

ตรวจเอกสาร

1. การสลายตัวพืงของแร่ดินเหนียวโดยกระบวนการเพอโรไลซิส

สมมติฐานของเพอโรไลซิส (ferrolysis) นี้ ได้ถูกเสนอมาสำหรับการเกิดดินแบบไฮโดรมอร์ฟิก (hydromorphic^{1/}) ซึ่งกระบวนการนี้จะมีผลทำให้ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินจะมีค่าเปลี่ยนไป สืบเนื่องมาจากการเปลี่ยนรูปของแร่ดินเหนียว (clay transformation)

ในกลไกการเกิดเพอโรไลซิส ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินชั้นบนซึ่งใช้เพาะปลูกมายาวนาน จะมีค่าต่ำและท้ายที่สุดดินจะมีลักษณะเป็นลีเทอ (pseudogley) และดินเหนียวจะเปลี่ยนไปเป็นพวก 2 : 1 : 1 เช่น คลอไรท์ ซึ่งมีสารประกอบเชิงซ้อนของอลูมิเนียมอยู่ในหลั (interlayer)

1.1 สมบัติของดินเพอโรไลซ์ (ferrolysed soil)

ดินเพอโรไลซ์นี้เกิดขึ้นภายใต้สภาพการออกซิไดซ์และรีดิวซ์สลับกันไปมา โดยมีชั้นเพอโรไลซ์ (ferrolysed horizon) ซึ่งเป็นชั้นดินที่อยู่เหนือชั้นดินที่น้ำมาอาจซึมผ่านลงไปได้ ซึ่งอาจเกิดมาจากชั้นไถพรวน (plow pan) เช่นในดินนา หรือเนื้อดินชั้น B มีความสามารถในการซึมน้ำต่ำ (low permeability) หรือสภาพทางภูมิศาสตร์เป็นที่ราบลุ่ม (flat topography) ร่วมกับการซึมน้ำปานกลางของดิน (moderate permeability) (Brinkman, 1981) ทำให้ดินมีสภาพขังน้ำช่วงระยะเวลาหนึ่ง ชั้นดินเพอโรไลซ์นี้จะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำ

1/ hydromorphic เป็นสมบัติของดินที่เกิดขึ้นในสภาพที่มีน้ำขังในช่วงระยะเวลาหนึ่งของปี และมีการระบายน้ำออก ทำให้เกิดการออกซิไดซ์และรีดิวซ์สลับกันไปมา

มีสีเทาจาง และมีจุดประสี(mottles) ที่ประกอบด้วยเหล็กและแมงกานีสอยู่น้อย ส่วนชั้นดินล่างจะมีจุดประสีอยู่ในปริมาณมาก

ความอุดมสมบูรณ์ดินจะต่ำ ดินค่อนข้างจะเป็นกรดในชั้นดินบน มีปริมาณของแร่ดินเหนียวและความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของดินต่ำ ส่วนในชั้นดินล่างมักมีปริมาณอนุพันธ์ที่แลกเปลี่ยนได้สูง เช่น ดินเพอโรไลต์ที่พบทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย พบว่าในดินบนมีเปอร์เซ็นต์ของแร่ดินเหนียวต่ำเพียง 10% มีปริมาณอินทรีย์วัตถุ ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ในสารละลายดินต่ำ มีเบสที่แลกเปลี่ยนได้เพียง 1 มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม และความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้อยู่ในช่วง 4.5 - 5 มิลลิกรัมสมมูลต่อดิน 100 กรัม ส่วนในดินชั้นล่างมีปริมาณแร่ดินเหนียวสูงถึง 25% และปริมาณอนุพันธ์ที่แลกเปลี่ยนได้สูงถึง 70% (Brinkman, 1977b)

1.2 กระบวนการเพอโรไลซิส (ferrolysis process)

กระบวนการเพอโรไลซิส มีความสัมพันธ์เกี่ยวเนื่องกันเป็นวงจรซึ่งประกอบด้วยภาวะขาดออกซิเจน (anaerobic phase) สลับกันไปกับภาวะมีออกซิเจน (aerobic phase) โดยมีการออกซิโดรีดสารประกอบอินทรีย์วัตถุ ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานแก่จุลินทรีย์เพื่อให้กระบวนการเพอโรไลซิสเกิดครบวงจร

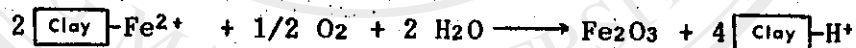
ในภาวะขาดออกซิเจนนั้น เหล็กจะถูกรีดิวซ์ไปพร้อม ๆ กับการออกซิโดรีดของอินทรีย์วัตถุ โดยปกติแล้วในภาวะมีออกซิเจนจุลินทรีย์จะใช้ ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากการออกซิโดรีดคาร์บอนซึ่งอยู่ในรูปอินทรีย์วัตถุ เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโต ส่วนในภาวะขาดออกซิเจนนั้นการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุยังคงสามารถเกิดขึ้นได้ แต่จะเป็นในอัตราที่ช้าโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์พวกที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนเช่นพวก anaerobes และ facultative anaerobes จุลินทรีย์พวกนี้จะใช้สารประกอบที่มีสภาพออกซิเดชันสูง ๆ แทนออกซิเจนในการรับอิเล็กตรอน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารประกอบพวกเหล็กออกไซด์ที่มีอยู่มากในดินทำให้ OH^- และ Fe^{2+} เกิดขึ้น เฟอร์ริออนจะไปที่ประจุบวกที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวแร่ดินเหนียวทำให้ดินดูดซับเฟอร์ริออนเป็นส่วนใหญ่ และขั้นต่อมาเมื่อเข้าสู่ภาวะมีออกซิเจน เฟอร์ริออนจะถูกออกซิไดซ์

ไปเป็นเฟอร์ริไฮดรอกไซด์ ซึ่งในขณะเดียวกันก็เกิดไฮดรเจนไอออนขึ้นด้วย ไฮดรเจนที่เกิดขึ้นจะกลับเข้าไปในที่เพอร์สอิดอนที่ถูกดูดซับอยู่บนผิวดินก่อนแล้วให้ออกมาอยู่ในสารละลายดิน แล้วกลายเป็นเฟอร์ริไฮดรอกไซด์ในที่สุด ในช่วงนี้ผิวดินจะเต็มไปด้วยไฮดรเจนไอออน ซึ่งสภาพเช่นนี้จะทำให้แร่ดินเหนียวไม่เสถียรทำให้เกิดการสลายตัวพัง

ดังนั้นทุก ๆ รอบของการเกิดกระบวนการเพอร์โรไลซิส ประจุบวกเบสมีแนวโน้มจะถูกชะล้างออกไป ทำให้เปอร์เซ็นต์เบสของดินต่ำลง pH ก็มีแนวโน้มต่ำลงด้วย และบางส่วนของแร่ดินเหนียวมีการสลายตัวพัง จึงทำให้ดินมีปริมาณดินเหนียน้อยลง ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ก็มีแนวโน้มลดลงตาม สีของดินซีดลง (เทา)

1.2.1 ระยะเริ่มต้นของกระบวนการเพอร์โรไลซิส

ระยะเริ่มต้นของกระบวนการเพอร์โรไลซิสนั้นถือวาระยะที่ pH ของดินเริ่มลดลงเนื่องจากการออกซิไดซ์ เพอร์สอิดอนดังสมการ (Breemen and Brinkman , 1976)



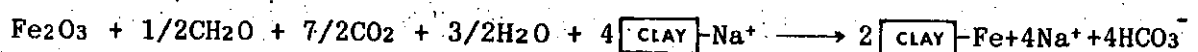
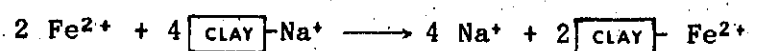
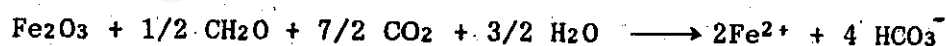
ไฮดรเจนที่ถูกผลิตออกมานี้ จะถูกดูดซับอยู่บริเวณผิวของแร่ดินเหนียว เกิดเป็น acid H-clay ซึ่งจะไม่เสถียร Brinkman (1970) อ้างถึงผลการศึกษาของ Eeckman และ Laudelout ได้แสดงให้เห็นว่า H-montmorillonite จะไม่เสถียรซึ่งจะเปลี่ยนมาเป็น Al-montmorillonite โดยที่ไฮดรเจนไอออนเป็นตัวทำให้อิออนที่มีประจุบวกในออกตะฮีดรอลหลุดออกมาซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่อลูมิเนียม โดยที่แมกนีเซียมเป็นเพียงส่วนน้อย ไอออนที่หลุดออกมานั้นจะถูกดูดซับอยู่ตามผิวของแร่ดินเหนียว ดังนั้น H-clay จะถูกเปลี่ยนไปเป็น H-Al-clay หรือ Al-Mg-clay ในที่สุด (Bolt, 1976) และในขณะเดียวกันก็อาจเกิดกระบวนการ hydroxylation อันเนื่องมาจากไฮดรเจนเข้าไปเกาะกับออกซิเจน ซึ่งเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างของแร่ดินเหนียวทำให้แร่ดินเหนียวมีประจุบวกเพิ่มขึ้น มีผลทำให้แรงคูลยัคไบแคสเซียระหว่างหลิบบของแร่อัลไซท์น้อยลง อัลไซท์จึงมีโอกาสนยึดตัวทำให้ไบแคสเซียที่ถูกตรึงในหลิบบมีโอกาสหลุดออกมาในสารละลายดินได้ เช่นเดียวกับในแร่บางประเภทที่มี Fe^{2+} เป็นองค์ประกอบ

เช่น แร่ไบโอไคท์ การออกซิไดซ์ของ Fe^{2+} เป็น Fe^{3+} นั้นทำให้โครงสร้างของแร่มีประจุบวกเกินมา เพราะฉะนั้นจึงทำให้เกิดมีการปลดปล่อยไอออนที่มีประจุบวกออกมาจากโครงสร้าง ทั้งนี้เพื่อรักษาความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้าไว้คงเดิม ประจุบวกที่สำคัญที่ถูกปลดปล่อยออกมาดังกล่าวคือ โปแตสเซียม ที่อยู่ในหลีบของแร่ดินเหนียว การที่ประจุบวกที่อยู่ในหลีบหลุดออกมา ทำให้แรงภายในหลีบที่ดุยิตซ์ต่าง ๆ ของแร่อ่อนลง แร่จะมีการขยายตัวได้ง่ายขึ้น จึงมีโอกาสหลุดสลายตัวได้ง่ายขึ้น (ไพบูลย์, 2530)

ในระหว่างการสลายตัวของแร่ดินเหนียวนั้น ซิลิกอนซึ่งเป็นองค์ประกอบหนึ่งของโครงสร้างแร่ดินเหนียวก็จะหลุดออกมาและถูกชะล้างต่อไป ในภาวะขาดออกซิเจน ซิลิกอนบางส่วนจะตกผลึกเป็นควอตซ์ (neoformation) (Brinkman *et al*, 1973) และบางส่วนก็จะเปลี่ยนไปเป็น amorphous silica (Si + Al). (Brinkman, 1977a)

1.2.2 ระยะเวลาหลักของกระบวนการเพอโรไลซิส

ในระยะนี้อลูมิเนียมที่แลกเปลี่ยนได้ และประจุบวกอื่นที่มาจากผิวของแร่ดินเหนียวจะถูกชะล้างออกไป และแร่ดินเหนียวคงมีการสลายตัวพองตัวต่อไป ซิลิกอนที่ถูกปลดปล่อยออกมาก็จะถูกชะล้างออกไปด้วย กระบวนการเหล่านี้จะเกิดในภาวะขาดออกซิเจนซึ่งในระยะนี้ดินจะอยู่ในสภาพน้ำขัง ธาตุที่มีสภาพออกซิเดชันสูง ๆ ในสารประกอบต่าง ๆ เช่น MnO_4 Mn_2O_3 Fe_2O_3 $Fe(OH)_3$ จะถูกรีดิวซ์ให้มาอยู่ในสภาพออกซิเดชันต่ำ ๆ เช่น Fe^{2+} Mn^{2+} (Ponnamperuma, 1955) ซึ่งจะทำให้ประจุบวกดังกล่าวนี้เพิ่มปริมาณมากขึ้นในสารละลายดิน ดังนั้นจึงสามารถเข้าไปไล่ที่ประจุบวกอื่นที่แร่ดินเหนียวดูดซับอยู่ก่อนแล้ว ดังรายละเอียดตามสมการข้างล่างนี้ (Breeman and Brinkman, 1976)



ในบรรดาประจุบวกที่ถูกไล่ที่เหล่านี้อลูมิเนียมและแมกนีเซียม ก็จะถูกไล่ที่ออกมาด้วย และใน

สภาพที่เหมาะสมแล้ว ประจุบวกของธาตุทั้งสอง ก็จะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน polymeric hydroxy compound (Brinkman, 1977a) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของแร่จิบไซต์และบรูไซต์ที่มีการแทนที่ประจุบวกในโครงสร้างด้วยอลูมิเนียมอ็อกไซด์ (substituted brucite) นี้จะมีโอกาสรวมตัวกับแร่ดินเหนียวชนิด 2 : 1 เกิดเป็นแร่ดินเหนียวชนิดใหม่ได้แก่คลอไรท์ ซึ่งทำให้แร่ดินเหนียวบางชนิด เช่น แร่ดินเหนียวมอนท์มอริลโลไนท์ เสียการยึดเหนี่ยว โดยมีการขยายในแนวแกนตั้ง (z) คงที่ที่ 14 Å (Jackson, 1964) การเกิดคลอไรท์นี้ จะทำให้พื้นที่ระหว่างหลีบ ซึ่งแต่เดิมนั้นสามารถบรรจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ของแร่ดินเหนียวมอนท์มอริลโลไนท์ลดลง (Brinkman, 1970) และในสภาพที่มีการขังน้ำนี้ pH ของดินจะเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของ pH นั้นจะมากหรือน้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับ pH เริ่มต้นของดิน อินทรีย์วัตถุ และขึ้นกับระยะเวลาในการขังน้ำ (Ponnamperuma, 1955) จากการศึกษาของ Ponnamperuma (1963) ได้สรุปการเปลี่ยนแปลง pH คือ ดินที่ค่อนข้างเป็นกรดเช่นดินที่ pH ก่อนขังน้ำ 4.6 - 5.7 เมื่อขังน้ำแล้ว pH จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึง 6.5 - 7.0 ภายในเวลา 20 วันหลังจากขังน้ำส่วนดินที่เป็นกรดเล็กน้อย เช่น ดินที่ pH ก่อนขังน้ำ 6.2 - 6.6 ภายหลังการขังน้ำแล้ว pH ของดินจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนถึง pH 7.0 - 7.2 ส่วนดินที่เป็นกลางหรือเบสอ่อนเมื่อขังน้ำวันแรก pH ของดิน จะลดลงมาเล็กน้อย แล้วจะเพิ่มขึ้นมายัง pH เดิม Ponnamperuma (1963) ได้สรุปผลการศึกษาของ Dennett (1932) และ Jofle (1933) ว่าการเพิ่มของ pH เนื่องมาจากสมดุลของระบบ $Fe^{3+} - Fe^{2+}$ และอ้างผลการศึกษาของ Mortimer (1942) ในการศึกษาดินอัลคาไลน์ (alkaline soil) ว่าการขาดออกซิเจนของดิน ทำให้เหล็กแมงกานีสและแอมโมเนียมเพิ่มขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์กันกับการเพิ่มของ pH

1.2.3 ระยะเวลาสุดท้ายของกระบวนการเพอโรไลซิส

การศึกษาของ Lindsay (1979) พบว่าแร่ดินเหนียวมีเสถียรภาพที่ต่างกันโดยขึ้นกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ พบว่าในสภาพที่ pH และ $H_4SiO_4^0$ สูง Mg-montmorillonite จะเป็นแร่ที่มีเสถียรภาพมากที่สุด รองลงมาคือไพโรฟิลไลต์ ที่ pH 7 และ $H_4SiO_4^0$ ต่ำกว่า $10^{-3.7}$ M เคโอลิไนท์จะเสถียรกว่า Mg-montmorillonite และถ้า $H_4SiO_4^0$ ลดลงต่ำกว่า $10^{-5.33}$ M จิบไซต์จะเป็นแร่ที่เสถียรที่สุด ดังนั้นเมื่อเกิดการสลายตัวผุพังไปนาน ๆ

มีการสูญเสียซิลิกาไปมาก ๆ แร่ดินเหนียวจะกลายเป็นจิบbsite และ เหล็กออกไซด์ จะเห็นได้ว่าเสถียรภาพของแร่ที่เปลี่ยนไปขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น การยกระดับ pH จะเป็นการเพิ่มเสถียรภาพของ Mg-montmorillonite เมื่อ pH ลดลงเสถียรภาพของ Mg-montmorillonite ก็ลดลงด้วยเมื่อเปรียบเทียบกับแคลอลิไนท์ การเพิ่มปริมาณแมกนีเซียมมากกว่า $10^{-3}M$ จะทำให้ Mg-montmorillonite มีเสถียรภาพมากขึ้น ในดินที่มี pH สูงกว่า 8.2 และปริมาณโบแตสเซียมเท่ากับ $10^{-3} M$ เสถียรภาพของมัสโคไวท์จะใกล้เคียงกับแคลอลิไนท์ ถ้าหากว่า pH เพิ่มขึ้นไปอีก และปริมาณโบแตสเซียมมากกว่า $10^{-3} M$ มัสโคไวท์จะมีเสถียรภาพมากกว่าแคลอลิไนท์ ถ้าดินอยู่ในสภาพเป็นกรด และมีการชะล้างสูง ๆ โบแตสเซียมมีการสูญเสียไปจากดิน มัสโคไวท์ก็จะพลอยสูญหายไปจากระบบของดินด้วย

เมื่อพิจารณาถึงการสลายตัวผุพังของแร่ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ พบว่าแนวโน้มของการสลายตัวผุพังโดยทั่วไปจะเป็นไปตามลำดับดังนี้ ไมก์้า \longrightarrow อิลไลต์ \longrightarrow เวอร์มิคูไลท์, มอนท์มอริลโลไนท์ \longrightarrow แคลอลิไนท์ \longrightarrow จิบbsite กลไกเริ่มแรกที่สุดคือจะต้องมีการปลดปล่อยหรือสูญเสียโบแตสเซียมออกจากหีบของแร่ไมก์้า และอิลไลต์ (Jackson *et al.*, 1952) ซึ่งในธรรมชาติอัตราการชะล้างจะมีบทบาทสำคัญต่ออัตราการสลายตัวผุพัง ส่วนชนิดของแร่ที่เกิดใหม่นั้นจะเป็นเวอร์มิคูไลท์หรือมอนท์มอริลโลไนท์นั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่นปริมาณการเกิดลูมิเนียมเตทตะและซิลิกอนออกตะไฮดรอล และชนิดของประจุบวกในหีบของแร่ดินเหนียว เมื่อระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น การสูญเสียประจุบวกต่าง ๆ ที่เป็นเบส เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{+2} และ Mg^{+2} จะมีมากขึ้นและสมบูรณ์ขึ้น รวมทั้งมีการสูญเสีย ซิลิกา (SiO_2) ไปจากโครงสร้างของแร่มากขึ้น แร่เวอร์มิคูไลท์และมอนท์มอริลโลไนท์ ซึ่งเป็นแร่ดินเหนียวซิลิเกตประเภท 2:1 ก็จะสามารถสลายตัวผุพังกลายเป็นแร่แคลอลิไนท์ประเภท 1:1 โดยตรง หรือในบางสภาพแวดล้อมพวกไฮดรอกไซด์ของอลูมิเนียม เหล็กและแมกนีเซียม ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแผ่นออกตะไฮดรอลสามารถเข้าไปแทรกอยู่ในหีบของเวอร์มิคูไลท์และมอนท์มอริลโลไนท์ ทำให้แร่ดังกล่าวเปลี่ยนโครงสร้างจาก 2:1 มาเป็น 2:1:1 ซึ่งได้แก่คลอไรท์ (Bernhisel and Rich, 1963; Rich, 1960) อย่างไรก็ตามแร่คลอไรท์ก็จะสลายตัวกลายเป็นแร่แคลอลิไนท์ได้อีกต่อหนึ่ง เช่นเดียวกัน แคลอลิไนท์เป็นแร่ดินเหนียวที่มีเสถียรภาพค่อนข้างสูงมักพบในดินที่มีการสลายตัวผุพังมานาน ในกรณีนี้ อัตราการสลายตัวผุพังค่อนข้างสูง แร่ไมก์้าอาจสลายตัวผุพังมาเป็นแคลอลิไนท์โดยตรง

(Sand, 1956) เมื่อระยะเวลาานเข้าเคลอไลนที่สามารถพองสลายตัวต่อไป โดยการถูกชะล้างและปลดปล่อยซิลิกา (SiO_2) ออกมาจากโครงสร้างกลายเป็นแร่จิปซั่ม

เมื่อพิจารณาเสถียรภาพของแร่ดินเหนียวและลำดับขั้นตอนการสลายตัวของแร่ดินเหนียว จะพบว่าแร่ดินเหนียวชนิด 2:1 หรือดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูง ๆ จะมีการสลายตัวพองได้มากกว่าดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ (ชนิด 1:1) ทั้งนี้ เพราะดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูงสามารถดูดซับ Fe^{2+} ได้มากกว่าซึ่ง Fe^{2+} นี้จะมีผลต่อเนื้อทำให้เกิดไฮดรเจนออกไซด์หรือออกซิเดชันหรืออีกที่หนึ่งอาจมองได้ว่าดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำนั้นถูกทำลายได้น้อยกว่า เนื่องจากโครงสร้างชั้นออกตะฮีดรอลมีความเสถียรมากกว่าออกตะฮีดรอลของดินที่มีความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้สูง (Brinkman, 1970) ดังนั้นในระยะสุดท้ายของกระบวนการเพอโรไลซิส pH ของดินมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการชะล้างของประจุบวกเบสต่าง ๆ และบางส่วนของแร่ดินเหนียวมีการสลายตัวพอง จึงทำให้ดินมีปริมาณแร่ดินเหนียวน้อยลง ความจุประจุบวกที่แลกเปลี่ยนได้ก็มีแนวโน้มลดลงด้วย

1.3 ลักษณะที่แสดงถึงการสลายตัวของแร่ดินเหนียว

การสลายตัวของแร่ดินเหนียวโดยกระบวนการเพอโรไลซิสนั้น สามารถวินิจฉัยได้โดยอาศัยการใช้เทคนิคบางอย่างเป็นเครื่องช่วย เช่น X-ray diffraction, Differential thermal analysis, Scanning electron microscopy และ Electron microprobe analysis

การสลายตัวของแร่ดินเหนียวจะตรวจพบได้จาก คิวแทน (cutan) ซึ่งเป็นผิวเคลือบดินเหนียวที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ซึ่งจะแสดงให้เห็นในชั้นดินบนมากกว่าชั้นดินล่าง โดยส่วนคิวแทนที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมนั้น จะมีสมบัติเป็นไอโซทรอปิก (Isotropic^{1/})

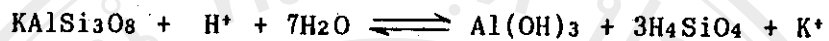
^{1/} Isotropic เทหวัตถุที่มีสมบัติเป็นไอโซทรอปิกนั้น เมื่อแสงผ่านตัวกลางนี้ ความเร็วของแสงที่ผ่านตัวกลางนี้จะเท่ากันทุกทิศทาง ซึ่งก็ได้แก่ ก๊าซ ของเหลว ผลึกแบบไอโซเมตริกที่ไม่ได้อยู่ในภาวะเครียด (Winchell, 1936)

ซึ่งเม็ดผลึกนี้จะทึบแสง และจะแสดงการวิบวาว เมื่อสะท้อนแสง แต่เมื่อมองผ่านกล้องที่กำลังขยายสูง ๆ เม็ดผลึกนี้จะโปร่งแสงและค่าไบรฟริงเจนซ์ (birefringence^{1/}) ของเม็ดผลึกนี้จะมีค่าต่ำ

การถ่ายภาพการหักเหของแสง X-ray ของดินจะแสดงให้เห็นว่ามีผลึกควอartz เล็ก ๆ อยู่มาก นอกจากนี้ก็ยังแสดงให้เห็นว่า ในชั้นดินบนมีลูมิเนียมอยู่ในหลืบของแร่ดินเหนียวอยู่ เช่นเดียวกับปริมาณของสเมคโตไท์ค้อย ๆ เพิ่มจากชั้น A2 ไปสู่ชั้น B แต่ผลึกควอartz จะมีการเปลี่ยนแปลงกลับกัน

X-ray emission ของควแทนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นจะมีปริมาณโคตาเนียมและซิลิกาสูงขึ้น ส่วนลูมิเนียม เหล็ก แมกนีเซียม และโปแตสเซียมลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับควแทนที่ไม่ได้รับอิทธิพลจากกระบวนการเพอโรไลซิส ซึ่งก็แสดงให้เห็นว่าการสลายตัวพืงของแร่ดินเหนียวนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณซิลิกาและการเคลื่อนย้ายองค์ประกอบอื่น ๆ ในดิน ในระหว่างการสลายตัวพืงของแร่ดินเหนียวนั้น ซิลิกาจะถูกปลดปล่อยออกจากโครงสร้างของแร่ดินเหนียวในสภาพที่มีการชะล้างประจุบวกต่าง ๆ และซิลิกาบางส่วนมีการสูญเสียไป ซิลิกาบางส่วนก็ตกผลึกเป็นควอartz (neoformation) ในการสลายตัวพืงของแร่ดินเหนียวโดยทั่วไปแล้ว อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ จะลดลง (Breeman and Brinkman, 1976 ; Birkelend, 1974) เช่น ในการสลายตัวพืงของแร่โปแตสเซียมเฟลด์สปาร์ไปเป็นแร่เคลโอไลนหรือจิบไซต์ ดังสมการ

1/ birefringence เป็นค่าความแตกต่างของดัชนีการหักเห (refractive indices) ตัวกลางชนิด Anisotropic เมื่อแสงผ่านความเร็วของแสงจะไม่เท่ากันทุกทิศทาง (ตัวกลางเหล่านี้ได้แก่ ตัวกลางที่เป็นผลึกทั้งหมด) ทำให้รังสีหักเหของแสงที่ผ่านแบ่งออกเป็น 2 รังสี ที่มีความเร็วแตกต่างกัน และมีดัชนีการหักเหต่างกันด้วย ความแตกต่างกันของดัชนีการหักเหทั้งสอง เรียกว่า ไบรฟริงเจนซ์ โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำมาก เช่น ควอartz จะมีค่า 0.009 ในขณะที่ แคลไซต์มีค่าสูงถึง 0.172 (Mason and Berry, 1968)



ทั้งนี้เนื่องจากเหล็กและอลูมิเนียมจะกลับเข้าไปเป็นองค์ประกอบของแร่ทุติยภูมิ (Fe, Al are conserved) แต่ในบางกรณีของการสลายตัวผุพังของแร่ดินเหนียว อัตราส่วนของ $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$ อาจเพิ่มสูงขึ้นได้ เช่น ดินทางภาคใต้ของ เนเธอร์แลนด์ มีแร่ดินเหนียวสเมคโตท์กว่า 30 % อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิเนียมประมาณ 2 เมื่อผ่านการสลายตัวผุพังพบว่าแร่ดินเหนียวสเมคโตท์ เหลือเพียง 20 % ในขณะที่ปริมาณแร่ควอทซ์เพิ่มขึ้นจากเดิม 10 % เป็น 20 % และอัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิเนียมเพิ่มขึ้นเป็น 2.5 (Brinkman et al., 1973) การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนซิลิกาต่ออลูมิเนียมในกรณีนี้อาจเนื่องมาจากแร่ประกอบอื่น ๆ ของหินได้สลายตัวผุพังออกไปแล้วคงเหลือแต่เฉพาะแร่ควอทซ์ จึงทำให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิเนียมหรือเหล็กเพิ่มขึ้นโดยปริยาย หรือเนื่องมาจากการตกผลึกของซิลิกอนที่ละลายอยู่ในน้ำเกิดเป็นแร่ควอทซ์ทุติยภูมิ ซึ่งกรณีเช่นนี้มีสภาพการที่ค่อนข้างจำกัด กล่าวคือสารละลายดินจะต้องอิ่มตัวด้วย H_4SiO_4 อุดหนุนด้วยค่ามีภาวะเบี่ยงกลับแห้ง และมีการเคลื่อนย้าย Al, Fe ออกไปจากชั้นดิน (Cheluviation) (Giesecking, 1975) จึงจะมีผลทำให้อัตราส่วนของซิลิกาต่ออลูมิเนียมเพิ่มขึ้นได้

ในการสลายตัวผุพังโดยทั่วไปที่เกิดกับแร่ดินเหนียวกลุ่มสเมคโตท์ เช่น มอนท์โมริลโลไนท์ เวอร์มิคูไลท์ และ อีลไลต์นั้น แร่ดินเหนียวเหล่านี้ก็มีโอกาสเปลี่ยนมาเป็นคลอไรท์ก็ได้ แต่ในกรณีที่มีการสลายตัวผุพังที่รุนแรงนั้นผลผลิตส่วนใหญ่ที่ได้คือ เคโอลิไนท์ (Brinkman, 1977a)

2. ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสในดิน

แมงกานีสเป็นธาตุในกลุ่ม VII B แมงกานีสอาจมีสภาพออกซิเดชันตั้งแต่ +2 +3 +4 +5 +6 และ +7 แต่โดยทั่วไปในดินเราพบ +2 +3 และ +4 เป็นส่วนใหญ่ พีชดุดแมงกานีสในรูป +2 (Mn^{+2}) ในสภาพที่เป็นสารละลายโดยเฉพาะที่เป็นกรดแล้วแมงกานีส (+2) เป็นรูปที่เสถียรที่สุด แต่ในดินที่มีการถ่ายเทอากาศดีแล้ว แมงกานีสจะอยู่ในรูปที่มีสภาพออกซิเดชันที่สูงเป็น

ออกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ (Gerring et al., 1969) ดังนั้น
ความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสจึงขึ้นกับสภาพออกซิเดชันของมัน ซึ่งควบคุมโดย pH Eh
กิจกรรมทางชีวภาพ และปัจจัยอื่น ๆ อีก

2.1 pH และ Eh

จากการศึกษาของ Bohn (1971) Fujimoto and Sherman (1945)
Graven et al. (1965) Olomu et al. (1973) Ponnampuruma (1972) Grass
et al. (1973) และ Siman et al. (1974) พบว่าในสภาพดินน้ำขังปริมาณแมงกานีสจะ
เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลง pH และ Eh ซึ่งดินจะอยู่ในสภาพรีดักชัน ทั้งนี้เพราะว่า
อัตราการแพร่ของออกซิเจนผ่านน้ำเข้าสู่ดินนั้นช้ากว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ดินโดยตรง
ถึง 10,000 เท่าตัว (Ponnampuruma, 1955) ดินจึงอยู่ในสภาพรีดักชัน Eh ของดินจะลด
ลงอย่างรวดเร็ว จากการศึกษานี้ของ Ponnampuruma et al. (1967) และ Ponnampuruma
(1972) พบว่า ในดินน้ำขังโดยทั่วไป Eh, pH และปริมาณของ Fe^{2+} มีความสัมพันธ์กันอย่าง
ใกล้ชิด สภาพรีดักชันในดินโดยทั่วไปแล้วจะถูกควบคุมโดยระบบรีดอกซ์ของเหล็ก ทั้งนี้เนื่องจาก
ในดินมีเหล็กในปริมาณที่มาก ในขณะที่ Eh ของดินลดลง pH ของดินกลับสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่า
Eh และ pH ของดินมีความสัมพันธ์กลับกันแสดงได้ดังสมการ



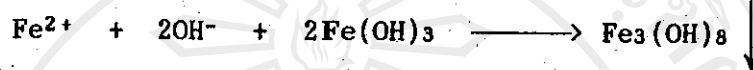
จากสมการของ Nernst จะได้

$$Eh = 1.06 - 0.059 \log Fe^{2+} - 0.177 pH$$

จากการศึกษาของ Jeffery (1960) ได้สมการจากการทดลองดังนี้

$$Eh = 1.37 - 0.18 pH$$

ในสภาพดินน้ำขังนี้ pH ของดินจะถูกควบคุมให้อยู่ประมาณ 7.0 ตลอดระยะเวลาที่ขังน้ำอยู่ทั้งนี้ เป็นผลเนื่องมาจากการตกตะกอนของ Fe^{2+} เมื่อ pH สูงขึ้น แสดงได้ดังสมการ



จึงเป็นการยับยั้งการเพิ่มขึ้นของ pH อีกต่อไป ในสภาพรีดักชันนี้ pH ของดินค่อนข้างคงที่ อันเนื่องมาจากกระบวนการรีดักชันของเหล็กแล้ว ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในดินก็ยังมีบทบาทสำคัญ ในการรักษาระดับ pH อีกด้วย แสดงได้ดังสมการ (Ponnamperuma, 1972)

$$pH = 6.1 - 0.58 \log PCO_2$$

ซึ่งในสภาพรีดักชันนี้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยจะมีประมาณ 0.1 atm ดังนั้น pH ของดิน ภายหลังการขังน้ำจะอยู่ประมาณ pH = 7.0

ในสภาพน้ำขังนั้น การเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเหล็กมีความสำคัญมาก ทั้งนี้ เพราะมีปริมาณมาก ในสภาพรีดักชันนี้ปริมาณของเหล็ก (2+) จะเพิ่มสูงขึ้นในระยะ 4 สัปดาห์ แรกของการขังน้ำ เมื่อสูงถึงขีดสุดแล้วก็จะรักษาระดับนั้นไว้หรืออาจลดลงแล้วคงที่ก็ได้ ปริมาณ ของเหล็ก(2+) ที่เพิ่มขึ้นนั้นขึ้นกับชนิดของดิน อินทรีย์วัตถุและปริมาณ active iron^{1/} ในดิน ที่มีอินทรีย์วัตถุสูง (2.3 - 4.3 %) และมี active iron สูง (2.8 - 7.6 %) เพอร์สอ็อกไซด์ที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่รวดเร็วจนถึงระดับสูงถึง 1,000 - 15,000 ppm ภายในเวลา 30 วันหลังจากขังน้ำ (Ponnamperuma, 1965)

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแมงกานีสในสภาพรีดักชันก็เป็นเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงของเหล็ก แมงกานีสในดินจะถูกรีดิวซ์ได้ง่ายกว่าเหล็กมาก ภายหลังที่ดินอยู่ในสภาพน้ำขัง

1/ active iron เป็นปริมาณเหล็กที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้รวมกับปริมาณเหล็กที่แลกเปลี่ยนได้ และปริมาณเหล็กที่ง่ายต่อการรีดิวซ์

ประมาณ 1 สัปดาห์ active manganese ในดินจะถูกรีดิวซ์จนหมดถ้าดินมีอินทรีย์วัตถุอย่างเพียงพอ ในดินกรดและมีปริมาณอินทรีย์วัตถุสูง ปริมาณแมงกานีสที่ละลายน้ำได้เพิ่มสูงถึง 90 ppm ภายในสองถึงสามสัปดาห์แรกของการขังน้ำแล้วลดลงมาจนคงที่ประมาณ 10 ppm ในดินอัลคาไลน์ และดินที่มีแมงกานีสต่ำเมื่อขังน้ำแมงกานีสที่ละลายน้ำได้เพิ่มสูงขึ้นสูง 10 ppm (Ponnamperuma, 1975) Ponnamperuma (1963) ได้สรุปว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของ Mn^{2+} และแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในสภาพดินน้ำขังจะขึ้นอยู่กับปริมาณ active manganese^{1/} ในดินถ้ามีมาก Mn^{2+} ในดินก็จะมีความด้วย

เมื่อมีการระบายน้ำออกจากดิน ดินจะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในสภาพออกซิเดชัน เหล็ก (2+) จะถูกออกซิไดซ์ได้รวดเร็วกว่าแมงกานีส (2+) จากการศึกษาดินที่มีน้ำขังเป็นเวลา 47 วัน เมื่อทำการระบายน้ำออกพบว่า เหล็ก (2+) จะถูกออกซิไดซ์หมดไปในเวลา 1 - 2 สัปดาห์ ส่วนการออกซิไดซ์แมงกานีส (2+) เป็นไปได้ช้ามาก (โพบูลย์, 2530) อย่างไรก็ตามการระบายน้ำของสารประกอบที่มีค่า Eh ใกล้เคียงกันมักจะเกิดเหลื่อมกันขึ้นได้เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากจำนวนโมเลกุลที่สามารถเข้าถึงในการทำปฏิกิริยาได้ (accessible reacted molecule)

2.2 ผลของกิจกรรมทางชีวภาพ (Biology activity)

Bromfield and Sherman (1950) แสดงให้เห็นว่าการออกซิเดชันในดินเกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ดิน 2 genus คือ Chromobacterium หรือ Flavobacterium และ genus Corynebacterium ในดินกรดพบว่าเชื้อราพวก Cladosporium Trirgschemia และ Pleaspora เป็นพวกที่สามารถออกซิไดซ์แมงกานีสได้อย่างรวดเร็ว

^{1/} active manganese เป็นปริมาณแมงกานีสที่อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้รวมกับปริมาณแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้และปริมาณแมงกานีสที่ง่ายต่อการรีดิวซ์ (Dion et al., 1947 ; Sherman et al., 1942)

Timonin (1946) พบว่า จุลินทรีย์ดินหลายชนิด เช่น Helminthosporium victoride Curvularia lunata และ Piriconia cricinata และแบคทีเรียที่สามารถสร้างสปอร์ได้ บางชนิดสามารถออกซิไดซ์แมงกานีสได้และเป็นสาเหตุของการขาดแมงกานีสในดิน ดังนั้นเมื่อเติมสารจำพวก fumigant เช่น คลอโรพิกริน พอร์มาลดีไฮด์ แคลเซียมไซยาไนด์ ลงในดิน ทำให้จำนวนของแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์แมงกานีสลดลงและสามารถแก้ไขการขาดแมงกานีสของพืชได้

จุลินทรีย์ดินที่ได้กล่าวข้างต้นสามารถเปลี่ยนสารประกอบที่ละลายได้ของแมงกานีส (soluble manganous) ไปอยู่ในรูปที่ละลายไม่ได้ (brown manganic oxides) เมื่อเลี้ยงในอาหารแข็ง (agar media) ที่มีเกลือที่เป็นกลางของกรดไฮดรอกซี เช่น กรดกลูโคนิก กรดมาลิก กรดซิตริก กรดแลคติก และกรดตาร์ตาริก และหยด Na_2CO_3 หรือ NaHCO_3 ลงบนผิวของอาหารแข็งด้วย หรืออีกนัยหนึ่งแสดงให้เห็นว่าในอาหารแข็งที่บรรจุน้ำตาลหรือเซลลูโลส และ MnO_2 เอาไว้ นั้น MnO_2 จะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเกลือแมงกานีสที่ละลายได้ในขั้นตอนการเกิดกรดไฮดรอกซีจากการย่อยสลายเซลลูโลสหรือน้ำตาล อย่างไรก็ตามเกลือของแมงกานีสจะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปแมงกานีสไดออกไซด์หรือเปลี่ยนรูปกลับไปกลับมาขึ้นกับ pH ของอาหารแข็ง เป็นส่วนใหญ่ (Mulder and Gerretsen, 1952 อ้างผลการศึกษาของ Sohngen, 1914) Leeper and Swaby (1940) อาศัยเทคนิคของ Gerretsen ในการศึกษาการออกซิเดชันของแมงกานีสพบว่าเกิดจุดสีน้ำตาลในอาหารเลี้ยงเชื้ออย่างรวดเร็วในช่วง pH 6.0 - 7.5 ซึ่งจุดสีน้ำตาลนี้เกิดเนื่องจากการออกซิเดชันของแมงกานีสซัลเฟตไปเป็นแมงกานีสไดออกไซด์โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์

ในการรีดิวซ์อินทรีย์วัตถุนั้น จุลินทรีย์สามารถใช้แมงกานีสไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจน โดยการเปลี่ยนแปลงรีดอกซ์โพเทนเชียลหรือความเครียดของออกซิเจน (oxygen tension) ทำให้แมงกานีสละลายได้มากขึ้น (Mulder and Gerretsen, 1952) การสะสมคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอินทรีย์ และสารประกอบที่มีความสามารถในการรีดิวซ์ที่ขับออกมาจากรากพืชจะช่วยเพิ่มความชื้นของแมงกานีสได้มากขึ้น โดยที่ pH ของดินอาจไม่เปลี่ยนแปลง (Cheng and Ouellette, 1971 อ้างผลการศึกษาของ Bolas and Portsmouth, 1948)

2.3 ความสัมพันธ์ของ เหล็กและแมงกานีส

นักธาตุอาหารพืชวิทยาหลายท่านได้ให้ความเห็นว่า อาการเป็นพิษของแมงกานีส เป็นอาการเดียวกับอาการขาดเหล็ก หรืออีกนัยหนึ่งอาการเป็นพิษของเหล็กก็เป็นอาการเดียวกับอาการขาดแมงกานีส แต่นักธาตุอาหารพืชวิทยายังอีกหลายท่านมีความเห็นที่ขัดแย้งกับข้อสรุปข้างต้น

Shive (1941) และ Somers and Shive (1942) สรุปว่าในพืชที่มีแมงกานีส สูง เหล็กจะอยู่ในรูปเฟอร์ริค ซึ่งอาจเป็นสาเหตุการขาดเหล็ก ในขณะที่เดียวกันถ้ามีปริมาณแมงกานีส ต่ำ เหล็กจะอยู่ในรูปเฟอร์รัส ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้เกิดการเป็นพิษของเหล็กได้ และอัตราส่วนของเหล็กต่อแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารและในเนื้อเยื่อพืชควรจะอยู่ในช่วง 1.5-2.5 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่พอเหมาะต่อการเจริญเติบโตของพืช ถ้าอัตราส่วนมากกว่า 2.5 จะเกิดอาการเป็นพิษของเหล็ก (อาการขาดแมงกานีส) ถ้าอัตราส่วนต่ำกว่า 1.5 จะเกิดอาการเป็นพิษของแมงกานีส (อาการขาดเหล็ก) Olomu and Racz (1974) ศึกษาถึงน้ำในดินและอากาศในดินต่อการเป็นประโยชน์ของเหล็กและแมงกานีสในต้นบ่อ (flax) พบว่าในสภาพขังน้ำ (150 % ของความจุความชื้นสนาม) บ่อจะแสดงอาการเหลืองระหว่างเส้นใบ และผลผลิตที่ได้จะลดลง บ่อที่แสดงอาการจะมีปริมาณเหล็กต่ำในขณะที่มีปริมาณแมงกานีสสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับบ่อที่ปกติ และการลดลงของผลผลิตมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนของแมงกานีสต่อเหล็ก

ในการศึกษาความสัมพันธ์ของ เหล็กและแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญของถั่ว มันฝรั่ง สับปะรด และบ่อ ในสารละลายธาตุอาหารที่มีความเข้มข้นของแมงกานีส อยู่สูง พืชจะแสดงอาการเหลืองระหว่างเส้นใบ (chlorosis) และเกิดอาการตายของเซลล์เนื้อเยื่อที่ใบพืช (necrotic spotting) ซึ่งเป็นอาการเป็นพิษของแมงกานีส อาการเหล่านี้จะลดลงเมื่อ เพิ่มปริมาณความเข้มข้นของเหล็กในสารละลาย และในการศึกษานที่มีปริมาณแมงกานีสสูงที่ Hawaii and Puerto Rico พบว่าอาการพิษของแมงกานีสในสับปะรดสามารถแก้ไขได้โดยการพ่นสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต (Mulder and Gerretsen, 1952 อ้างผลการศึกษาของ Hopkins et al., 1944)

อย่างไรก็ตาม Tanaka and Navasero (1966) พบว่าอาการเป็นพิษของเหล็กแตกต่างไปจากอาการขาดแมงกานีส และอาการเป็นพิษของแมงกานีสก็แตกต่างไปจาก

อาการขาดเหล็ก ในการเพิ่มความเข้มข้นของเหล็กจะ ปลอดภัยปริมาณแมงกานีส เช่นเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแมงกานีสในสารละลายธาตุอาหารก็จะ ปลอดภัยปริมาณเหล็กในข้าวลงด้วย Mulder and Gerretsen (1952) อ้างผลการศึกษาของ Hewitt (1984c) ว่าอัตราส่วน ของเหล็กต่อแมงกานีสไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของ oat และ sugar beet ความเข้มข้น ที่แท้จริงของเหล็กและแมงกานีสเท่านั้นที่มีผลต่อการเจริญเติบโต เช่นเดียวกับ Morris and Pierre (1947) ในการทดลองในสารละลายธาตุอาหาร การเพิ่มความเข้มข้นของทั้งเหล็กและ แมงกานีสจึงทำให้ lespedeza แสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีส แม้อัตราส่วนของเหล็กต่อ แมงกานีสคงที่ก็ตาม และการเติมเหล็กลงไปก็ไม่สามารถแก้ไขอาการพิษของแมงกานีสได้ เช่น เดียวกับการพ่นสารละลายเฟอร์รัสซัลเฟต ก็ไม่สามารถแก้ไขอาการพิษของแมงกานีสต่อมันฝรั่งได้ (Mulder and Gerretsen, 1952 อ้างผลการศึกษาของ Berrger and Gerloff (1947a)) Morris and Pierre (1949) พบว่าอาการพิษของแมงกานีสของถั่วเหลือง ถั่วลิสง และถั่วคาวที่ที่แสดงออกนั้น แตกต่างไปจากอาการขาดเหล็ก ในดินกรดเมื่อเติมเฟอร์รัส ซัลเฟตลงไป จะมีผลทำให้แมงกานีสละลายเพิ่มขึ้น ทำให้ alfalfa สามารถดูดไปใช้ได้มาก แต่ในการเติม เหล็กออกไซด์ไม่มีผลกระทบต่อความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสเลย

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าในการเพิ่มปริมาณเหล็กอาจจะ ปลอดภัยการดูดแมงกานีส (Sommer and Shive, 1942 ; Morris and Pierre, 1947) ส่วนการเพิ่มเติมปริมาณ แมงกานีสอาจจะ ปลอดภัยการดูดเหล็กนั้นยังไม่แน่ชัดนัก Mulder and Gerretsen (1952) อ้างผลการศึกษาของ Friederichsen (1944) ถึงการศึกษาการเพิ่มปริมาณแมงกานีสในสาร ละลายธาตุอาหารต่อปริมาณเหล็กในรากและใบของ spinach และข้าวบาร์เลย์ พบว่าเมื่อใช้ ไนเตรตเป็นแหล่งไนโตรเจน ปริมาณความเข้มข้นที่สูงของแมงกานีสไม่มีผลต่อปริมาณเหล็กในใบ แต่ในรากจะมีปริมาณเหล็กลดลง แต่เมื่อใช้แอมโมเนียมเป็นแหล่งไนโตรเจน ปริมาณความเข้มข้น ที่สูงของแมงกานีสจะ ปลอดภัยปริมาณเหล็กทั้งในใบและในราก

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเหล็กและแมงกานีสมีความสัมพันธ์กันมาก และยัง แสดงให้เห็นว่ามันเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยารีดอกซ์ในดิน โดยทั่วไปแล้วเฟอร์รัส เช่น เฟอร์รัสซัลเฟต จะเพิ่มความ เป็นประโยชน์ของแมงกานีสต่อพืชซึ่งก็เนื่องมาจากรีดักชันของแมงกานีสไดออกไซด์ไป อยู่ในรูปที่ละลายได้และหรือยับยั้งออกซิเดชันของแมงกานีสโดยเฟอร์รัสไอออนดังแสดงได้ดังสมการ



จากสมการจะเห็นว่าสมการจะเคลื่อนไปทางขวาเมื่อมี Fe^{2+} เช่น การเติมเพอร์สัลเฟตลงไป หรือเมื่อปริมาณ Mn^{2+} ลดลงในขณะที่ pH สูงขึ้น (Wivutvongvana, 1979)

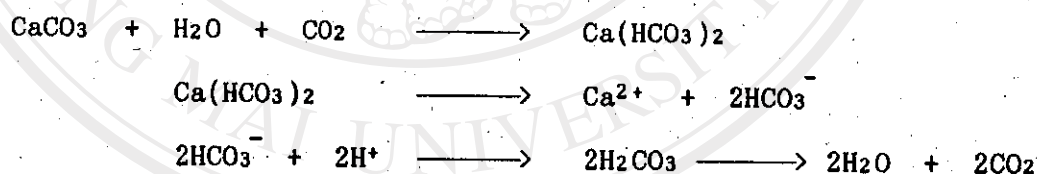
2.4 ผลของ pH และผลของแคลเซียมต่อความเป็นประโยชน์ของแมงกานีส

แมงกานีสในดินมีหลายรูป ในดินที่มี pH ต่ำกว่า 5.5 แมงกานีส ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ และในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ เมื่อ pH สูงขึ้นแมงกานีส (+2) จะเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปแมงกานีส (+3) และแมงกานีส (+4) ซึ่งการเปลี่ยนรูปของแมงกานีสนี้เป็นผลมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม (Mulder and Gerretsen, 1952) โดยทั่วไปแล้วในการแก้ปัญหาอาการเป็นพิษของแมงกานีสในดินกรดนั้น เราใช้ปูนเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต หรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ เติมลงไปดินเพื่อยกระดับ pH ของดิน และลดการดูดแมงกานีสของพืช (Morris, 1948; Siman et al., 1971) ในดินที่เป็นกลางหรือดินอัลคาไลน์ พบว่ามีการตรึงแมงกานีสทำให้บออยู่ในรูปที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้ภายในเวลา 2 - 3 วัน หลังจากการเติมแมงกานีสลงไป Sherman and Harmer (1941) ก็พบเช่นเดียวกันว่าแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้จะลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากการเติมปูนลงไป Cheng and Ouellette (1971) แสดงให้เห็นว่าการเติมปูนลงไปทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้นและทำให้แมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ในดินลดลงถึง 3 เท่า ในขณะที่ในพืชลดลง 2 เท่า ส่วน Adam and Wear (1957) พบว่าการเติมปูนจะลดปริมาณแมงกานีสในรูปที่ละลายน้ำได้ลงอย่างมาก แต่จะมีผลน้อยต่อการลดลงของแมงกานีสในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ ในสารละลายธาตุอาหารที่มีแมงกานีสเข้มข้นสูง การเติมปูนเช่น แคลเซียมคาร์บอเนต การดูดแมงกานีสของถั่วเหลืองลดลง เนื่องมาจากการกักแมงกานีสเอาไว้ที่รากของถั่วเหลือง (Heenan and Carter, 1975)

อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แคลเซียมในรูปอื่นนอกเหนือจากแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมออกไซด์ ผลที่ได้จะแตกต่างกัน Morris (1948) ศึกษาถึงผลของการใช้แคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมซัลเฟตต่อแมงกานีสในดินและการดูดแมงกานีสของถั่ว การใช้แคลเซียม

คาร์บอเนตจะลดการดูดแอมกานีสของพืชและลดแอมกานีสในรูปที่ละลายน้ำได้ เนื่องจากการเพิ่ม pH ของดิน ในขณะที่เมื่อใช้ปูนในรูปแคลเซียมซิลิเกต พบว่าการดูดแอมกานีสของถั่วจะเพิ่มขึ้นพร้อม ๆ กับการเพิ่มขึ้นของแอมกานีสที่ละลายน้ำได้ และ pH ของดินลดลงจากเดิม 5.18 เป็น 4.58 เช่นเดียวกับการศึกษาของ Fried และ Peech (1946) ในการเปรียบเทียบผลของการใช้ปูนกับการใช้จุลินทรีย์

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่า pH มีบทบาทอย่างยิ่งในการควบคุมความเป็นประโยชน์ของแอมกานีสในดิน เมื่อ pH ลดลงความเป็นประโยชน์ของแอมกานีสจะเพิ่มขึ้น และเมื่อระดับ pH เพิ่มขึ้น ความเป็นประโยชน์ของแอมกานีสจะลดลง ส่วนการเติมแคลเซียมในรูปต่าง ๆ นั้นจะมีผลทางอ้อมต่อความเป็นประโยชน์ของแอมกานีส เนื่องจากมันจะไปมีผลต่อการลดหรือเพิ่ม pH ของดิน เช่น การเติมแคลเซียมคาร์บอเนตลงไปจะทำให้ pH ของดินเพิ่มขึ้น ดังสมการ



จากการละลายตัวของปูนจะทำให้ HCO_3^- ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนกลายเป็นน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ความเป็นกรดของดินจึงลดลง

2.5 ผลของอินทรีย์วัตถุต่อความเป็นประโยชน์ของแอมกานีส

จากการศึกษาถึงบทบาทของอินทรีย์วัตถุ ต่อความเป็นประโยชน์ของแอมกานีสนั้น นักสัตตอาหารพืชวิทยาหลายท่านพบว่า อินทรีย์วัตถุจะช่วยให้เพิ่มความเป็นประโยชน์ของแอมกานีสในดิน โดย Fujimoto and Sherman (1948) พบว่าแอมกานีสที่เป็นประโยชน์ในดินจะเพิ่มขึ้นหลังจากเติมน้ำตาลซูโครส ใบสับปะรด ใบอ้อยที่มีอัตราส่วนของ C:N สูง ๆ ในดินกรด (acid mineral soil) การเติมอินทรีย์วัตถุ เช่น พีทมอสส์ (peat moss) และปุ๋ยหมักลงไปจะไป

เพิ่มปริมาณแอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้และแอมกานีสที่ง่ายต่อการรีดิวซ์ (Cheng and Ouellette, 1971) Christensen *et al.* (1950) ก็พบว่าดินที่มีแอมกานีสอยู่ในปริมาณสูง เมื่อเติมปุ๋ยหมัก หรือปุ๋ยหมักผสมกับพีทมอสส์ จะส่งเสริมความเป็นพิษของแอมกานีสต่อมันฝรั่ง เนื่องจากกระบวนการรีดิวซ์โดยสิ่งมีชีวิตในดิน การเติมอินทรีย์สารสังเคราะห์ (synthetic organic material) เช่น น้ำตาลซูโครส กลูโคส กลีเซอริน คาซีน (casein) และโซเดียมไฮเมทในสารละลายธาตุอาหาร ปริมาณแอมกานีสในใบของมันฝรั่งลดลงแต่ในลำต้นจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าในสารละลายธาตุอาหารมีออกซิน (auxin) เพียงเล็กน้อยก็ตาม การดูดแอมกานีสของมันฝรั่งจะลดลงในการศึกษากับฝ้ายของ Morgan *et al.* (1966) ได้สรุปว่าอาการเป็นของแอมกานีสในพืชเกิดเนื่องจากการขาดออกซิน ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ auxin oxidase ในใบพืชที่มีแอมกานีสมากเกินไป ในการศึกษาบทบาทของอินทรีย์วัตถุต่อสมดุลของแอมกานีสในดิน Cotter and Mishra (1968) พบว่าอินทรีย์วัตถุมีศักยภาพในการรีดิวซ์ ดังนั้นเมื่อเติมลงในดินจะช่วยเพิ่มปริมาณแอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ ที่อุณหภูมิ $21^{\circ} - 37^{\circ} \text{C}$ ความชื้นที่ความจุ ความชื้นสนามนั้นจะช่วยส่งเสริมกระบวนการรีดักชัน และกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่สูง Hewitz (1948) พบว่าการเติมคอกซ์ของ oat และ alfalfa meal ที่มีอัตราส่วนของ C:N = 30:1 ลงในดินแล้วเก็บในที่ควบคุมอุณหภูมิ $37^{\circ} - 47^{\circ} \text{C}$ ทำให้แอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้นจนสูงสุดภายในเวลา 3 วันหลังทำการทดลอง การเพิ่มขึ้นของแอมกานีสที่แลกเปลี่ยนได้นั้น เนื่องมาจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในสภาพที่มีออกซิเจนจำกัด และรีด็อกซ์โพเทนเชียลที่ต่ำ

อย่างไรก็ตามนักธาตุอาหารพืชวิทยาอีกหลายท่าน พบว่าอินทรีย์วัตถุจะปลดความเป็นประโยชน์ของแอมกานีสในดิน แต่การผันกลับของแอมกานีส (+2) ไปอยู่ในรูปสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำในดินโดยบทบาทของอินทรีย์วัตถุนั้นยังไม่เป็นที่แน่ชัดนัก อาการขาดแอมกานีสโดยทั่วไปมักพบที่พืชที่ปลูกในดินพีท (peat soil) ดินอัลคาไลน์ และดินทรายที่มีอินทรีย์วัตถุสูง ถึงแม้ว่าดินเหล่านี้จะมีปริมาณแอมกานีสทั้งหมดมากพอสมควร Heintz and Mann (1949) ได้ให้สมมุติฐานว่า อาการขาดแอมกานีสของพืชที่ปลูกในดินเหล่านี้เนื่องมาจากแอมกานีส (+2) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับอินทรีย์วัตถุทำให้การละลายของแอมกานีส (+2) ลดลง Mulder and Gerretsen (1952) อ้างผลการศึกษาของ Hudind and Meyer ในปี ค.ศ.

1919 ถึงในการทดลองในทรายเมื่อเติมอินทรีย์วัตถุลงไปพืชจะแสดงอาการขาดแมงกานีส และอาการขาดแมงกานีสจะหายไปเมื่อเติมแมงกานีสซัลเฟตลงในดินทรายที่มีอินทรีย์วัตถุสูง ส่วนดินพีทที่ประเทศเนเธอร์แลนด์นั้นพบว่า อาการขาดแมงกานีสจะปรากฏให้เห็นเมื่อ pH สูงมากกว่า 6 หรือ 6.5 สำหรับในดินที่เป็นกลางหรือดินอัลคาไลน์บางครั้งก็พบว่าพืชแสดงอาการขาดแมงกานีส ถึงแม้ว่าจะมีอินทรีย์วัตถุอยู่ก็ตาม (Mulder and Gerretsen, 1952)

2.6 ความสัมพันธ์ของแหล่งธาตุอาหารที่เติมลงไปกับแมงกานีสในดิน

2.6.1 สารประกอบไนโตรเจน

ในการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของธาตุไนโตรเจนกับอาการ เป็นพิษของแมงกานีสต่อต้านในสารละลายธาตุอาหาร พบว่าเมื่อใช้ในเตรตและยูเรีย เป็นแหล่งไนโตรเจน จะส่งเสริมความเป็นพิษของแมงกานีส อาการเป็นพิษของแมงกานีสจากแหล่งไนโตรเจนที่ต่างกัน เขียนเรียงลำดับความรุนแรงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ ไนเตรต > ยูเรีย > แอมโมเนียมไนเตรต > แอมโมเนียมซัลเฟต (Mulder and Gerretsen, 1952) แหล่งไนโตรเจนที่แตกต่างกันไม่เพียงแต่ส่งเสริมความรุนแรงของอาการ เป็นพิษของแมงกานีส แต่ยังทำให้ปริมาณแมงกานีสในใบพืชแตกต่างกัน ในใบแก้วเหลือง เมื่อให้ปุ๋ยทางใบด้วยไนเตรตอย่างเดียวจะมีปริมาณแมงกานีสในใบสูงกว่าในใบที่พ่นด้วยแอมโมเนียมไนเตรตถึง 5 เท่า (Mulder and Gerretsen, 1952) อ้างผลการศึกษาของ Lohnis, 1951) จากการทดลองปลูกในทราย (sand culture) พบว่าเมื่อใส่ไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน จะเพิ่มปริมาณของแมงกานีสที่เป็นประโยชน์ได้มากกว่าใส่ไนโตรเจนในรูปอินทรีย์ไนโตรเจน สำหรับไทอูเรีย (thiourea) มีผลต่อการเพิ่มปริมาณแมงกานีสเพียงเล็กน้อยเท่านั้น Timonin (1946) พบว่าอาการขาดแมงกานีสมีความสัมพันธ์กับการใช้ ไชยานาไมด์ แคลเซียมไนเตรต หรือแอมโมเนียมซัลเฟต เพราะสารประกอบเหล่านี้ส่งเสริมกิจกรรมของแบคทีเรีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งพวกที่สามารถออกซิไดซ์แมงกานีสได้ และพวกที่ทำให้เกิดกระบวนการ denitrification

การเปลี่ยนแปลงความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสนั้น บางส่วนเป็นผลมาจาก pH และบางส่วนเป็นผลมาจากการออกซิเดชัน โดยไนโตรเจนเป็นผลทางอ้อม

2.6.2 สารประกอบฟอสฟอรัส

อาการ เป็นพิษของแมงกานีสต่อมันฝรั่งที่ปลูกในดินกรดทางด้านตะวันออกของแคนาดาสามารถแก้ไขได้โดยการใส่ปุ๋ยโบแคสเซียมและแคลเซียมฟอสเฟตในอัตราที่เหมาะสม (Cheng and Ouellete, 1971) การละลายของแมงกานีสในพื้นที่ที่ปลูกข้าวโพดจะลดลงเมื่อใช้ $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ เนื่องจากเกิดสารประกอบ $\text{Mn}(\text{NH}_4)_2 \text{P}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งมีสารประกอบนี้มีค่าการละลายต่ำ และตกตะกอนตลอดช่วง pH 4-8 (Giordano and Mortvedt, 1969) อย่างไรก็ตาม Larsen (1964) พบว่าการใช้ triple super-phosphate จะเพิ่มปริมาณแมงกานีสในใบของ oat และ sugar beet เนื่องจากเพิ่มความสามารถของรากในการดูดกลืนแมงกานีส Morris and Pierre (1947) ก็พบว่าการใช้ superphosphate ในปริมาณมากจะส่งเสริมอาการเป็นพิษของแมงกานีสในดินกรด และปริมาณแมงกานีสในใบจะเพิ่มขึ้น 2 - 3 เท่า ดังนั้นความสามารถของฟอสเฟตในการส่งเสริมหรือลดความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสขึ้นกับชนิดของสารประกอบฟอสเฟต และลักษณะของพืชด้วย

2.6.3 โบแคสเซียม

ในปี 1968 Cheng and Ouellet ได้รายงานการศึกษาเกี่ยวกับการใส่ปุ๋ยโบแคสเซียมคลอไรด์ และ โบแคสเซียมซัลเฟตกับมันฝรั่งพบว่ามันฝรั่งจะแสดงอาการเป็นพิษของแมงกานีสและการดูดแมงกานีสจะเพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยโบแคสเซียมทั้งสอง Parker et al. (1969) ก็พบเช่นเดียวกัน และยังพบอีกว่า pH ของดินก็ลดลงด้วย แต่ในการใส่ปุ๋ยโบแคสเซียมในรูปโบแคสเซียมคาร์บอเนตกลับมีแนวโน้มที่จะลดความเป็นพิษของแมงกานีส ซึ่งก็สอดคล้องกับการรายงานของ Jackson et al. (1966)

ถึงแม้ว่าข้อมูลเกี่ยวกับบทบาทของโบแคสเซียมต่อความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสจะมีไม่มากนักก็ตาม การใส่โบแคสเซียมในรูปต่าง ๆ กัน น่าจะเป็นผลทางอ้อมต่อความเป็นประโยชน์ของแมงกานีส เช่นเดียวกับกับผลของการใส่แคลเซียมในรูปต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

2.7 ผลของอุณหภูมิ ความชื้นและสมบัติทางกายภาพต่อความเป็นประโยชน์ของแมงกานีส

Jackson and Sherman (1953) ได้ศึกษาถึงความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสในช่วงฤดูการที่แตกต่างกัน พบว่าแมงกานีสจะถูกรีดิวซ์ในช่วงฤดูฝน และถูกออกซิไดซ์ในช่วงฤดูแล้ง สำหรับผลของอุณหภูมินั้นพบว่าสภาพการรีดิวซ์จะเกิดบนผิวดินในช่วงฤดูหนาว ในขณะที่สภาพการออกซิไดซ์จะเกิดในช่วงฤดูร้อนที่มีการคายระเหยในอัตราสูง ฤดูหนาวจะส่งเสริมการเกิดแมงกานีส(+2) และในฤดูร้อนจะส่งเสริมการเกิดแมงกานีส(+3) Cheng et al. (1971) พบว่าในดินที่มีความชื้นและอุณหภูมิสูงจะมีปริมาณแมงกานีสในดินสูงขึ้น แต่อัตราส่วนของแมงกานีสต่อเหล็กในดิน oat ลดลง ปฏิกริยาร่วมระหว่างอุณหภูมิและความชื้นของดินที่มีผลต่อการดูดกลืนแมงกานีสนั้นก็ยังไม่ปรากฏผลต่อค่าเฉลี่ยเช่นเดียวกัน (Mederski and Wilson, 1955) ดินที่มีอุณหภูมิต่ำและอยู่ในร่มเงานั้น ข้าวจะมีการดูดแมงกานีสเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของปริมาณปกติ (Cheng and Ouellette, 1971 อ้างผลการศึกษานี้ของ Fujiwara and Ishida, 1963) ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้ อาจจะเนื่องมาจากการสลายตัวของซากพืชเช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลง pH เนื่องจากกิจกรรมของจุลินทรีย์พร้อมกับการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (Hurwitz, 1948)

ความชื้นของดินมีผลต่อกระบวนการออกซิเดชันรีดักชันของดิน (Harter and Mclean, 1965) ดินที่เก็บควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 90 °F ความชื้น 60 % ของความจุความชื้นสนาม จะมีปริมาณของแมงกานีสในรูปที่แลกเปลี่ยนได้ และในรูปที่ง่ายต่อการรีดิวซ์เพิ่มขึ้น ในฤดูหนาวภายใต้สภาพน้ำขัง เมื่อน้ำในดินมีการแข็งตัวและหลอมละลายสลับกันหลาย ๆ ครั้ง พบว่าแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้จะถูกปลดปล่อยออกมาได้มากกว่าในสภาพดินแห้ง เมื่อลดความชื้นต่ำกว่า 60% ของความจุความชื้นสนามแล้ว อุณหภูมิมีผลต่อการปลดปล่อยแมงกานีสในดินเพียงเล็กน้อยและความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคดินเล็กลง

ภายใต้สภาพการระบายอากาศที่ดี แมงกานีสที่พบในดินโดยทั่วไป จะอยู่ในรูปที่ตกตะกอนเป็นออกไซด์ของแมงกานีสหรือตกตะกอนกับฟอสเฟต ในสภาพขาดออกซิเจนแมงกานีสที่แลกเปลี่ยนได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในสภาพรีดักชันโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์

จะเห็นว่าสมบัติทางกายภาพส่งผลต่อสมดุลย์ระหว่างแมงกานีส (+2) และแมงกานีส (+3) ในดิน ความสามารถในการแทรกซึมลงในดิน การกระจายของอนุภาคดิน ความพรุนของดินจะมีผลต่อการระบายน้ำ การระบายอากาศ pH และรีดอกซ์โพเทนเทียลของดิน ปฏิกริยาร่วมกันทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และกิจกรรมทางชีวภาพเหล่านี้จะเป็นตัวควบคุมความเป็นประโยชน์ของแมงกานีสในดิน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved