	5.60	0.80	3.69	1.16	0.38	149.65	63.28
10	5.77	0.48	3.37	1.07	0.33	162.32	81.25
15	6.19	0.61	3.87	0.86	0.41	92.58	107.48
20	6.48	0.55	3.96	0.71	0.25	110.35	130.72
25	6.60	0.51	3.76	0.54	0.21	78.44	164.63
30	6.10	0.48	3.96	0.49	0.13	52.92	257.93
L.S.D. 0.05	0.48	0.11	0.41	2.54	0.10	36.74	46.20
C.V. (%)	5.23	12.21	7.22	20.61	23.82	22.30	23.63

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2. การทดลองในกระถาง

2.1 อิทธิพลของระดับ pH ของดิน

2.1.1 อิธิพลของระดับ pH ดินต่อการละลายตัวของอะลูมินั่ม และ แมงกานีส

คุณสมบัติสำคัญบางประการของดินที่ใช้ในการทดลองได้แสดงไว้แล้วในตาราง ที่ 2 (หน้า 22) ดินดังกล่าวถูกนำมาปรับด้วยกรด H_2SO_4 และด่าง (ปูนขาว) ให้มี pH ต่าง ๆ กัน 5 ระดับ เพื่อใช้ในการศึกษาการตอบสนองของถั่วเหลือง ปริมาณของอะลูมินั่ม และ แมงกานีส ที่สะกัดได้จากดิน (โดย 1 M KCl) ที่ pH ต่าง ๆ ดังกล่าวได้แสดงไว้ในตารางที่ 7 ความเข้มข้นของอะลูมินั่มและ แมงกานีส เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ตามลำดับการลดลงของ pH โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อดินมี pH <4.5 ทั้งนี้เนื่องจากความสามารถในการละลายตัวได้ดีของธาตุทั้งสองเมื่อดินมีสภาพเป็นกรดจัด

ตารางที่ 7 ปริมาณอะลูมินั่มที่สะกัดได้ และแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในดินที่มีระดับ pH ต่าง ๆ กัน

Tr	pH	ปริมาณของธาตุ (ppm)	
		Al	Mn
Tr_1	4.1	74.0	163
Tr_2	4.5	12.5	108
Tr_3	5.1	5.0	86
Tr_4	5.3	2.5	42
Tr_5	6.1	-	32

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.2 อิทธิพลของ pH ดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตถั่วเหลือง

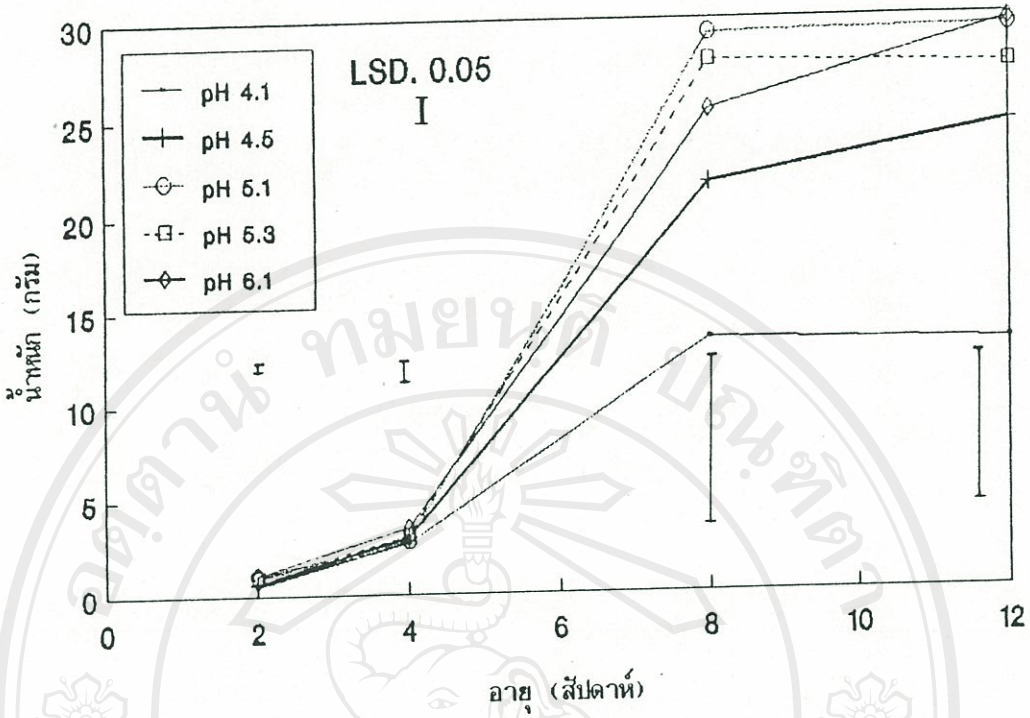
น้ำหนักแห้งของลำต้น และรากถั่วเหลือง (พันธุ์ ส.จ.5) ที่ระดับ pH ต่าง ๆ กัน ของดิน เมื่อพืชอายุได้ 2, 4, 8 และ 12 สัปดาห์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ ลักษณะการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งขององค์ประกอบผลผลิตทั้งสองจะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือน้ำหนักแห้งจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง 4 สัปดาห์แรก โดยที่น้ำหนักแห้งทั้งของราก และลำต้นในแต่ละ pH ของดินไม่แตกต่างกันมากนัก การเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพืชอายุระหว่าง 4-8 สัปดาห์ โดยที่พืชที่ปลูกในดินที่มี pH ต่ำสุด(Tr_1, pH = 4.1) จะมีน้ำหนักแห้งของทั้งรากและลำต้นน้อยที่สุด และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดินที่มี pH สูงขึ้น หลังจากสัปดาห์ที่ 8 แล้ว การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักแห้งจะมีเพียงเล็กน้อย เนื่องจากเป็นระยะที่ถั่วเหลืองเข้าสู่ระยะการออกดอกและติดเมล็ด ซึ่งพืชที่ปลูกใน Tr_1 ยังคงมีน้ำหนักแห้งต่ำสุดและแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดิน pH อื่น ๆ

ผลผลิตของถั่วเหลืองที่เกี่ยวข้องกับจำนวนฝัก จำนวนและน้ำหนักของเมล็ดที่ปลูกในดินที่มี pH ต่าง ๆ กัน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 8 พืชที่ปลูกในดิน pH 6.1 (Tr_5) จะให้ผลผลิตสูงสุด องค์ประกอบผลผลิตดังกล่าวจะลดลงอย่างเด่นชัดเมื่อ pH ของดินลดต่ำลง อย่างไรก็ตาม น้ำหนักเมล็ดของพืชที่ปลูกในดิน pH 5.3 (Tr_4) ถึงแม้จะลดลงแต่ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับพืชที่ปลูกในดิน pH 6.1 (Tr_5)

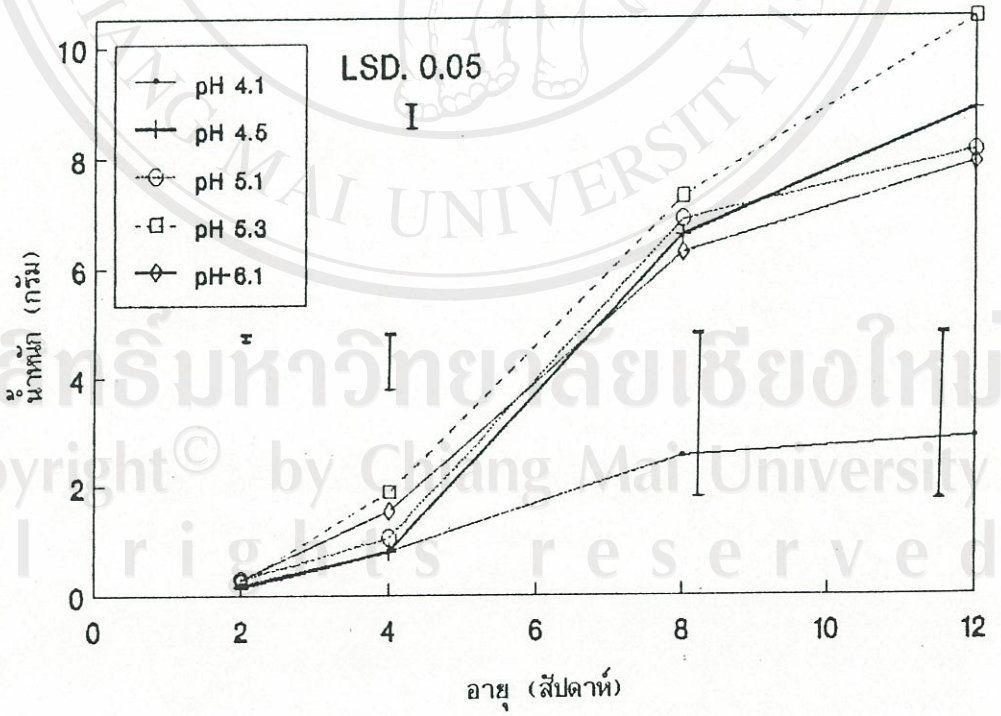
2.1.3 อิทธิพลของ pH ดินต่อความเป็นประโยชน์ของอาหารธาตุต่าง ๆ

ผลจากการวิเคราะห์อาหารธาตุต่าง ๆ ในใบถั่วเหลืองที่แต่ละระดับ pH ของดิน เมื่อพืชอายุได้ 8 สัปดาห์ (ระยะพืชออกดอก) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 9 ความเข้มข้นของ P, K, Ca และ Mg ในใบในแต่ละ pH ของดิน อยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูงและไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใส่ปุ๋ย และปริมาณของ Ca และ Mg ในดินมีปริมาณพอเพียงกับความต้องการของพืช ในทางตรงกันข้ามความเข้มข้นของ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2 น้ำหนักแห้งของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีระดับ pH ต่างกัน เมื่ออายุได้ 2, 4, 8 และ 12 สัปดาห์



รูปที่ 3 น้ำหนักแห้งของรากถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีระดับ pH ต่างกัน เมื่ออายุได้ 2, 4, 8 และ 12 สัปดาห์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 8 ค่าเฉลี่ยของ จำนวนฝัก จำนวนเมล็ด และ น้ำหนักเมล็ด ต่อกระถางของถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มี pH ต่างกัน

Tr	pH	จำนวนฝัก	จำนวนเมล็ด	น้ำหนักเมล็ด (กรัม)
Tr_1	4.1	17.67	47.67	6.12
Tr_2	4.5	38.67	72.00	8.56
Tr_3	5.1	49.67	89.00	10.04
Tr_4	5.3	53.67	95.00	12.80
Tr_5	6.1	74.53	132.70	17.60
L.S.D. 0.05		19.45	30.55	6.29
C.V. (%)		22.07	18.59	20.28

ของอะลูมินั่ม และ แมงกานีส ในใบพืชจะเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับการลดลงของ pH ของดิน การเพิ่มขึ้นของอาหารธาตุดังกล่าวจะมีนัยสำคัญยิ่ง เมื่อ pH ของดินลดลงกว่า 4.5 (Tr_2 และ Tr_1) จากการศึกษาลักษณะการเจริญเติบโตของราก (จะได้รายงานในหัวข้อถัดไป) ทำให้เชื่อได้ว่า ความเข้มข้นของอะลูมินั่มในใบ (> 100 ppm) ของพืชที่ปลูกใน Tr_1 (pH = 4.1) และ Tr_2 (pH = 4.5) ทำให้เกิดความเป็นพิษในถั่วเหลือง นอกจากนั้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่ pH ดังกล่าว ยังมีปริมาณของ Mn ในใบสูงมาก (>800 ppm) Wivutvongvana (1979) พบว่าถั่วเหลืองจะแสดงอาการเป็นพิษเมื่อความเข้มข้นของแมงกานีสในใบมีมากกว่า 400 ppm ดังนั้นการเจริญเติบโตและผลผลิตของถั่วเหลืองที่ลดลงในการศึกษาครั้งนี้ นอกจากจะเนื่องมาจากความเป็นพิษของอะลูมินั่มแล้ว ความเป็นพิษของแมงกานีสน่าจะมีส่วนเกี่ยวข้องด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นธาตุต่าง ๆ ในใบถั่วเหลืองเมื่ออายุ 8 สัปดาห์ ในดินที่มี pH ต่างกัน

Tr	pH	ความเข้มข้นของธาตุ P	K	Ca	Mg	Mn	Al
		----------(%)----------				----(ppm)----	
Tr_1	4.1	0.217	3.125	0.664	0.262	1408.0	297.9
Tr_2	4.5	0.175	2.511	0.488	0.269	858.3	110.4
Tr_3	5.1	0.196	2.323	0.490	0.277	202.1	92.3
Tr_4	5.3	0.158	2.344	0.499	0.223	170.8	84.4
Tr_5	6.1	0.200	2.531	0.506	0.284	135.4	72.9
L.S.D. 0.05		0.049	0.319	0.056	0.038	122.54	64.29
C.V. (%)		13.71	6.60	5.62	7.74	11.73	25.95

2.1.4 ลักษณะอาการเป็นพิษของอะลูมินั่มในถั่วเหลือง

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่า ลักษณะการเจริญเติบโตและผลผลิต รวมทั้งความยาว และน้ำหนักแห้งของรากถั่วเหลืองพันธุ์ ส.จ.5 จะลดลงอย่างเด่นชัด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับพืชที่ปลูกในดินที่มี pH 4.1 และ 4.5 (Tr_1 และ Tr_2) โดยที่พืชใน Tr_1 จะมีรากอ้วนสั้นชรุขระ ส่วนใน Tr_2 อาการจะลดความรุนแรงลง (รูปที่ 4 และ 5) อาการดังกล่าวมีลักษณะเช่นเดียวกับที่พบในพืชที่ทดลองในน้ำยา ลักษณะอาการเป็นพิษที่เห็นเด่นชัดในราก ถือว่าเป็นอาการเริ่มต้นของความเป็นพิษของอะลูมินั่ม ซึ่ง Foy et al. (1969) ได้ใช้เป็นดัชนีในการเปรียบเทียบความทนทานต่ออะลูมินั่มของถั่วเหลืองพันธุ์ต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การศึกษาในครั้งนี้ไม่พบอาการเป็นพิษของอะลูมินั่มทางใบ ที่ทำให้ใบหุบลง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 4 แสดงความยาวของรากถั่วที่ปลูกในดินที่มี pH ต่างกัน

รูปที่ 5 แสดงอาการรากอ้วนสั้น ขรุขระ ของถั่วเหลืองที่ปลูกใน Tr_1 (pH 4.1)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

(collapse) อันเนื่องมาจากการขาดแคลเซี่ยม โดยอิทธิพลของอะลูมินั่มดังที่ Foy et al. (1969) ได้รายงานไว้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความสามารถในการทนทานต่อความเป็นพิษของอะลูมินั่มในถั่วเหลืองพันธุ์ ส.จ.5 รวมทั้งปริมาณของแคลเซี่ยมที่สูงเพียงพอในดินที่ใช้ในการทดลองดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่ผ่านมา

ส่วนอาการเป็นพิษที่แสดงออกในใบถั่วเหลืองที่ปลูกใน Tr_1 และ Tr_2 เมื่ออายุได้ 2-3 สัปดาห์ ซึ่งในส่วนยอดจะมีสีเหลืองอ่อนบริเวณระหว่างเส้นใบ และเกิดจุดสีน้ำตาล (chlorosis และ necrotic spots) กระจายตามผิวใบ และมีลักษณะเด่นชัดขึ้นในใบแก่ (รูปที่ 6) แต่เมื่อพืชอายุได้ 3-4 สัปดาห์ อาการเหลืองระหว่างเส้นใบของ Tr_2 จะค่อย ๆ หายไป ส่วน Tr_1 เมื่ออายุเข้าสู่สัปดาห์ที่ 4 ใบยอดจะเริ่มเกิดอาการย่นบิดงอ (Crinkle) ดังรูปที่ 7 โดยที่อาการดังกล่าวจะไม่ปรากฏในถั่วเหลืองที่ปลูกในดิน pH อื่น ๆ อาการผิดปกติที่กล่าวมานี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับอาการเป็นพิษของแมงกานีส ในถั่วเหลือง ที่ทดลองโดยชูชาติ (2530) กล่าวคือใบจะเหลืองระหว่างเส้นใบ มีจุด chlorosis เกิดขึ้น และ เมื่ออาการรุนแรงใบจะย่นม้วนงอ (crinkle) (Paker et al, 1969) โดยที่ความเข้มข้นของแมงกานีสในใบ Tr_1 และ Tr_2 มีสูงถึง 858 และ 1408 ppm ตามลำดับ (ตารางที่ 9)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 6 อาการเหลืองระหว่างเส้นใบ และอาการเซลเนื้อเยื่อตายเป็นจุด ๆ ของถั่วเหลืองที่ปลูกในดิน pH ประมาณ 4.5 เป็นเวลา 2 สัปดาห์

รูปที่ 7 อาการใบย่นหยิกม้วนงอในใบถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มี pH 4.1 เป็นเวลา 8 สัปดาห์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 อิทธิพลของอะลูมินั่มในดิน

2.2.1 อิทธิพลของอะลูมินั่มต่อ pH และการละลายตัวของแมงกานีสในดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นดินที่มี pH 5.3 ชนิดเดียวกันกับที่ใช้ในการทดลองที่ 2.1 โดยได้นำมาเติมด้วย $Al_2(SO_4)_3 . 18 H_2O$ ในอัตรา 4 ระดับของอะลูมินั่มคือ 0, 3, 6 และ 9 meq/ดิน 100 กรัม ผลจากการวิเคราะห์พบว่าการเพิ่มอัตราการใส่อะลูมินั่มทำให้ pH ของดินลดลง และความเข้มข้นของแมงกานีสที่สะกัดได้จากดินเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (ตารางที่ 10) การลดลงของ pH ดังกล่าว เนื่องจากบางส่วนของอะลูมินั่มไปไล่ที่ H บนผิวคอลลอยด์ดินออกมาอยู่ในสารละลายดินมากขึ้น และ $Al_2(SO_4)_3$ ซึ่งเป็นเกลือของกรดแก่กับเบสอ่อน สามารถทำปฏิกิริยา Hydrolysis แล้วเกิด H^+ ในสารละลายมากขึ้นดังสมการ

$$Al^{+3} + 3H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3\ H^+$$

การลดลงของ pH ดังกล่าว ทำให้ความสามารถในการละลายตัวของ Mn ในดินสูงขึ้นเป็นลำดับตามไปด้วย

ตารางที่ 10 ค่า pH และปริมาณ Mn ที่สะกัดได้ในดินที่มีการเติม Al ระดับ ต่าง ๆ กัน ก่อนปลูกถั่วเหลือง

Tr	ระดับการเติม Al meq/ดิน 100 กรัม	pH	Mn (ppm)
Tr_6	0	5.3	42
Tr_7	3	4.0	76
Tr_8	6	3.7	93
Tr_9	9	3.6	132

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 อิทธิพลของอะลูมินั่มในดินต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตถั่วเหลือง

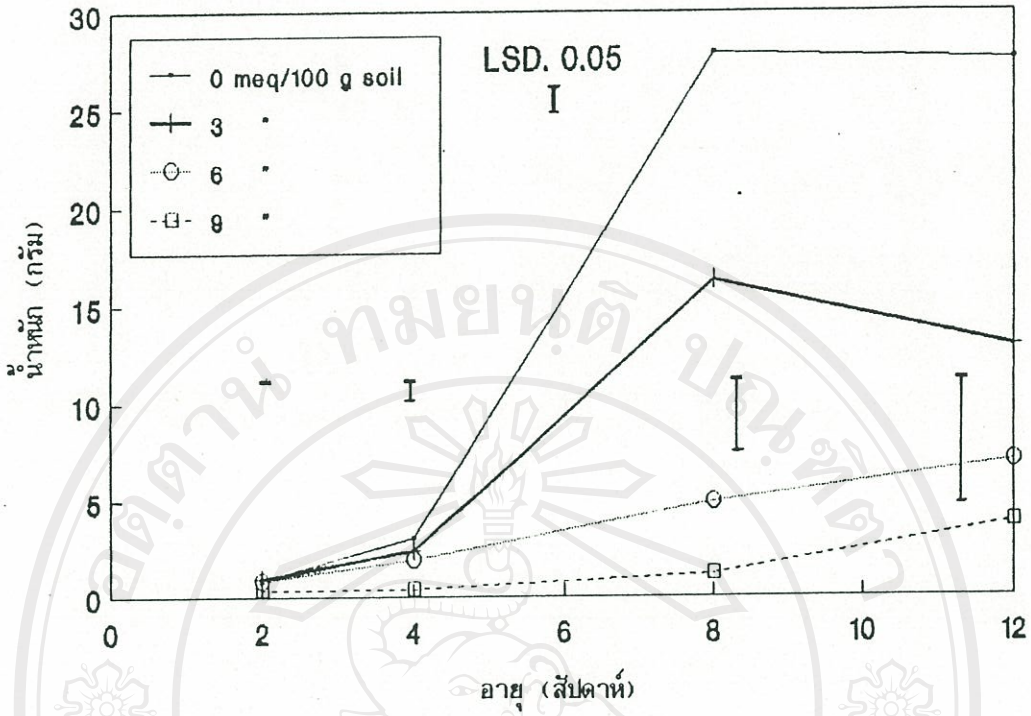
น้ำหนักแห้งของลำต้น และ รากถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีการใส่อะลูมินั่มในระดับต่าง ๆ กัน เมื่อพืชอายุได้ 2, 4, 8 และ 12 สัปดาห์ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8 และ 9 ตามลำดับ ลักษณะการเพิ่มน้ำหนักของทั้งต้นและรากที่มีระดับอะลูมินั่ม 0 (Tr_8) และ 3 (Tr_7) meq/ดิน 100 กรัม จะคล้ายคลึงกันคือน้ำหนักจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ในช่วง 4 สัปดาห์แรก และจะเจริญเติบโตเพิ่มน้ำหนักอย่างรวดเร็วในช่วงอายุ 4 - 8 สัปดาห์ ส่วนที่ระดับอะลูมินั่ม 6 และ 9 meq/ดิน 100 กรัม (Tr_8 และ TR_9) การเจริญเติบโตจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตลอดการทดลอง อย่างไรก็ตามในระยะ 2-4 สัปดาห์ น้ำหนักแห้งทั้งต้นและรากไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ในแต่ละระดับของอะลูมินั่ม แต่ในช่วง 8-12 สัปดาห์ น้ำหนักแห้งของทั้งต้นและรากในระดับอะลูมินั่ม 0 และ 3 meq/ดิน 100 กรัม จะแตกต่างจากที่ระดับอะลูมินั่ม 6 และ 9 meq/ดิน 100 กรัม อย่างมีนัยสำคัญ โดยที่น้ำหนักแห้งทั้งต้น และ รากในกระถางที่ไม่มีการใส่อะลูมินั่ม (0 meq/ดิน 100 กรัม) จะสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับการทดลองอื่น ๆ และน้ำหนักจะลดลงตามลำดับการเพิ่มขึ้นของอะลูมินั่ม

ผลผลิตในด้านจำนวนฝัก จำนวนเมล็ด และน้ำหนักเมล็ดของถั่วเหลืองจะสูงสุดในดินที่ไม่มีการเติมอะลูมินั่ม (Tr_8) (ตารางที่ 11) และจะลดลงตามลำดับการเพิ่มของอะลูมินั่ม อย่างไรก็ตามผลผลิตของถั่วเหลืองที่ระดับอะลูมินั่ม 6 และ 9 meq/ดิน 100 กรัม ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติ ผลการทดลองจากการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับผลงานของ Seripong (1989)

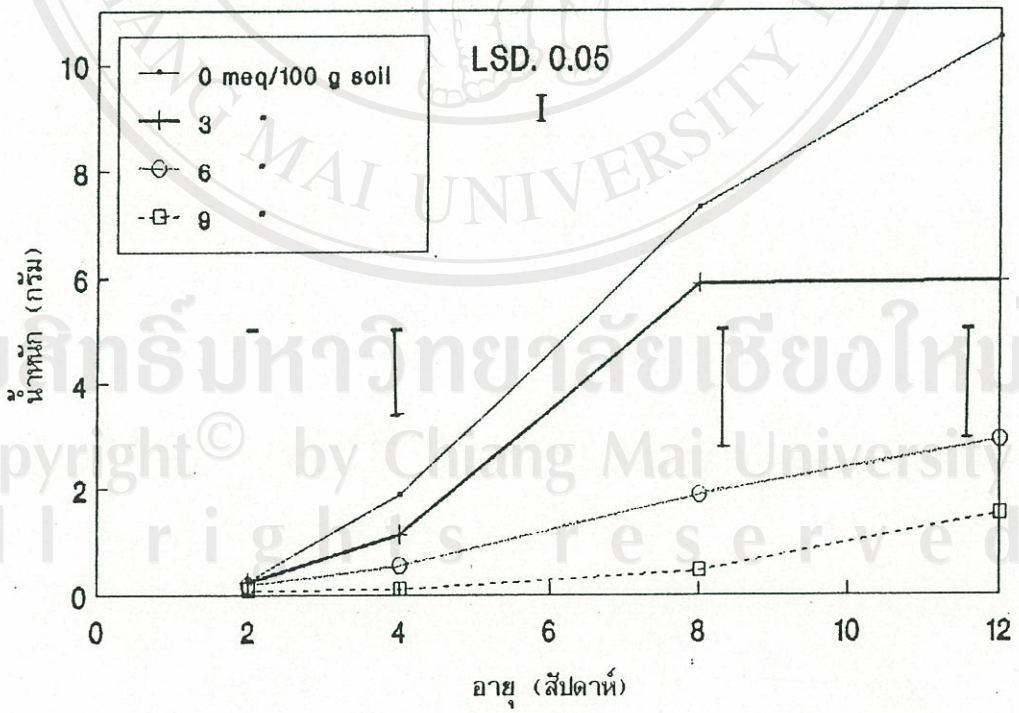
2.2.3 อิทธิพลของอะลูมินั่มในดินต่อความเป็นประโยชน์ของอาหารธาตุต่าง ๆ

ผลการวิเคราะห์อาหารธาตุต่าง ๆ ในใบถั่วเหลือง ที่ปลูกในดินที่มีระดับอะลูมินั่มแตกต่างกัน เมื่อพืชอายุได้ 8 สัปดาห์ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 12 ความเข้มข้นของ P, K, Ca และ Mg ในใบ ในทุกตำรับการทดลองอยู่ในระดับค่อนข้างสูงพอเพียงกับความต้อง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 8 น้ำหนักแห้งของต้นถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่เติม Al ระดับต่าง ๆ กัน เมื่อพืชอายุ 2, 4, 8 และ 12 สัปดาห์



รูปที่ 9 น้ำหนักแห้งรากถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีการเติม Al ในระดับต่าง ๆ กัน เมื่อพืชอายุ 2, 4, 8 และ 12 สัปดาห์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การของพืช อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตุว่า ความเข้มข้นของ P ในใบพืชมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่อะลูมินั่มลงไปในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับ 6 และ 9 meq /ดิน 100 กรัม (Tr_7 และ Tr_8) การศึกษานี้สอดคล้องกับการทดลองในสารละลายของ Tang Van Hai et al. (1989) ซึ่งพบว่าการใส่ Al ตั้งแต่ 1 - 5 ppm จะส่งเสริมการดูดใช้ P ของพืชให้สูงขึ้น อย่างไรก็ตามสาเหตุของ P ในใบที่สูงขึ้นนี้อาจมีผลเนื่องมาจากขนาดของใบที่เล็กลงมากอันเนื่องจากความเป็นพิษของอะลูมินั่ม จึงทำให้ความเข้มข้นของ P ในใบสูงขึ้น (Dilution effect) ในทางตรงกันข้าม ความเข้มข้นของ Mg ในใบมีแนวโน้มลดลงตามลำดับการเพิ่มขึ้นของอะลูมินั่ม (ตารางที่ 12)

การใส่อะลูมินั่มลงไปในดินมีอิทธิพลอย่างเด่นชัดต่อถั่วเหลือง ในการดูดใช้ของอะลูมินั่มและ แมงกานีสความเข้มข้นของธาตุทั้งสองในใบสูงขึ้นเป็นลำดับตามอัตราที่เพิ่มขึ้นของการใส่อะลูมินั่ม (ตารางที่ 12) อย่างไรก็ตาม อะลูมินั่ม ในใบของถั่วเหลืองที่ระดับอะลูมินั่ม 3 meq/ดิน 100 กรัม ไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับตำรับที่ไม่ได้ใส่อะลูมินั่ม (0 meq/ดิน 100 กรัม) แต่จะแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มอะลูมินั่มในดินมากขึ้น ในทางตรงกันข้ามแมงกานีส ในใบถั่วเหลืองสูงขึ้นประมาณถึงสี่เท่าตัวเมื่อมีการใส่อะลูมินั่มที่ระดับ 3 meq/ดิน 100 กรัม และแมงกานีสในใบสูงขึ้นอีกอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับอะลูมินั่ม 6 meq/ดิน 100 กรัม แต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มอะลูมินั่มถึง 9 meq/ดิน 100 กรัม ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความสามารถของพืชในการดูดใช้แมงกานีสจะลดลงเมื่ออะลูมินั่มในดินอยู่ในปริมาณที่สูงมาก สาเหตุสำคัญที่การดูดใช้ของแมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใส่อะลูมินั่มนั้น เนื่องจาก pH ของดินลดต่ำลงอย่างมาก ทำให้การละลายของแมงกานีสในดินเพิ่มสูงมากตามไปด้วย การเพิ่มอะลูมินั่มเพียง 3 meq/ดิน 100 กรัม ทำให้ pH ของดินลดลงจาก 5.3 เป็น 4.0 และแมงกานีสที่สกัดได้เพิ่มจาก 42.0 เป็น 76.0 ppm ดังตารางที่ 10

เป็นที่น่าสังเกตุว่าทุกตำรับการทดลองที่มีการใส่อะลูมินั่มให้แก่ดินจะทำให้แมงกานีสในใบมีความเข้มข้นมากกว่า 400 ppm (ตารางที่ 12) ความเข้มข้นดังกล่าวสามารถทำให้เกิดความเป็นพิษในถั่วเหลืองได้ (Wivutvongvana, 1979) ดังนั้นถั่วเหลืองที่แสดง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 11 ผลผลิตเฉลี่ยจำนวนฝัก จำนวนเมล็ด และน้ำหนักเมล็ดต่อกระถาง ของถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีการเติม Al ในระดับต่าง ๆ กัน

Tr	Al (mg/ดิน 100 g)	จำนวนฝัก	จำนวนเมล็ด	น้ำหนักเมล็ด (กรัม)
Tr_6	0	53.67	95.00	12.80
Tr_7	3	19.33	37.67	4.58
Tr_8	6	8.33	12.33	1.31
Tr_9	9	6.00	5.33	0.60
L.S.D. 0.05		7.24	9.82	1.12
C.V. (%)		16.60	13.07	11.66

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของธาตุต่าง ๆ ในใบถั่วเหลือง อายุ 8 สัปดาห์ที่ปลูกในดินที่มีการเติม Al ต่าง ๆ กัน

Tr	Al (mg/ดิน 100 g)	pH	P	K	Ca	Mg	Mn	Al
			----------(%)----------				----ppm----	
Tr_6	0.0	5.3	0.158	2.30	0.499	0.223	170.8	84.4
Tr_7	3.0	4.0	0.173	1.97	0.481	0.267	691.7	105.2
Tr_8	6.0	3.7	0.275	2.78	0.568	0.306	849.8	148.3
Tr_9	9.0	3.6	0.310	2.32	0.468	0.137	464.6	191.2
L.S.D. 0.05			0.086	0.519	0.078	0.083	125.11	28.98
C.V. (%)			18.8	11.0	7.8	17.89	11.51	10.96

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อาการเป็นพิษของอะลูมินั่ม ในการศึกษานี้จึงอาจแสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีสร่วมด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 ตามที่ได้กล่าวมาแล้ว (อิทธิพลของ pH ดิน)

2.2.4 ลักษณะอาการเป็นพิษของ อะลูมินั่ม ในถั่วเหลือง

ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.2.2 ถึงลักษณะการเจริญเติบโต และผลผลิตของต้นและรากถั่วเหลืองจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนในทุกระดับของการเติมอะลูมินั่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใส่อะลูมินั่ม 3 - 6 meq/ดิน 100 กรัม (Tr_6-Tr_7) การเจริญเติบโตของต้นและรากจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ที่ระดับ 6 และ 9 meq-Al/100 กรัม (Tr_7 และ Tr_8) ต้นถั่วจะแคระแกรน ใบมีขนาดเล็ก (รูปที่ 10) รากของถั่วจะสั้นผิดปกติ การแตกรากแขนงลดลงดังรูปที่ 11 สำหรับอาการเป็นพิษของอะลูมินั่มทางใบนั้น ยังไม่ปรากฏเด่นชัดในการศึกษาในครั้งนี้ เช่นเดียวกันกับการทดลองปลูกพืชในสารละลาย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

รูปที่ 10 รูปร่างและลักษณะของต้นถั่วเหลือง (อายุ 8 สัปดาห์) ที่ปลูกในดินที่มีการเติม Al ในระดับต่าง ๆ กัน

รูปที่ 11 ลักษณะของรากถั่วเหลืองที่ปลูกในดินที่มีการเติม Al ในระดับต่าง ๆ กัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved