

ผลการทดลองและวิจารณ์

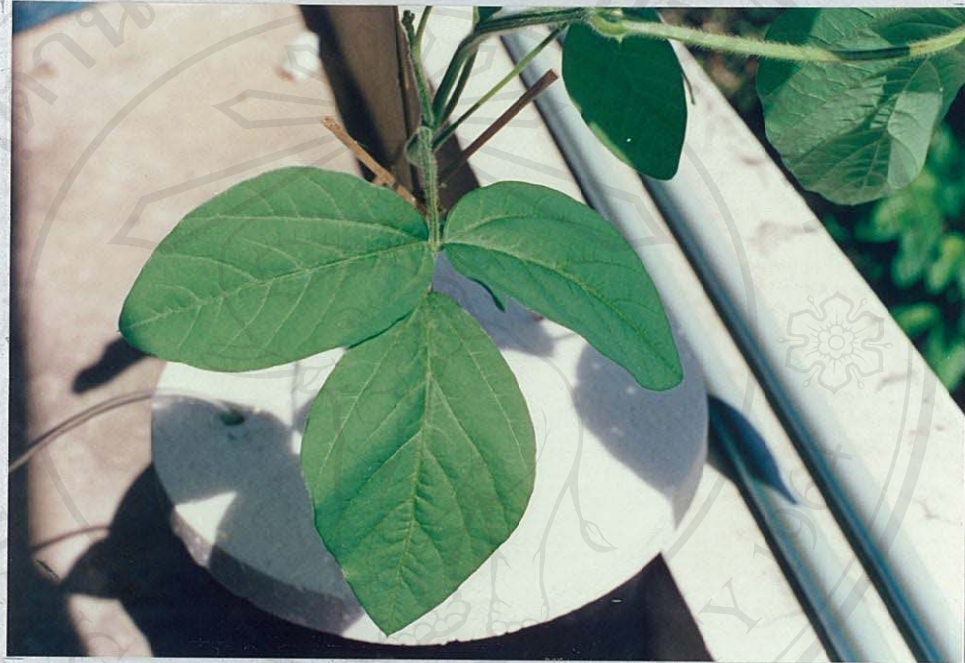
1. การทดลองในน้ำยา

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 ที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีสเท่ากับ 0 ppm พืชจะแสดงอาการขาดแมงกานีสอย่างเด่นชัดโดยอาการจะปรากฏที่ใบบนของถั่วเหลืองที่ยังอ่อนอยู่ โดยจะเกิดอาการใบด่าง (mosaic) และอาการเหลืองระหว่างเส้นใบ (chlorosis) ดังรูป 1.1



รูปที่ 1.1 ลักษณะใบถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร
ที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีส = 0 ppm

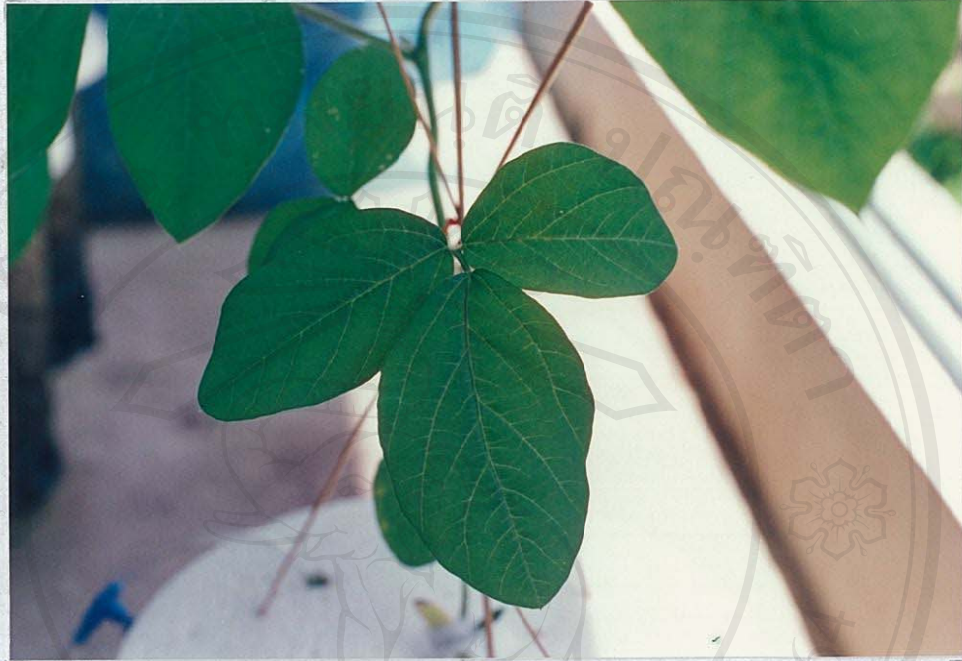
ที่ระดับความเข้มข้นของเท่ากับ 0.1 ppm การเจริญเติบโตของต้นถั่วเป็นปกติ ไม่แสดงอาการขาดหรืออาการเป็นพิษของแมงกานีสแต่อย่างใด ดังรูป 1.2



รูปที่ 1.2 ลักษณะใบถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร
ที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีส = 0.1 ppm

ที่ระดับ 0.5 ppm ของแมงกานีส เริ่มปรากฏอาการ เป็นพิษของแมงกานีสขึ้น เล็กน้อยที่ใบรวมที่แก่ (ใบล่าง ๆ) ดังรูป 1.3 และ เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของแมงกานีสสูงขึ้น อาการเป็นพิษของแมงกานีสก็เพิ่มขึ้นด้วย

ผลของระดับความเข้มข้นของแมงกานีสต่อน้ำหนักแห้งของต้นและราก พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีสตั้งแต่ 0.5 ppm ถึง 5 ppm น้ำหนักแห้งของต้นและราก จะลดลงตามความเข้มข้นของแมงกานีสที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความเป็นพิษของแมงกานีส เมื่อ เปรียบเทียบกับระดับแมงกานีสที่ 0.1 ppm



รูปที่ 1.3 ลักษณะใบถั่วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร
ที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีส = 0.5 ppm

อาการเป็นพิษของแมงกานีสจะเริ่มปรากฏที่ใบรวมใบล่าง ๆ ก่อน (ในใบแก่) ภายใต้อายุ 2 - 3 วัน หลังจากย้ายต้นถั่วลงปลูกในสารละลายธาตุอาหาร อาการโดยเริ่มแรก พื้นที่ระหว่างเส้นใบ จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อน ๆ หลังจากนั้นสองสามวันต่อมาพื้นที่สีเขียวอ่อนเหล่านั้นจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและเกิดอาการเซลล์เนื้อเยื่อตายเป็นจุด ๆ (necrotic spots) กระจายอยู่ไม่สม่ำเสมอบนผิวของใบและจะปรากฏให้เห็นเด่นชัดในใบรวมที่แก่ อาการ necrotic spots นี้จะพบบนผิวใบด้านบนก่อนแล้วจึงเกิดกับผิวใบด้านล่าง ใบอ่อนจะไม่แสดงอาการ necrotic spots แต่อย่างไรก็ตามก็เกิดอาการเหลืองระหว่างเส้นใบเกิดขึ้น และในกรณีที่เกิดอาการรุนแรง ใบของถั่วเหลืองจะเกิดอาการใบย่น (crinkle) รำด้ายและเมื่อใบขยายตัวเต็มที่อาการใบย่นจะลดลงแต่ก็ไม่หายอย่างสมบูรณ์ ใบใบที่แสดงอาการรุนแรงของการย่นมาก เมื่อใบขยายตัวเต็มที่แล้วจะเกิดอาการฉีกขาดของใบเกิดขึ้นได้ ดังรูป 1.4-1.5



รูปที่ 1.4 ลักษณะใบแก้วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร
ที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีส = 4.0 ppm



รูปที่ 1.5 ลักษณะใบแก้วเหลืองที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหาร
ที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีส = 5 ppm

จากการทดลองพบว่าระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่ระดับ 0.1 ppm ต้นถั่วเจริญได้เป็นปกติ ต้นถั่วเริ่มแสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีสที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารเป็น 0.5 ppm แต่อย่างไรก็ตามที่ระดับแมงกานีส 0.5 - 1.0 ppm ในสารละลายธาตุอาหาร ถึงแม้ถั่วจะ เริ่มแสดงอาการ เป็นพิษของแมงกานีสแต่การลดลงของน้ำหนักแห้งของต้นก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่ง จะ เริ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีสตั้งแต่ 1.5 ppm เป็นต้นไป อาการเป็นพิษของแมงกานีสเกิดอย่างรุนแรงและน้ำหนักแห้งของต้นลดลงประมาณ 50 % จากที่ระดับ 0.1 ppm เมื่อระดับความเข้มข้นของแมงกานีสสูง ๆ ที่ 4.5 และ 5.0 ppm

ระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่แนะนำโดย Hoagland No. 2 คือ 0.5 ppm แต่ในการทดลองนี้ พบว่าระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่เหมาะสมคือ 0.1 ppm เช่นเดียวกับ Carter *et al.* (1975) และ Wivutvongvana (1979) ส่วนระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่ทำให้เกิดอาการเป็นพิษของแมงกานีสนั้นรายงานไว้แตกต่างกัน โดย Robson and Loneragan (1969), Morris and Pierre (1964), Truong *et al.* (1971) และ Ohki (1976) พบว่าระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษนั้นคือ 0.3, 5, 5 และ 10 ppm ตามลำดับ ซึ่งความแตกต่างของระดับความเข้มข้นของแมงกานีสนั้น เนื่องจากความแตกต่างของชนิดพืชหรือความแตกต่างของพันธุ์ Williams and James (1957) พบว่าข้าว barley จะแสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีส เมื่อปลูกในสารละลายธาตุอาหารที่แนะนำโดย Hoagland No. 2 แต่จะไม่พบอาการเหล่านั้นเมื่อปลูกมันฝรั่ง Carter *et al.* (1969) พบว่าถั่วเหลืองสายพันธุ์ Bragg จะแสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีสอย่างรุนแรงที่ระดับความเข้มข้นของแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารที่ 20 ppm ในขณะที่ถั่วเหลืองสายพันธุ์ Lee ไม่แสดงอาการเหล่านั้น อุดทภูมิ ก็มีผลเกี่ยวข้องกับการตอบสนองต่ออาการเป็นพิษของแมงกานีส Heenan and Carter (1977) พบว่าระดับความเข้มข้นของแมงกานีส 15 ppm ที่อุณหภูมิ 21 °C ก่อให้เกิดอาการเป็นพิษของแมงกานีสอย่างรุนแรงต่อถั่วเหลือง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 33 °C ที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน ถั่วเหลือง ไม่แสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีส

ถึงแม้ว่าระดับความเข้มข้นของแมงกานีสที่ทำให้เกิดอาการ เป็นพิษของแมงกานีสที่รายงานไว้จะแตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามลักษณะอาการของพืชที่ตอบสนองต่อความเป็นพิษของแมงกานีสที่ได้รายงานเอาไว้จะมีลักษณะอาการที่คล้ายคลึงกัน เช่นเดียวกับการทดลองนี้

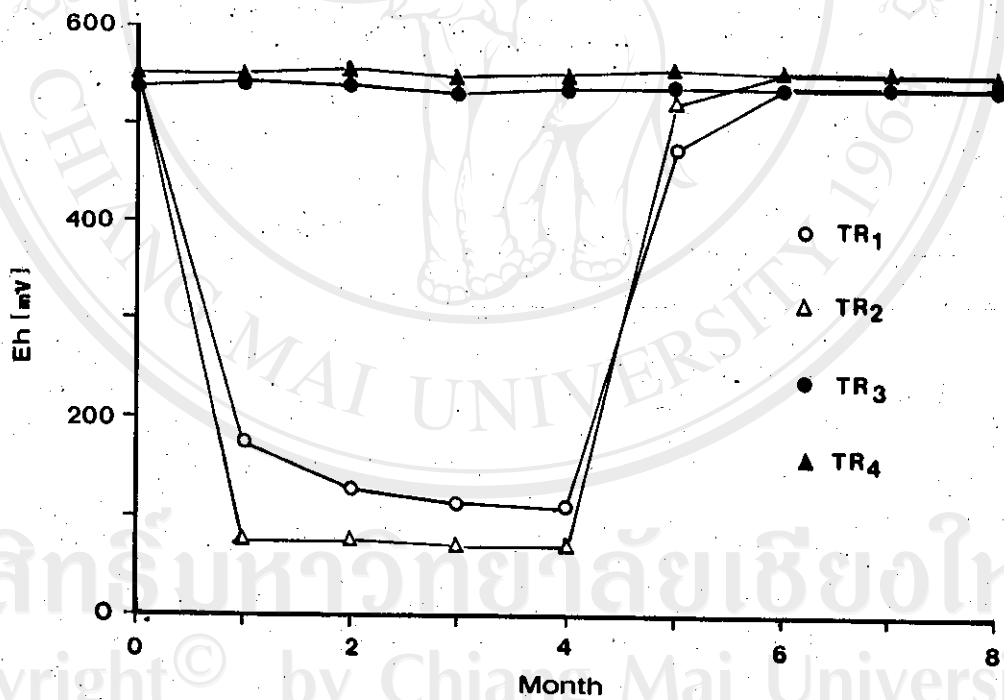
ตารางที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของแมงกานีสในสารละลาย ธาตุอาหาร กับน้ำหนักแห้งของต้น ราก และระดับอาการเป็นพิษของแมงกานีส

ระดับความเข้มข้น แมงกานีส (ppm)	ระดับอาการเป็นพิษของ แมงกานีส	น้ำหนักแห้งของต้น กรัม/ต้น	น้ำหนักแห้งของราก กรัม/ต้น
0	1	3.04	0.44
0.1	1	5.33	0.67
0.5	2	5.28	0.64
1.0	2	4.88	0.62
1.5	3	4.29	0.55
2.0	3	4.13	0.56
2.5	3	3.52	0.55
3.0	4	3.72	0.54
3.5	4	3.51	0.52
4.0	4	3.27	0.56
4.5	5	2.73	0.47
5.0	5	2.62	0.47
	LSD 0.05	0.46	0.07
	LSD 0.01	0.63	0.09
	% CV	7.13	7.56

2. การทดลองในกระถาง

2.1 การเปลี่ยนแปลงของรีดอกซ์โพเทนเชียล (Eh)

ผลการเปลี่ยนแปลงของ Eh แสดงดังรูป 2.1 และผลการวิเคราะห์ค่าเรขาคณิตของการเปลี่ยนแปลง Eh ของดิน แสดงดังตารางภาคผนวกที่ 35 - 46



รูปที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงรีดอกซ์โพเทนเชียลของดิน

จากรูปจะเห็นได้ว่ารูปแบบของการเปลี่ยนแปลง Eh ในชุดดินพินายและชุดดินสันทราย จะมีรูปแบบที่คล้ายกัน เมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำ ค่า Eh ของดินจะลดลงอย่างรวดเร็วจาก Eh เดิมของดินภายหลังการขังน้ำได้ 1 เดือน และจะลดลงจนค่อนข้างคงที่ที่ Eh ประมาณ

70 mV ในชุดดินสันทรายและประมาณ 110 mV ในชุดดินพินาย ภายหลังจากการระบายน้ำจากดิน ค่า Eh ของชุดดินทั้งสองจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าเท่ากับ Eh เดิมของดินก่อนขังน้ำ ส่วนในชุดดินพินายและชุดดินสันทรายที่ไม่ได้ขังน้ำนั้น Eh ของชุดดินทั้งสองค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาของการทดลอง

เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Eh พบว่า เมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำ ค่า Eh ของดินจะลดลงจนมีค่าต่ำสุด และเมื่อดินอยู่ในภาวะมีออกซิเจน ค่า Eh ของดินจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งก็สอดคล้องกับการทดลองของ Ponnampetuma (1963) ในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลง Eh ของดิน 31 ชนิด ในฟิลิปปินส์ พบว่าลักษณะการลดลงของ Eh ของดินโดยทั่วไป มี 4 แบบด้วยกันคือ

1) ดินที่มี pH เป็นกลาง เนื้อดินหยาบ มีเหล็กและแมงกานีสต่ำ แต่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง (มากกว่า 3 %) เมื่อขังน้ำ Eh ของดินจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าต่ำสุดประมาณ -250 mV ภายในระยะเวลา 3 อาทิตย์ และค่า Eh ดังกล่าวจะคงที่อยู่นานนับเดือนต่อไป

2) ดินที่มีปริมาณเหล็กค่อนข้างสูง (มากกว่า 2.9 %) อินทรีย์วัตถุปานกลาง เมื่อขังน้ำ Eh ของดินจะลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 3 อาทิตย์แรก ถึงค่า Eh ประมาณ -50 mV และลดลงต่ำสุดประมาณ -250 mV

3) ดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำ แต่มีปริมาณแมงกานีสสูง (มากกว่า 0.2 %) Eh ของดินจะลดลงอย่างรวดเร็วลงมาถึง 100 mV ภายใน 2-3 วันหลังการขังน้ำ จากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนต่ำสุดที่ -50 mV

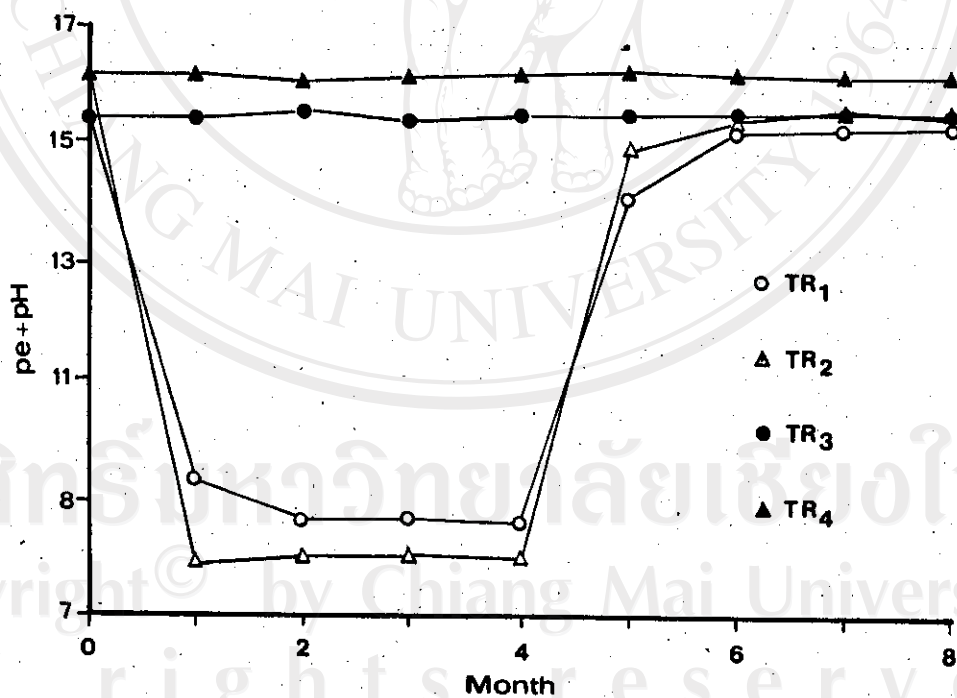
4) ดินที่มีอินทรีย์วัตถุที่ต่ำมาก ๆ (น้อยกว่า 1 %) และมีแมงกานีสพอสมควร Eh ของดินจะค่อย ๆ ลดลง ตั้งแต่เริ่มขังน้ำ และค่า Eh ต่ำสุดยังคงเป็นบวกอยู่ตลอดระยะเวลาการขังน้ำ

ซึ่งจากผลการทดลองนี้ ทั้งชุดดินสันทรายและชุดดินพินายควรจัดอยู่ในกลุ่มที่ 4 เนื่องจาก Eh ยังคงเป็นบวกตลอดระยะเวลาการขังน้ำ การลดลงของ Eh ดินจะเกิดขึ้นรวดเร็วและรุนแรงเพียงใดนั้นจะแตกต่างกันออกไปแล้วแต่ชนิดของดิน ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณและ

อัตราการลดลงของ Eh ของดินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน อุณหภูมิของดิน ระดับของ Eh และ pH ของดินก่อนที่จะมีการขังน้ำ และชนิดและปริมาณของตัวรับอิเล็กตรอนที่มีอยู่ในดิน โดยทั่วไปแล้วอินทรีย์วัตถุในดินจะส่งเสริมสภาพรีดักชันรุนแรงขึ้น และถ้าเป็นอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายง่ายแล้วอัตราการลดลงของ Eh จะสูงและจะทำให้ดินบรรลุสภาพรีดักชันต่ำสุด (low ultimate potential) เร็วกว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุน้อยกว่า (Ponnamperuma, 1972) ดังนั้นในสภาพขังน้ำค่า Eh ต่ำสุดของชุดดินพินายน่าจะมีค่าต่ำกว่าค่า Eh ของชุดดินสันทราย เพราะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุมากกว่า อย่างไรก็ตามดินที่มีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูงไม่จำเป็นที่จะส่งเสริมให้ค่า Eh ต่ำกว่าดินที่มีอินทรีย์วัตถุต่ำกว่าเสมอไป เนื่องจากค่าต่ำสุดของ Eh นั้นยังขึ้นกับระดับของ Eh และ pH ของดินก่อนขังน้ำ ถ้าระดับของ Eh ก่อนขังน้ำสูง อัตราการลดลงของ Eh จะรวดเร็วกว่าเมื่อดินมีระดับ Eh เดิมที่ต่ำกว่า และดินที่มี pH เป็นกลาง อัตราการลดลงของ Eh ก็จะมีรวดเร็วกว่าดินที่มี pH เป็นกรดอย่างรุนแรง (Ponnamperuma, 1963) นอกจากนี้แล้วชนิดและปริมาณตัวรับอิเล็กตรอนอื่น ๆ ที่มีอยู่ในดินก็ยังมีส่วนในการร่วมชะลอการลดลงของ Eh เช่น ไนเตรท แมงกานีสไดออกไซด์ (MnO_2) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) ถ้ามีปริมาณสูงก็จะสามารถยับยั้งการลดลงอย่างรวดเร็วของ Eh ของดิน และรักษาระดับ Eh ของดินเอาไว้ไม่ให้ลดลงต่อไปอีก (Ponnamperuma, 1965) ดังนั้นการที่ระดับ Eh ของชุดดินสันทรายลดลงถึงระดับต่ำสุดต่ำกว่าชุดดินพินาย ก็เนื่องจากสมบัติของดินทั้งสองแตกต่างกัน ซึ่งชุดดินสันทรายปฏิกิริยาของดินเป็นกลางมีค่า pH = 6.9 ส่วนค่า Eh ของดินก่อนการขังน้ำถึงแม้จะไม่แตกต่างกัน แต่ก็มีแนวโน้มว่าในชุดดินสันทรายจะมีค่าสูงกว่าชุดดินพินาย สำหรับชนิดและปริมาณตัวรับอิเล็กตรอนนั้น ถึงแม้ว่าในการทดลองนี้จะมีได้วีเคราะห์หาปริมาณ NO_3^- , MnO_2 และ Fe_2O_3 โดยตรง แต่จากปริมาณแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้และปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ที่วิเคราะห์ได้ในช่วงที่ดินอยู่ในสภาพน้ำขังนั้น ซึ่งเป็นผลจากการใช้ MnO_2 และ Fe_2O_3 เป็นตัวรับอิเล็กตรอน พบว่าในชุดดินพินายมีปริมาณมากกว่าชุดดินสันทรายมาก โดยในชุดดินพินายมีปริมาณแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ 153.7 ppm และมีเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ 1498 ppm ในขณะที่ชุดดินสันทรายมีปริมาณแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้เพียง 112.2 ppm และเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้เพียง 578.0 ppm เท่านั้น

ในการบ่งบอกถึงสภาพรีดักชันของดินโดยใช้ค่า Eh นั้น มักเกิดปัญหาในการเปรียบเทียบกับค่า Eh ของระบบอื่น เนื่องจากค่า Eh และ pH มีความสัมพันธ์กลับกันโดยเมื่อ

pH สูงขึ้น Eh จะมีค่าลดลง ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากการใช้ค่า Eh ในการบ่งบอกถึงสภาพรีดักชันของดินแล้ว ค่า $pe+pH$ ยังเป็นรีดอกซ์พารามิเตอร์ (Redox parameter) อีกตัวหนึ่งที่สำคัญในการบ่งบอกถึงสภาพรีดักชันของดิน Baas Becking et al. (1960) ได้ทำการสรุปช่วง pH และ $pe+pH$ ของดินขังน้ำไว้ โดยมีค่า pH อยู่ระหว่าง 3.5-9.0 และ $pe+pH$ อยู่ระหว่าง 1-18 โดยที่สภาพรีดิวซ์สมบูรณ์ (ความดันย่อยของไฮโดรเจนก๊าซ = 1 บรรยากาศ) $pe+pH = 0$ และสภาพออกซิไดซ์สมบูรณ์ (ความดันย่อยของออกซิเจนก๊าซ = 1 บรรยากาศ) $pe+pH = 20.78$ และจากผลการทดลอง เมื่อใช้ $pe+pH$ เป็นรีดอกซ์พารามิเตอร์ แสดงดังรูป 2.2

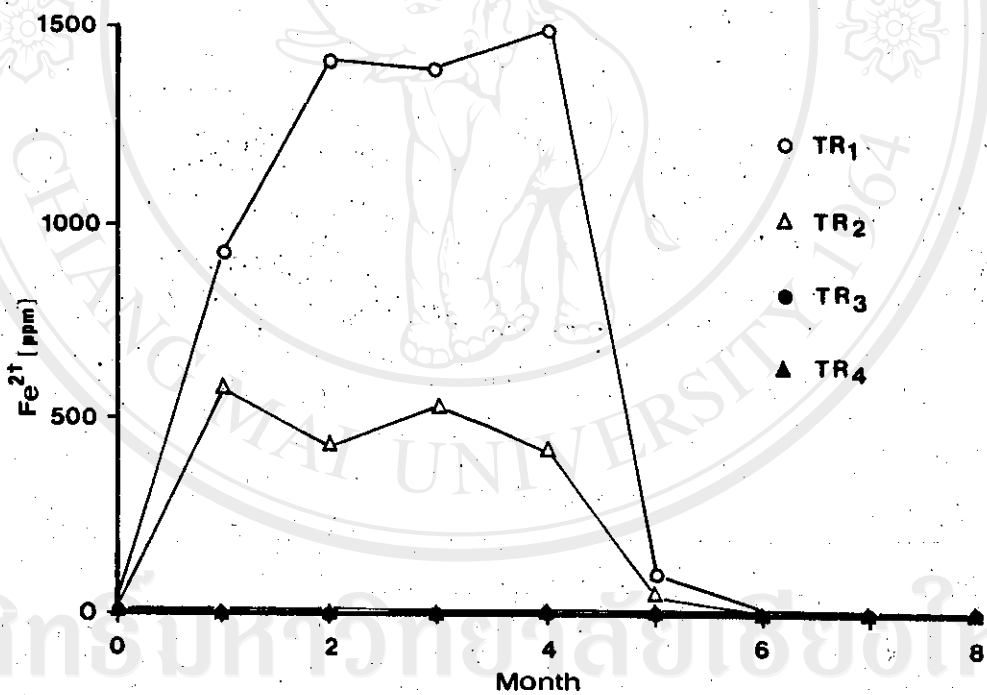


รูปที่ 2.1.1 แสดงการเปลี่ยนแปลง $pe + pH$ ของดิน

จากรูป 2.1.1 จะเห็นว่าดินสันทรายนั้นจะอยู่ในสภาพออกซิไดซ์สูงกว่าดินพินาย แต่เมื่อทำการขังน้ำให้ดินอยู่ในสภาพขาดออกซิเจนแล้วดินสันทรายกลับมีสภาพรีดิวซ์สูงกว่าดินพินาย ซึ่งผลการทดลองที่ได้ก็เป็นไปตามลักษณะ เดียวกันกับค่ารีดอกซ์โพเทนเชียล

2.2 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้แสดงดังตารางภาคผนวกที่ 59 - 70



รูปที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำ ปริมาณของเหล็กจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างมากจากปริมาณเหล็กที่มีอยู่เดิม หลังจากนั้นปริมาณเหล็กค่อนข้างจะคงที่ ภายหลังจากการระบายน้ำออกจากดินแล้วปริมาณเหล็กจะลดลงจนมีปริมาณเท่าเดิมก่อนขังน้ำ ซึ่งทั้งชุดดินพินายและชุดดินสินทรายมีลักษณะและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่คล้ายคลึงกัน

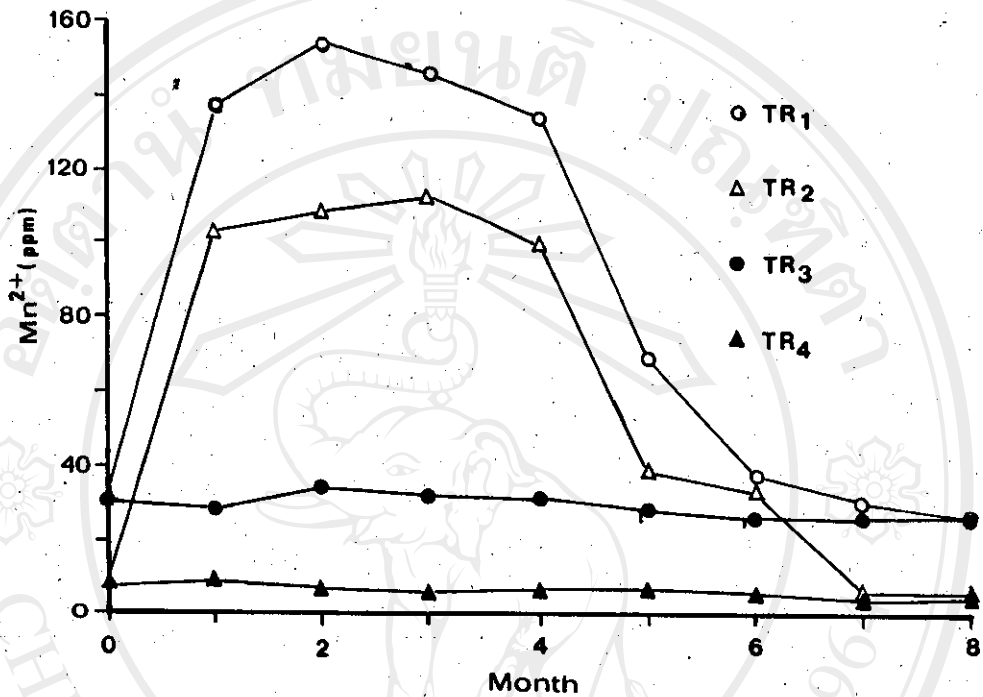
การเพิ่มของ Fe^{2+} หลังการขังน้ำนั้นขึ้นอยู่กับ active iron ที่มีอยู่ในดิน (Ponnamperuma, 1963) ซึ่งก็สอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้ ซึ่งเดิมชุดดินพินายมี 11-15 ppm และชุดดินสันทรายมี 2-3 ppm เมื่อขังน้ำแล้วปริมาณ Fe^{2+} เพิ่มสูงขึ้นอย่างมากดังรูป 2.2 เป็นที่น่าสังเกตว่าการเพิ่มของ Fe^{2+} จะสอดคล้องกับการลดของ Eh ซึ่งเป็นสิ่งบ่งชี้ว่าเหล็ก (3+) เป็นสารรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนในภาวะขาดออกซิเจน เมื่อพิจารณาถึงการสลายตัวของแร่ดินเหนียวโดยกระบวนการเพอโรไลซิส ดินที่ผ่านการสลายตัวมาแล้วน่าจะมีปริมาณเหล็กเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับปริมาณอลูมิเนียม แต่จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างของเหล็กระหว่างดินที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเพอโรไลซิส ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าเหล็กที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวของแร่ดินเหนียวเกิดตกตะกอนเป็นเหล็กไฮดรอกไซด์ ($Fe(OH)_3$, $K_{sp} = 3.2 \times 10^{-38}$) และหรือเหล็กฟอสเฟต ($FePO_4$, $K_{sp} = 1.3 \times 10^{-22}$) ซึ่งมีค่าการละลายค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ ($Al(OH)_3$, $K_{sp} = 1 \times 10^{-32}$) และอลูมิเนียมฟอสเฟต ($AlPO_4$, $K_{sp} = 5.75 \times 10^{-19}$) (สุพจน์, 2526) จึงทำให้ปริมาณเหล็กที่วิเคราะห์ได้ไม่แตกต่างกันระหว่างดินที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเพอโรไลซิส

2.3 การเปลี่ยนแปลงแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.3 ผลการวิเคราะห์หาเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ดังตารางภาคผนวกที่ 71 - 82

จากผลการทดลองพบว่า ลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของแมงกานีสของชุดดินพินายและชุดดินสันทราย จะเป็นไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำปริมาณแมงกานีสจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งสองชุดดิน โดยชุดดินพินายปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 29 ppm สูงถึง 153.7 ppm และชุดดินสันทรายปริมาณแมงกานีสเพิ่มขึ้นจากเดิมประมาณ 7 ppm สูงถึง 112.2 ppm เมื่อระบายน้ำออกจากดินแล้วปริมาณแมงกานีสจะลดลงอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณเท่ากับปริมาณแมงกานีสก่อนขังน้ำ

จากการทดลองจะเห็นได้ว่า ลักษณะรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงแมงกานีสนั้นคล้ายคลึงกับการเปลี่ยนแปลงของเหล็ก แต่ในภาวะมีออกซิเจนนั้น แมงกานีสจะถูกออกซิไดซ์

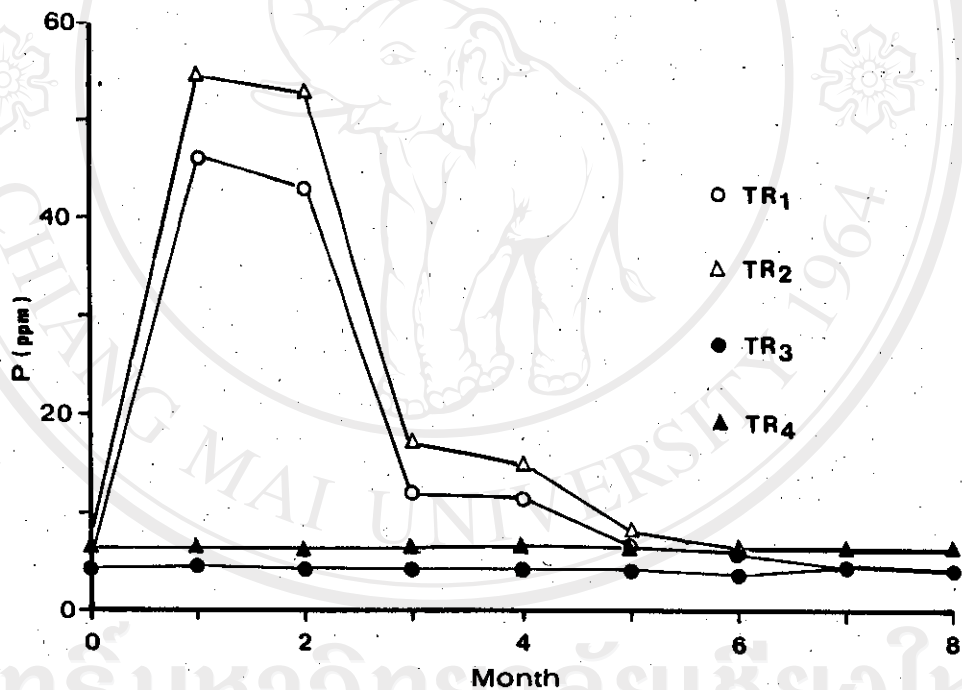


รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้

ได้ช้ากว่าเหล็กมาก ($E^\circ \text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+} = 0.771 \text{ V}$, $E^\circ \text{Mn}^{4+}/\text{Mn}^{2+} = 1.208 \text{ V}$) ซึ่งจากการทดลองก็พบว่าภายหลังการระบายน้ำออกจากดินแล้ว ปริมาณแมงกานีสลดลงประมาณ 50 % จากปริมาณสูงสุดในสภาวะขาดออกซิเจน ในขณะที่เหล็กลดลงมากกว่า 90 % ทั้งชุดดินพินายและชุดดินสันทราย ดังนั้นจึงอาจจะเกิดการพิษของแมงกานีสต่อพืชที่ปลูกตามภายหลังการระบายน้ำออกจากดินแล้ว จากการสลายตัวพื้ของแร่ดินเหนียวโดยกระบวนการเพอโรไลซิส ปริมาณแมงกานีส น่าจะมีปริมาณสูงขึ้นเช่นเดียวกับปริมาณอลูมิเนียม แต่จากการทดลองพบว่าไม่มีความแตกต่างกันของปริมาณแมงกานีส ที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเพอโรไลซิส ซึ่งก็น่าจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับเหล็ก โดยแมงกานีสที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวพื้ของแร่ดินเหนียวนั้น อาจตกตะกอนเป็นแมงกานีสไฮดรอกไซด์ ($\text{Mn}(\text{OH})_3$ $K_{sp} = 10^{-36}$) และในภาวะมีออกซิเจนนั้น แมงกานีสจะอยู่ในสภาวะออกซิเดชันที่สูง (+3, +4) ซึ่งมีค่าการละลายต่ำมาก นอกจากนั้นแล้ว ปริมาณแมงกานีสทั้งหมดในดินก็มีค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียมและเหล็ก (Al = 8.1%, Fe = 5 %, Mn = 0.09 %, P = 0.1 %) จึงทำให้ปริมาณแมงกานีสที่มีโอกาสเพิ่มขึ้นนั้นน้อยมากจนไม่อาจมีผลได้

2.4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฟอสฟอรัสที่สกัดได้

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.4 จากผลการวิเคราะห์หาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงของฟอสฟอรัสที่แสดงในตารางภาคผนวกที่ 83 - 94



รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณฟอสฟอรัสในดิน

จากรูป 2.4 พบว่าเมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำปริมาณของฟอสฟอรัสจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงระยะแรก ๆ ของการขังน้ำ โดยในชุดดินที่พื้มีปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มสูงถึง 46.31 ppm และชุดดินสันทรายเพิ่มสูงขึ้นไปถึง 54.67 ppm หลังจากปริมาณฟอสฟอรัสเพิ่มจนถึงขีดสูงสุดแล้ว จากนั้นปริมาณฟอสฟอรัสจะลดต่ำลงมาในช่วงหลังของการขังน้ำ แต่ก็ยังมีปริมาณสูงกว่าปริมาณเริ่มต้น เมื่อระบายน้ำออกจากดินแล้ว ปริมาณฟอสฟอรัสก็จะลดลงมาจนมีปริมาณเท่าเดิมก่อนขังน้ำ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าสภาพดินน้ำขังนั้น ส่งเสริมการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัส ซึ่งก็เนื่องมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ในสภาพน้ำขัง จะมีสารประกอบอินทรีย์ต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากขบวนการ anaerobic metabolism นั้น สามารถจะทำปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับเหล็ก แมงกานีส และอลูมิเนียมในดิน ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการตกตะกอนของฟอสฟอรัสลดลง (Ponnamperuma, 1964) หรืออีกนัยหนึ่งพวก ferric hydroxides ต่าง ๆ จะถูกรีดิวซ์ ทำให้อำนาจการตรึงฟอสฟอรัสโดย ferric hydroxides ลดลง (Ponnamperuma, 1955)

2. ฟอสเฟตที่ถูกตรึงอยู่บนผิวของเหล็ก และอลูมิเนียมออกไซด์ จะถูกไล่ที่ออกมาโดย organic anion ที่เกิดจากขบวนการ anaerobic metabolism ของอินทรีย์วัตถุในดิน (Shapiro, 1958)

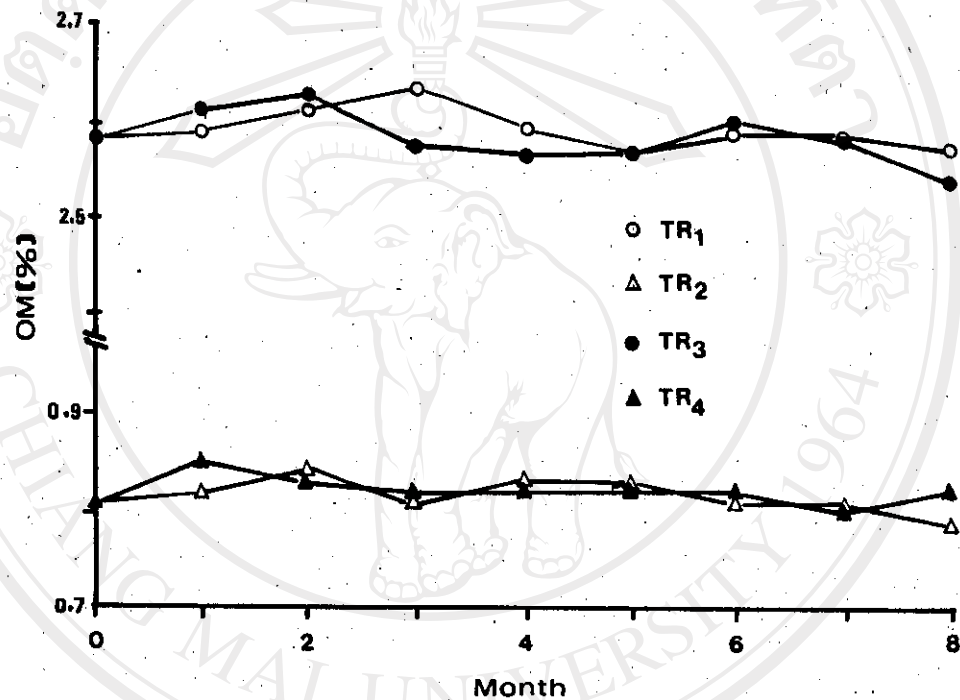
3. การรีดิวซ์สเตรนจ์ไท์ (strengite) $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ให้กลายเป็นวีเวียนไนท์ (vivianite) $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งสามารถละลายน้ำได้ง่ายมาก และจะอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด ในทันใดที่เกิดสารประกอบนี้ (Ponnamperuma, 1955)

4. เนื่องจากรูปภาพขังน้ำ การละลายของ $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ จะสูงขึ้น เนื่องจากถูกไฮโดรไลซ์ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นขบวนการที่สำคัญขบวนการหนึ่งในการปลดปล่อย H_2PO_4^- (สรสิทธิ์, 2511)

5. จากการกระทำของแบคทีเรียที่สามารถละลายฟอสเฟตได้ (phosphate dissolving bacteria) ซึ่งสามารถละลายสารประกอบฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำให้ละลายน้ำได้ง่ายขึ้น โดยการผลิตสารที่เป็นกรดต่าง ๆ จากกระบวนการ anaerobic metabolism ของมัน (Ponnamperuma, 1964)

อย่างไรก็ตามในดินก็ยังมีปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในดินลดลง ปฏิกิริยาที่สำคัญ ได้แก่ การตกตะกอน การถูกดูดตรึง และ isomorphic replacement ของไอออนกับแร่ดินเหนียวและ sesquioxides ของดินซึ่งเป็นเหตุที่ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสลดลงในช่วงหลัง ๆ ของการขังน้ำ และเมื่อครบวงจรเพอโรไลซิสแล้ว พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสของแต่ละชุดดินที่ผ่านและไม่ผ่านกระบวนการเพอโรไลซิส ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

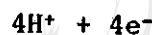
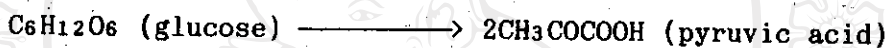
2.5 การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุ



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงของอินทรีย์วัตถุในดิน

จากผลการวิเคราะห์หาเงื่อนไขของการเปลี่ยนแปลงอินทรีย์วัตถุในดิน ดังแสดงรายละเอียดในตารางภาคผนวกที่ 95-106 พบว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุในแต่ละเดือนของชุดดินพินายไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เช่นเดียวกับชุดดินสันทราย โดยชุดดินพินายมีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณ 2.56 % ส่วนชุดดินสันทรายมีปริมาณอินทรีย์วัตถุประมาณ 0.8 % ในภาวะขาดออกซิเจน จุลินทรีย์ดินจะย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานแล้วปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโปรตอนออกมา จึงทำให้รีดอกซ์โพเทนเชียลลดลง ซึ่งจากหลักการดังกล่าวน่าจะคาดหวังว่าปริมาณอินทรีย์วัตถุจะต้องลดลง แต่จากการทดลองปริมาณอินทรีย์วัตถุมิได้ลดลงก็อาจเนื่องด้วยเหตุผลหนึ่ง เหตุผลใดหรือทั้งสองสาเหตุดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. การหาอินทรีย์วัตถุในดินนั้นจะหาในรูปอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งถึงแม้ว่าจะได้มิกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินดังกล่าวแล้วข้างต้นก็ตาม การหาปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ใช้อยู่ในที่นี้อาจตรวจสอบปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ลดลงจากเดิมได้ ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุอาจถูกเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปยังอีกรูปหนึ่ง โดยระหว่างกิจกรรมนั้นจุลินทรีย์ดินก็ยังได้รับพลังงานและปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโปรตอนตามหลักการเดิม แต่ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนมิได้เปลี่ยนแปลงดังสมการ (Greenland and Hayes, 1981)



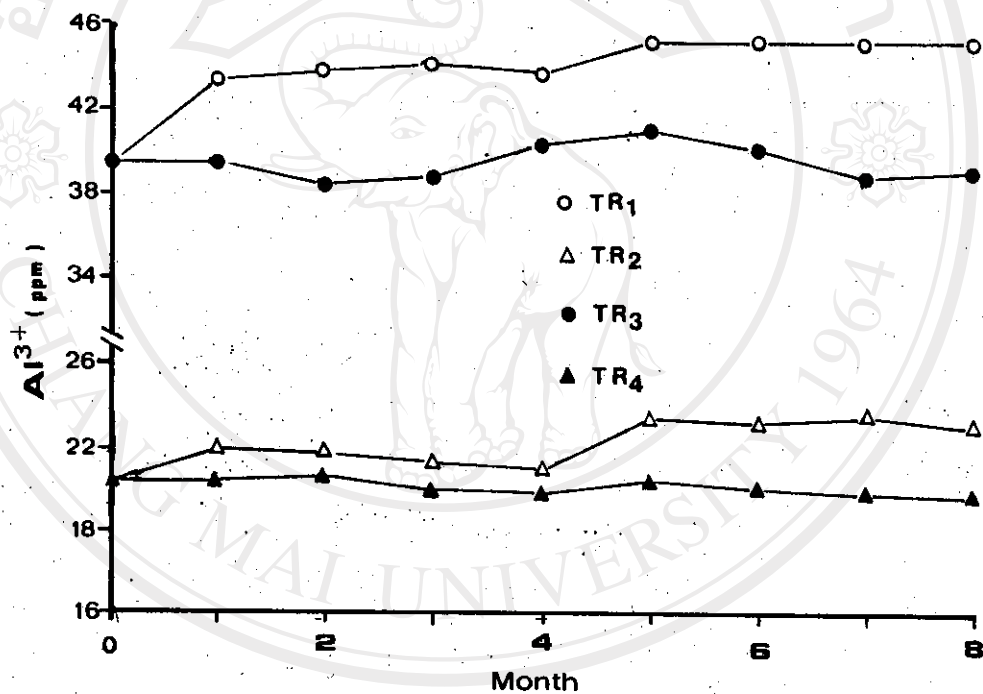
2. อินทรีย์วัตถุที่อยู่ในดินนั้นอยู่ในรูปที่ค่อนข้างเสถียร นอกจากนี้แล้วมักมีสมดุลย์ระหว่างอัตราการสูญเสีย^{1/} และอัตราการเกิด^{2/}อินทรีย์วัตถุ

1/ การสูญเสียอินทรีย์วัตถุ เกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุโดยจุลินทรีย์ดิน

2/ การเกิดอินทรีย์วัตถุ เกิดจากซากสหร่ายสีเขียวและสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินและการขับกรดอินทรีย์ต่าง ๆ จากรากพืช

2.6 การเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมที่สกัดได้

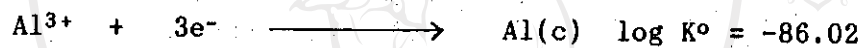
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในดิน

ผลการวิเคราะห์แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในดินแสดงในตารางภาคผนวกที่ 107-118 จากการทดลองพบว่า ลักษณะและรูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณอลูมิเนียมในชุดดิน พินายและชุดดินสันทรายจะมีลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงเหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำปริมาณอลูมิเนียมในดินจะเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณเริ่มต้น และค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการขังน้ำ ภายหลังจากระบายน้ำออกจากดินแล้วพบว่าปริมาณอลูมิเนียมได้เพิ่มสูงขึ้นมากกว่าในระยะขังน้ำ โดยในชุดดินพินาย ปริมาณอลูมิเนียมก่อนขังน้ำ 39.58 ppm เมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำ

ปริมาณอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นมาเป็น 43.50 ppm และเมื่อระบายน้ำแล้ว ปริมาณอลูมิเนียมสุดท้ายเป็น 45.28 ppm ส่วนชุดดินสนทรายมีปริมาณอลูมิเนียมก่อนขังน้ำ 19.8 ppm เมื่อคินอยู่ในสภาพขังน้ำ ปริมาณอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นมาเป็น 21.0 ppm และเมื่อระบายน้ำแล้วปริมาณอลูมิเนียมสุดท้ายเป็น 23.0 ppm จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เมื่อผ่านกระบวนการเพอโรไลซิสแล้ว อลูมิเนียมในดิน ได้เพิ่มปริมาณสูงขึ้นทั้งสองชุดดิน ลักษณะการเพิ่มขึ้นของอลูมิเนียมจะแบ่งเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรก นั้นเป็นช่วงที่คินอยู่ในสภาพรีดักชัน เมื่อพิจารณาจากสมการรีดอกซ์ของอลูมิเนียม ดังแสดงในสมการ ข้างล่าง (Lindsay, 1979)



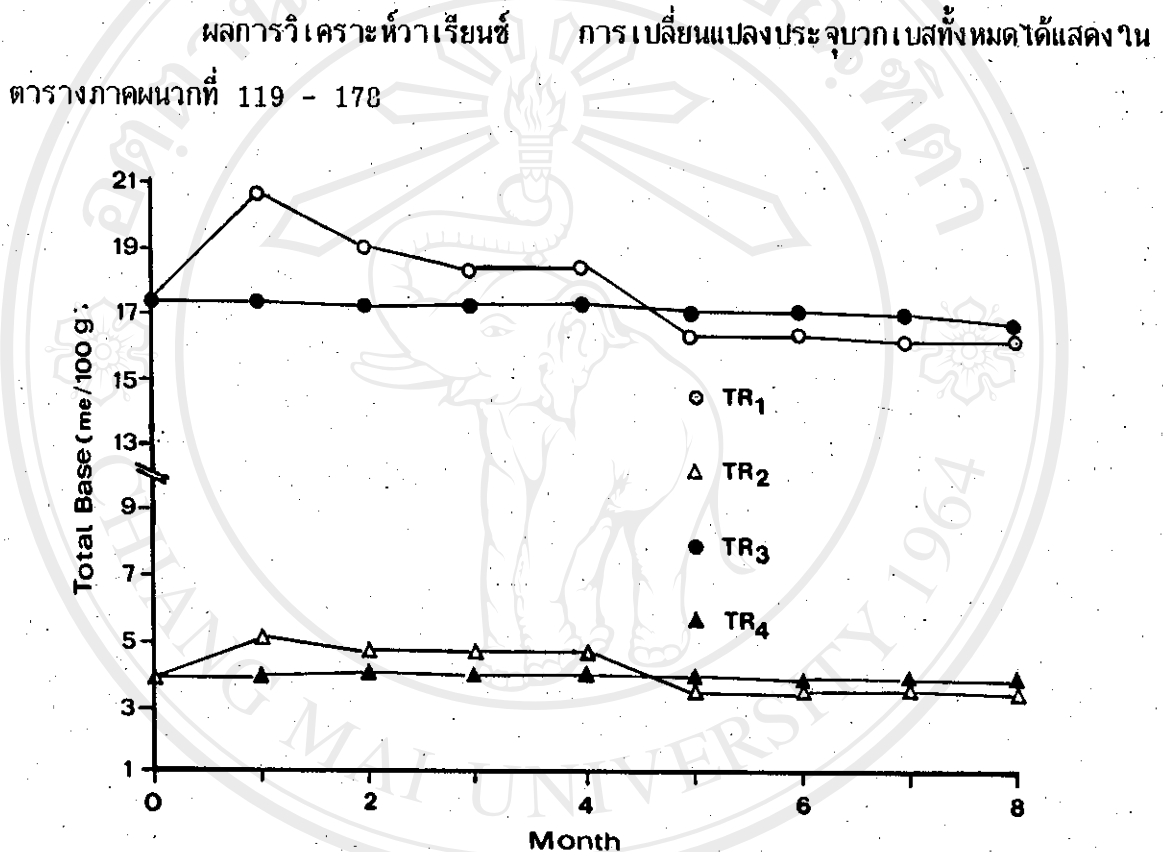
$$pe = -28.67 + 1/3 \log \text{Al}^{3+}$$

และสภาพรีดอกซ์ในดินโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง $pe+pH = 1-18$ ในขณะที่ pH ของดินขังน้ำ = 7 จากสมการก็จะได้ปริมาณ $(\text{Al}^{3+}) = 10^{68.01} - 10^{122.01}$ ซึ่งจะเห็นว่าในดินโดยทั่วไป ไม่มีโอกาสพบ Al(c) ได้เลยเนื่องจากมันไม่เสถียร นอกจากนี้แล้วรีดอกซ์ยังมีผลทางอ้อมต่อการละลายของแร่ลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณ OH^- ที่เพิ่มสูงขึ้นในสภาพรีดักชันดังตัวอย่างการละลายของแร่ลูมิเนียมฟอสเฟต ดังสมการ (Fujiwara, 1950)



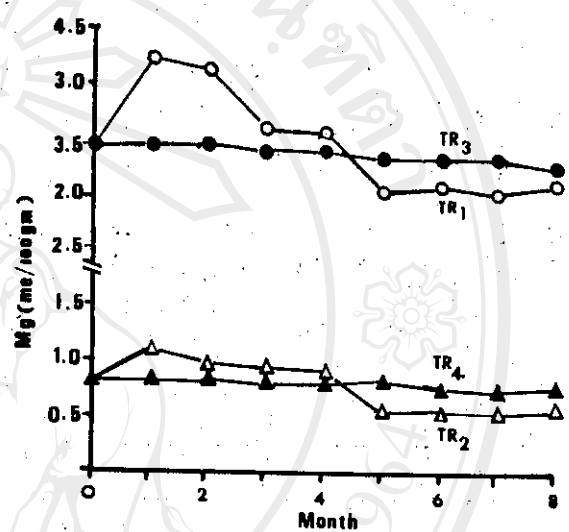
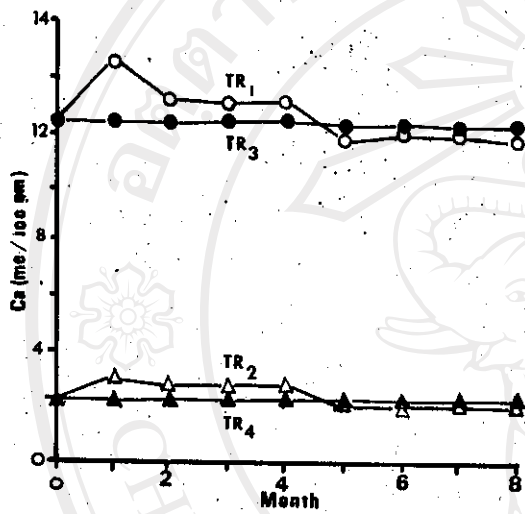
ส่วนการเพิ่มของอลูมิเนียมในช่วงที่ 2 นั้นเป็นช่วงหลังจากการระบายน้ำออกจากดินแล้ว การเพิ่มขึ้นของอลูมิเนียมในระยะนี้ เนื่องจากการลดลงของความเป็นกรด-เบสของดิน ซึ่งเกิดจากการออกซิไดซ์ของเหล็กและแมงกานีส ทำให้เกิดไฮดรเจนไอออน (Breemen and Brinkman, 1976) ไฮดรเจนไอออนจะไปสลายที่เอาอลูมิเนียมที่ถูกดูดซับที่ผิวแร่ดินเหนียวให้ออกมาอยู่ในสารละลายดินและบางส่วนก็ถูกปลดปล่อยออกมาจากโครงสร้างแร่ที่มีอลูมิเนียมเป็นองค์ประกอบ เนื่องจากการสลายตัวพองตัวของแร่ดังกล่าว ซึ่งเป็นผลมาจากการกระทำของไฮดรเจนไอออน (Bolt, 1976 ; Miller, 1965)

2.7 การเปลี่ยนแปลงประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดในดิน



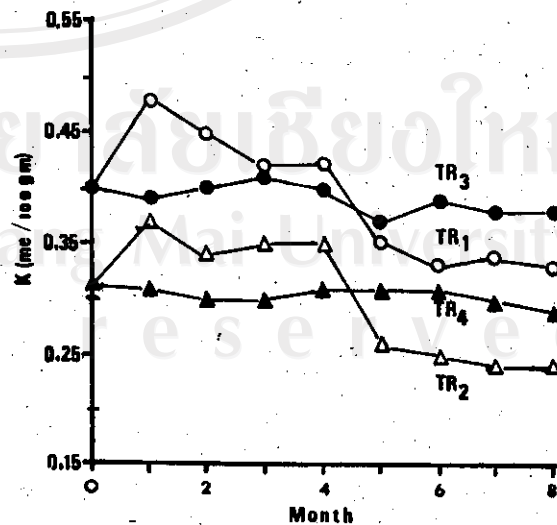
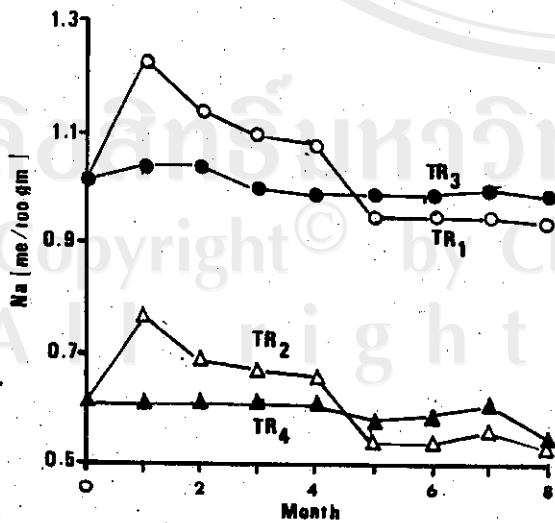
รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงปริมาณประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดในดิน

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูปพบว่าลักษณะรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงของประจุบวกเบสทั้งหมด ซึ่งประกอบไปด้วย แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม และโปแตสเซียมของทั้งชุดดินพินายและชุดดินสันทรายมีลักษณะรูปแบบที่เหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อดินอยู่ในสภาพขังน้ำ ปริมาณประจุบวกเบสทั้งหมดจะเพิ่มปริมาณสูงขึ้นจากปริมาณเริ่มต้นในระยะเวลาแรกของการขังน้ำ หลังจากนั้นแล้วปริมาณประจุบวกเบสทั้งหมดจะลดลงมาเล็กน้อย และรักษาระดับนั้นเอาไว้ตลอดระยะเวลาของการขังน้ำ เมื่อระบายน้ำออกจากดินแล้วปริมาณของประจุบวกเบสทั้งหมดจะลดปริมาณลงจนต่ำกว่าปริมาณเริ่มต้น ส่วนในชุดดินพินายและชุดดินสันทรายที่ไม่ได้ทำการขังน้ำ พบว่าปริมาณประจุบวกเบสทั้งหมดในระยะเวลาเดือนท้าย ๆ ของการทดลองมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ส่วนรายละเอียดของประจุบวกเบสแต่ละชนิดได้แสดงดังรูปที่ 2.7.1 - 2.7.4



รูปที่ 2.7.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงแคลเซียม

รูปที่ 2.7.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงแมกนีเซียม



รูปที่ 2.7.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงโซเดียม

รูปที่ 2.7.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงโพแทสเซียม

จากรูป 2.7.1 - 2.7.4 จะเห็นว่าลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของ แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม และ โบแทสเซียม จะคล้ายคลึงกันดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นในการเปลี่ยนแปลงประจุบวกเบสทั้งหมด

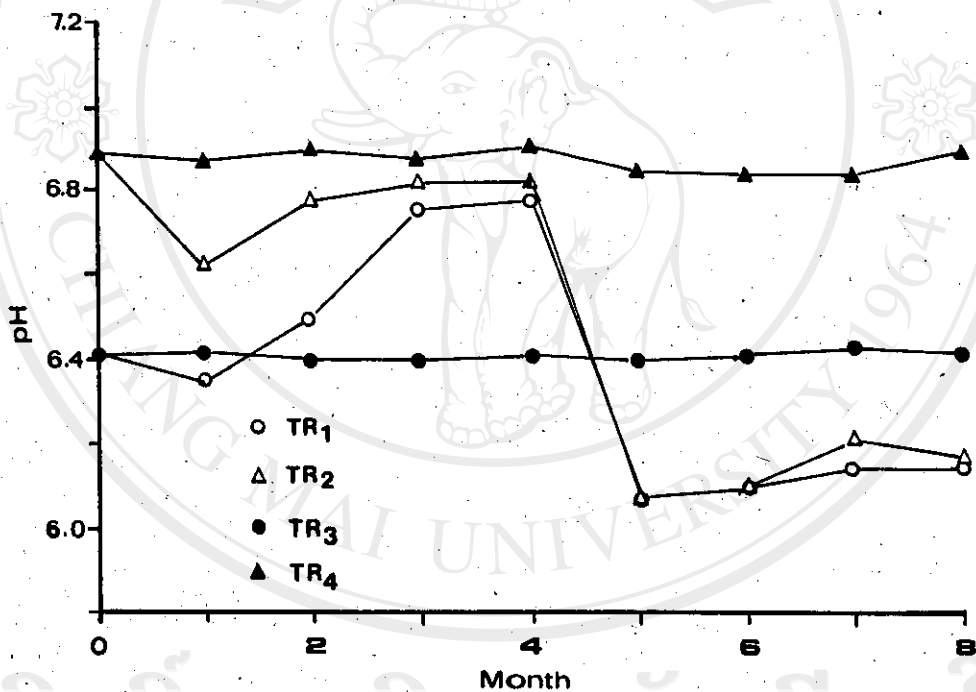
ในสภาพที่ดินมีน้ำขังนั้น Ponnampereuma (1972) ก็พบว่าปริมาณของประจุบวกเบสต่าง ๆ มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น สภาพที่ดักชั้นในดินจะมีผลทางอ้อมต่อการเพิ่มของประจุบวกเบสผลทางอ้อมที่สำคัญก็คือ อานาจการทำละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดและสะสมอยู่ในดินเป็นจำนวนมากสามารถจะส่งเสริมให้ประจุบวกเบสต่าง ๆ เหล่านั้น ซึ่งเป็นองค์ประกอบของทั้งแร่ปฐมภูมิและทุติยภูมิต่าง ๆ ได้ละลายตัวออกมา และปริมาณ Fe^{2+} และ Mn^{2+} ซึ่งเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากในสภาพที่ดักชั้นของดิน จะไปไล่ที่เอาประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ให้ออกมาอยู่ในสารละลายดินเพิ่มขึ้น

เมื่อระบายน้ำออกจากดินแล้ว พบว่าปริมาณประจุบวกเบสทั้งหมดได้ลดต่ำกว่าปริมาณประจุบวกเบสเริ่มต้น โดยในชุดดินพินายซึ่งมีประจุบวกเบสเริ่มต้น 16.94 me/100 gm แล้วมีประจุบวกเบสสุดท้ายเป็น 16.15 me/100 gm หรือลดลง 4.66 % ส่วนชุดดินสันทรายมีประจุบวกเบสเริ่มต้น 3.87 me/100 gm แล้วมีประจุบวกเบสสุดท้ายเป็น 3.36 me/100 gm หรือลดลง 13.17 % ซึ่งการลดลงของประจุบวกเบสนั้นก็เนื่องมาจากการสูญเสียจากดินโดยการชะล้าง เพราะระบบการทดลองเป็นระบบเปิด น้ำสามารถที่จะซึมผ่านชั้นดินและระบายออกนอกกระถางได้สะดวก

เมื่อพิจารณาการลดลงของประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมด พบว่าประจุบวกเบสทั้งหมดของชุดดินสันทรายลดลงมากกว่า (13.17 %) ชุดดินพินาย (4.66 %) ทั้งนี้เนื่องมาจากชุดดินสันทรายมีการชะล้างสูงกว่าชุดดินพินาย เพราะชุดดินสันทรายซึ่งเป็นดินเหนียวามีอินทรีย์วัตถุ (0.8 %) และความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมด (4.18 me/100 gm) ต่ำกว่าชุดดินพินาย ซึ่งเป็นดินเหนียวมีอินทรีย์วัตถุ (2.56 %) และความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมด (18.5 me/100 gm) สูงกว่า จึงทำให้ชุดดินสันทรายมีความสามารถด้านทานการเปลี่ยนแปลงประจุบวกเบสทั้งหมดได้น้อยกว่าชุดดินพินาย

2.8 การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดิน

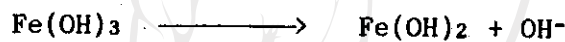
ผลการเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-เบส ของดินแสดงดังรูป 2.8 และผลการวิเคราะห์ค่าเรซินซ์ของการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดิน แสดงรายละเอียดในตารางภาคผนวกที่ 179 - 190



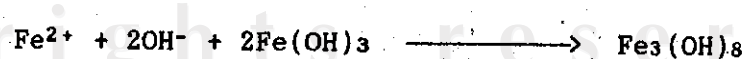
รูปที่ 2.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดิน

จากการทดลองพบว่า ลักษณะรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดิน ทั้งสองชุดดินจะมีลักษณะรูปแบบเหมือนกัน กล่าวคือ เมื่อดินอยู่ในสภาพน้ำขัง ความเป็นกรดเบสของดิน จะลดลงมาจากระดับเดิมเล็กน้อยในระยะแรกของการขังน้ำ หลังจากนั้นความเป็นกรด-เบสของดินจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและค่อนข้างคงที่ ประมาณ 6.75 - 6.8 ภายหลังเมื่อระบายน้ำออกจากดินพบว่า ระดับความเป็นกรด-เบสของชุดดินทั้งสองลดลงอย่างรวดเร็วและค่อนข้างคงที่ ประมาณ 6.1 - 6.2

ในสภาพน้ำขังนั้น ความเป็นกรด-เบสของดินจะลดลงมาเล็กน้อยก่อนที่จะสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากในระยะแรก ๆ ของการขังน้ำ กิจกรรมของจุลินทรีย์ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว เพราะมีอากาศและสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่มีสภาพออกซิเดชันสูงอยู่มาก จึงเกิดการสะสมก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งกรดอินทรีย์บางชนิดทำให้ปฏิกิริยาดินในระยะแรก ๆ ของการขังน้ำเป็นกรดมากขึ้นกว่าเดิม (Ponnamperuma, 1955; Ponnamperuma, 1972) หลังจากนั้นระดับความเป็นกรด-เบสของดินจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของไฮโดรเจนอิออนหรือการเพิ่มขึ้นของไฮดรอกซิลอิออน ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของสารประกอบต่าง ๆ ในดินเมื่อดินอยู่ในสภาพรีดิวซ์ ดังสมการ



ในระยะหลังของการขังน้ำ ความเป็นกรด-เบสของดินเปลี่ยนแปลงน้อยมากและค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากการตกตะกอนของ Fe^{2+} และ Mn^{2+} เมื่อดินมีระดับความเป็นกรด-เบสสูงขึ้น ระดับความเป็นกรด-เบสของดินจึงถูกควบคุมโดยระบบของ $\text{Fe}_3(\text{OH})_8\text{-Fe}^{2+}$ ดังปฏิกิริยาสมดุลย์ (Ponnamperuma *et al.*, 1967)



ในปี ค.ศ. 1963 Ponnamperuma ได้ศึกษาดินนา 31 ชนิด และได้สรุปการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบส ของดินในสภาพน้ำขัง 3 ลักษณะด้วยกัน

1) ในดินที่เป็นกรด ($\text{pH} = 4.6 - 5.7$) เมื่อขังน้ำแล้ว ระดับความเป็นกรด-เบสจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ 6.5 - 7.0 และจะคงที่อยู่นั้นตลอดไป

ดินพวกนี้มักมีปริมาณเหล็กสูง แต่ถ้าเป็นดินที่มีเหล็กและแมงกานีสต่ำ ระดับความเป็นกรด-เบส จะถูกยกขึ้นไปเหมือนกัน แต่จะผันแปรตามระยะเวลาโดยมีค่าเฉลี่ยประมาณ 6.5

2) ดินที่เป็นกรดเล็กน้อย ระดับความเป็นกรด-เบส ใกล้เคียง (6.2 - 6.6) เมื่อขังน้ำระดับความเป็นกรด-เบส จะสูงขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึงประมาณ 7.0 - 7.2 และรักษา ระดับนั้นตลอดไป

3) ในดินที่เป็นกลางเมื่อขังน้ำในระยะแรก ๆ ระดับความเป็นกรด-เบสจะลดลงเล็กน้อย แล้วจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นมายังระดับความเป็นกรด-เบสเดิมอีก แต่ถ้าดินเป็นเบส ระดับความเป็นกรด-เบสของดินจะลดลงอย่างช้า ๆ ใกล้เคียงกับเป็นกลางหรือด่างอ่อน ๆ

ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ก็สอดคล้องกับการทดลองของ Ponnampetura (1963) โดยชุดดินพินายนั้นควรจะอยู่ในกลุ่มที่ 2 ส่วนชุดดินสันทรายควรอยู่ในกลุ่มที่ 3

เมื่อระบายน้ำออกจากดิน ระดับความเป็นกรด-เบสของดินจะลดลง เนื่องมาจากการออกซิไดซ์ของ เพอร์สอิดอนซึ่งมีการผลิตไฮโดรเจนอิดอนหรือไฮดรอกซิลอิดอนไปในกระบวนการดังกล่าวมาแล้วข้างต้น (Breemen and Brinkman, 1976; Brinkman, 1981) อย่างไรก็ตามการลดลงของระดับความเป็นกรด-เบสของชุดดินทั้งสองกลับลดลงต่ำกว่าระดับความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น โดยชุดดินสันทรายซึ่งมีระดับความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น 6.90 แล้วมีระดับความเป็นกรด-เบสสุดท้าย 6.17 หรือลดลง 10.58 % ส่วนชุดดินพินายซึ่งมีระดับความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น 6.42 แล้วมีระดับความเป็นกรด-เบสสุดท้าย 6.14 หรือลดลง 4.36 % การที่ระดับความเป็นกรด-เบสของดินลดลงจากระดับความเป็นกรด-เบสเริ่มต้น น่าจะมีสาเหตุมาจากการลดลงของประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในชุดดินสันทรายประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดลดลง 13.17 % โดยลดลงจาก 3.87 me /100 gm เหลือเพียง 3.36 me /100 gm ส่วนชุดดินพินายประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมดลดลง 4.66 % โดยลดลงจาก 16.44 me /100 gm เหลือเพียง 16.15 me/100 gm สาเหตุอีกประการหนึ่งก็คือการเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุพันธ์ซึ่งเป็นประจุบวกกรด พบว่าในชุดดินสันทรายนั้นปริมาณอนุพันธ์เพิ่มขึ้นจากเดิม 0.22 me/100 gm เป็น 0.25 me/100 gm และชุดดินพินายปริมาณเพิ่มจากเดิม 0.44 me /100 gm เป็น 0.50 me /100 gm จากการลดลงของประจุบวกเบสที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งหมด และการเพิ่มขึ้นของประจุบวกกรด ก็น่าจะเป็นสาเหตุของการลดลงของระดับความเป็นกรด-เบสของดิน

จากการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของความเป็นกรด-เบสของชุดดินสนทราย (10.58 %) นั้นลดลงมากกว่าชุดดินพินาย (4.36 %) ซึ่งก็น่าจะเป็นผลมาจากความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน โดยกลไกการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดินนั้นเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูประหว่างอลูมิเนียม (เหล็ก) เฮกซาไฮดรอนเนียมไอออน ($\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$) กับอลูมิเนียม (เหล็ก) ในรูปแบบต่าง ๆ (Bhumbla and Mclean, 1965; Devis *et al.*, 1962; Jackson, 1963; Jackson, 1964; Schwertman and Jackson, 1964) โดยปฏิกิริยาในดินส่วนใหญ่แล้วเนื่องมาจากอลูมิเนียม ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณมากกว่า ดังสมการ (Lindsay, 1979)

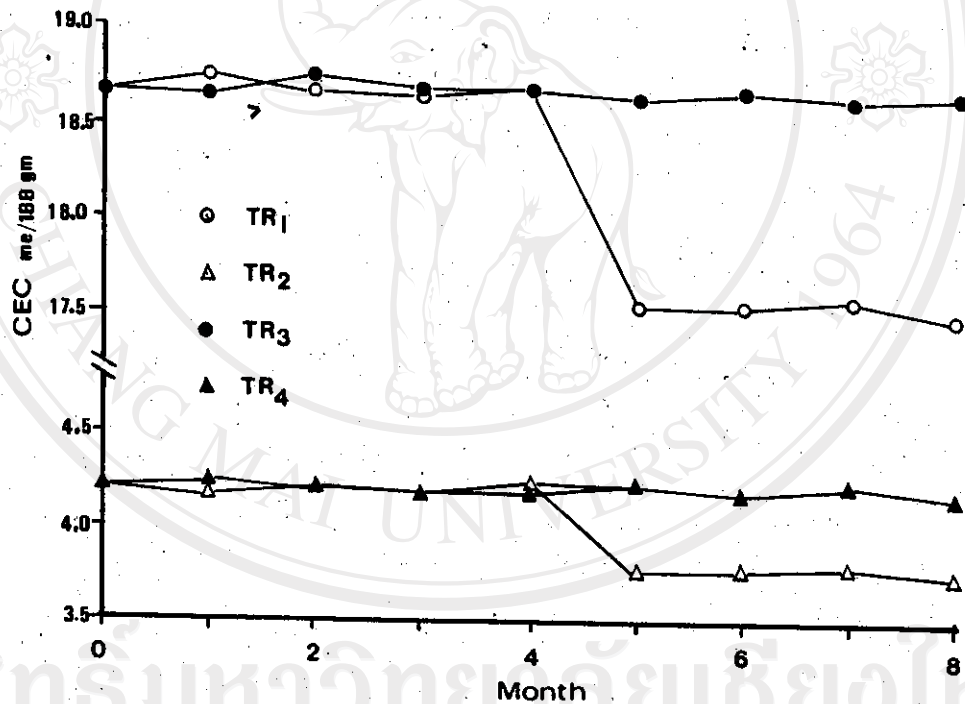


นอกจากนี้แล้วอินทรีย์วัตถุก็มีผลต่อการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดิน ซึ่งดินพินายมีอินทรีย์วัตถุสูงกว่า (2.56 %) ชุดดินสนทราย (0.8 %) สำหรับกลไกการต้านทานการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดินเนื่องมาจากอินทรีย์วัตถุนั้น เพราะอินทรีย์วัตถุประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ กรดฮิวมิก และกรดฟุลวิก ซึ่งสารประกอบทั้งสองตัวนี้ประกอบไปด้วย functional group ที่สำคัญคือ คาร์บอกซิลิก และฟีนอลิกไฮดรอกซิลที่สามารถแตกตัวได้หลายครั้ง จึงทำให้อินทรีย์วัตถุมีสมบัติเป็นกรดอ่อนเช่นเดียวกับกับอลูมิเนียม จึงมีสมบัติในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-เบสของดิน

2.9 การเปลี่ยนแปลงความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.9 ผลการวิเคราะห์หาเรซินซ์ของการเปลี่ยนแปลงของความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ แสดงในตารางภาคผนวกที่ 191 - 202 จากผลการทดลองพบว่าในสภาพที่ดินมีการขังน้ำ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติของความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ระหว่างดินที่ขังน้ำและไม่ได้ขังน้ำ ทั้งชุดดินพินายและชุดดินสนทราย แต่เมื่อระบายน้ำออกจากดินแล้วปรากฏว่าความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของชุดดินทั้งสองได้ลดลงมาจากเดิม โดยในชุดดิน

พืมายซึ่งมีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ เริ่มต้น 18.68 me /100 gm แล้วมีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ สุดท้ายเป็น 17.54 me /100 gm และชุดดินล้นทรายซึ่งมีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ เริ่มต้น 4.18 me /100 gm แล้วมีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ สุดท้ายเป็น 3.78 me /100 gm



รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้

จากการทดลองจะสังเกตเห็นว่าเมื่อดินได้ผ่านกระบวนการเพอโรลซิสแล้ว ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งการลดลงของความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินนั้นอาจเนื่องมาจากการเกิดลูมินัมแทรกเข้าไปในระหว่างหลีบของแร่ดินเหนียวประเภท 2 : 1 เช่น มอนท์โมริลโลไนท์ และเวอร์มิคูไลท์ (Rich, 1960 ; Dixon and Jackson, 1962 ; Frink, 1965 ; Shen and Rich, 1962 ; Sawhney, 1960 ;

Bernhisel and Rich, 1963 ; Weed and Nelson, 1962) โดยอลูมิเนียมที่อยู่ในหลืบของแร่ดินเหนียนั้นจะอยู่ในลักษณะที่เป็นเกาะ (atolls) ส่วนในดินเหนียวประเภท 1 : 1 นั้นอลูมิเนียมไม่สามารถแทรกเข้าบานหลืบได้ เนื่องจากเป็นแร่ดินเหนียวที่ไม่มีการยึดขยายตัว หรือน้อยมาก ดังนั้นการลดลงของความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดิน น่าจะเนื่องมาจากการสลายตัวผุพังของแร่ดินเหนียว โดยการกระทำของไฮโดรเจนออกไซด์ (Miller, 1965) ผลลัพธ์ที่ได้คือ ควอตซ์ จึงทำให้ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินลดลง เหตุผลอีกประการหนึ่งก็คือการสูญเสียแร่ดินเหนียวโดยการชะล้าง เมื่อแร่ดินเหนียวอยู่ในสภาพคอลลอยด์ (Brinkman, 1981) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบการสลายตัวผุพังของแร่ดินเหนียวระหว่างดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูงและดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ ดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูง น่าจะมีโอกาสที่จะสลายตัวผุพังหรือความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินลดลงได้มากกว่าดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ ทั้งนี้เพราะว่าดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูงสามารถดูดซับ Fe^{2+} ได้มากกว่า ซึ่ง Fe^{2+} นี้จะมีผลต่อเนื้อทำให้เกิดไฮโดรเจนออกไซด์ในระยะออกซิเดชัน (Brinkman, 1970) และจากผลการทดลองก็พบว่าชุดดินพินายที่เป็นดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูง เมื่อผ่านกระบวนการเพอร์โรไลซิสแล้ว ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินลดลงมากกว่าชุดดินสันทรายที่เป็นดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ ซึ่งผลการทดลองที่ได้ก็สอดคล้องกับสมมติฐานเพอร์โรไลซิสที่ได้เสนอมา

2.10 ความเป็นพิษของแมงกานีสต่อถั่วเหลือง

ในการปลูกถั่วเหลือง เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ ของความเป็นพิษของแมงกานีส เนื่องจากกระบวนการเพอร์โรไลซิสนั้น จากการสังเกตรอดระยะ เวลาการเจริญเติบโตของถั่วเหลืองพบว่าการเจริญเติบโตเป็นปกติ ไม่ปรากฏอาการ เป็นพิษของแมงกานีสให้เห็นตลอดทุกระยะของการเจริญเติบโตของถั่วเหลือง ผลผลิตและน้ำหนักแห้งเฉลี่ยของถั่วเหลืองในระยะเก็บเกี่ยวที่ปลูกในดินที่ผ่านและ ไม่ผ่านกระบวนการ เพอร์โรไลซิสไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แสดงน้ำหนักแห้งในระยะเก็บเกี่ยวและผลผลิตของถั่วเหลือง

ดำรับการทดลอง	น้ำหนักแห้ง (กรัม/ต้น)	ผลผลิตเมล็ด (กก./ไร่)
TR1	9.50	335.7
TR2	9.13	348.3
TR3	9.59	373.7
TR4	9.93	340.4
LSD 0.05	1.0	47.33
% CV	7.89	10.1

เมื่อพิจารณาถึงโอกาสของความเป็นพิษของแมงกานีสต่อถั่วเหลือง จากการศึกษาของ Lindsay (1979) แสดงให้เห็นว่าการละลายของแมงกานีสจะเพิ่มขึ้น 2 หน่วยของ $\log \text{Mn}^{2+}$ ต่อการลดลง 1 หน่วยของ pH ในภาวะมีออกซิเจน ไพโรลูไซต์ ($\beta\text{-MnO}_2$) และแมงกานีท์ ($\gamma\text{-MnOOH}$) จะเป็นแร่หลักในการควบคุมการละลายของแมงกานีส แต่ในภาวะขาดออกซิเจนแล้ว โรโดครอไซต์ (MnCO_3) จะเป็นตัวควบคุมการละลายของแมงกานีส

ในการนี้ของการทดลองนี้เมื่อระบายน้ำออกจากดินแล้ว ปรากฏว่ารีดอกซ์ของดินทั้งสองมีค่าอยู่ประมาณ 15.15 ซึ่งในสภาพการณ์เช่นนี้แร่ที่ควบคุมการละลายของแมงกานีสน่าจะได้แก่แมงกานีท์ หรือโรโดครอไซต์ ในกรณีที่เป็นแมงกานีท์นั้น ถ้าดินมี pH = 6 และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ $10^{-3.52}$ ของบรรยากาศแล้ว ปริมาณของแมงกานีสที่ควรละลายอยู่ในสารละลายดินเมื่อถึงจุดสมดุลแล้วน่าจะเท่ากับ 10^{-1} M แต่จากการวิเคราะห์ปรากฏว่าปริมาณแมงกานีสต่ำกว่ามาก ($10^{-3.9}$ M) ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าสภาพการสกัดแมงกานีสนั้นยังมีไม่ถึงจุดสมดุลของการละลายของแร่แมงกานีท์ ถ้าหากมีสาเหตุผลดังกล่าว ปริมาณแมงกานีสที่สกัดได้นี้

ก็น่าจะเกิดจากการควบคุมของแร่โรคโคราไซต์ ที่มีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในดินประมาณ $10^{-2.02}$ ของบรรยากาศ Siman et al. (1974) พบว่าในดินเป็นกรด (ระดับความเป็นกรด-เบสของดินอยู่ระหว่าง 4.7 - 5.5) แอมกานีสที่เป็นประโยชน์อยู่ในช่วง 25-30 ppm ภายหลังการขังน้ำปริมาณแอมกานีสเพิ่มขึ้นถึง 270 ppm เมื่อปลูกถั่วหลังจากการระบายน้ำออกแล้ว พบว่าถั่วแสดงอาการเป็นพิษของแอมกานีสอย่างรุนแรง และในสภาพธรรมชาติ พบว่าถั่วจะแสดงอาการเป็นพิษของแอมกานีสหลังจากที่ฝนตกลงมาอย่างหนัก

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าอาการเป็นพิษของแอมกานีสต่อพืชนั้น โดยทั่วไปมักจะพบในดินที่เป็นกรด ($\text{pH} < 5.2$) และมีปริมาณแอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้สูง ($> 50 \text{ ppm}$) (Adams and Wear, 1957) เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับชุดดินที่ใช้ในการทดลองพบว่าชุดดินสันทรายซึ่งปฏิกิริยาดินค่อนข้างจะเป็นกลาง โดยมีระดับความเป็นกรด-เบส = 6.9 และมีปริมาณแอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ค่อนข้างต่ำ (6 ppm) ดังนั้นจึงไม่น่าจะมีปัญหาเกี่ยวกับการเป็นพิษของแอมกานีส แต่ในชุดดินพินายปฏิกิริยาของดินเป็นกรดเล็กน้อย ระดับความเป็นกรด-เบส = 6.4 และมีปริมาณแอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้พอสมควร (30 ppm) ถ้าระดับความเป็นกรด-เบสของดินลดต่ำลง (เนื่องจากกระบวนการเพอโรไลซิส) พืชที่ปลูกในชุดดินพินายมีโอกาที่จะแสดงอาการเป็นพิษของแอมกานีสมากกว่าพืชที่ปลูกในชุดดินสันทราย แต่อย่างไรก็ตามก็ไม่พบอาการพิษของแอมกานีสต่อพืชที่ปลูกในชุดดินทั้งสอง