ปุ๋ยและธาตุอาหาร "นาโน"

ยงยุทธ โอสถสภา
ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

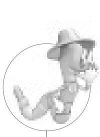
บทคัดย่อ

เมื่อมีการใช้คำ "นาโน" มาเรียกชื่อปุ๋ย ทำให้คนในวงการเกษตรสนใจความหมายของคำนี้มากขึ้น นาโน (nano) เป็นคำอุปสรรคแปลว่าเล็กมาก ความยาว 1 นาโนเมตร คือ 10^{-9} เมตร นาโนสเกล (nanoscale) หมายถึง ขนาดในช่วง 1-100 นาโนเมตรโดยประมาณ ธาตุอาหารทุกธาตุในขณะที่เป็นธาตุหรืออยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้มีขนาดในระดับนาโนสเกลทั้งสิ้น การผลิตปุ๋ยเคมีใช้กระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ธรรมดา มิได้ใช้นาโนเทคโนโลยีในการผลิต ส่วนปุ๋ยหมักได้จากการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ทุกธาตุซึ่งมีอยู่ในดินได้จากปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพ มีขนาดในระดับนาโนสเกลเหมือนกัน โดยปุ๋ยเคมีซึ่งเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำง่าย ส่วนมากเมื่อละลายแล้วจะแตกตัวเป็นไอออน ธาตุอาหารในปุ๋ยอินทรีย์ก็มีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีและปลดปล่อยออกมาในรูปไอออนอนินทรีย์ ซึ่งมีขนาดในระดับนาโนสเกล จึงกล่าวได้ว่าธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์จากปุ๋ยที่ใช้ในปัจจุบันมีขนาดในระดับนาโนสเกลทั้งหมด จากนั้นเซลล์รากพืชก็ดูดธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์จากดินและปุ๋ยด้วยโปรตีนขนส่งที่เยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ คือ โปรตีนช่องผ่านและโปรตีนพาหะ พืชแต่ละชนิดต้องการธาตุอาหารทุกธาตุในปริมาณที่แตกต่างกันเพื่อให้เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตและสร้างผลผลิต โดยดูดไปสะสมและใช้ประโยชน์ในรากและส่วนเหนือดิน ปริมาณธาตุอาหารหลักที่สะสมในส่วนเหนือดินของพืชหนึ่งไร่มีหน่วยเป็นกิโลกรัมของธาตุ แม้ว่าพืชได้รับธาตุอาหารส่วนหนึ่งจากดิน แต่ปริมาณธาตุอาหารหลักจากปุ๋ยต้องมีน้ำหนักในหน่วยกิโลกรัมต่อไร่ ส่วนจุลธาตุนั้น ข้าวต้องการเหล็ก 602 สังกะสี 94 และทองแดง 20 กรัม/ไร่ เมื่อไม่นานมานี้ มีการนำเฟอรัสออกไซด์ คิวปริกออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ ซึ่งมีอนุภาคนาโน (nano particles) มาทดลองใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืช โดยใส่ในสารละลายธาตุอาหารปลูกพืชและฉีดพ่นทางใบ ปรากฏว่าจุลธาตุรูปออกไซด์นาโนทั้งสามชนิดเข้าไปในเซลล์พืชได้ และช่วยให้พืชทดลองเจริญเติบโตได้ดีกว่าตำรับควบคุม ซึ่งไม่ให้ธาตุดังกล่าว หากผลการทดลองต่อๆ ไป แสดงว่าปุ๋ยจุลธาตุนาโนเหมาะสมทางเศรษฐกิจจะเป็นทางเลือกใหม่สำหรับการใช้ปุ๋ยจุลธาตุพวกโลหะในรูปออกไซด์

1. ชื่อปุ๋ยที่เร้าใจ

ปุ๋ยเป็นปัจจัยการผลิตพืชที่สำคัญซึ่งเกษตรกรจำเป็นต้องหามาใช้ ปุ๋ยจึงเป็นสินค้าที่มีขายทั่วประเทศและมีการแข่งขันทางธุรกิจสูง

คำสำคัญ: นาโนเมตร นาโนสเกล ธาตุอาหารพืช ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ ความต้องการธาตุอาหาร



กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจปุ๋ยประกอบด้วยการผลิต การขาย การนำเข้า การส่งออก และการนำผ่านปุ๋ย เพื่อให้การทำธุรกิจนี้มีความยุติธรรมกับทุกฝ่ายจึงมีมาตรการควบคุมทางกฎหมายหลายอย่าง เช่น 1) ผู้ประกอบการทั้ง 5 ประเภทต้องมีใบอนุญาต (พ.ร.บ. ปุ๋ย มาตรา 18) 2) ปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยชีวภาพต้องมีใบสำคัญการขึ้นทะเบียนปุ๋ย (พ.ร.บ.ปุ๋ย มาตรา 40) 3) ปุ๋ยที่นำมาขอขึ้นทะเบียนต้องไม่ใช้ชื่อทำนองโอ้อวดไม่สุภาพหรืออาจทำให้เข้าใจผิดจากความจริง (พ.ร.บ. ปุ๋ย มาตรา 39) และ 4) ผู้โฆษณาขายปุ๋ยจะต้องไม่ทำผิดหลัก 3 ประการ คือ (1) ไม่แสดงสรรพคุณของปุ๋ยเป็นเท็จ หรือเกินความจริง (2) ไม่ทำให้เข้าใจว่ามีวัตถุใดเป็นตัวปุ๋ย หรือเป็นส่วนประกอบของปุ๋ย ซึ่งความจริงไม่มีวัตถุหรือส่วนประกอบนั้นในปุ๋ยหรือมีแต่ไม่เท่าที่ทำให้เข้าใจ และ (3) ไม่มีการรับรองหรือยกย่องสรรพคุณปุ๋ยโดยบุคคลอื่น (พ.ร.บ.ปุ๋ย มาตรา 43) ขอเน้นอีกครั้งหนึ่งว่า ชื่อปุ๋ย “ต้องไม่ใช้ชื่อทำนองโอ้อวดไม่สุภาพ หรืออาจทำให้เข้าใจผิดจากความจริง”

อย่างไรก็ตาม การตั้งชื่อปุ๋ยให้น่าสนใจหรือ “เร้าใจ” เป็นความสามารถในการตลาดอย่างหนึ่ง ตราบเท่าที่ชื่อนั้นไม่ขัดกับข้อความในมาตรา 43 ก็ย่อมทำได้ การนำคำบางคำในวงการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งมีการกล่าวถึงอย่างกว้างขวางและสะดุดใจมาใช้เรียกชื่อปุ๋ยก็ได้รับความนิยมไม่น้อย เทคโนโลยีสาขาหนึ่งคือนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) จัดเป็นสาขาที่โดดเด่นมากในยุคปัจจุบัน “นาโน (nano)” จึงเป็นคำที่อยู่ในแนวทางดังกล่าว และถูกนำมาใช้เป็นชื่อสินค้าบางชนิดรวมทั้งปุ๋ยด้วย เพื่อบ่งบอกถึงความก้าวหน้าและทันสมัย จึงสมควรอธิบายให้กระจ่างว่า “นาโน” คืออะไร เกี่ยวข้องกับปุ๋ยและธาตุอาหารพืชอย่างไร? บทความนี้พัฒนามาจากเรื่อง “ปุ๋ยเคมีนาโนในมือคุณ” ซึ่งตีพิมพ์ในวารสารเกษตรอภิรมย์ (ยงยุทธ, 2559) โดยขยายขอบเขตของเรื่องและเพิ่มรายละเอียดให้มากขึ้น

2. ความหมายของนาโน

ในระบบหน่วยระหว่างประเทศ (International System of Units แปลมาจากภาษาฝรั่งเศส Le Systéme International d’ Unités) หรือ ระบบเอสไอ (SI) ที่เราคุ้นเคยหน่วยวัดความยาวจากหน่วยใหญ่ไปหาหน่วยเล็กได้แก่ เมตร เซนติเมตร (10^{-2} เมตร) มิลลิเมตร (10^{-3} เมตร) ในทางวิทยาศาสตร์ยังมีหน่วยที่เล็กลงไปอีก เช่น ไมโครเมตร (10^{-6} เมตร) นาโนเมตร (10^{-9} เมตร) และพิโกเมตร (10^{-12} เมตร) ปัจจุบันมีการใช้หน่วยวัดความยาว “นาโนเมตร” มากขึ้นเพราะเป็นยุคที่นาโนเทคโนโลยีกำลังเฟื่องฟู “นาโน (nano)” มาจากคำในภาษากรีกว่า nanos แปลว่า แคระหรือเล็ก เมื่อเป็นคำอุปสรรคหรือนำหน้าหน่วยวัด จะหมายถึงขนาดเศษหนึ่งส่วนพันล้านส่วนของหน่วยวัดนั้น เช่น นาโนเมตร (nanometer หรือ nanometre คำ metre มาจาก metron = unit of measurement) เป็นหน่วยของการวัดที่มีขนาด “เศษหนึ่งส่วนพันล้านส่วนของหนึ่งเมตร” นอกจาก “นาโน” แล้ว ความหมายของคำอุปสรรคที่กล่าวถึงบ่อยๆ แสดงไว้ในดังตารางที่ 1

หน่วยความยาวที่ใช้กันอีกหน่วยหนึ่ง คือ อังสตรอม โดย 1 อังสตรอมเท่ากับ 10^{-10} เมตร หรือ 10^{-6} มิลลิเมตร หรือ 10^{-4} ไมโครเมตร หรือ 0.1 นาโนเมตร

ตารางที่ 1 คำอุปสรรคนำชื่อหน่วยวัดและความหมาย

คำอุปสรรคนำชื่อหน่วยวัด	ความหมาย
เดซิ (deci)	10^{-1}
เซ็นติ (centi)	10^{-2}
มิลลิ (milli)	10^{-3}
ไมโคร (micro)	10^{-6}
นาโน (nano)	10^{-9}
พิโก (pico)	10^{-12}
เฟมโต (femto)	10^{-15}

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Nanometre

3. ความหมายของนาโนเทคโนโลยี

สำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรมอธิบายความหมายของนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) ว่า “หมายถึง การประยุกต์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ในการจัดการและควบคุมสสารในระดับนาโนสเกล (nanoscale - ขนาดในช่วง 1-100 นาโนเมตร โดยประมาณ) เพื่อใช้ประโยชน์จากสมบัติหรือปรากฏการณ์ที่ขึ้นกับขนาดหรือโครงสร้างของสสาร โดยสมบัติหรือปรากฏการณ์ดังกล่าวแตกต่างจากที่พบในอะตอมหรือโมเลกุล หรือวัสดุขนาดใหญ่”

นอกจากนั้น นาโนเทคโนโลยียังหมายถึง “เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการจัดการ การสร้างหรือการวิเคราะห์ วัสดุ อุปกรณ์ เครื่องจักรหรือผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ในนาโนสเกล รวมถึงการออกแบบหรือการประดิษฐ์เครื่องมือเพื่อใช้สร้างหรือวิเคราะห์วัสดุในระดับที่เล็กมากๆ เช่น การจัดอะตอมและโมเลกุลในตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ส่งผลให้โครงสร้างของวัสดุหรืออุปกรณ์มีสมบัติพิเศษขึ้น ไม่ว่าทางด้านฟิสิกส์ เคมี หรือชีวภาพ และสามารถนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ได้” (Wikipedia, 2559)

นาโนเทคโนโลยีเกิดจากความก้าวหน้ามาบรรจบกันของความรู้และเทคโนโลยีหลายด้าน เช่น ฟิสิกส์ทฤษฎี อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุศาสตร์ เคมี และอื่นๆ ตัวอย่างของวัสดุนาโน ได้แก่ ท่อนาโน (nanotube) ที่เกิดจากการเรียงตัวของคาร์บอนเป็นท่อกลวง มีโครงสร้างเป็นโครงข่ายร่างแห ทำให้เล็กมาก แข็งแรงมาก แต่มีน้ำหนักเบา ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ขนาดเล็กที่สุดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.33 นาโนเมตร (ยอดหทัย, 2545)

ในด้านเครื่องสำอางนั้นเดิมใช้สังกะสีออกไซด์ (ZnO) ชนิดผง (powder) ผสมลงในครีมกันแดด (sun screen) เพื่อให้มีผลด้านป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV filter) ต่อมาได้ใช้สังกะสีออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโน (nano size

zinc oxide particles) แทนชนิดผงแบบเดิม สังกะสีออกไซด์นาโน (200 นาโนเมตร) ป้องกันได้ทั้ง UVA/UVB น้ำหนักเบา ไม่มีส่วนผสมของน้ำมัน ไม่อุดตันรูขุมขน มีความปลอดภัยสูง สามารถกระจายตัวได้ง่ายและสมบูรณ์ (Anonymous, 2012) จากนั้นไม่นานนักได้มีผู้นำสังกะสีออกไซด์ขนาดอนุภาคนาโนมาทดลองใช้เป็นปุ๋ยธาตุสังกะสี (ดังรายละเอียดในข้อ 11)

ปัจจุบันทั่วโลกมีความตื่นตัวและให้ความสนใจต่อนาโนเทคโนโลยีมาก มีการจัดประชุมและอบรมกันอย่างกว้างขวาง มีการจัดตั้งองค์กรและสถาบันด้านนาโนเทคโนโลยีในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทย ทั้งนี้เพื่อนำนาโนเทคโนโลยีมาใช้เป็นรากฐานในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ (วิรุฬห์ และสมศักดิ์, 2545)

จากความทันสมัยและประโยชน์ของนาโนเทคโนโลยีที่มีต่อมนุษย์ในปัจจุบันและอนาคต ทำให้คำ “นาโน” อยู่ในกระแสความสนใจของประชาชนโดยทั่วไป ในส่วนของปุ๋ยมักมีคำถามว่า กระบวนการผลิตปุ๋ยเคมีที่ใช้ในปัจจุบันเกี่ยวข้องกับนาโนเทคโนโลยีหรือไม่

ความจริง คือ (1) ปุ๋ยเคมีทุกชนิดซึ่งใช้อยู่ในปัจจุบันผลิตด้วยกระบวนการเคมีและฟิสิกส์ธรรมดา มิได้ใช้นาโนเทคโนโลยีแต่อย่างใด และ (2) ผู้สนใจด้านปฐพีวิทยาทุกคนทราบดีว่า “ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช” ในปุ๋ยทุกชนิดมีขนาด “นาโน” อยู่แล้วตามธรรมชาติ และ (3) พืชชนิดแรกที่อุบัติขึ้นในโลกเมื่อ 600 ล้านปีที่แล้ว โดยเริ่มจากสาหร่ายและวิวัฒนาการไปเป็นพืชชนิดอื่นๆ (Graham *et al*., 2003) พืชเหล่านั้นต่างก็ดูดธาตุอาหารจากน้ำและดินในรูปไอออน ซึ่งมีขนาดที่ใช้หน่วยวัดนาโนเมตร ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

4. ขนาดของเซลล์พืชและออร์แกเนลล์

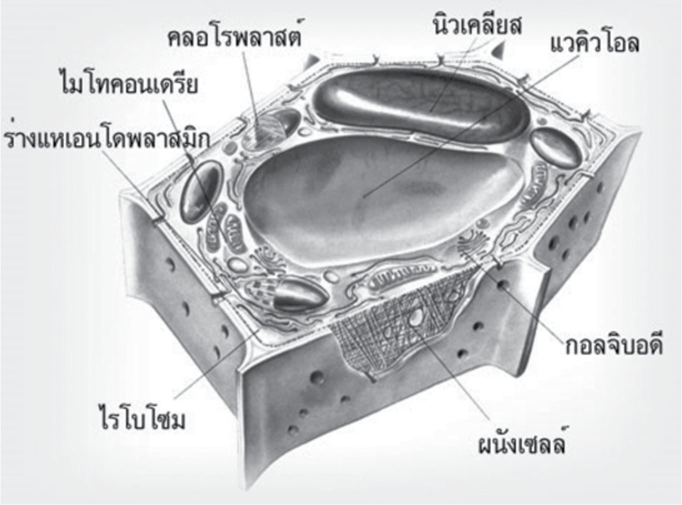
เมื่อพิจารณาขนาดของเซลล์พืชทั่วไป พบว่ามีขนาดอยู่ในช่วง 10-100 ไมโครเมตร (10,000-100,000 นาโนเมตร) เซลล์ยูคาริโอตมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ เยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) ไซโตพลาสซึม (cytoplasm) และนิวเคลียส (nucleus) (ดังภาพที่ 1)

ส่วนประกอบของเซลล์พืชแต่ละอย่างมีขนาดโดยประมาณดังนี้ (นิรนาม, 2559)

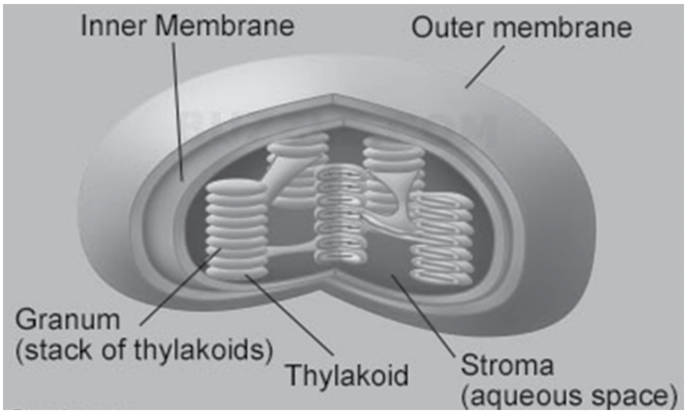
1) เยื่อหุ้มเซลล์ ทำหน้าที่ห่อหุ้มส่วนต่างๆ ของเซลล์ไว้ทั้งหมด มีความหนาประมาณ 7.5-10.0 นาโนเมตร ที่เยื่อมีโมเลกุลของโปรตีนประกอบกันเป็นช่องผ่าน (channel) ซึ่งไอออนหรือโมเลกุลขนาดเล็กผ่านได้ หรือทำหน้าที่เป็นโปรตีนพาหะ (transport protein) นำไอออนหรือโมเลกุลของสารเข้าหรือออกจากเซลล์ ช่องในโปรตีนช่องผ่านและโปรตีนพาหะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8 นาโนเมตร

2) ไซโตพลาสซึม ประกอบด้วยไซโตซอล (cytosal) ซึ่งเป็นของเหลวที่มีสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ละลายหรือแขวนลอยกับออร์แกเนลล์ (organelles) กระจายอยู่ทั่วไป พลาสโมเดสมาตา (plasmodesmata) ซึ่งเป็นช่องที่เชื่อมไซโตพลาซึมระหว่างเซลล์ข้างเคียงมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 70 นาโนเมตร

สิ่งที่เรียกว่าออร์แกเนลล์ (organelle) เป็นโครงสร้างย่อยที่มีขนาดเล็กอยู่ภายในเซลล์และมีหน้าที่เฉพาะ คำว่า ออร์แกเนลล์ มาจากแนวความคิดที่ว่า โครงสร้างเล็กๆ ในเซลล์เปรียบเหมือนกับอวัยวะ (organ) ของร่างกาย การเติมคำปัจจัย -elle เพื่อให้มีความหมายว่าเป็นส่วนเล็กๆ ยกตัวอย่างเช่น



ภาพที่ 1 ส่วนประกอบของเซลล์พืช
ที่มา: http://www.thaigoodview.com/node/66680



ภาพที่ 2 โครงสร้างของคลอโรพลาสต์
ที่มา: http://www.buzzle.com/articles/chloroplast-structure-and-function.html

(1) นิวเคลียสเป็นออร์แกเนลล์ขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร (10,000 นาโนเมตร) ภายในมีของโมเลกุลดีเอ็นเอ (DNA, deoxyribonucleic acid) ซึ่งมีความกว้างประมาณ 2.5 นาโนเมตร

(2) ไมโตคอนเดรีย ยาว 3 ไมโครเมตร (3,000 นาโนเมตร) ทำหน้าที่หายใจ

(3) คลอโรพลาสต์ ยาว 5 ไมโครเมตร (5,000 นาโนเมตร) (ภาพที่ 2) ทำหน้าที่สังเคราะห์แสง

(4) ไรโบโซม เป็นออร์แกเนลล์ที่มีขนาดเล็กที่สุด เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 นาโมเมตร ทำหน้าที่สังเคราะห์โปรตีน

บทความนี้ใช้คำ “เส้นผ่านศูนย์กลาง (diameter)” ซึ่งเป็นศัพท์บัญญัติของคณะกรรมการจัดทำพจนานุกรมศัพท์คณิตศาสตร์ เนื่องจาก diameter มาจากรากศัพท์ dia = through แปลว่า “ผ่าน” และ metro = measure แปลว่า “การวัด”

ในไซโตพลาสซึมยังมีโครงสร้างหลักของเซลล์ (cell cytoskeleton) ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อจุลภาคและเส้นใยโปรตีนโยงยึดกันเพื่อให้เซลล์คงรูปร่าง ได้แก่ ท่อจุลภาคหรือไมโครทูบูล (microtubule) เกิดจากการจัดเรียงตัวของโปรตีน มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 24-25 นาโนเมตร ไมโครฟิลาเมนต์ (micro filament) เป็นเส้นใยโปรตีนที่มีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-7 นาโนเมตร ส่วนโกลบูลาร์โปรตีน (globular protein) มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นาโนเมตร

5. ขนาดของธาตุอาหารพืช

ธาตุอาหารต่างๆ มีขนาดเล็กมาก เช่น อะตอมของไนโตรเจนมีรัศมี 56 พิโกเมตร (56×10^{-12} เมตร) หรือ 0.056 นาโนเมตร จึงขอสรุปขนาดรัศมีอะตอมของธาตุอาหารที่มาจากดินหรือจากปุ๋ยไว้ในตารางที่ 2 ขอเพิ่มรัศมีของ H, O และ C ด้วยว่ามีค่า 53, 48 และ 67 พิโกเมตร ตามลำดับ (ลัดดา, 2548) เพื่อใช้พิจารณาขนาดไอออนที่มีธาตุเหล่านี้เป็นองค์ประกอบ เมื่อคูณค่ารัศมีด้วย 2 จะได้เส้นผ่านศูนย์กลางของอะตอม

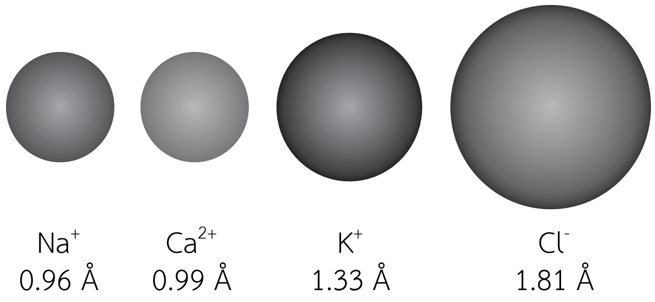
6. พืชดูดธาตุอาหารในรูปไอออน

ในเรื่องนี้จะอธิบายขนาดไอออนของธาตุอาหารพืชและกลไกการดูดธาตุอาหารของเซลล์พืช

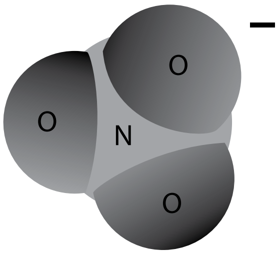
ตารางที่ 2 ชื่อธาตุอาหารและรัศมีอะตอมของธาตุ (พิโกเมตร, pm เมื่อคูณด้วย 2 จะได้เส้นผ่านศูนย์กลาง)

ธาตุหลักและธาตุรอง		รัศมีของอะตอม (pm)	ธาตุอาหารเสริม	รัศมีของอะตอม (pm)
ธาตุหลัก :	N	56	Fe	156
	P	98	Cu	145
	K	243	Mn	161
ธาตุรอง :	Ca	194	Zn	142
	Mg	145	B	87
	S	88	M0	190
			Cl	79
			Ni	149

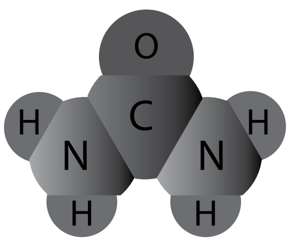
ที่มา: ลัดดา (2548)



ภาพที่ 3 รัศมีของโซเดียม แคลเซียม โพแทสเซียม และคลอไรด์ไอออน (1 อังสตรอม = 0.1 นาโนเมตร) เท่ากับ 0.096, 0.099, 0.133 และ 0.181 นาโนเมตรตามลำดับ



ภาพที่ 4 อะตอมของธาตุที่ประกอบเป็นไนเทรตไอออน



ภาพที่ 5 อะตอมของธาตุที่ประกอบเป็นโมเลกุลยูเรีย

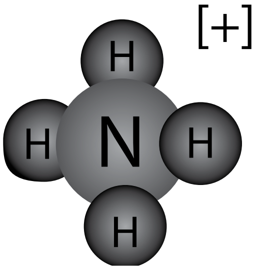
6.1 ขนาดของไอออน

มีข้อมูลเกี่ยวกับธาตุที่น่าสนใจดังนี้คือ เมื่ออะตอมของธาตุอยู่ในสภาพไอออน รัศมีรวมจะมากขึ้น แต่เนื่องจากไอออนในสารละลายอยู่ในสภาพที่มีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบ (hydrated ion) รัศมีของไอออนที่รวมโมเลกุลของน้ำจึงมากกว่าเดิม เช่น รัศมีของโพแทสเซียมไอออน 0.133 นาโนเมตร (ภาพที่ 3) แต่ถ้ารวมโมเลกุลของน้ำที่ล้อมรอบจะได้รัศมี 0.232 นาโนเมตร

ในการดูดธาตุอาหารนั้น เซลล์รากและเซลล์ใบดูดในรูปของไอออน เช่น ไนโตรเจนรูปที่เซลล์พืชดูดได้ คือ แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และไนเทรตไอออน (NO_3^-) (ภาพที่ 4) แต่มีข้อยกเว้นว่าเซลล์พืชสามารถดูดยูเรีย [$CO(NH_2)_2$] ในรูปโมเลกุล (ภาพที่ 5) ได้ด้วย ส่วนรูปที่เป็นประโยชน์ของฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม คือ ฟอสเฟตไอออน ($H_2PO_4^-$ หรือ HPO_4^{2-}) และโพแทสเซียมไอออน (K^+) ตามลำดับ

เมื่อพิจารณารัศมีอะตอมของธาตุต่างๆ ในตารางที่ 2 และรัศมีของไอออนในภาพที่ 3 แล้วคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลาง (รัศมี x 2) ของไอออนสำหรับธาตุอาหารทุกธาตุ รวมทั้งโมเลกุลของยูเรีย ล้วนมีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรมาก แม้จะมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบไอออนก็ไม่มีปัญหาในการดูด ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

ปุ๋ยเคมีที่ให้ธาตุอาหารต่างๆ เป็นสารประกอบซึ่งละลายน้ำง่าย เมื่อใส่ในดินจะแตกตัวเป็นไอออน เช่น



ภาพที่ 6 อะตอมของธาตุที่ประกอบเป็นแอมโมเนียมไอออน

(1) แอมโมเนียมซัลเฟต 1 โมเลกุล แตกตัวได้แอมโมเนียมไอออน (ภาพที่ 6) 2 ไอออน และซัลเฟต 1 ไอออน ดังนี้

$$(NH_4)_2SO_4 \longrightarrow 2NH_4^+ + SO_4^{2-}$$

(2) ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 1 โมเลกุล แตกตัวได้แอมโมเนียมไอออน 2 ไอออน และฟอสเฟต 1 ไอออน ดังนี้

$$(NH_4)_2HPO_4 \longrightarrow 2NH_4^+ + HPO_4^{2-}$$

(3) โพแทสเซียมคลอไรด์ 1 โมเลกุล แตกตัวได้โพแทสเซียมไอออนและคลอไรด์ไอออน อย่างละ 1 ไอออน ดังนี้

$$KCl \longrightarrow K^+ + Cl^-$$

จึงสรุปได้ว่าธาตุอาหารที่ได้จากปุ๋ยเคมีทุกชนิด เมื่อละลายและแตกตัวอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์แล้ว ไอออนที่เซลล์ของรากพืชดูดได้ล้วนมีขนาดในหน่วยนาโนเมตร (ยกเว้นยูเรียซึ่งไม่แตกตัวเป็นไอออน) นอกจากนั้นธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ของแต่ละธาตุซึ่งมาจากปุ๋ยอินทรีย์หรือที่เป็นผลจากกิจกรรมของปุ๋ยชีวภาพ หรือที่มาจากดิน ล้วนเป็นรูปเดียวกัน จึงมีขนาดในหน่วยนาโนเมตรด้วย

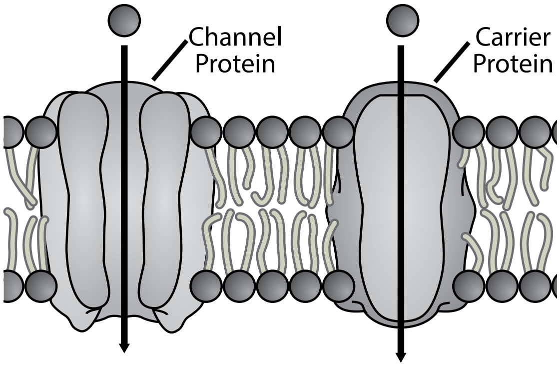
6.2 การดูดธาตุอาหารของเซลล์พืช

เยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์รากพืชมีโปรตีนขนส่ง (transport protein) 2 แบบ คือ โปรตีนช่องผ่าน (channel protein) และพาหะ (carrier protein หรือ transporter) ดังภาพที่ 7 ซึ่งมีบทบาทแตกต่างกัน (ยงยุทธ, 2558) ดังนี้

1) โปรตีนช่องผ่าน ส่วนมากมีความจำเพาะต่อกลุ่มของไอออนหรือสาร เช่น สำหรับแคตไอออน ซึ่งแบ่งเป็นหลายกลุ่ม ได้แก่ โปรตีนช่องผ่านสำหรับแคตไอออนเวเลนซีหนึ่ง แคตไอออนเวเลนซีสอง แคตไอออนเวเลนซีมากกว่าสอง แอนไอออนเวเลนซีแต่ละแบบ และสำหรับโพแทสเซียมโดยเฉพาะ นอกจากนี้ยังมีช่องผ่านสำหรับสารที่ไม่มีประจุ เช่น น้ำ ยูเรีย และกรดบอริกอีกด้วย

2) พาหะ เป็นโปรตีนขนส่งที่มีความเจาะจงต่อชนิดของไอออน เช่น พาหะสำหรับไนเตรตไอออน และพาหะสำหรับแอมโมเนียมไอออน เป็นต้น

ในการดูดไอออนของโปรตีนขนส่งนั้น ขนาดของไอออนที่โตขึ้นเมื่อมีโมเลกุลของน้ำล้อมรอบจะไม่ทำให้มีปัญหาในการดูด เนื่องจากโปรตีนขนส่งมีกลไกการรีดโมเลกุลของน้ำบางโมเลกุลออกไปก่อน ยกตัวอย่างเช่น การดูดโพแทสเซียมไอออนของช่องผ่านสำหรับโพแทสเซียมไอออนนั้น



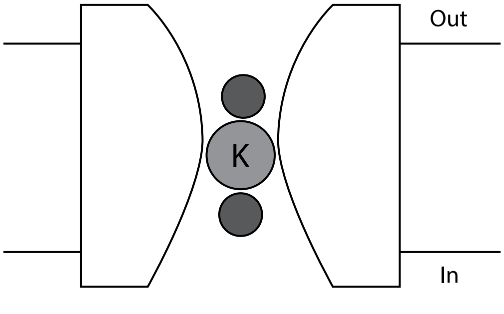
ภาพที่ 7 เยื่อหุ้มเซลล์แสดงโปรตีนขนส่ง (transport protein) 2 แบบ คือ โปรตีนช่องผ่าน (channel protein) และพาหะ (carrier protein หรือ transporter)
ที่มา: http://brycegoldmancellproject.weebly.com/cell-membrane-processes.html

มีขั้นตอนดังนี้ คือ แต่เดิมโพแทสเซียมไอออนมีน้ำล้อมรอบ 6 โมเลกุล เมื่อไอออนเข้าประชิดกับโปรตีนช่องผ่าน น้ำจะถูกรีดออก 4 โมเลกุล เหลือเพียง 2 โมเลกุล ซึ่งอยู่ด้านหน้าและหลังของไอออนที่ละโมเลกุล (ภาพที่ 8) แล้วไอออนก็ผ่านช่องไปได้ (ยงยุทธ, 2558)

7. ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ในปุ๋ยเคมี

คำนิยามดั้งเดิมของปุ๋ยกล่าวว่า ปุ๋ย คือ สารซึ่งมีธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ ต่อมามีปุ๋ยชนิดใหม่ คือ ปุ๋ยชีวภาพ ซึ่งหมายถึงจุลินทรีย์มีชีวิตซึ่งเตรียมขึ้น ใช้ใส่ในดินหรืออวัยวะของพืชที่ใช้ปลูก เมื่อประชากรของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น กิจกรรมของจุลินทรีย์เหล่านั้นจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารบางธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (ยงยุทธ, 2549) ข้อนี้จะกล่าวถึงปุ๋ยเคมี ส่วนปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยชีวภาพจะอธิบายในข้อ 8 และ 9 ตามลำดับ

การผลิตปุ๋ยเคมีเพื่อให้ได้ธาตุอาหารตามที่ต้องการและการแปรสภาพของปุ๋ยเคมีในดินจนได้ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์มีดังนี้ (ยงยุทธ และคณะ, 2557)



ภาพที่ 8 การดูดโพแทสเซียมไอออนทางโปรตีนช่องผ่าน
ที่มา: http://web-books.com/MoBio/Memory/Channel.htm

7.1 การผลิตปุ๋ยเคมี

หากจะกล่าวถึงเฉพาะปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารหลัก (ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม) แล้ว จะเห็นได้ว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นวัตถุจากธรรมชาติ นำมาแปรสภาพให้ได้สารประกอบที่ละลายน้ำง่าย หากกระบวนการผลิตเป็นกระบวนการทางเคมี ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นก็เป็นปฏิกิริยาด้านอนินทรีย์เคมีธรรมดาเท่านั้น แล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบที่มีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูงและละลายน้ำง่าย ดังนี้

1) ปุ๋ยไนโตรเจน เริ่มจากการผลิตแอมโมเนีย (NH_3) โดยใช้แก๊สธรรมชาติ น้ำ และไนโตรเจนจากอากาศเป็นวัตถุดิบ ทำปฏิกิริยากันภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง

นำแอมโมเนียไปผลิตปุ๋ยได้หลายชนิด เช่น (1) แอมโมเนียทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์ได้ยูเรีย (สูตร 46-0-0) และ (2) แอมโมเนียไปทำปฏิกิริยากับกรดแก่ก็ได้ปุ๋ยอีกแบบหนึ่ง เช่น ทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริกได้แอมโมเนียมซัลเฟต (สูตร 21-0-0)

2) ปุ๋ยฟอสเฟต เริ่มจากการนำหินฟอสเฟตจากแหล่งธรรมชาติมาแต่งแร่ เพื่อลดสิ่งเจือปน แต่แร่อะพาไทต์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของหินฟอสเฟตเป็นสารที่ละลายน้ำยาก จึงนำมาทำปฏิกิริยากับกรด เช่น กรดซัลฟิวริกได้กรดฟอสฟอริก

นำกรดฟอสฟอริกไปผลิตปุ๋ยได้หลายชนิด เช่น (1) กรดฟอสฟอริกทำปฏิกิริยากับหินฟอสเฟตได้ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต (สูตร 0-46-0) และ (2) กรดฟอสฟอริกไปทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียจะได้ปุ๋ยไดแอมโมเนียมฟอสเฟต (สูตร 18-46-0)

3) ปุ๋ยโพแทช ใช้วัตถุดิบจากแหล่งธรรมชาติ เช่น แร่ซิลไวต์สำหรับผลิตปุ๋ยโพแทสเซียมคลอไรด์ (สูตร 0-0-60) โดยนำแร่มาแยกเอาสิ่งเจือปนออกด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ หากต้องการผลิตปุ๋ยโพแทสเซียมซัลเฟต (สูตร 0-0-50) ก็นำโพแทสเซียมคลอไรด์ไปทำปฏิกิริยากับกรดซัลฟิวริก

4) ปุ๋ยเชิงประกอบสูตรต่างๆ เช่น สูตร 15-15-15 และ 13-13-21 สามารถผลิตได้สองวิธี คือ วิธีแรกใช้กระบวนการทางเคมี และวิธีที่สองใช้วิธีการผสมแบบคลุกเคล้า

ข้อมูลโดยสังเขปนี้แสดงว่าการผลิตปุ๋ยเคมีที่ให้ธาตุอาหารหลักหรือแม้แต่ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารรองและธาตุอาหารเสริม ก็เป็นกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ธรรมดา มิได้ใช้นาโนเทคโนโลยีแต่อย่างใด และเมื่อปุ๋ยเคมีละลายน้ำก็แตกตัวเป็นไอออน ได้ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ซึ่งมีขนาดวัดในหน่วยนาโนเมตรทั้งสิ้น

7.2 การแปรสภาพของปุ๋ยเคมีในดิน

ปุ๋ยเคมีส่วนมากเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำง่าย ดังนั้นเมื่ออยู่ในดินที่มีความชื้นเพียงพอจะละลายแล้วอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช 2 ลักษณะ คือ

1) ปุ๋ยเป็นสารประกอบที่แตกตัวเป็นไอออน ซึ่งเซลล์รากพืชดูดไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต 1 โมเลกุล แตกตัวได้แอมโมเนียมไอออน 2 ไอออน และฟอสเฟต 1 ไอออน

2) ปุ๋ยบางชนิด เช่น ยูเรีย เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำง่าย ละลายแล้วเซลล์รากพืชดูดไปใช้ในรูปโมเลกุลได้โดยตรง ส่วนที่รากพืชยังไม่ดูดไปใช้และคงอยู่ในดินจะแปรสภาพทางชีวเคมีเป็นแอมโมเนียมไอออนซึ่งเซลล์รากพืชดูดไปใช้ง่ายเช่นเดียวกัน

8. ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ในปุ๋ยอินทรีย์

ในข้อนี้จะกล่าวถึงประเภทของปุ๋ยอินทรีย์และการแปรสภาพของปุ๋ยอินทรีย์ในดิน เพื่อเชื่อมโยงถึงธาตุอาหารที่ได้จากปุ๋ยอินทรีย์เท่านั้น ส่วนประโยชน์ของปุ๋ยอินทรีย์ต่อดินและพืชในด้านอื่นๆ ศึกษารายละเอียดได้จากคณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2548) ยงยุทธ และคณะ (2556) และ ธงชัย (2558)

8.1 ประเภทของปุ๋ยอินทรีย์

ปุ๋ยอินทรีย์มี 3 ประเภท คือ (1) ปุ๋ยคอก หมายถึงมูลสัตว์เลี้ยงที่รวมรวมได้จากคอก (2) ปุ๋ยหมัก หมายถึงปุ๋ยที่ได้จากการหมักวัสดุอินทรีย์จากพืชและ/หรือสัตว์จนได้ที่ และ (3) ปุ๋ยพืชสด หมายถึงพืชซึ่งปลูกในพื้นที่ โดยมุ่งหมายจะพรวนกลบเพื่อบำรุงดินของพื้นที่นั้น ธาตุอาหารส่วนใหญ่ที่มีในปุ๋ยทั้ง 3 ประเภทนี้มาจากดินหรือปุ๋ยที่ใส่ให้แก่พืชซึ่งเป็นที่มาของธาตุอาหารในปุ๋ยดังกล่าว การที่พืชได้สะสมธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมไว้ในเนื้อเยื่อ เมื่อครั้งยังมีชีวิต หรือการนำผลผลิตจากพืชไปเลี้ยงสัตว์ ทำให้ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยคอก และปุ๋ยพืชสด เป็นแหล่งของธาตุเหล่านั้นด้วย (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

8.2 การแปรสภาพของปุ๋ยอินทรีย์ในดิน

ธาตุอาหารพืชในปุ๋ยอินทรีย์ส่วนมากเป็นองค์ประกอบอยู่ในสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ พืชจึงใช้ประโยชน์ไม่ได้ แต่สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน 2 ขั้นตอน คือ (1) ย่อยสลายให้โมเลกุลขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก และ (2) แปรสภาพธาตุอาหารที่เป็นองค์ประกอบในสารโมเลกุลเล็กจากรูปสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการมินเนอราลไลเซชัน (mineralization)

ตัวอย่างที่ 1 การแปรสภาพของโปรตีนในปุ๋ยอินทรีย์มี 2 ขั้นตอนดังนี้

1) การย่อยสลายของสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลที่เล็กลง เช่น จากโปรตีนชื่อไมโอโกลบินแต่ละโมเลกุลประกอบด้วยสายพอลิเพ็บไทด์หนึ่งสาย ที่มีกรดอะมิโน 153 โมเลกุล (Brown and Poon, 2005) และได้สลายตัวกลายเป็นเพ็บไทด์โซ่สั้น แล้วเป็นกรดอะมิโนเดี่ยวในที่สุด

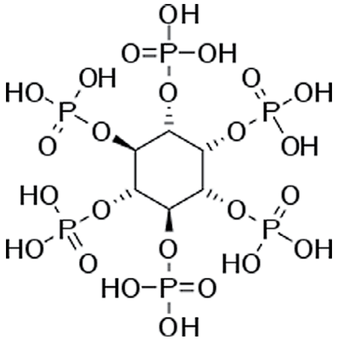
2) การแปรสภาพของธาตุอาหารซึ่งเคยอยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์มาเป็นรูปสารอนินทรีย์ด้วยกระบวนการมินเนอราลไลเซชัน เช่น จากหมู่อะมิโนในกรดอะมิโน (ไนโตรเจนในรูปสารอินทรีย์) ได้แปรสภาพกลายเป็นแอมโมเนียมไอออน (ไนโตรเจนในรูปสารอนินทรีย์) (Tate III, 2000)

ตัวอย่างที่ 2 การแปรสภาพของสารอินทรีย์ฟอสเฟตในปุ๋ยอินทรีย์

สารประกอบอินทรีย์ฟอสเฟตที่มีในปุ๋ยอินทรีย์ ได้แก่ กรดไฟติกซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่ากรดเฮกซะฟอสฟอริกเอสเทอร์ของอิโนซิตอล (ภาพที่ 9-ใน 1 โมเลกุลมีหมู่ฟอสเฟต 6 หมู่) พบมากในเมล็ดพืชและฟอสโฟลิปิดในเยื่อหุ้มเซลล์ ฟอสโฟลิพิดเกิดจากการรวมตัวของกลีเซอรอล 1 โมเลกุล กรดไขมัน 2 โมเลกุล และกรดฟอสฟอริก 1 โมเลกุล แต่ละโมเลกุลจึงมีหมู่ฟอสเฟต 1 หมู่ (Brown and Poon, 2005) จุลินทรีย์ดินสามารถสลายพันธะที่เชื่อมหมู่ฟอสเฟตกับอิโนซิตอล หรือ

ที่เชื่อมหมู่ฟอสเฟตกับกลีเซอรอลได้ ทำให้หมู่ฟอสเฟตหลุดออกมาเป็นอิสระในรูปฟอสเฟตไอออนซึ่งเป็นประโยชน์ต่อพืช (Tate III, 2000)

ส่วนโพแทสเซียมนั้นอยู่ในเซลล์พืชรูปโพแทสเซียมไอออน ในลักษณะไอออนอิสระในของเหลวภายในเซลล์หรือดูดซับกับประจุลบที่ผิวของสารโมเลกุลใหญ่ เมื่อเซลล์พืชตายโพแทสเซียมไอออนจึงออกมาเป็นโพแทสเซียมไอออนในดิน (ยงยุทธ, 2558)



ภาพที่ 9 หมู่ฟอสเฟต 6 หมู่ในโครงสร้างของกรดไฟติก
ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Phytic_acid

9. ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์จากปุ๋ยชีวภาพ

ปุ๋ยชีวภาพคือปุ๋ยที่ได้จากการนำจุลินทรีย์มีชีวิต ที่สามารถช่วยเพิ่มธาตุอาหารหรือช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช กิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพที่เอื้อต่อพืชในด้านธาตุอาหารมีดังนี้ (ธงชัย, 2558)

9.1 กิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ

กิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพแตกต่างกันตามชนิดของจุลินทรีย์ เช่น เชื้อไรโซเบียมมีกิจกรรมการตรึงไนโตรเจนจึงเป็นพวกที่ช่วยเพิ่มธาตุอาหาร ส่วนเชื้อราไมคอร์ไรซาช่วยละลายสารประกอบฟอสเฟตในดินที่ละลายยาก ช่วยดูดและเคลื่อนย้ายฟอสเฟตไอออนให้เซลล์รากพืช จึงอยู่ในกลุ่มที่ช่วยให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์กับพืช

9.2 ธาตุอาหารที่ได้จากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในปุ๋ยชีวภาพ

ขอยกตัวอย่างรูปของธาตุอาหารที่ได้จากกิจกรรมของเชื้อไรโซเบียมและเชื้อราไมคอร์ไรซาดังนี้

1) เชื้อไรโซเบียมเข้าไปในรากของพืชตระกูลถั่ว (ที่เหมาะกับเชื้อนั้น) ทางขนราก แล้วสร้างปมราก แบคทีรอยด์ในปมรากใช้เอนไซม์ไนโตรจีเนสดึงก๊าซไนโตรเจนมารีดิวซ์ได้แอมโมเนีย แล้วส่งแอมโมเนียไปให้เซลล์พืชสังเคราะห์กรดอะมิโน สรุปได้ว่ารูปของธาตุอาหารที่เซลล์รากได้รับ คือ “ไนโตรเจนในรูปแอมโมเนีย”

2) กิจกรรมของเชื้อราไมคอร์ไรซาคือ

ตารางที่ 3 ธาตุอาหารหลักรูปที่เป็นประโยชน์ที่มาจากดิน ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ (เฉพาะธาตุอาหารหลัก)

ธาตุ	ที่มา	รูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช
ไนโตรเจน	ดิน	NH_4^+, NO_3^-
	ปุ๋ยเคมี: ยูเรีย	$CO(NH_2)_2$ ต่อมาเปลี่ยนแปลงเป็น NH_4^+ และ NO_3^- ตามลำดับ
	ปุ๋ยเคมี: แอมโมเนียมซัลเฟต	NH_4^+ ต่อมาเปลี่ยนแปลงเป็น NO_3^-
	ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด	NH_4^+ ต่อมาเปลี่ยนแปลงเป็น NO_3^-
ฟอสฟอรัส	ดิน	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}
	ปุ๋ยเคมี: ทิปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต	$H_2PO_4^-$
	ปุ๋ยเคมี: ไดแอมโมเนียมฟอสเฟต	HPO_4^{2-} (มี NH_4^+ ด้วย)
	ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด	$H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}
โพแทสเซียม	ดิน	K^+
	ปุ๋ยเคมี: โพแทสเซียมคลอไรด์	K^+
	ปุ๋ยเคมี: โพแทสเซียมซัลเฟต	K^+
	ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยพืชสด	K^+

ที่มา: ยงยุทธ และคณะ (2556)

อยู่ร่วมกับรากพืช จากนั้นเชื้อราก็ช่วยละลายสารประกอบฟอสเฟตที่ละลายยากในดินให้สลายและปลดปล่อยฟอสเฟตไอออนออกมาในสารละลายดิน ต่อมาเส้นใยราก็ดูดฟอสเฟตดังกล่าวและส่งต่อให้เซลล์รากพืชไปใช้ประโยชน์ สรุปได้ว่ารูปของธาตุอาหารที่เซลล์รากได้รับคือ “ฟอสฟอรัสในรูปฟอสเฟตไอออน”

จากที่กล่าวมาในข้อ 7-9 แสดงว่า ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ซึ่งมีอยู่ในดิน ได้รับจากปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยชีวภาพ ส่วนมากอยู่ในรูปไอออนซึ่งมีขนาดของหน่วยวัดนาโนเมตร ตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างเฉพาะธาตุอาหารหลักเท่านั้น เมื่อมองภาพรวมทั้งหมดจึงสรุปในแง่ของขนาดธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช จากปุ๋ยทุกชนิดที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า “มีขนาดที่วัดได้ในหน่วยนาโนเมตรทั้งสิ้น”

10. ปริมาณธาตุอาหารที่พืชต้องการ

อีกประเด็นหนึ่งที่ควรกล่าวถึงก็คือ พืชต้องการธาตุอาหารปริมาณเท่าใด จึงจะให้ผลผลิตระดับที่เหมาะสม และปริมาณธาตุอาหารที่ติดไปกับผลผลิตพืช เพื่อประกอบการพิจารณาว่า “เป็นไปได้ไหมที่จะมีปุ๋ยชนิดพิเศษ ซึ่งใช้เพียงนิดเดียวก็ให้ธาตุอาหารเพียงพอสำหรับพืช 1 ไร่”

10.1 ความต้องการธาตุอาหารของพืช

ความต้องการธาตุอาหารของพืช คือ ปริมาณธาตุอาหารแต่ละธาตุที่พืชดูดไปสะสมไว้เพื่อสร้างผลผลิตระดับที่กำหนด ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีความต้องการธาตุอาหารต่างกัน ในที่นี้ขอยกตัวอย่างการผลิตข้าวให้ได้น้ำหนักข้าวเปลือก 1 ตัน/ไร่ ข้าวต้องมีธาตุต่างๆ สะสมในส่วนเหนือดิน

(เมล็ดและฟาง) อย่างเพียงพอ หากพิจารณาเฉพาะธาตุอาหารหลัก พบว่าต้องการไนโตรเจน 17.5 กก. ฟอสฟอรัส 3.0 กก. และโพแทสเซียม 17.0 กก. เพื่อสะสมในส่วนเหนือดินของพืชในพื้นที่ 1 ไร่ (เพื่อให้ได้ผลผลิตข้าวเปลือก 1 ตัน) และ 3 ธาตุนี้กระจายในเมล็ดและฟาง (Fairhurst *et al*., 2007) ดังตารางที่ 4 ส่วนการสะสมจุลธาตุ 3 ธาตุในระยะสุกแก่ (อายุ 130 วัน) คือ เหล็ก สังกะสี และทองแดง ในต้นข้าวและเมล็ดรวมกันจากพื้นที่ 1 ไร่ ได้แก่ เหล็ก 602.24 กรัม/ไร่ สังกะสี 93.33 กรัม/ไร่ และทองแดง 20.05 กรัม/ไร่ ดังตารางที่ 5

เมื่อดูความต้องการเฉพาะธาตุอาหารหลักที่สะสมในฟางและเมล็ดเพื่อผลิตเมล็ดข้าว 1 ตัน พบว่าต้องการ ไนโตรเจน 17.5 กก.

ตารางที่ 4 การสะสมธาตุหลักในเมล็ดและฟางของข้าวที่ปลูกโดยมีการชลประทาน

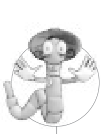
รายการ	N	P	K
สะสมในเมล็ดและฟาง (กก.ธาตุ/ผลผลิตเมล็ดข้าว 1 ตัน)	17.5	3.0	17.0
สะสมในเมล็ด (กก.ธาตุ/ผลผลิตเมล็ดข้าว 1 ตัน)	10.5	2.0	2.5
สะสมในฟาง (กก.ธาตุ/ผลผลิตเมล็ดข้าว 1 ตัน)	7.0	1.0	14.5
ความเข้มข้นของธาตุหลักในเมล็ด (%)	1.10	0.20	0.29
ความเข้มข้นของธาตุหลักในฟาง (%)	0.65	0.10	1.40

ที่มา: Fairhurst *et al*., 2007

ตารางที่ 5 ปริมาณเหล็ก สังกะสี และทองแดงที่สะสมในซังและเมล็ดของข้าวนาน้ำขังในช่วงอายุต่างๆ

อายุ (วัน)/ระยะการเติบโต	การดูดสะสม		
	(ก.Fe/ไร่)	(ก.Zn/ไร่)	(ก.Cu/ไร่)
19 (IT)	21.44	3.04	0.89
43 (AT)	65.46	7.80	2.41
68 (IP)	168.80	31.29	4.54
90 (B)	224.48	65.61	4.26
102 (F)	352.32	88.86	4.45
130 (PM)	559.84	87.73	3.31
130 (เมล็ด)	42.40	5.60	16.74

*ระยะการเติบโตของข้าว: IT = initiation of tillering หรือต้นข้าวเริ่มแตกหน่อ (อายุ 19 วัน) AT = active tillering หรือแตกหน่อรวดเร็ว (อายุ 43 วัน) IP = initiation of panicle หรือก่อกำเนิดช่อดอกอ่อน (อายุ 68 วัน) B = booting หรือตั้งท้อง (อายุ 90 วัน) F = flowering หรือออกดอก (อายุ 102 วัน) และ PM = physiological maturity หรือสุกแก่ (อายุ 130 วัน)
ที่มา: Fageria (2014)



10.2 ปริมาณธาตุอาหารที่ติดไปกับผลผลิตพืช

ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตพืชแต่ละชนิด จะมีธาตุอาหารต่างๆ ติดไปกับผลผลิตเสมอ หากพิจารณาเฉพาะการสูญเสียธาตุหลักไปกับผลผลิตข้าว จะพบในตารางที่ 4 ว่าเมล็ดข้าวเปลือก 1 ตัน มีไนโตรเจน 10.5 กก. ฟอสฟอรัส 2.0 กก. และโพแทสเซียม 2.5 กก. (Fairhurst *et al.*, 2007) สำหรับพืชอื่นๆ อีก 8 ชนิด ปริมาณธาตุอาหารหลักที่ติดไปกับผลผลิตที่เก็บเกี่ยวไป 1 ตัน มีไนโตรเจน 0.8-15.6 กก. ฟอสฟอรัส 0.1-2.9 กก. และโพแทสเซียม 1.8-4.2 กก. (ยงยุทธ และคณะ, 2556) ดังตารางที่ 6

11. ปุ๋ยอนุภาคขนาดนาโนมีจริงๆ

จากแนวคิดในการนำนาโนเทคโนโลยี (nanotechnology) มาใช้ในการพัฒนาปุ๋ย เริ่มจากปุ๋ยจุลธาตุพวกโลหะ เนื่องจากปุ๋ยจุลธาตุในกลุ่มนี้ ซึ่งประกอบด้วย เหล็ก ทองแดง แมงกานีส และสังกะสี รูปที่ใช้ได้ผลดีคือรูปคีเลต ซึ่งต้องผลิตด้วยกระบวนการคีเลชัน (chelation) และความเข้มข้นของธาตุเหล่านั้นในปุ๋ยคีเลตค่อนข้างต่ำ (ยงยุทธ และคณะ, 2556) ส่วนในรูปออกไซด์ คือ เฟอรัสออกไซด์ (FeO) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) แมงกานีสออกไซด์ (MnO) และคิวปริกออกไซด์ (CuO) แม้จะมีความเข้มข้นของธาตุสูง (ตารางที่ 7) แต่ละลายน้ำยากมาก จึงไม่เป็นประโยชน์ต่อพืช การพัฒนาคือ นำสารประกอบดังกล่าวขนาดอนุภาคนาโน (nano particles) ซึ่งมีการผลิตเพื่อใช้ในงานอื่นมาทดลองใช้กับพืช

11.1 มนุษย์ต้องการ “ปุ๋ยอัจฉริยะ”

ที่กล่าวมาตั้งแต่ข้อ 1-10 สรุปได้ว่า ธาตุอาหารพืชซึ่งมาจากปุ๋ยเคมี ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยชีวภาพ รูปที่พืชใช้ประโยชน์ต่อพืชส่วนมากเป็นไอออนและส่วนน้อยเป็นโมเลกุล แต่ทั้งหมดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีหน่วยวัดเป็นนาโนเมตร

ตารางที่ 6 ปริมาณธาตุอาหารหลักที่ติดไปกับผลผิตพืช (กก.ธาตุ/ตัน ผลผลิต)

พืช	ส่วนของพืช	N	P	K
ข้าวโพด	เมล็ด	15.6	2.9	3.8
มันสำปะหลัง	หัว	1.7	0.5	2.5
มันฝรั่ง	หัว	2.7	0.3	3.6
มะเขือเทศ	ผล	3.3	0.4	4.2
ทุเรียน	ผล	2.5	0.4	4.2
มะม่วง	ผล	3.0	0.4	3.3
ส้ม	ผล	1.8	0.2	2.5
สับปะรด	ผล	0.8	0.1	1.8

ที่มา: ยงยุทธและคณะ (2556)

ตารางที่ 7 ปุ๋ยจุลธาตุที่ให้เหล็ก ทองแดงและสังกะสี

ปุ๋ยจุลธาตุ	องค์ประกอบทางเคมี/ชื่อย่อ	%ธาตุอาหาร
ปุ๋ยเหล็ก		
เฟอรัสออกไซด์	FeO	77%Fe
เหล็กอีดีทีเอ	NaFeEDTA	9-12%Fe
เหล็กอีดีดีเอชเอ	FeEDDHA	6%Fe
ปุ๋ยทองแดง		
คิวปริกออกไซด์	CuO	75%Cu
คอปเปอร์อีดีทีเอ	$Na_2CuEDTA$	9-13%Cu
คอปเปอร์เอชอีดีทีเอ	NaCuHEDTA	9%Cu
ปุ๋ยสังกะสี		
สังกะสีออกไซด์	ZnO	50-78%Zn
สังกะสีอีดีทีเอ	$Na_2ZnEDTA$	9-14%Zn
สังกะสีเอชอีดีทีเอ	NaZnHEDTA	9%Zn

ที่มา: ยงยุทธ และคณะ (2557)

ซึ่งเป็นปุ๋ยธรรมดาทั่วไปที่เกษตรกรใช้กันมานานแล้ว ต่อมาเมื่อนาโนเทคโนโลยีเป็นที่รู้จักเมื่อประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา และเริ่มนำมาใช้ในการสร้างผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ เมื่อ 10 ปีที่แล้ว ทำให้นักวิชาการคิดถึงการผลิต “ปุ๋ยอัจฉริยะ (smart fertilizers)” ซึ่งควรมีสมบัติ 2 ประการ คือ (1) ปลดปล่อยธาตุอาหารช้าและออกมาเมื่อพืชต้องการ และ (2) พืชดูดไปใช้ได้ง่าย มีประสิทธิภาพการใช้สูงกว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป โดยคาดหมายว่า ปุ๋ยซึ่งมีอนุภาคนาโน (nano particles, NPs) และ นาโนแคปซูล (nano-capsules) คือ “ปุ๋ยอัจฉริยะ” ตามที่ต้องการ (Roosta *et al*., 2015)

ปุ๋ยเคมีซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 100 นาโนเมตร หรือที่เรียกว่าอนุภาคนาโนที่ผลิตในระยะเริ่มต้น เป็นปุ๋ยที่ให้ธาตุเหล็ก ทองแดง และสังกะสี ซึ่งมีสมบัติที่สำคัญคือเป็นอนุภาคปุ๋ยที่มีสภาพไวปฏิกิริยา (reactivity) สูงเนื่องจากพื้นที่ผิวจำเพาะ (specific surface area) สูง และพื้นที่ผิวแต่ละส่วนยังไวปฏิกิริยา (reactive area) ด้วย

ปุ๋ยอนุภาคขนาดนาโนที่นำมาใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารพืชในปัจจุบัน เป็นปุ๋ยจุลธาตุในรูปออกไซด์ คือ เฟอรัสออกไซด์ (FeO) (Roosta *et al*., 2015) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) (Adhikari *et al*., 2015) และคิวปริกออกไซด์ (CuO) (Adhikari *et al*., 2016;) ดังนี้

11.2 ปุ๋ยจุลธาตุอนุภาคนาโน

ปุ๋ยจุลธาตุอนุภาคนาโนที่เริ่มนำมาทดลองใช้กับพืชได้แก่ ปุ๋ยเหล็ก สังกะสี และทองแดง โดยนำเฟอรัสออกไซด์ สังกะสีออกไซด์ และคิวปริกออกไซด์ มาทำให้มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร หรือเป็นอนุภาคนาโน และคาดหมายว่าเมื่อผลิตในระดับอุตสาหกรรมปุ๋ย

อาจเป็นทางเลือกที่ใช้ทดแทนเกลืออนินทรีย์ (เฟอรัสซัลเฟต สังกะสีซัลเฟต และคิวปริกซัลเฟต) หรือ ปุ๋ยเหล็ก สังกะสี และทองแดงรูปคีเลต

1) ปุ๋ยเหล็กที่ใช้กันแต่เดิมมี 3 กลุ่ม คือ (1) เกลืออนินทรีย์ เช่น เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) (2) คีเลตสังเคราะห์ เช่น NaFe-EDTA, Fe-EDDHA และ (3) คีเลตธรรมชาติ ซึ่งมีกรดอะมิโนหรือสารฮิวเมตทำหน้าที่เป็นสารคีเลต (chelating agent) ซึ่งการใช้ปุ๋ยจุลธาตุ 3 กลุ่มนี้ทางใบก็ให้ผลในการแก้ปัญหาขาดธาตุเหล็กของพืชได้ดี แต่หวังว่าปุ๋ยเฟอรัสออกไซด์ขนาดนาโน (เล็กกว่า 100 นาโนเมตร) จะเป็นทางเลือกใหม่

2) ปุ๋ยสังกะสีที่ใช้กันแต่เดิมมี 3 กลุ่ม คือ (1) เกลืออนินทรีย์ เช่น สังกะสีซัลเฟต ($ZnSO_4$) (2) คีเลตสังเคราะห์ เช่น Na_2Zn-EDTA, NaZn-HEDTA และ (3) คีเลตธรรมชาติ ซึ่งมีกรดอะมิโนหรือสารฮิวเมตทำหน้าที่เป็นสารคีเลต การนำปุ๋ยสังกะสีออกไซด์ขนาดนาโนมาทดลองใช้ เพื่อเป็นอีกทางเลือกหนึ่ง

3) ปุ๋ยทองแดงที่ใช้กันแต่เดิมมี 3 กลุ่ม คือ (1) เกลืออนินทรีย์ เช่น คิวปริกซัลเฟต ($CuSO_4$) (2) คีเลตสังเคราะห์ เช่น Na_2Cu-EDTA, NaCu-HEDTA และ (3) คีเลตธรรมชาติ ซึ่งมีกรดอะมิโนหรือสารฮิวเมตทำหน้าที่เป็นสารคีเลต การนำปุ๋ยคิวปริกออกไซด์ขนาดนาโนมาทดลองใช้ เพื่อพิจารณาความเหมาะสม ในการใช้ทดแทนปุ๋ยแบบเดิม

11.3 การใช้ปุ๋ยจุลธาตุอนุภาคนาโนในการทดลองกับพืช

เนื่องจากสารประกอบเฟอรัสออกไซด์ คิวปริกออกไซด์และสังกะสีออกไซด์เป็นสารประกอบที่ละลายน้ำยาก เมื่อนำมาผสมน้ำจะมีสภาพสารแขวนลอย (suspension) เพื่อให้สารแขวนลอยมีความสม่ำเสมอ ต้องกวนด้วยเครื่องกวนเชิงกล (mechanical stirrer) ความเร็วสูง ป้องกันมิให้อนุภาครวมกลุ่ม (aggregation) กันใหม่ แล้วนำไปใส่ในสารละลายธาตุอาหารสำหรับปลูกพืช

11.4 ผลการใช้ปุ๋ยนาโน

การวิจัยด้านการใช้ปุ๋ยจุลธาตุนาโนกับพืชต่างๆ ในปัจจุบัน ส่วนมากใช้ในการปลูกพืชด้วยสารละลายธาตุอาหาร หรือฉีดพ่นทางใบ ซึ่งได้ข้อสรุปดังนี้

1) จุลธาตุนาโน 3 ชนิด คือ เฟอรัสออกไซด์ (FeO) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) และคิวปริกออกไซด์ (CuO) เข้าไปในเซลล์พืชได้

2) จุลธาตุนาโนช่วยให้พืชทดลองเจริญเติบโตได้ดีกว่าตำรับควบคุม (สารละลายที่ไม่เติมธาตุนั้น)

3) เหล็ก สังกะสี และทองแดง มีบทบาทในการกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์ซูเปอร์ออกไซม์ดีสมิวเทส แต่ละไอโซไซม์ที่ต้องการธาตุนั้นเป็นโคแฟกเตอร์ การใช้ในรูปเกลือซัลเฟตในสารละลายปลูกพืช เช่น เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4$) สังกะสีซัลเฟต ($ZnSO_4$) และคิวปริกซัลเฟต ($CuSO_4$) หรือใช้จุลธาตุนาโนของเฟอรัสออกไซด์ (FeO) สังกะสีออกไซด์ (ZnO) และคิวปริกออกไซด์ (CuO) ก็ได้ผลด้านการกระตุ้นกิจกรรมของเอนไซม์นั้นๆ เช่นเดียวกัน

12. สรุป

1) ธาตุอาหารรูปที่เป็นประโยชน์ (ไอออนหรือโมเลกุล) ทุกธาตุ มีขนาดที่วัดด้วยหน่วยนาโนเมตร

2) ปุ๋ยเคมีทุกชนิดผลิตด้วยกระบวนทาง

ทางเคมีและฟิสิกส์ธรรมดา ไม่มีปุ๋ยเคมีชนิดใดที่ผลิตด้วยนาโนเทคโนโลยี แต่เมื่อปุ๋ยเคมีละลายน้ำและแตกตัวเป็นไอออน ก็มีขนาดที่วัดด้วยหน่วยนาโนเมตร

3) ปุ๋ยคอกและปุ๋ยหมักสลายตัวโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน และปลดปล่อยธาตุอาหารในรูปไอออนอนินทรีย์ ซึ่งมีขนาดที่วัดด้วยหน่วยนาโนเมตร

4) ไอออนของธาตุอาหารหนึ่งที่มีอยู่ในดินมาจากปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยอินทรีย์ ย่อมเหมือนกัน

5) กลไกการดูดธาตุอาหารในรูปไอออนหรือโมเลกุลขนาดเล็ก โดยโปรตีนขนส่งที่เยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์ราก โปรตีนขนส่งมีช่องที่ธาตุอาหารผ่านเยื่อเข้าไปในเซลล์ได้ด้วยกลไกเฉพาะ แล้วนำธาตุอาหารที่ดูดได้ไปใช้ประโยชน์ในเซลล์หรือเคลื่อนย้ายทางระบบท่อลำเลียงสู่อวัยวะอื่น

6) "ปุ๋ยนาโน" ที่อยู่ในขั้นตอนของการวิจัยในปัจจุบัน เป็นปุ๋ยจุลธาตุรูปออกไซด์ เช่น เฟอรัสออกไซด์ คิวปริกออกไซด์ และสังกะสีออกไซด์ ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 100 นาโนเมตร ใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารโดยใส่ในสารละลายปลูกพืช หรือฉีดพ่นทางใบ ผลการทดลองกับพืชบางชนิดแสดงว่าเซลล์พืชสามารถดูดธาตุอาหารเหล่านี้ในลักษณะอนุภาคนาโนได้ เหล็ก ทองแดง และสังกะสีในปุ๋ย ช่วยให้พืชเจริญเติบโตและแสดงบทบาทของแต่ละธาตุในเซลล์พืช

12. เอกสารอ้างอิง

พระราชบัญญัติปุ๋ย (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550. ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เล่ม 125 ตอนที่ 7 ก วันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2551.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2548. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ธงชัย มาลา. 2558. อินทรียวัตถุและจุลินทรีย์ดินเพื่อการเพาะปลูกพืช. *ใน* คัมภีร์ดินและปุ๋ยไทย (ประเสริฐ สุดใหม่ บรรณาธิการ) สมาคมการค้าผู้ผลิตปุ๋ยไทย. กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2549. ศัพท์ในวงการปุ๋ย. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2558. ธาตุอาหารพืช. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ยงยุทธ โอสถสภา. 2559. ปุ๋ยเคมีนาโนในมือคุณ. เกษตรอภิรมย์ 2: (มีนาคม-เมษายน) 32-34.

ยงยุทธ โอสถสภา อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ชวลิต ฮงประยูร. 2556. ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ยอดหทัย เทพธรานนท์. 2545. บทนำ. *ใน* นาโนเทคโนโลยี...เทคโนโลยีซูเปอร์จิ๋ว (ยอดหทัย เทพธรานนท์ และ ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์ บรรณาธิการ). สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

ลัดดา มีศุข. 2548. เคมีทั่วไป เล่ม 1 ฉบับรวบรัด. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

วิรุฬห์ สายคณิต และ สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว. 2545. ภาพรวมและอนาคตของนาโนเทคโนโลยี. *ใน* นาโนเทคโนโลยี...เทคโนโลยีซูเปอร์จิ๋ว (ยอดหทัย เทพธรานนท์ และ ประมวล ตั้งบริบูรณ์รัตน์ บรรณาธิการ). สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

นิรนาม. 2559. เซลล์: หน่วยพื้นฐานของชีวิต http://e-book.ram.edu/e-book/c/CU474/chapter3.pdf สืบค้นเมื่อวันที่ 30 ธันวาคม 2559.

Adhikari,T., S. Kundu, A. K. Biswas, J. C. Tarafdar & A. Subba Rao. 2015. Characterization of zinc oxide nano particles and their effect on growth of maize (*Zea mays* L.) plant. Journal of Plant Nutrition. 38 (10): 1505-1515.

Adhikari, T., D. Sarkar, H. Mashayekhi and B. Xing. 2016. Growth and enzymatic activity of maize (*Zea mays* L.) plant: Solution culture test for copper dioxide nano particles. Journal of Plant Nutrition. 39 (1): 99-115.

Anonymous. 2012. Nano-form zinc oxide in sunscreens. European Scientific Committee on Consumer Safety. European Commission. http://ec.europa.eu/health/scientific_committee/

Brown, W.H. and T. Poon. 2005. Introduction to Organic Chemistry. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Fageria, N.K. 2014. Mineral Nutrition of Rice. CRC. Press. New York.

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

Graham, L.E., J.M. Graham and L.W. Wilcox. 2003. Plant Biology. Pearson Education, Inc. New Jersey.

Roosta, H.R., M. Jalali and S. M. A. V. Shahrbabaki. 2015. Effect of nano Fe-chelate, Fe-EDDHA and $FeSO_4$ on vegetative growth, physiological parameters and some nutrient elements concentrations of four varieties of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in NFT system. Journal of Plant Nutrition. 38 (14): 2176-2184.

Tate III, R.L. 2000. Soil Microbiology. John Wiley and Sons, Inc. New York.

Wikipedia. 2559. นาโนเทคโนโลยี. สืบค้นจาก https://th.wikipedia.org/wiki/ แก้ไขล่าสุดเมื่อวันที่ 13 ตุลาคม 2559 เวลา 11:50 น