สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. 2559. มันสำปะหลัง โรงงาน : เนื้อที่ปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปี 2558-2560. เข้าถึงได้จาก: http://www.oae.go.th/download/prcai/DryCrop/cassava.pdf [เข้าถึงเมื่อ 1 มิถุนายน 2560].

Cock, J. H. 1985. Cassava: a basic energy source in the tropics. Science. 218: 755-762.

Fujii, K., C. Hayakawa, T. Panitkasate, I. Maskhao, S. Funakawa, T. Kosaki and E. Nawata. 2017. Acidification and buffering mechanisms of tropical sandy soil in northeast Thailand. Soil Tillage Res. 165: 80-87.

Walkley, A. and C.A. Black. 1934. An examination of Digestion method for determining soil organic matter
and proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci.

Jackson, M.L. 1958. Soil Chemical Analysis. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. USA. 498 p.

ประโยชน์ของยิปซัมในการเกษตร

ยงยุทธ โอสถสภา [1]

บทคัดย่อ

ยิปซัม คือ เกลืออนินทรีย์ ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่าแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต มีธาตุเป็นองค์ประกอบ 3 ธาตุ คือ แคลเซียม กำมะถัน และออกซิเจน ยิปซัมมาจาก 2 แหล่ง คือ เป็นแร่ในดินและเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม มีการใช้ยิปซัมเป็นวัสดุก่อสร้างและเป็นสารปรับปรุงดิน

ยิปซัมมีประโยชน์ด้านการปรับปรุงดิน 2 อย่าง คือ (1) เป็นแหล่งธาตุรอง เนื่องจากมีธาตุแคลเซียมและกำมะถัน ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช และ (2) เป็นสารปรับปรุงสมบัติของดิน 2 ด้าน คือ ช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีและสมบัติทางฟิสิกส์

พืชได้รับธาตุแคลเซียมและกำมะถันมาจากดิน แต่ในดินเนื้อหยาบ ดินเป็นกรด ดินมีอินทรียวัตถุต่ำและขาดการอนุรักษ์ พืชอาจขาดแคลนธาตุทั้งสองนี้ หากขาดแคลนมาก พืชจะแสดงอาการผิดปรกติ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะการแก้ไขความขาดแคลนแคลเซียมและกำมะถันของพืชทำได้โดยการใช้ยิปซัมในอัตราที่เหมาะสม “ยิปซัมจึงเป็นปุ๋ยแคลเซียมและกำมะถัน” สำหรับดินที่มีสองธาตุนี้ไม่เพียงพอ

ยิปซัมช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดิน ทำให้สภาพของดินเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของราก “ยิปซัมช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินที่มีปัญหา 2 ชนิด คือ ดินกรดและดินโซดิก”

การปรับปรุงดินกรด ทำได้โดยการใส่ปูนและยิปซัม โดยปูนซึ่งเป็นสารที่ละลายน้ำยาก ช่วยทำให้ดินบนมีพีเอช (pH) สูงขึ้น เพิ่มแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และลดอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ เฉพาะในดินบน แต่รากพืชยังเป็นพิษจากอะลูมินัมในดินล่าง ส่วนยิปซัมละลายน้ำได้ดีกว่า แคลเซียมและซัลเฟตไอออนจึงเคลื่อนย้ายลงสู่ดินล่าง และช่วยเพิ่มแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และลดอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ทั้งดินบนและดินล่าง โดยยิปซัมมีผลต่อพีเอชของดินเพียงเล็กน้อย

ยิปซัมช่วยปรับปรุงดินโซดิกทางเคมี โดยลดโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ และเพิ่มแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ พืชจึงไม่เป็นพิษจากโซเดียม และช่วยลดความหนาแน่นรวมของดิน โดยทำให้ดินมีการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศดีขึ้น การใส่ยิปซัมอัตราต่ำ นอกจากจะช่วยชดเชยแคลเซียมและกำมะถันที่ติดไปกับผลผลิตพืชที่เก็บเกี่ยวแล้ว ยังป้องกันการเกิดดินโซดิกได้ด้วย

“ยิปซัมช่วยปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน” เนื่องจากแคลเซียมส่งเสริมให้อนุภาคดินเหนียวเข้ามาใกล้กัน แล้วยึดอนุภาคดินเหนียวด้วยประจุไฟฟ้า ทำให้ดินจับตัวกันเป็นกลุ่ม อันเป็น

[1] รองศาสตราจารย์ ดร., ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

พื้นฐานของการเกิดโครงสร้างดิน จากนั้นก็พัฒนาเป็นเม็ดดินจากการเสริมด้วยกระบวนทางเคมีและชีวภาพอื่นๆ ดินที่มีโครงสร้างดีและมีเสถียรภาพจะมีการอุ้มน้ำ การระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศดี แล้วยังทนต่อการกร่อนดินด้วย ยิปซัมช่วยลดการเกิดแผ่นแข็งปิดผิวดิน ทำให้น้ำแทรกซึมลงไปในดินได้ง่าย เป็นสภาพดินที่เมล็ดงอกแล้วแทงทะลุผิวดินง่ายและต้นพืชตั้งตัวเร็ว

มีการทดลองใช้ยิปซัมกับอ้อยและพืชต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่เป็นกรด ระดับความเป็นประโยชน์ของแคลเซียมและกำมะถันในดินต่ำ พบว่าช่วยให้พืชเหล่านั้นมีการเจริญเติบโตดีขึ้นและผลผลิตสูงขึ้น

คำนำ

มนุษย์รู้จักใช้ยิปซัมเป็นวัสดุก่อสร้างมากว่า 5,000 ปีแล้ว ดังปรากฏหลักฐานว่าชาวอียิปต์ใช้แร่นี้ในการสร้างปิระมิด แต่การใช้ยิปซัมในการเกษตรเกิดขึ้นในภายหลัง โดยเกษตรกรชาวฝรั่งเศสนำมาใช้ใส่ในดินเพื่อเพิ่มผลผลิตพืช ต่อมาเมื่อประมาณ พ.ศ. 2260 เบ็นจามิน แฟรงคลิน ได้นำวิธีการดังกล่าวไปเผยแพร่ในสหรัฐอเมริกา จึงทำให้มีการใช้ยิปซัมเป็น “สารปรับปรุงดิน” อย่างแพร่หลาย หลังจากนั้นไม่นานนัก (ประมาณ พ.ศ. 2320) ลาวัวซีเย นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของยิปซัม (Gypsum Association, 2018)

บทความนี้แบ่งเป็น 4 ตอน คือ ตอนที่ 1 ทำความรู้จักยิปซัม ตอนที่ 2 ยิปซัมมีธาตุอาหาร ตอนที่ 3 ยิปซัมเป็นสารปรับปรุงดิน และตอนที่ 4 การใช้ยิปซัมกับพืชชนิดต่างๆ

ตอนที่ 1 ทำความรู้จักยิปซัม

1. ยิปซัมคืออะไร

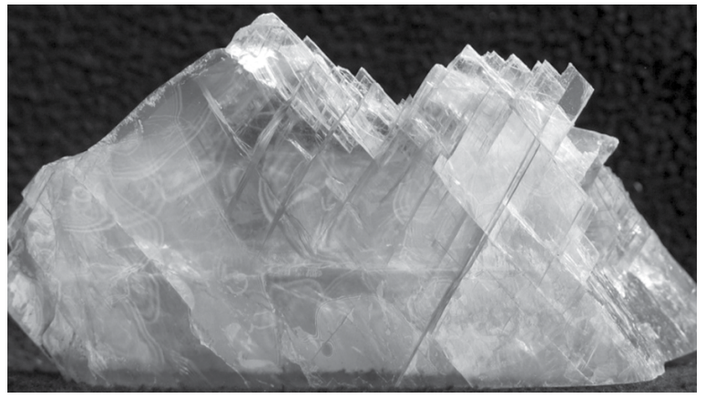
ยิปซัม (gypsum) หรือ “แร่เกลือจืด” เป็นเกลืออนินทรีย์ที่ประกอบด้วย ธาตุแคลเซียม กำมะถัน และออกซิเจน ชื่อและสูตรทางเคมี คือ แคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) เนื่องจากมีน้ำผลึก 2 โมเลกุล หากได้รับความร้อนจนสูญเสียน้ำผลึกจะได้แคลเซียมซัลเฟตเฮมิไฮเดรต (hemihydrate) สูตรโมเลกุล $CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$ (hemi มาจากภาษากรีก ซึ่งมีความหมายว่า “ครึ่ง หรือ half”) หากได้รับความร้อนต่อไปอีก จะสูญเสียน้ำผลึกจนหมด ได้แอนไฮไดรต์ (anhydrite, $CaSO_4$)

สมบัติทางกายภาพที่สำคัญของยิปซัม คือ มีสีขาว ไม่มีสี หรือสีเทา เนื้อแร่โปร่งใสจนกระทั่งโปร่งแสง แต่มักมีสีเหลือง แดง หรือน้ำตาลเจือ (ภาพที่ 1) ยิปซัมมีความแข็ง 2 (Mohs scale) ความถ่วงจำเพาะ 2.7 สภาพละลายน้ำได้ (solubility) 2.0-2.5 กรัมต่อลิตร (ที่ 25 องศาเซลเซียส) (Wigipedia, 2018) แร่ยิปซัมควรมีแคลเซียมซัลเฟตไดไฮเดรต ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) ไม่น้อยกว่า 70% (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2528)

2. ยิปซัมมาจากไหน

ยิปซัมมาจาก 2 แหล่ง คือ (1) แร่ในดิน และ (2) ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม

1) แหล่งธรรมชาติ แร่ยิปซัมในดินมีกำเนิดได้หลายแบบ แต่จะพบเกิดมากที่สุดในแหล่งแร่หินเกลือระเหย สีขาวหรือขาวหม่น ในประเทศไทยพบมากที่จังหวัดนครสวรรค์ พิจิตร และสุราษฎร์ธานี นอกจากนั้นยังมีการผลิตยิปซัม



ภาพที่ 1 ก้อนแร่ยิปซัมแสดงลักษณะของผลึก
ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Gypsum

จากน้ำทะเล โดยนำน้ำทะเลมาระเหยจนได้ยิปซัมตกตะกอนเป็นผลึกเล็กๆ ก่อนเกลือชนิดอื่นๆ เนื่องจากยิปซัมไม่มีรสเค็มจึงเรียกว่า “เกลือจืด” (พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา, 2544)

2) ผลพลอยได้จากแหล่งอื่นที่มิใช่แร่ในดิน เช่น ผลพลอยได้จาก (1) โรงงานผลิตกรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) (2) การกำจัดซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และ (3) การผลิตกรดแลกติก (lactic acid)

(1) ผลพลอยได้จากโรงงานผลิตกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ในการผลิตกรดฟอสฟอริกจากปฏิกิริยาระหว่างหินฟอสเฟต (phosphate rock) และกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จะได้กรดฟอสฟอริกกับยิปซัม แล้วแยกกรดซึ่งเป็นของเหลวออกจากยิปซัมซึ่งเป็นของแข็งโดยการกรอง ยิปซัมที่ได้เรียกว่า ฟอสโฟยิปซัม (phosphogypsum) (ยงยุทธ และคณะ 2556)

(2) ผลพลอยได้จากการกำจัดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) การใช้ถ่านหินหรือลิกไนต์เป็นเชื้อเพลิงนั้น การเผาถ่านหินหรือลิกไนต์จะได้แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปนออกมากับคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการกำจัด (scrubbing process) แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ทำได้โดยออกซิไดส์แก๊สนี้ แล้วให้ทำปฏิกิริยากับปูน ($CaCO_3$) จะได้ยิปซัมซึ่งเรียกว่า flue gas desulfurization gypsum (FGD gypsum) (http://lc.dpim.go.th/kb/925)

(3) ผลพลอยได้จากการผลิตกรดแลกติก ในกระบวนการผลิตกรดแลกติก (lactic acid) นั้น ขั้นแรกจะได้แคลเซียมแลกเตต (Ca-lactate) ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) จะได้กรดแลกติกกับยิปซัม แล้วแยกกรดซึ่งเป็นของเหลวกับยิปซัมซึ่งเป็นของแข็งออกจากกันโดยการกรอง

3. ประโยชน์ของยิปซัม

ประโยชน์ของแร่ยิปซัมมี 3 ด้าน (https://th.wikipedia.org/wiki/) คือ

1) ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรม สามารถนำยิปซัมมาทำปูนปลาสเตอร์ ปูนซีเมนต์ (portland cement) แผ่นยิปซัมอัด (gypsum board) หรือแผ่นยิปซัมบอร์ด ชอล์ก กระดาษ ดินสอ ฯลฯ

2) ในตำรายาไทยเรียกยิปซัมว่า “เกลือจืด” ใช้ทำแป้งผัดหน้า ที่เป็นผลึกเรียกหินฟันม้า ถ้าเป็นหินสีขาวเรียกเศวตศิลา ในตำรายาจีนเรียก “เจียะกอ” ใช้ทำยาเช่นเดียวกัน

3) ประโยชน์ด้านการเกษตร มี 2 อย่าง คือ

(1) เป็นแหล่งธาตุรอง (secondary nutrient elements) เนื่องจากยิปซัมมีธาตุแคลเซียมและกำมะถัน ซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช

(2) เป็นสารปรับปรุงสมบัติของดิน 2 ด้าน คือ ช่วยปรับปรุงสมบัติทางทางเคมีและสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

การใส่ยิปซัมในดินจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์หลายอย่าง ซึ่งจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช

ตอนที่ 2 ยิปซัมมีธาตุอาหาร

1. ยิปซัมกับการเจริญเติบโตของพืช

ยิปซัมมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชเนื่องจากสาเหตุ 2 ประการ (ยงยุทธ และคณะ, 2556) คือ

1) ยิปซัมมีแคลเซียมและกำมะถัน (รูปซัลเฟต) เป็นองค์ประกอบ ทั้งแคลเซียมและกำมะถันเป็นธาตุอาหารจำพวกมหธาตุ (macronutrient elements) และจัดอยู่ในประเภทธาตุรอง (secondary elements) ความเข้มข้นของแคลเซียมและกำมะถันในใบพืชที่จัดว่าเพียงพอแก่การเจริญเติบโตแสดงไว้ในตารางที่ 1

2) ยิปซัมเป็นสารปรับปรุงดินที่ช่วยให้สมบัติทางเคมีและสมบัติทางฟิสิกส์ของดินดีขึ้น (ดังรายละเอียดในตอนที่ 3)

2. แคลเซียม

เรื่องแคลเซียมมี 4 ประเด็น คือ (1) แคลเซียมในดิน (2) ลักษณะของดินที่พืชมักขาดแคลเซียม (3) บทบาทของแคลเซียมต่อพืช และ (4) อาการขาดแคลเซียมของพืช

2.1 แคลเซียมในดิน

แคลเซียมในดินแบ่งตามสภาพความเป็นประโยชน์ต่อพืชได้ 3 พวก คือ (1) แคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ (2) แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และ (3) แคลเซียมไอออนในสารละลายของดิน (ภาพที่ 2) (Brady and Weil, 2007; Osman, 2013; Yong *et al*., 2012)

1) แคลเซียมในแร่ แคลเซียมเป็นองค์ประกอบในแร่ เฟลด์สปาร์ แอมฟิโบล อะพาไทต์ แคลไซต์ และโดโลไมต์ เนื่องจากแร่ดังกล่าวไม่ละลายน้ำ แคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบอยู่จึงยังไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่เมื่อแร่เหล่านั้นผุพัง จะปล่อยแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ออกมาในสารละลายของดิน หรือแคลเซียมไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable calcium) ซึ่งพืชดูดไปใช้ได้ง่าย เมื่อแคลเซียมไอออนถูกปลดออกมาสู่สารละลายของดินแล้ว บางส่วนอาจเปลี่ยนแปลงต่อไปดังนี้ คือ (1) สูญหายโดยการชะละลาย (leaching) ไปกับน้ำที่ไหลผ่านชั้นดินหรือการกร่อนดิน (erosion) (2) พืชหรือจุลินทรีย์ดินดูดไปใช้ (3) เป็นแคลเซียมไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ หรือ 4) กลายเป็นเกลือที่ละลายยากและตกตะกอนอีกครั้งหนึ่ง

2) แคลเซียมที่เป็นประโยชน์ ได้แก่ แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และแคลเซียมไอออนในสารละลายของดิน สองส่วนนี้เป็นประโยชน์ต่อพืช แต่พืชดูดได้มาจากสารละลายของดินเป็นส่วนใหญ่ หากแคลเซียมไอออนในสารละลายของดินถูกพืชดูดไปใช้หรือถูกชะล้างจนร่อยหรอลง ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้จะคลายจากการดูดซับออกมาเพื่อรักษาสมดุลไว้ ในทางตรงกันข้าม หากแคลเซียมไอออนในสารละลายของดินสูงขึ้น ส่วนที่แลกเปลี่ยนได้ก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

เกณฑ์ในการประเมินระดับความเพียงพอของแคลเซียมในดินต่อพืช ใช้ค่าความเข้มข้นของแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable calcium) ดังนี้

ต่ำกว่า 200 มก. ต่อ กก. แสดงว่า ต่ำ (พืชขาดแคลเซียม)

200-400 มก. ต่อ กก. แสดงว่า ปานกลาง (พืชได้รับแคลเซียมเพียงพอ)

สูงกว่า 400 มก. ต่อ กก. แสดงว่า สูง (พืชได้รับแคลเซียมเพียงพอ)

2.2 ลักษณะของดินที่พืชมักขาดแคลเซียม

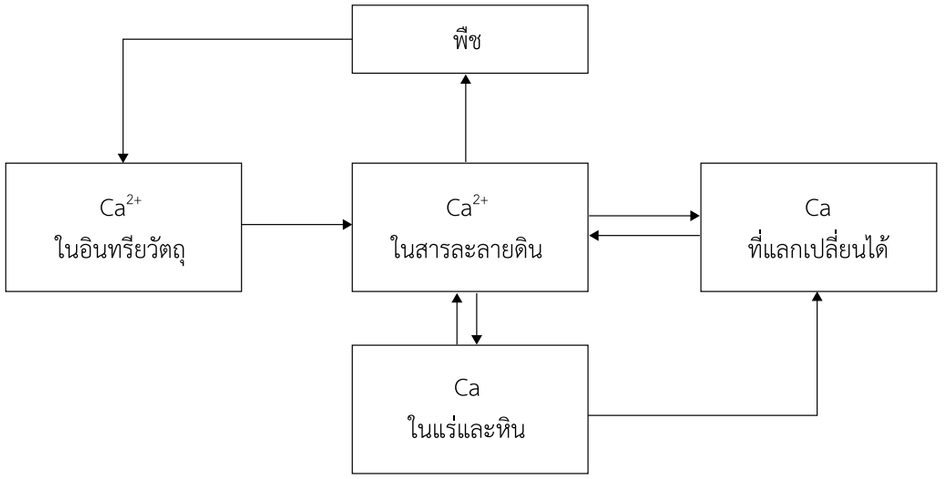
ลักษณะของดินที่พืชมักขาดแคลเซียม มี 3 ประการ คือ

1) ดินเนื้อหยาบ เนื่องจากดินเนื้อหยาบมีกำเนิดมาจากหินและแร่ที่มีแคลเซียมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดินเนื้อละเอียด ดังนั้นดินทรายจึงมีแคลเซียมน้อยกว่าดินเหนียวหรือดินร่วน

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของแคลเซียมและกำมะถันในใบพืชชนิดต่างๆ ที่จัดว่าเพียงพอต่อการเจริญเติบโต

พืช	Ca (%)	S (%)
	พืชไร่	
อ้อย	0.43-076	0.13-0.28
ข้าว	0.20-0.60	0.15-0.30
ข้าวโพด	0.20-1.00	0.10-0.30
มันสำปะหลัง	0.60-1.50	0.30-0.40
ถั่วลิสง	0.50-0.60	0.15-0.20
ถั่วเหลือง	0.36-2.00	0.21-0.40
ทานตะวัน	1.45-1.60	0.36-0.44
	พืชผัก	
แตงกวา	1.00-2.00	0.30-0.50
มะเขือเทศ	3.10-3.50	0.26-0.35
	ไม้ผล	
ส้ม	2.60-5.00	0.20-0.50
องุ่น	2.51-3.50	0.25-0.50
กล้วย	0.70-1.25	0.20-0.27
กาแฟ	0.60-1.60	0.15-0.26

ที่มา: ยงยุทธ (2558 และ 2560)



ภาพที่ 2 วงจรของแคลเซียมในดิน
ที่มา: Brady and Weil (2007)

2) ดินเป็นกรด ในดินกรด (pH ต่ำกว่า 7) ความเป็นประโยชน์ของแคลเซียมมักต่ำ ส่วนดินด่าง (pH สูงกว่า 7) ระดับความเป็นประโยชน์ของแคลเซียมต่อพืชจะสูง เนื่องจากมีปริมาณของแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้มาก

3) ดินที่ไม่มีการอนุรักษ์ เป็นดินที่มีการกร่อนดิน หรือถูกน้ำชะล้างพังทลายมาก ทำให้ธาตุอาหารต่างๆ รวมทั้งแคลเซียมถูกน้ำพัดพาไป จึงเหลือในดินน้อย พืชที่ปลูกจะขาดแคลนแคลเซียมและธาตุอื่นๆ

2.3 บทบาทของแคลเซียมต่อพืช

แคลเซียมมีบทบาทสำคัญ 7 ประการที่ทำให้พืชดำรงชีพได้ตามปรกติ (ยงยุทธ, 2558; Maathuis and Diatloff, 2013; Podar, 2013) ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1) เสถียรภาพของผนังเซลล์ ผนังเซลล์พืชประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ (1) เซลลูโลสไมโครไฟบริล (cellulose microfibril) และ (2) วัสดุพื้นหรือแมทริกซ์ (matrix) ซึ่งประกอบด้วย เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) สารเพ็กทิน (pectin) และโปรตีน แคลเซียมเป็นองค์ประกอบของแคลเซียมเพ็กเทต (calcium pectate) ในกลุ่มของสารเพ็กทิน นอกจากนี้ยังพบแคลเซียมเพ็กเทตมากในมิดเดิลลาเมลลา (middle lamella) ซึ่งเป็นชั้นบางๆ ทำหน้าที่เชื่อมให้ผนังเซลล์ข้างเคียงประสานกัน ผนังเซลล์จึงมีความแข็งแรง เซลล์จำนวนมากเชื่อมติดกันกลายเป็นเนื้อเยื่อและอวัยวะของพืช

2) การเจริญเติบโตของพืช แคลเซียมมีบทบาทควบคุมให้รากพืชเจริญเติบโตมีทิศทางลงสู่ดิน ตอบสนองต่อความถ่วงของโลก และส่งเสริมการทำหน้าที่ของฮอร์โมนพืชที่ชื่อ “ออกซิน (auxin)” ด้านการเจริญเติบโตของเซลล์

3) เสถียรภาพของเยื่อหุ้มเซลล์ และเยื่ออื่นๆ โดยแคลเซียมช่วยเชื่อมโยงระหว่างองค์ประกอบต่างๆ ในเยื่อ ทำให้เยื่อมีเสถียรภาพ สามารถทำหน้าที่ดูดธาตุอาหาร ตลอดจนควบคุมมิให้มีการรั่วไหลของสารต่างๆ ออกจากเซลล์

4) ควบคุมการดูดน้ำของเซลล์พืช โดยปรับความเข้มข้นขององค์ประกอบในแวคิวโอลของเซลล์ให้พอเหมาะ เอื้อต่อการดูดน้ำเข้ามาใช้ประโยชน์ นอกจากนี้แคลเซียมยังมีบทบาททางอ้อมในการควบคุมการเปิดและปิดปากใบ

5) ทำหน้าที่เป็นตัวนำรหัส แคลเซียมไอออนเป็นตัวนำรหัสที่สอง (second messenger) ในการส่งข่าวสารให้ระบบส่วนกลางทราบภาวะของสิ่งแวดล้อมภายนอกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ เช่น อุณหภูมิ แสง ความแห้งแล้ง ความเค็ม และการเข้าทำลายของเชื้อโรค รวมทั้งกระตุ้นให้พืชป้องกันอันตรายจากสิ่งเหล่านั้นอย่างเหมาะสม นอกจากนั้นแคลเซียมยังช่วยเพิ่มความต้านทานโรคพืชและซ่อมแซมบาดแผลที่เกิดขึ้น

6) บทบาทในระยะเจริญพันธุ์ แคลเซียมส่งเสริมให้มีการปฏิสนธิ (fertilization) ในดอกหลังจากการถ่ายเรณู (pollination) โดยเหนี่ยวนำให้หลอดเรณูยืดตัวเพื่อส่งเซลล์สืบพันธุ์เพศผู้ไปจนถึงรังไข่ ทำให้เกิดการปฏิสนธิกับเซลล์ไข่ในออวุล จึงมีการพัฒนาผลและเมล็ด

7) บทบาทด้านการงอกของเมล็ด แคลเซียมกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสในเมล็ด ซึ่งทำหน้าที่ย่อยแป้งอันเป็นอาหารสะสมในเอนโดสเปิร์ม ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็ก เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการงอกของเมล็ดและเป็นโครงคาร์บอนสำหรับสังเคราะห์สารอินทรีย์ต่างๆ

2.4 อาการขาดแคลเซียมของพืช

พืชต่างๆ อาจขาดแคลเซียมเมื่อปลูกในดินกรดหรือดินเนื้อหยาบ ซึ่งมีแคลเซียมที่เป็นประโยชน์ต่ำ แคลเซียมเป็นธาตุอาหารที่ไม่เคลื่อนย้ายในพืช (immobile element) อาการขาดจึงปรากฏที่ใบอ่อนหรือยอดอ่อน อาการขาดแคลเซียมแสดงอย่างเด่นชัดที่ใบอ่อน โดยปลายใบอ่อนจะกลายเป็นสีขาว ปลายใบม้วนหรือโค้ง ขอบใบแห้งตายเกือบตลอดแนว นอกจากนี้ยังพบอาการขาดแคลเซียมที่ก้นผลด้วย (Dobermann and Fairhurst, 2000; Fairhurst *et al*., 2007)

3. กำมะถัน

เรื่องกำมะถันมี 4 ประเด็น คือ (1) กำมะถันในดิน (2) ลักษณะของดินที่พืชมักขาดกำมะถัน (3) บทบาทของกำมะถันต่อพืช และ (4) อาการขาดกำมะถันของพืช

กำมะถันในผิวโลกเป็นองค์ประกอบของแร่พวกโลหะซัลไฟด์ เมื่อแร่ดังกล่าวถูกออกซิไดส์ได้กลายเป็นสารประกอบซัลเฟต ซึ่งบางชนิดเป็นเกลือที่ละลายง่าย ส่วนบางชนิดเป็นเกลือที่ละลายยากและตกตะกอนอยู่ในดิน พืชและจุลินทรีย์ดินดูดใช้กำมะถันรูปซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เพื่อการเจริญเติบโต สารประกอบของกำมะถันในดินมีดังนี้ (Brady and Weil, 2007; Osman, 2013; Yong *et al*., 2012)

3.1 กำมะถันในดิน

ดินมีสารประกอบกำมะถัน 2 ประเภท คือ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์

3.1.1 สารประกอบอินทรีย์

กำมะถันในดิน ส่วนหนึ่งเป็นองค์ประกอบอยู่ในสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน ซึ่งอยู่ในอินทรียวัตถุ และเป็นแหล่งกำมะถันที่สำคัญอย่างหนึ่งของพืช ดินที่มีอินทรียวัตถุสูงพืชมักไม่ขาดกำมะถัน โปรตีนมีกรดอะมิโน 2 ชนิดที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ คือ ซีสเทอีนและเมไทโอนีน นอกจากนี้ อาจมีธาตุนี้ในสารประกอบอินทรีย์ชนิดอื่น เช่น กลูโคสซัลเฟตและซัลโฟลิปิดด้วย สารประกอบเหล่านี้เป็น

ส่วนหนึ่งของอินทรียวัตถุในดิน โปรตีนและสารประกอบต่างๆ จะถูกจุลินทรีย์ดินย่อยสลายแล้วแปรสภาพกำมะถันจากรูปของสารอินทรีย์มาเป็นสารอนินทรีย์คือซัลเฟตไอออนซึ่งพืชดูดไปใช้ประโยชน์ได้ สารประกอบอินทรีย์ของกำมะถันบางส่วนถูกยึดไว้อย่างแข็งแรงด้วยฮิวมัสหรือแร่ดินเหนียว เป็นเหตุให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายได้ยาก กำมะถันในดินส่วนนี้จะไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช โดยปรกติดินบน (0-15 ซม.) มีกำมะถันที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมากกว่าดินล่าง (ลึกกว่า 15 ซม.) เนื่องจากดินบนมีอินทรียวัตถุมากกว่าดินล่าง

3.1.2 สารประกอบอนินทรีย์

แม้ว่าดินโดยทั่วไปมีสารประกอบกำมะถันประเภทอนินทรีย์ น้อยกว่าสารประกอบอินทรีย์ แต่สารประกอบอนินทรีย์มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช เนื่องจากบางชนิดเป็นสารที่ละลายน้ำง่าย เช่น เกลือซัลเฟต ส่วนในดินที่มีน้ำขังจะมีแร่ไพไรต์ (FeS_2) ซึ่งละลายยาก แต่เมื่อแร่นี้ได้รับออกซิเจน จะแปรสภาพเป็นกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เป็นการเพิ่มกรดในดิน แต่ซัลเฟตไอออนที่มีอยู่นี้เป็นประโยชน์ต่อพืช ซัลเฟตในดินมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ ซัลเฟตไอออนในสารละลายของดินและซัลเฟตไอออนที่ถูกดูดซับอยู่กับอนุภาคดินเหนียวบางประเภท ดังนี้

1) ซัลเฟตไอออนในสารละลายดิน เป็นรูปที่รากพืชดูดไปใช้ง่าย หากสารละลายดินมีซัลเฟตไอออนซึ่งคงระดับไว้เพียง 3-5 มิลลิกรัม SO_4^{2-} ต่อลิตร ก็เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชทั่วไป การสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินจะช่วยชดเชยซัลเฟตไอออนในสารละลายดิน ดังนั้นพืชซึ่งปลูกในดินที่มีอินทรียวัตถุสูงจึงไม่ขาดแคลนกำมะถัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากซัลเฟตไอออนมีประจุลบ การดูดซับที่ผิวของอนุภาคดินมีปริมาณน้อย จึงอาจสูญหายไปกับน้ำที่ผ่านชั้นดินหรือการชะละลาย

2) ซัลเฟตที่ดูดซับ แม้ว่าอนุภาคดินเหนียวโดยทั่วไปมีประจุบวกน้อย จึงดูดซับแอนไอออน เช่น ซัลเฟตไอออนได้จำกัด แต่มีสาร 3 ประเภท คือ (1) ดินเหนียวซึ่งเป็นออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัม (2) แร่ดินเหนียวเคโอลิไนต์ และ (3) ฮิวมัส เป็นพวกที่มีประจุบวกเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของดินลดลงต่ำกว่า 6 ดังนั้นในดินที่เป็นกรดจะมีการดูดซับซัลเฟตไว้ที่ผิวของสารเหล่านี้มากขึ้น และส่วนนี้เป็นประโยชน์ต่อพืช ทั้งการดูดซับยังทำให้การชะละลายซัลเฟตไปจากดินน้อยลง นอกจากนี้ ดินล่างซึ่งมีดินเหนียวกับออกไซด์ของเหล็กและอะลูมินัมมากกว่าดินบนจะดูดซับซัลเฟตได้มากกว่าดินบน

3.2 ลักษณะของดินที่พืชมักขาดกำมะถัน

ลักษณะของดินที่มักมีกำมะถันน้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืชมี 3 ประการ คือ

1) ปริมาณอินทรียวัตถุในดินต่ำ ทั้งนี้เพราะอินทรียวัตถุเป็นแหล่งสำคัญของกำมะถันสำหรับพืช

2) ขาดการอนุรักษ์ดิน จึงสูญเสียซัลเฟตจากการชะละลายและการกร่อนดินมาก

3) ดินเป็นด่าง เนื่องจากดินด่างมีประจุบวกที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวและฮิวมัสน้อย จึงดูดซับซัลเฟตไว้ในดินได้น้อย

เนื่องจากกำมะถันในดิน มีทั้งที่เป็นองค์ประกอบในเกลืออนินทรีย์ซึ่งอยู่ในรูปซัลเฟต กับเป็นองค์ประกอบในสารอินทรีย์ เช่น โปรตีนในอินทรียวัตถุ จึงอาจวิเคราะห์ได้ทั้ง 2 รูป สำหรับระดับที่ขาดแคลนและเพียงพอของกำมะถันในดินแต่ละรูป แสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์การประเมินระดับกำมะถันในดิน

ระดับ	SO_4-S (มก./กก.)	Organic-S (มก./กก.)
ขาดแคลน	0-6	0-10
เพียงพอ	7-12	10-20
เกินพอ	>12	>20

ที่มา: ปรับปรุงจาก Jones Jr, (2001)

3.3 บทบาทของกำมะถันต่อพืช

กำมะถันมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชใน 2 ด้านหลัก คือ (1) เป็นองค์ประกอบของโปรตีน เอนไซม์ และโคเอนไซม์ และ (2) เป็นองค์ประกอบของสารที่สำคัญอีกหลายชนิด (ยงยุทธ, 2558; Hawkesford and De Kok. 2007) ซึ่งสรุปได้ดังนี้

1) เป็นองค์ประกอบของโปรตีน เอนไซม์ และโคเอนไซม์

กำมะถันเป็นองค์ประกอบของกรดอะมิโน 2 ชนิด คือ ซีสเทอีนและเมไทโอนีน อันเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีน สำหรับซีสเทอีนซึ่งมีหมู่ซัลไฟด์ (-SH) อยู่ตรงส่วนปลายของโมเลกุล ช่วยทำให้โครงสร้างของโปรตีนส่วนหนึ่งจับโปรตีนส่วนอื่นอย่างมีเสถียรภาพ โดยสร้างพันธะไดซัลไฟด์ (-S-S-) กับหมู่ซัลไฟด์ของซีสเทอีนในส่วนนั้น การทำหน้าที่ของซีสเทอีนในลักษณะดังกล่าว ทำให้โปรตีนมีโครงสร้างซับซ้อนและเอนไซม์ทำหน้าที่ได้สมบูรณ์ นอกจากนั้นกำมะถันยังเป็นองค์ประกอบในโคเอนไซม์บางชนิดที่สำคัญต่อเมแทบอลิซึมของเซลล์

2) เป็นองค์ประกอบของสารที่สำคัญอีกหลายชนิด

สารประกอบอินทรีย์ที่สำคัญในพืชซึ่งมีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ได้แก่

(1) กลูตาไทโอน (glutathione) มีความสำคัญ 2 ประการ คือ (1) การควบคุมระบบออกซิเดชัน-รีดักชันภายในเซลล์ เนื่องจากมีได้ 2 รูป คือ กลูตาไทโอนรูปรีดิวซ์และกลูตาไทโอนรูปออกซิไดส์ ซึ่งสามารถปรับสัดส่วนของ 2 รูปนี้ให้เหมาะสมกับระดับออกซิเดชัน-รีดักชันภายในแต่ละส่วนของเซลล์ที่ต้องการ และ (2) ทำหน้าที่ร่วมกับเอสคอเบต (วิตามินซี) ในการกำจัดอนุมูลอิสระที่เกิดจากกระบวนการต่างๆ

(2) ไฟโทคีเลทิน (phytochelatin) ทำหน้าที่ลดพิษจากแคดเมียมที่เซลล์พืชดูดเข้าไป โดยสร้างพันธะเคมีกับแคดเมียม กลายเป็นสารเชิงซ้อน “แคดเมียม-ไฟโทคีเลทิน” แล้วส่งไปเก็บในแวคิวโอล ทำให้แคดเมียมไม่เป็นพิษต่อเซลล์พืช

(3) เมทาลโลไทโอเนอีน (metallothioneins) ช่วยลดพิษจากสังกะสีและทองแดง เมื่อพืชได้รับธาตุใดธาตุหนึ่งใน 2 ธาตุนี้มากเกินไป โดยทำปฏิกิริยากับสังกะสีหรือทองแดง ได้สารประกอบเชิงซ้อน แล้วส่งไปเก็บไว้ในแวคิวโอล ไม่ให้เข้ามารบกวนกระบวนการเมแทบอลิซึมของเซลล์

(4) ไฟโทโครม (phytochromes) ทำหน้าที่ควบคุมการงอกของเมล็ดพืชบางชนิดและควบคุมการออกดอกของพืชที่ไวต่อช่วงแสง

(5) ไทโอรีดอกซิน (thioredoxin) มีบทบาทในการสังเคราะห์แสงและควบคุมการงอกของเมล็ดพืชบางชนิด

(6) ซัลโฟลิพิด เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ (thylakoid membrane) ซึ่งเป็นโครงสร้างภายในคลอโรพลาสต์ของใบจึงมีบทบาทเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง

(7) สารระเหยต่างๆ ซึ่งมีในผักวงศ์กะหล่ำ เช่น อัลลิอิน (alliins) และกลูโคซิโนเลต (glucosinolates) ซึ่งเป็นกลุ่มของสารเคมีพืช (phytochemicals) ที่พืชใช้ป้องกันโรคและแมลง สำหรับกลิ่นของสารนี้ช่วยไล่แมลงศัตรูที่มากัดกินสารดังกล่าว ทำให้พืชในตระกูลกะหล่ำมีกลิ่นและรสอันเป็นลักษณะเฉพาะด้วย

3.4 อาการขาดกำมะถันของพืช

กำมะถันเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายในพืช (immobile element) อาการขาดจึงปรากฏที่ใบอ่อน พืชที่ขาดกำมะถันอาจจะเหลืองทั้งต้นหรือเหลืองเฉพาะใบอ่อน ปลายใบอ่อนสีเหลืองซีดและปลายใบแห้งตาย สำหรับข้าวจะมีต้นเตี้ยแตกกอน้อยและรวงสั้น (Dobermann and Fairhurst, 2000; Fairhurst *et al*., 2007)

เนื่องจากกำมะถันเป็นองค์ประกอบของโปรตีน การขาดกำมะถันทำให้การสังเคราะห์โปรตีนถูกยับยั้ง จึงขาดแคลนโปรตีนที่จะนำไปใช้เชื่อมโยงกับโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ในโครงสร้างของคลอโรพลาส ขณะเดียวกันปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบก็ลดลง จึงทำให้ใบและต้นเหลืองซีด

ตอนที่ 3 ยิปซัมเป็นสารปรับปรุงดิน

การใส่ยิปซัมลงไปในดินจะช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมี สมบัติทางฟิสิกส์ โดยแคลเซียมและซัลเฟตอันเป็นองค์ประกอบของยิปซัมมีบทบาทสำคัญที่ทำให้สมบัติของดินบางประการเปลี่ยนแปลง ดังข้อสรุปในตารางที่ 3

1. ช่วยปรับปรุงสมบัติทางทางเคมีของดิน

ยิปซัมช่วยปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน 2 ประการ คือ (1) ลดสภาพกรดและลดพิษของอะลูมินัมในดินกรด และ (2) ช่วยปรับปรุงดินโซดิก (Brady and Weil, 2007; Havlin *et al*., 2005; Sparks, 2003)

1.1 ยิปซัมช่วยลดสภาพกรดและลดพิษของอะลูมินัมในดินกรด

ก่อนจะกล่าวถึงบทบาทของยิปซัมในการลดสภาพกรดและลดพิษของอะลูมินัมในดินกรด จะอธิบายผลกระทบของสภาพกรดในดินต่อพืชและสารที่ใช้ปรับปรุงดินกรด แล้วจึงจะอธิบายเรื่องผลการใช้ยิปซัมในดินกรด

1.1.1 ผลกระทบของสภาพกรดในดินต่อพืช

ผลกระทบของสภาพกรดต่อพืชมี 2 ด้าน (Havlin *et al*., 2005; Osman, 2013) คือ

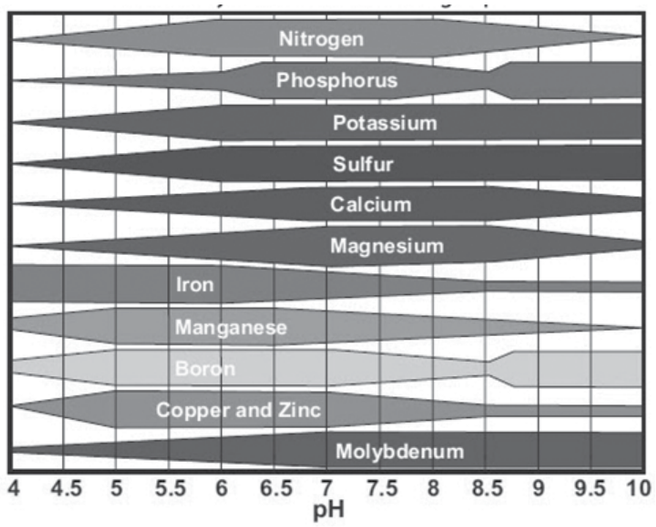
1) ผลต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน สภาพกรดในดินมีผลกระทบต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดินดังภาพที่ 3 คือ (1) ความเป็นประโยชน์ของธาตุหลักลดลง และ (2) ความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุ (ยกเว้นโมลิบดีนัม) เพิ่มขึ้น

2) พิษของอะลูมินัมต่อพืช ในดินกรดจะมีอะลูมินัมในสารละลายดินสูงกว่าดินที่เป็นกลาง หากสารละลายดินมี Al^{3+} 9 มิลลิกรัมต่อลิตร ก็เริ่มเป็นพิษต่อข้าวโพดแล้ว หากพืชสะสมอะลูมินัมในเนื้อเยื่อมากกว่า 13 ไมโครกรัม Al ต่อเนื้อเยื่อพืช 1 กรัม การเจริญเติบโตของราก

ตารางที่ 3 ผลกระทบของการใส่ยิปซัมในดินต่อสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดิน ซึ่งจะส่งผลต่อการกระจายของรากในดิน การกร่อนดิน การสูญเสียธาตุอาหารจากดิน ประสิทธิภาพการใช้น้ำ และธาตุอาหารพืช และผลผลิตพืช

กลไก	ผลที่เกิดขึ้น
เพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ซึ่งเป็นแคตไอออนที่มีประจุบวกสอง (divalent cation) ในสารละลายดิน	ช่วยลดความหนาของ double layer ที่ผิวอนุภาคแร่ดินเหนียว จึงส่งเสริมให้เกิดโครงสร้างดิน เพิ่มการระบายน้ำ (drainage) และลดการเกิดแผ่นแข็งปิดผิวดิน (crusting)
	ลดแอกติวิตี (activity) ของ Al^{3+} จึงลดพิษของธาตุนี้
เพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในสารละลายดิน	เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกับโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Na) ในดินโซดิก (sodic soils) ทำให้ดินมีโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ลดลง ดินจึงไม่แน่นและซึมน้ำได้ดีขึ้น
	เพิ่มแคลเซียมซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช
	เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกับโพแทสเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ทำให้สองธาตุนี้ถูกชะละลายออกไปจากดิน
	เกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนกับอะลูมินัมและโปรตอนที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable Al, exchangeable proton) ในดินกรดให้มาอยู่ในสารละลายดิน ทำให้พีเอชของดินลงเล็กน้อยชั่วคราว
	เพิ่มความอิ่มตัวด้วยเบส (basic saturation) และลดความอิ่มตัวด้วยกรด (acid saturation) ในดิน
	ลดการละลายของฟอสฟอรัส (phosphorus solubility) ในดิน เนื่องจากทำให้เกิดแคลเซียมฟอสเฟตแล้วตกตะกอน
เพิ่มความเข้มข้นของซัลเฟต (SO_4^{2-}) ในสารละลายดิน	เพิ่มกำมะถันซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช
	ทำปฏิกิริยากับ Al^{3+} และ Mn^{2+} ลดสภาพพิษของไอออนทั้งสองต่อพืช
	ในดินกรด ซัลเฟตไอออนช่วยให้แคลเซียมไอออนและแคตไอออนอื่นๆ เคลื่อนย้ายลงไปในชั้นดินล่างได้ดีขึ้น
	เกิดปฏิกิริยา ligand exchange กับหมู่ไฮดรอกไซด์หมู่นอกสุด (terminal hydroxide) ของแร่ ซึ่งมีจำนวนประจุที่ผันแปรได้ (variable charge) ทำให้พีเอชของดินเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

ที่มา: Zoca and Penn (2017)



ภาพที่ 3 ผลของ pH ดินต่อความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน ตัวเลขด้านล่างคือ pH ของดิน แถบของแต่ละธาตุแคบหรือกว้างที่ pH ค่าใด แสดงว่าความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารนั้นต่ำหรือสูงที่ pH ช่วงนั้น

ที่มา: Havlin *et al*., 2005

จะลดลง อาการพิษจากอะลูมินัมเกิดจากไอออนของธาตุนี้ที่เข้าไปทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์ในเซลล์ นอกจากนี้ยังรบกวนกลไกการดูดแคลเซียมและแมกนีเซียมของเซลล์รากอีกด้วย (Ma *et al*., 2001)

1.1.2 สารที่ใช้ปรับปรุงดินกรด

สารที่ใช้ในการปรับปรุงดินกรดมี 2 อย่าง คือ ปูน (lime) และยิปซัม ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการใช้ต่างกัน (Brady and Weil, 2007) ดังนี้

1) ผลการใช้ปูนในดินกรด การใส่ปูน ($CaCO_3$) ในดินกรดมีผล 2 ประการ คือ (1) หากใส่ตามความต้องการปูนของดิน (lime requirement) ทำให้ pH ของดินสูงขึ้นถึง 6.5 ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสม ขณะเดียวกันก็ลดพิษของอะลูมินัมไอออนในดินด้วย และ (2) เพิ่มแคลเซียม (และแมกนีเซียม - หากใช้โดโลไมต์) ในดิน พืชจึงมีแคลเซียมเพียงพอกับความต้องการของพืช แต่การใช้ปูนมีข้อด้อย 2 ประการ คือ (1) ปูนละลายน้ำยาก (สภาพละลายน้ำได้ 0.013 กรัมต่อลิตร ที่ 25 องศาเซลเซียส) และไม่เคลื่อนย้ายลงไปในดินล่าง ผลของปูนต่อดินกรดจึงจำกัดเฉพาะดินบนซึ่งเป็นกรดหรือเฉพาะชั้นดินที่สามารถไถพรวนและคลุกเคล้าปูนลงไปถึง และ (2) เนื่องจากในสภาพดินที่เป็นกลาง ปูนจะไม่ละลาย ดังนั้นหากชั้นดินบนเป็นกลางแต่ชั้นดินล่างเป็นกรด การใส่ปูนที่ดินบน ก็จะไม่เกิดประโยชน์ในการปรับปรุงดินกรด ซึ่งอยู่ชั้นล่าง เนื่องจากปูนไม่ละลาย และไม่เคลื่อนย้ายลงสู่ดินล่าง ดังนั้นการหว่านปูนบนผิวดินโดยไม่มีการพรวนกลบ พิษจากอะลูมินัมในดินล่างต่อพืชก็ยังเกิดขึ้นต่อไป เว้นแต่จะมีการไถพรวนลึกเป็นพิเศษ เพื่อคลุกเคล้าปูนลงไปจนถึงชั้นดินล่างที่เป็นกรด

การที่แคลเซียมจากปูนเคลื่อนย้ายในดินได้น้อย เนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้ เมื่อปูนละลายและแตกตัวให้แคลเซียมไอออนกับคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) หรือไฮดรอกซิลไอออน (OH^-) แล้วแต่ชนิดของปูนแล้ว แอนไอออนดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับไอออนต่อไปนี้ คือ (1) ทำปฏิกิริยากับ H^+ ได้ H_2CO_3 ซึ่งต่อมาแตกตัวได้ CO_2+H_2O หรือ (2) ทำปฏิกิริยากับ Al^{3+} ได้เกลือที่ละลายยาก แล้วตกตะกอน

สำหรับแคลเซียมไอออนที่ได้จากการแตกตัวของปูนก็เคลื่อนย้ายได้ยาก เพราะ (1) ถูกดูดซับกับผิวแร่ดินเหนียวหรือฮิวมัส เป็นแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ และ (2) หากแคลเซียมไอออนจะเคลื่อนย้ายลงสู่ดินล่าง ก็ต้องการแอนไอออนเป็นคู่ (cation-anion pair) เพื่อให้เกิดสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า (electroneutallity) แต่เมื่อขาดแอนไอออนคู่ แคลเซียมไอออนจึงเคลื่อนย้ายลงสู่ดินล่างไม่ได้

2) ผลการใช้ยิปซัมในดินกรด เนื่องจากยิปซัมละลายได้ดีกว่าปูนและไอออนที่แตกตัวจากการละลายสามารถเคลื่อนย้ายลงไปในดินล่างได้ จึงช่วยแก้ไขดินล่างที่เป็นกรด ผลการใส่ยิปซัมในดินกรดมี 2 ประการ คือ (1) ลดความเป็นพิษของอะลูมินัม และ (2) ผลด้าน pH ของดิน (Zoca and Penn, 2017)

(1) ลดความเป็นพิษของอะลูมินัม เมื่อยิปซัมแตกตัวได้แคลเซียมไอออนและซัลเฟตไอออนแล้ว ไอออนทั้งสองนี้สามารถเคลื่อนย้ายจากดินบนสู่ดินล่างได้ดี จึงช่วยลดพิษของอะลูมินัมในดินล่างได้ แม้ว่าจะหว่านยิปซัมบนผิวดินโดยไม่ได้พรวนกลบก็ตาม โดยซัลเฟตไอออนมีบทบาทในการลดพิษของอะลูมินัม 2 วิธี คือ วิธีแรกทำปฏิกิริยากับอะลูมินัมไอออนได้ $AlSO_4^+$ ซึ่งไม่เป็นพิษต่อพืช และ วิธีที่ 2 ทำปฏิกิริยากับอะลูมินัมไอออนได้ $Al_2(SO_4)_3$ ซึ่งละลายยากและตกตะกอน

(2) ผลด้าน pH ของดิน หลังการใส่ยิปซัม เนื่องจากยิปซัมมิใช่สารที่ทำให้กรดเป็นกลาง (acid-neutralizing substance) และมิได้เป็นสารก่อกรด (acid-forming substance) โดยทั่วไป การใส่ยิปซัมจึงไม่มีผลต่อสภาพกรด-ด่างของดิน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มซัลเฟตในดินอาจมีผลให้พีเอชของดินลดลงหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดแร่ที่เป็นองค์ประกอบของดิน ความจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออน (cation exchange capacity, CEC) ของดิน และแอนไอออนชนิดอื่นที่มีในดิน ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการและภาคสนาม พบว่าการใส่ยิปซัมในดิน อาจช่วยเพิ่ม หรือลด หรือไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอชของดินล่างเลยก็ได้ หากมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชก็พบว่าเพิ่มหรือลดเพียง 0.2-0.3 หน่วยพีเอช และพบจากวิธีการวัดค่าด้วยการผสมดินกับน้ำเท่านั้น ค่าพีเอชที่เพิ่มหรือลดขึ้นอยู่กับปฏิกิริยาเคมีในดินที่ต่างกัน คือ

(ก) หากแคลเซียมไอออนเข้าแทนที่อะลูมินัมหรือไฮโดรเจนไอออนที่แลกเปลี่ยนได้ จะทำให้พีเอชของสารละลายดินลดลง กรณีนี้เกิดกับดินที่มีอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้สูง โดยอะลูมินัมที่ออกมาในสารละลายดิน แล้วถูกไฮโดรไลส์และปลดปล่อยไฮโดรเจนไอออน จึงเป็นเหตุให้พีเอชของสารละลายดินลดลง

(ข) ถ้าเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนแอนไอออน โดยซัลเฟตไอออนเข้าแทนที่ไฮดรอกซิลไอออนให้ออกมาในสารละลายดิน ย่อมทำให้สารละลายดินมีพีเอชสูงขึ้น กรณีนี้

เกิดกับดินที่มีอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ นอกจากนี้ยังพบในดินออกซิโซล (Oxisol) ซึ่งมี sesquioxide (Al_2O_3, $Al(OH)_3$, Fe_2O_3, $Fe(OH)_3$) เนื่องจากกิจกรรมของซัลเฟตไอออน กล่าวคือ ซัลเฟตไอออนเข้าทำปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนลิแกนด์ (ligand exchange) กับหมู่ไฮดรอกไซด์ส่วนปลาย (terminal hydroxide) ที่โมเลกุลของเหล็กและอลูมินัมไฮดรอกไซด์ ให้ออกมาในสารละลายดิน บทบาทของซัลเฟตไอออนดังกล่าวเกิดได้ในดินที่พีเอชต่ำหรือดินกรดจัด

1.2 ยิปซัมช่วยปรับปรุงดินโซดิกและดินเค็มโซดิก

เรื่องนี้เริ่มจากการอธิบายสมบัติของดินโซดิกและดินเค็มโซดิกแล้วกล่าวถึงการใช้ยิปซัมในการปรับปรุงดินทั้ง 2 ประเภทนี้

1.2.1 สมบัติของดินโซดิกและดินเค็มโซดิก

ดินโซดิกและดินเค็มโซดิกมีสมบัติที่สำคัญดังนี้ (Brady and Weil, 2007)

1) ดินโซดิก คือ ดินที่มีเกลือซึ่งละลายง่ายอยู่น้อย จึงมิใช่ดินเค็ม แต่มีปริมาณโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้สูง จนทำให้ (1) การเจริญเติบโตของพืชทั่วไปลดลง และ (2) โครงสร้างดินเลว ซึมน้ำยาก ดินจัดว่าเป็นดินโซดิก เมื่อสารละลายที่สกัดจากดินซึ่งอิ่มตัวด้วยน้ำ มี EC_e ต่ำกว่า 4 dS/m และ SAR ตั้งแต่ 13 ขึ้นไป เนื่องจากดินโซดิกมี pH สูงกว่า 8.5 การปรับปรุงดินโซดิกทำได้โดยการใส่ยิปซัม เพื่อลดปริมาณโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ให้ลดลงสู่ระดับปรกติ

2) ดินเค็มโซดิก คือ ดินซึ่งมีเกลือที่ละลายง่าย และโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้สูง จนทำให้การเจริญเติบโตของพืชทั่วไปลดลงมาก ดินดังกล่าวมีค่าการนำไฟฟ้าตั้งแต่ 4 dS/mขึ้นไป และ SAR ตั้งแต่ 13 ขึ้นไป ดินเค็มโซดิกมีปัญหาสำคัญคือพืชอาจเป็นพิษจากโซเดียม การปรับปรุงดินเค็มโซดิกทำได้โดย (1) การชะล้างเกลือที่ละลายได้ และ (2) การใส่ยิปซัมเพื่อลดปริมาณโซเดียมแลกเปลี่ยนได้ลงสู่ระดับปรกติ

1.2.2 การใช้ยิปซัมในดินโซดิกและดินเค็มโซดิก

เนื่องจากดินโซดิกและดินเค็มโซดิกมีโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้สูง จึงต้องใส่ยิปซัมเพื่อให้แคลเซียมทำหน้าที่ไล่โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ออกไป แล้วชะโซเดียมส่วนเกินนี้ออกไปจากดิน (Brady and Weil, 2007)

ยิปซัมมีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ ซึ่งเมื่อใส่ในดินและแตกตัวแล้ว แคลเซียมไอออนจะเข้าแทนที่โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ ถ้ากำหนด C เป็นสัญลักษณ์แทนอนุภาคดินเหนียวหรือฮิวมัสในดิน อาจเขียนสมการแสดงปฏิกิริยาระหว่างยิปซัมกับดินโซดิก โดยแคลเซียม 1 ไอออน สามารถแทนที่โซเดียม 2 ไอออน ดังนี้

$$2NaC + CaSO_4 \longrightarrow CaC + Na_2SO_4$$

เมื่อปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนสิ้นสุดลง ดินจะมีแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้เพิ่มขึ้น ส่วนโซเดียมซัลเฟตอันเป็นผลจากปฏิกิริยา เป็นเกลือที่ละลายง่าย จึงถูกชะละลายออกไป

1.2.3 การใส่ยิปซัมป้องกันการเกิดสภาพโซดิกของดิน

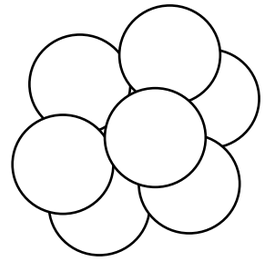
การเกิดสภาพโซดิก (sodicity) ของดิน หมายถึง การเพิ่มขึ้นของโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน เนื่องจากน้ำชลประทานมีคุณภาพต่ำ โดยน้ำมีค่าการนำไฟฟ้าสูงกว่า 1 dS/m และสัดส่วนการดูดซับโซเดียม (sodium adsorption ratio, SAR) สูงกว่า 10 ซึ่งถือว่าเสี่ยงต่อการเกิดสภาพโซดิก (sodicity hazards) หากใช้น้ำชลประทานที่มีคุณภาพต่ำดังกล่าวอย่างต่อเนื่อง จะทำให้โซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ของดินเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนดินกลายเป็นดินเค็มโซดิกและดินโซดิกในที่สุด วิธีป้องกันที่ดีที่สุดคือใส่ยิปซัมลงไปในน้ำชลประทาน เพื่อลดค่า SAR ของน้ำให้ต่ำกว่า 10 หรือใส่ลงไปในดินเพื่อลดค่า SAR ของดินให้ต่ำกว่า 10 ก็ได้ (Chhabra, 1996)

2. ช่วยปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

สมบัติทางฟิสิกส์ดิน (soil physical properties) หมายถึง สมบัติของดินที่เห็นได้และสัมผัสได้ เช่น เนื้อดินและโครงสร้างดิน รวมทั้งสมบัติอื่นๆ ที่เป็นผลต่อเนื่องจากสมบัติพื้นฐาน 2 ประการข้างต้น เช่น ความหนาแน่นรวม ความพรุน สภาพให้ซึมน้ำได้ การถ่ายเทอากาศ และความสามารถในการอุ้มน้ำ แคลเซียมมีบทบาทในการเกิดและรักษาเสถียรภาพของโครงสร้างดิน รวมทั้งสมบัติอื่นที่เชื่อมโยงกับโครงสร้างดินด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544; Buckley and Wolkowski, 2014)

2.1 บทบาทของแคลเซียมในการเกิดโครงสร้างดิน

โครงสร้างดิน (soil structure) คือรูปแบบของการเกาะยึดและการเรียงตัวของอนุภาคเดี่ยว (primary particles-อนุภาคทราย ทรายแป้งและดินเหนียว) เป็นกลุ่ม (aggregates) ดังโมเดลในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การรวมกลุ่มของอนุภาคเดี่ยวหลายอนุภาคได้กลุ่มของอนุภาค 1 กลุ่ม

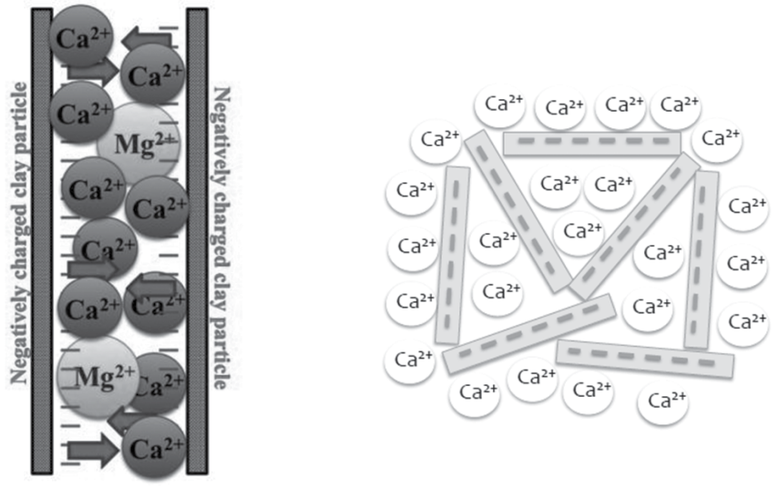
การเกิดโครงสร้างดิน ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา 2544) คือ

1) การเกาะกลุ่มของอนุภาคเดี่ยวหลายๆ อนุภาคเป็นกลุ่มอย่างหลวมๆ ซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ

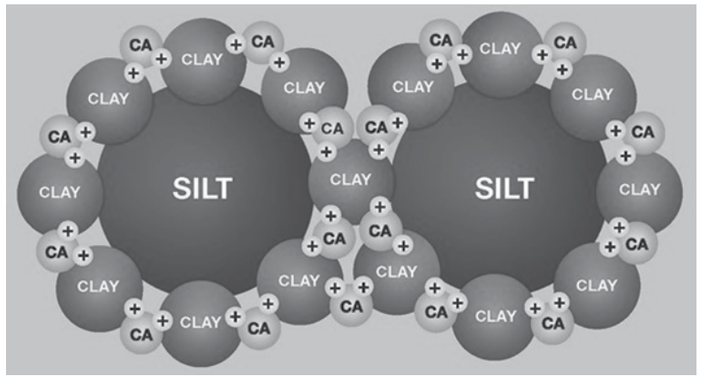
(1) การทำให้อนุภาคดินเบียดชิดกัน เช่น การที่ดินเปียกและแห้งสลับกัน และการผลักดันอนุภาครอบผิวรากที่เจริญเติบโต

(2) การยึดอนุภาคดินที่อยู่ใกล้กัน โดยเกิดจากการเกี่ยวพันของกระจุกใยรา (mycelium) การเชื่อมของสารเหนียวจากแบคทีเรียและแคตไอออนที่มีวาเล็นซีมากกว่าหนึ่ง เช่น แคลเซียมและแมกนีเซียมไอออน ยึดอนุภาคดินเหนียวที่อยู่ใกล้กันไว้เป็นกลุ่ม (ภาพที่ 5)

2) การเชื่อมยึดกลุ่มของอนุภาคดินที่เกาะอย่างหลวมๆ ให้เป็นเม็ดดินที่ถาวร เกิดจากการเชื่อมด้วยพันธะเคมีระหว่างฮิวมัส (humus) กับอนุภาคดิน การเชื่อมด้วยสารประกอบเหล็กและอะลูมินัมออกไซด์ การเชื่อมระหว่างแร่ดินเหนียวกับอนุภาคทรายและทรายแป้ง (ภาพที่ 6)



ภาพที่ 5 แคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ที่อยู่ตรงกลางระหว่างอนุภาคดินเหนียว 2 อนุภาค ได้ใช้ประจุบวกอันแรกจับกับประจุลบ (-) ของอนุภาคดินเหนียวชิ้นหนึ่ง และประจุบวกที่เหลือจับกับประจุลบของอนุภาคดินเหนียวอีกชิ้นหนึ่ง (ภาพซ้าย) ดังนี้แคลเซียมไอออนจำนวนมากจึงทำให้อนุภาคแร่ดินเหนียวรวมกลุ่มได้ (ภาพขวา)



ภาพที่ 6 การเชื่อมยึดอนุภาคดินเหนียวด้วยแคลเซียม และกลุ่มอนุภาคดินเหนียวยึดอนุภาคทรายแป้ง (silt) หรืออนุภาคทราย (sand) ให้รวมอยู่ในกลุ่มได้ด้วย

ต่อจากนั้นเม็ดดินเล็กๆ จะรวมกลุ่มกันเป็นเม็ดดินขนาดใหญ่ขึ้น จนกลายเป็นก้อนดิน ในที่สุด เม็ดดิน (soil aggregate, ped) คือ มวลดินที่เกิดการจับตัวกันตามธรรมชาติของอนุภาคดิน เป็นหน่วยโครงสร้างดิน (structural unit) ซึ่งมีรูปร่างได้หลายแบบ เช่น แบบก้อนเหลี่ยม แบบทรงกลม เป็นต้น เห็นได้ว่าแคลเซียมมีบทบาทสำคัญในการเกิดหน่วยพื้นฐานของโครงสร้างดิน ซึ่งจะพัฒนาต่อไปเป็นโครงสร้างดินที่มีเสถียรภาพ เม็ดดินที่มีเสถียรภาพ (stable soil aggregate) คือเม็ดดินที่แข็งแรงพอ ไม่ถูกทำให้แตกกระจายโดยแรงบดจากการไถพรวน แรงกระแทกของหยดน้ำฝนหรือลม โครงสร้างดินลักษณะนี้จึงทนต่อการกร่อนดิน (soil erosion) ที่เกิดจากน้ำได้ดี

2.2 ผลของโครงสร้างดินที่ดีต่อการเจริญเติบโตของพืช

การเกิดโครงสร้างดินมีผลต่อสมบัติทางฟิสิกส์ด้านอื่นๆ ของดินดังนี้ (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2544)

2.2.1 ช่องว่างในดิน (soil pores)

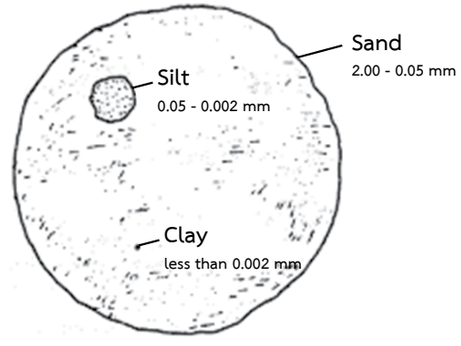
เนื่องจากอนุภาคดินมี 3 ขนาด คือ ทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay) ดังภาพที่ 7 ในดินที่มีเนื้อดินต่างกันจะมีสัดส่วนของทราย ทรายแป้งและดินเหนียวต่างกัน ช่องว่างระหว่างอนุภาคทรายจะใหญ่กว่าช่องว่างระหว่างอนุภาคทรายแป้งและระหว่างอนุภาคดินเหนียว แต่ก็ถือว่าช่องระหว่างอนุภาคต่างๆ เป็นช่องขนาดเล็ก เมื่อมีโครงสร้างดินตามธรรมชาติเกิดเม็ดดินและก้อนดิน ทำให้มีช่องขนาดกลางและขนาดใหญ่ระหว่างเม็ดดิน อาจจำแนกช่องในดินได้เป็น 3 ขนาด คือ

(1) ช่องขนาดใหญ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 100 ไมโครเมตร ทำหน้าที่ระบายน้ำ (drainage) เมื่อดินได้รับน้ำมากเกินไป เมื่อน้ำระบายออกไปแล้ว ช่องว่างขนาดใหญ่จะทำหน้าที่เป็นทางผ่านของอากาศและเก็บอากาศไว้ ดังนั้นช่องว่างขนาดใหญ่จึงทำหน้าที่ระบายน้ำและถ่ายเทอากาศ

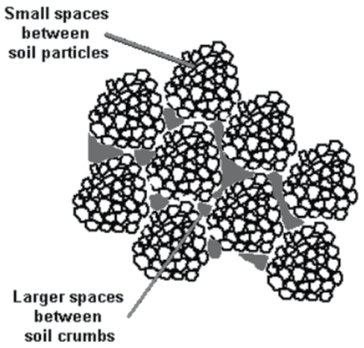
(2) ช่องขนาดกลาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50-100 ไมโครเมตร ทำหน้าที่ระบายน้ำและถ่ายเทอากาศต่อเนื่องจากช่องขนาดใหญ่

(3) ช่องขนาดเล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 50 ไมโครเมตร ทำหน้าที่บรรจุน้ำไว้ให้พืชใช้ ซึ่งพืชสามารถดูดน้ำในช่องขนาดเล็กไปใช้ประโยชน์ได้บางส่วน เนื่องจากน้ำส่วนหนึ่งถูกอนุภาคดินดูดยึดไว้อย่างเหนียวแน่นจนพืชดูดไปใช้ไม่ได้ จำเป็นต้องให้น้ำเพื่อเพิ่มน้ำในช่องขนาดเล็กซึ่งเป็นความชื้นที่เป็นประโยชน์ (available water) มีเพียงพอต่อความต้องการของพืช

สรุปได้ว่าดินที่มีโครงสร้างจะมีช่องในดิน 3 แบบ คือ ช่องขนาดเล็กระหว่างอนุภาคดิน ช่องขนาดกลาง และขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดิน (ดังภาพที่ 8) เม็ดดินที่มีลักษณะดี เรียก “เม็ดดิน



ภาพที่ 7 ขนาดของอนุภาคทราย (sand) ทรายแป้ง (silt) และดินเหนียว (clay)



ภาพที่ 8 ดินที่มีโครงสร้างจะมีช่องในดิน 3 แบบ คือ ช่องขนาดเล็กระหว่างอนุภาคดิน ช่องขนาดกลางและขนาดใหญ่ระหว่างก้อนดิน

กลมพรุน (crumb)" เป็นเม็ดดินที่เกิดจากอนุภาคเดี่ยว มีลักษณะกลมพรุน นอกจากนี้ช่องว่างขนาดใหญ่และขนาดกลางในชั้นดินต้องมีความต่อเนื่อง (continuity) จากชั้นดินบน (surface soil) จนถึงดินล่าง (subsoil) เพื่อให้เอื้อต่อการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศ

2.2.2 การระบายน้ำ (drainage) และการถ่ายเทอากาศ (aeration)

พืชบกจะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อรากอยู่ในดินที่มีน้ำที่เป็นประโยชน์เพียงพอสำหรับหล่อเลี้ยงพืชทั้งต้น มีออกซิเจนเพียงพอสำหรับการหายใจของราก และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำไม่มีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของรากและสิ่งมีชีวิตอื่นในดิน ซึ่งสภาพดังกล่าวเกิดขึ้นได้เมื่อดินมีการระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศดี

1) การระบายน้ำ หมายถึง การชักนำให้น้ำที่ท่วมผิวดินหรือขังในช่องขนาดใหญ่และช่องขนาดกลาง อันเป็นน้ำส่วนเกินออกไป เปิดโอกาสให้อากาศจากบรรยากาศเคลื่อนที่เข้าไปในช่องขนาดใหญ่และขนาดกลาง

2) การถ่ายเทอากาศ คือ กระบวนการที่อากาศในดินถูกแทนที่โดยอากาศจากบรรยากาศ กล่าวคือ เมื่อมีการระบายน้ำส่วนเกินออกจากช่องขนาดใหญ่และขนาดกลางในดินหลังฝนตกหรือหลังจากการให้น้ำชลประทาน จะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

(1) อากาศในบรรยากาศเหนือดินจะเคลื่อนย้ายลงไปในช่องเหล่านั้น

(2) กิจกรรมการหายใจของรากพืชและจุลินทรีย์ดิน ทำให้ออกซิเจนในดินลดลงและคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

(3) กระบวนการถ่ายเทอากาศของดินจะทำให้ออกซิเจนในบรรยากาศแพร่ลงไปในดิน และคาร์บอนไดออกไซด์แพร่ขึ้นมาสู่บรรยากาศ เพื่ อรักษาดุลยภาพของแก๊สทั้งสองนี้ในดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของรากพืชและจุลินทรีย์ดิน

2.2.3 บทบาทของโครงสร้างดิน

ดินที่มีโครงสร้างจะมีช่องว่างขนาดใหญ่และขนาดกลางเพียงพอและช่องทั้งสองขนาดในชั้นดิน ต้องมีความต่อเนื่องจากชั้นดินบนจนถึงดินล่าง เพื่อให้เอื้อต่อการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศ ดังนั้นการที่ดินมีสมบัติต่อไปนี้ คือ (1) ระดับความอุดมสมบูรณ์ของดินสูงโดยมีธาตุอาหารครบทุกธาตุ แต่ละธาตุเพียงพอและสมดุลกันตามความต้องการของพืช (2) ดินมีโครงสร้างดี และ (3) มีการชลประทานเหมาะสม จะช่วยให้พืชเจริญเติบโตดีและให้ผลผลิตสูงดังนี้

1) หากโครงสร้างของดินมีเสถียรภาพ เม็ดดินไม่แตกสลายง่าย จากแรงกระแทกของน้ำ ประกอบกับมีการอนุรักษ์ดินเหมาะสม จะไม่เกิดแผ่นแข็งปิดผิวดิน (surface crust) เมล็ดพืชที่งอก จะแทงทะลุผิวดินขึ้นมาง่าย สามารถควบคุมจำนวนต้นต่อพื้นที่ได้ตามเป้าหมาย

2) โครงสร้างดินในชั้นดินบนและชั้นดินล่างดี ช่องขนาดต่างๆ ในดินมีลักษณะสมดุล และช่องขนาดใหญ่และขนาดกลางต่อเนื่อง ช่วยให้ดินมีระดับความชื้นที่เป็นประโยชน์เหมาะสมการแทรกซึมและซาบซึมของน้ำลงสู่ดินล่างได้ลึก การกระจายความชื้นในชั้นดินดีมาก ส่งเสริมการพัฒนาของระบบราก ทั้งแนวระดับและแนวดิ่ง รากพืชใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารและน้ำที่เป็นประโยชน์ได้เต็มที่ รวมทั้งมีออกซิเจนในดินล่างเพียงพอ พืชจึงเจริญเติบโตดีและให้ผลผลิตสูง

2.3 ยิปซัมกับสมบัติด้านอื่นๆ ของดิน

ข้อที่ 2.2 กล่าวถึงบทบาทของยิปซัมในการเกิดโครงสร้างดิน เนื่องจากแคลเซียมไอออนส่งเสริมการรวมกลุ่ม (flocculation) ของอนุภาคดิน ช่วยให้เม็ดดินมีเสถียรภาพ (aggregate stability) และส่งเสริมการแทรกซึมน้ำ (water infiltration) ลงสู่ดิน ช่วยให้รากพืชไชชอนลงสู่ชั้นดินล่างซึ่งเคยมีชั้นดาน (hardpans) ได้ดีขึ้น ประสิทธิภาพการใช้น้ำจากดินจึงสูงขึ้นด้วย ผลของการใส่ยิปซัมอัตรา 180-350 กก. ต่อไร่ เกิดผลทางตรงและทางอ้อม ผลของยิปซัมทางตรงคือช่วยให้เกิดเม็ดดินในชั้นดินล่าง ส่วนผลทางอ้อมคือส่งเสริมการเจริญเติบโตและไชชอนของราก ซึ่งช่วยให้ดินล่างมีโครงสร้างมากขึ้น การตอบสนองเชิงบวกต่อการใส่ยิปซัมจะมีมากในดินโซดิก (sodic soil) และดินที่มีแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ (Truman *et al*., 2010; Buckley and Wolkowski, 2014)

บทบาทของยิปซัมในการส่งเสริมโครงสร้างของดินบนและป้องกันการเกิดแผ่นแข็งปิดผิวดิน (surface crust) ช่วยให้การแทรกซึมของน้ำลงสู่ดิน (water infiltration) ดีขึ้น สภาพผิวดินดังกล่าวช่วยให้เมล็ดพืชที่งอกสามารถแทงทะลุผิวดินง่ายและต้นอ่อนตั้งตัวเร็ว ผลระยะยาวประมาณ 50 เดือนหลังจากการใส่ยิปซัมในดิน พบว่าในดินบนระดับ 0-7.5 ซม. ช่องขนาดใหญ่ลดลงและเพิ่มช่องขนาดกลางและเล็กมากขึ้น ส่วนระดับ 7.5-15 ซม. ความพรุน (porosity) สูงขึ้น และความหนาแน่นรวม (bulk density) ลดลง (Muller *et al*., 2012)

ตอนที่ 4 การใช้ยิปซัมกับพืชชนิดต่างๆ

1. คำนำ

การใส่ยิปซัมลงไปในดินมีวัตถุประสงค์ 3 ประการ คือ (1) เพิ่มแคลเซียมและกำมะถันลงไปในดิน เพื่อให้ดินมีธาตุอาหารทั้งสองนี้เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช และ (2) ปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน เช่น ลดปริมาณอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินล่างของดินกรด และลดโซเดียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินโซดิกและดินเค็มโซดิก และ (3) ช่วยให้ดินมีโครงสร้างดีขึ้น เพิ่มการซึมน้ำลงไปในดินและลดการกร่อนดิน

ผลการตอบสนองของพืชต่อการใส่ยิปซัมในดิน มักใช้เวลาอย่างน้อย 1 ปีหลังจากการใส่

เนื่องจากต้องใช้เวลาระยะหนึ่งสำหรับการละลายของยิปซัมและเคลื่อนย้ายลงไปยังดินล่าง จนมีผลให้สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดินล่างดีขึ้น (Sumner, 1993)

ในบางกรณีไม่พบการตอบสนองต่อการใช้ยิปซัมในข้าวสาลี จากการเปรียบเทียบการใช้ 4 อัตรา คือ 0, 358, 1792, 3584 กก. ต่อไร่ ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงการปลูกพืชนั้นมีฝนตกเพียง 110 มม. ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของพืช และไม่เพียงพอที่จะละลายแล้วชะให้แคลเซียมและซัลเฟตไอออนเคลื่อนย้ายลงไปยังชั้นดินล่าง (DeSutter *et al*., 2014)

2. การใช้ยิปซัมในไร่อ้อย

พื้นที่ในประเทศบราซิลประมาณ 70% เป็นดินกรด และอ้อยส่วนใหญ่ปลูกในพื้นที่ซึ่งดินเป็นกรด ทำให้การเจริญเติบโตของรากไม่ดีเท่าที่ควร เนื่องจากดินมีอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้สูง และความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารหลายธาตุต่ำ จึงมีการวิจัยเพื่อหาอัตราการใช้ปูนและยิปซัมสำหรับแก้ปัญหาดังกล่าว การใช้ปูนมีวัตถุประสงค์ในการเพิ่มพีเอช เสริมธาตุแคลเซียมและแมกนีเซียม แต่เนื่องจากปูนเคลื่อนย้ายในดินยาก จึงช่วยยกระดับพีเอช เพิ่มแคลเซียมและแมกนีเซียมเฉพาะดินบนเท่านั้น อย่างไรก็ตามอ้อยเป็นพืชที่ทนต่อสภาพกรดและอะลูมินัมได้พอประมาณ ดังนั้นอ้อยจึงตอบสนองต่อการใช้ปูนในดินเพียงเล็กน้อย เมื่อใส่ปูนในดินที่มีความอิ่มตัวด้วยเบส (base saturation) เกิน 25% และพีเอชดิน 4.5 (วัดในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์) ต่อมามีการใส่ยิปซัมในไร่อ้อยของบราซิลมากขึ้นเพื่อเพิ่มปริมาณแคลเซียมในดินล่าง (20-60 ซม.) และลดอะลูมินัมในสารละลายดิน อันเป็นการปรับสภาพแวดล้อมทางเคมีในดินให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของรากอ้อย (Cantarella and Rossetto, 2014)

ในหลายประเทศที่มีการปลูกอ้อยในพื้นที่ดินกรด ก็มีการวิจัยเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวเช่นเดียวกัน ผลการวิจัยการใช้ยิปซัมในการปลูกอ้อยมีดังนี้

1) การทดลองในดินกรดจัดที่บราซิล ซึ่งดินบนมีพีเอช 4.8 ความอิ่มตัวด้วยด่าง 46.1% ดินล่างมีพีเอช 4.7 ความอิ่มตัวด้วยด่าง 37.6% พบว่าการใช้ยิปซัมอัตรา 272 กก. ต่อไร่ ช่วยเพิ่มผลผลิตอ้อยตอ (Rossato *et al*., 2017)

2) การทดลองใช้ยิปซัม (อัตรา 0, 224, 448, 896 กก. ต่อไร่) ร่วมกับปูน (อัตราไร่ละ 160, 320 กก. ต่อไร่) ในไร่อ้อยของบราซิลซึ่งเป็นดินกรด พบว่าการใช้ยิปซัมอัตรา 224 กก. ต่อไร่อย่างเดียว หรือใช้ร่วมกับปูนอัตราไร่ละ 160 กก. ต่อไร่ ช่วยเพิ่มผลผลิตอ้อยและรากอ้อยกระจายลงไปในดินได้ลึกกว่าเดิม เมื่อเปรียบเทียบวิธีการใส่ในดิน 3 วิธีนี้ คือ หว่านที่ผิวดิน หว่านที่ผิวดินแล้วพรวนกลบ และใส่ในร่องน้ำข้างแถวปลูก พบว่าไม่ว่าจะใส่วิธีใด ปูนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฉพาะดินบน แต่ยิปซัมสามารถลงไปในดินล่าง ช่วยเพิ่มปริมาณแคลเซียมและลดปริมาณอะลูมินัมที่ดูดซับตามผิวอนุภาคดินเหนียวถึงความลึกกว่า 75 ซม. การใช้ยิปซัมอย่างเดียวมีผลให้แมกนีเซียมถูกชะล้างออกไปจากดิน แต่ถ้าใช้ยิปซัมร่วมกับปูนทำให้การกระจายของแคลเซียมและแมกนีเซียมได้ชั้นดินดีขึ้น และยังช่วยให้ผลผลิตอ้อยสูงกว่าการใช้ยิปซัมหรือปูนเพียงอย่างเดียว (Morelli *et al*., 1987)

3) การทดลองในไร่อ้อยซึ่งดินเป็นกรดจัดใน Brazillian Cerrado พบว่าการใช้ยิปซัมอัตรา 800 กก. ต่อไร่ ช่วยเพิ่มผลผลิตอ้อยจากการตัด 4 ครั้ง ในช่วงเวลา 50 เดือน นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ดินยังแสดงว่าการใช้ยิปซัมอัตราดังกล่าวช่วยเพิ่มแคลเซียมและซัลเฟตในดินทุกระดับ ตั้งแต่ 20 ซม. ถึง 100 ซม. (Araujo *et al*., 2016.)

4) การทดลองในรัฐลุยเซียนา ประเทศสหรัฐอเมริกา ในไร่อ้อยที่ดินมีพีเอช 5.0 และแคลเซียม 1830 มก. ต่อ กก. พบว่าการใช้ยิปซัมอัตรา 358, 716 หรือ 1433 กก. ต่อไร่ ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของราก ผลผลิตอ้อยและผลผลิตน้ำตาล แต่การใส่ยิปซัมช่วยเพิ่มความเข้มข้นของแคลเซียม กำมะถัน แมงกานีส และสังกะสีในใบอ้อย (Viator *et al*., 2002)

5) การทดลองในแอฟริกาใต้ซึ่งดินในไร่อ้อยเป็นกรดจัด 2 แปลง (pH 4.2 และ 4.4) พบว่าการใช้ยิปซัม 800 กก. ต่อไร่ รวมกับปูน 800 กก. ต่อไร่ ให้ผลผลิตอ้อยสูงกว่าการใช้อัตราอื่น (Nixon *et al*., 2003)

ผลการทดลองใช้ยิปซัมในดินที่ปลูกพืชบางชนิด แสดงไว้ในตารางที่ 4

3. การใช้ยิปซัมในพืชอื่นๆ

การตอบสนองของพืชต่อการใส่ยิปซัมขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น (1) สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของดิน (2) ชนิดพืชและพันธุ์พืช (3) อัตรายิปซัมที่ใช้ และช่วงเวลาหลังการใส่ยิปซัม และ (4) ภูมิอากาศ เช่น ปริมาณฝน ผลการทดลองใช้ยิปซัมกับข้าวโพดและถั่วเหลือง (Caires *et al*., 2011; Chen and Dick, 2011) เป็นดังนี้

การใส่ยิปซัมในดินกรดช่วยลดพิษของอะลูมินัมในดินออกซิซอล ทำให้ผลผลิตข้าวโพดสายพันธุ์ซึ่งไวต่อพิษของอะลูมินัมสูงขึ้น การใช้ยิปซัมอัตรา 320 กก. ต่อไร่ ช่วยเพิ่มผลผลิตเมล็ดข้าวโพด 9.3% และเพิ่มผลผลิตเมล็ดถั่วเหลือง 11.4% เนื่องจากการใส่ยิปซัมช่วยเพิ่มแคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินระดับ 0-10 ซม. และลดปริมาณอะลูมินัมที่แลกเปลี่ยนได้ที่ระดับ 20-40 ซม. (van Raij *et al*., 1998)

ผลของยิปซัมต่อระบบรากพืชขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น (1) อัตรายิปซัมที่ใส่ในดิน และ (2) การเคลื่อนย้ายของน้ำเพื่อนำแคลเซียมไอออนและซัลเฟตไอออนลงไปสู่ดินล่าง ซึ่งสัมพันธ์กับความชื้นในดินและการกระจายของช่องขนาดต่างๆ ตลอดจนความต่อเนื่องของช่องในดิน การใช้ยิปซัม 320 และ 640 กก. ต่อไร่ ช่วยเพิ่มผลผลิตข้าวสาลีที่ปลูกในดินแลโทซอลสีแดง (Red Latosol) ซึ่งเป็นดินกรด (Ritchey *et al*., 1995)

ในกรณีที่ดินมีแผ่นแข็งปิดผิวดิน (surface crust) ควรปรับปรุงด้วยการใส่ยิปซัมอัตรา 150-300 กก. ต่อไร่ ต่อปี แต่ถ้าต้องการเสริมธาตุแคลเซียมและกำมะถัน ควรใช้อัตรา 100 กก. ต่อไร่ ต่อปี (สำเนา, 2553)

ตารางที่ 4 การตอบสนองของพืชต่างๆ ต่อการใส่ยิปซัม

ชื่อการทดลอง	พืชทดลอง	อัตรายิปซัม (กก./ไร่)	ช่วงเวลาการวัดผล	การตอบสนอง
ผลการทดลองระยะยาวในการใช้ปูนและยิปซัมต่อผลผลิตข้าวโพดและถั่วเหลืองที่ปลูกโดยไม่ไถพรวน	ข้าวโพด	0, 480, 960, 1440	6 และ 9 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ถั่วเหลือง	0, 480, 960, 1440	7 และ 8 ปี	ไม่ตอบสนอง
ผลการใช้ยิปซัมต่อผลผลิตเมล็ดพืช 3 ชนิด ที่ปลูกในระบบไม่ไถพรวนดิน	ข้าวโพด	0, 960	1 และ 37 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ข้าวสาลี	0, 960	9 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ถั่วเหลือง	0, 960	14 เดือน	ไม่ตอบสนอง
			16 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลการใช้ยิปซัมหว่านบนผิวดินของดินออกซิโซล (กรดเล็กน้อย) ในระบบการปลูกพืชแบบไม่ไถพรวน	ข้าวโพด	640, 1280, 1920	9 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ถั่วเหลือง	640, 1280, 1920	13 และ 25 เดือน	ไม่ตอบสนอง
ผลการใช้โดโลไมต์และฟอสโฟยิปซัมหว่านบนผิวดินต่อการดูดธาตุอาหารและผลผลิต	ข้าวไร่ (พันธุ์ Caiapo)	0, 336	1 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ข้าวไร่ (พันธุ์ IAC 202)	0, 336	1 ปี	ไม่ตอบสนอง
	ถั่ว	0, 336	2 ปี	ไม่ตอบสนอง
การควบคุมสภาพกรดของดินเพื่อการผลิตถั่วเหลืองในระบบการปลูกแบบไม่ไถพรวน	ถั่วเหลือง	0, 880	2 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
			3 ปี	ไม่ตอบสนอง
			4 ปี	ไม่ตอบสนอง
			5 ปี	ไม่ตอบสนอง
การใส่ยิปซัมและปูนเพื่อบรรเทาผลกระทบจากความแห้งแล้ง	ถั่วเหลือง	0, 80, 160, 320, 640, 1280	0-12 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ข้าวโพด	0, 80, 160, 320, 640, 1280	0-12 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลการปรับปรุงสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของดินในชั้นดินต่อผลผลิตถั่วเหลืองและข้าวโพด	ถั่วเหลือง	0, 5600	1 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
		0, 5600	13 เดือน	ไม่ตอบสนอง
	ข้าวโพด	0, 5600	24 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลของฟอสโฟยิปซัมต่อผลผลิตข้าวโพดที่ทนและไวต่อพิษของอะลูมินัม	ข้าวโพด (ทนต่อ Al)	0, 640, 1280	1, 2, 4, 5 ปี	ไม่ตอบสนอง
	ข้าวโพด (ไวต่อ Al)	0, 640, 1280	1, 2, 4, 5 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลระยะยาวของยิปซัมต่อผลผลิตข้าวโพดและสมบัติทางเคมีของดินล่าง	ข้าวโพด	0, 5600	16 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ข้าวโพด	0, 1600	15 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลการปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินล่าง (ดินออกซิซอล) ต่อผลผลิตพืชที่ปลูกในระบบไม่ไถพรวน	ข้าวโพด	0, 400, 800	6 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ถั่วเหลือง	0, 400, 800	2 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ถั่วเหลือง	0, 400, 800	3 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลการใช้ยิปซัมปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดินล่างต่อผลผลิตพืช	ข้าวโพด	0, 1600	6 เดือน	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ข้าวโพด	0, 1600	1 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
	ข้าวโพด	0, 1600	2 ปี	ผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้น
ผลการใช้ยิปซัมและปูนต่อสมบัติทางเคมีของดินทราย และผลผลิตอ้อย	อ้อย	0, 224, 448, 896	17 เดือน	ผลผลิตอ้อยเพิ่มขึ้น

ที่มา: Zoca and Penn (2017)

12. เอกสารอ้างอิง

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2544. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.

พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา. 2544. ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2558. ธาตุอาหารพืช. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2560. การใช้ปุ๋ยและสารเร่งทางใบ. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

ยงยุทธ โอสถสภา อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ชวลิต ฮงประยูร. 2552. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2528. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมยิปซัม. มอก. 595-252.

สำเนา เพชรฉวี. 2553. กรีนแคล ยิปซัมเพื่อการเกษตร http://www.bktgypsum.com/cgi-bin/mainframe_th.pl?showp=news_content_th3.html (24 กุมภาพันธ์ 2553).

Araújo, L.G., C. C. de Figueiredo, D. M. G. de Sousa, R. S. Nunes and T. A. Rein. 2016. Influence of gypsum application on sugarcane yield and soil chemical

properties in the Brazilian Cerrado. AJCS 10(11):1557-1563

Balota, M. 2014. Peanut Nutrition. Virginia Cooperation Extension, Virginia State University. Virginia 23437 (www.ext.vt.edu.)

Bapat, S.S., C.P. Aichele and K.A. High. 2014. Development of a sustainable process for the production of polymer grade lactic acid. Sustainable Chemical Processes. 2:3-12. (https://sustainablechemicalprocesses.springeropen.com/articles/10.1186/2043-7129-2-3)

Brady, N.C. and R.R. Weil. 2007. The Nature and Properties of Soils. Pearson, Prentice Hall, New York.

Buckley, M.E. and R.P. Wolkowski. 2014. In-season effect of flue gas desulfurization gypsum on soil physical properties. J. Environ. Qual. 43, 322–327.

Caires, E.F., F.J. Garbuio, S. Churka and H.A.W. Joris. 2011. Use of gypsum for crop grain production under a subtropical no-till cropping system. Agron. J. 103, 1804–1814.

Cantarella, H and R. Rossetto. 2014. Fertilizers for sugarcane, p. 405-422. In Luis Augusto Barbosa Cortez (Coord.). Sugarcane bioethanol - R&D for Productivity and Sustainability, São Paulo, Brazil

Chhabra, R. 1996. Soil Salinity and Water Quality. A.A. Balkema Publishers, Brookfield, USA.

Chen, L. and W.A. Dick. 2011. Gypsum as an Agricultural Amendment: General Use Guidelines. The Ohio State University Extension, Columbus. http://ohioline.osu.edu/b945/index.html. accessed 4 Jan. 2013.

DeSutter, T.M., L.J. Cihacek and S. Rahman. 2014. Application of flue gas desulfurization gypsum and its impact on wheat grain and soil chemistry. J. Environ. Qual. 43, 303-3011.

Dobermann, A. and T. Fairhurst. 2000. Rice: Nutrient Disorders and Nutrient Management. Potash and Phosphate Institute. Canada.

Fairhurst, T., C. Witt, R. Buresh and A. Dobermann (Edited). 2007. Rice: A Practical Guide to Nutrient Management. International Rice Research Institute, Philippines and International Plant Nutrition Institute, Singapore.

Gypsum Association. 2018. Gypsum through the age. https://www.gypsum.org/about/gypsum-101/history-gypsum/

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale and W.L. Nelson. 2005. Soil Fertilty and Fertilizers. Pearson, Prentice Hall, New Jersey.

Hawkesford, M.J. and L. J.De Kok. 2007 Sulfur in Plant: an Ecological Perspective. Springer. New York.

Howeler, R. 1985. Nutritional Disorders of Cassava Plant. CIAT, Cali, Colombia.

Jones, Jr. J.B. 2001. Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis. CRC Press, New York.

Ma, J.F., Ryan P.R. and E. Delhaize. 2001. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. Trends Plant Sci. 6, 273–278.

Maathuis, F.J.M. and E. Diatloff. 2013. Roles and Functions of Plant Mineral Nutrients. In Plant Mineral Nutrients: Methods and Protocols. (Edited by Maathuis, F.J.M.) Humana Press. New York.

Morelli, J.L., E.J. Nelli, J.L.I. Dematte, and A.E. Dalben, 1987. Effects of gypsum and lime application in soil chemical properties of a high aluminum sandy soil. In: Congresso nacional da stab, vol. 4, pp. 86-93.

Muller, M.M.L., C.A. Tormena, A.M. Genu, L.F.M. Ramer, L. Michalovicz, E.F. Caires, 2012. Structural quality of a no-tillage red latosol 50 months after gypsum application. Rev. Bras. Cienc. Solo. 36: 1005-1013.

Nixon, D.J., J. H. Meyer, D. McArthur and A. W. Schumann. 2003. The impact of lime and gypsum on sugarcane yield and soil acidity in South African sugar industry. Proc S Afr Sug Technol Ass (2003) 77: 284-293.

Osman, K.T. 2013. Soils: Principles, Properties and Management. Springer, New York.

Podar, D. 2013. Plant growth and cultivation. In Plant Mineral Nutrients: Methods and Protocols. (Edited by Maathuis, F.J.M.) Humana Press. New York.

Ritchey, K.D., C.M. Feldhake, R.B. Clark and D.M.G. Sousa. 1995. Improved water and nutrient uptake from subsurface layers of gypsum-amended soils. In: Karlen, D.L. *et al*. (Ed.), Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-Products. ASA Spec. Publ., vol. 58. ASA, CSSA, and SSSA, Madison. WI, pp. 157–181.

Rossato, O. B. Passato, R. Foltran, C. A. C. Crusciol, J. M. Martello, R. Rossetto and J. McCray. 2017. Soil fertility, ratoon sugarcane yield, and post-harvest residues as affected by surface application of lime and gypsum in Southeastern Brazil. Biosci. J., Uberlândia, v. 33, n. 2, p. 276-287.

Sparks, D.L. 2003. Environmental Soil Chemistry. Academic Press. New York.

Sumner, M.E. 1993. Gypsum and acid soils: the world scene. Advances in Agronomy. 51: 1-32.

Truman, C.C., R.C. Nuti, L.R. Truman and J.D. Dean. 2010. Feasibility of using FGD gypsum to conserve water and reduce erosion from an agricultural soil in Georgia. Catena. 81: 234-239.

van Raij, B., P.R. Furlani, J.A. Quaggio and A. Pettinelli. 1998. Effect of phosphogypsum on the yield of corn varieties with differential tolerance to aluminum at three liming levels. Rev. Bras. Ciênc. Solo 22, 101–108.

Viator, P.R., J.L. Kovar, and W.B. Hallmark. 2002. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield, and plant nutrients. Agron. J. 94: 1332-1336.

Wigipedia. 2018. Gypsum. https://en.wikipedia.org/wiki/Gypsum

Yong, R.N., M. Nakano and R. Pusch. 2012. Environmental Soil Properties and Behavior. CRC Press, New York.

Zoca, S.M. and C. Penn. 2017. An important tool with no instruction manual: A Review of gypsum use in agriculture. Advances in Agronomy. 144:1-44.