

ผลของการเคลือบปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของธัญพืช

ชินาลักษณ์ พริงเพราะ^{1,2} และ เบ็ญจพร กุลนิตย^{2,3*}

¹สถานีวิจัยพัฒนาที่ดินบุรีรัมย์ สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 3 กรมพัฒนาที่ดิน อำเภอคูเมือง จังหวัดบุรีรัมย์ 31190

²ภาควิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150

³กลุ่มวิจัยการจัดการอินทรีย์วัตถุของดิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40002

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อตรวจสอบการที่เกี่ยวของกับผลของการเคลือบปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของธัญพืช พบว่า การเคลือบปุ๋ยด้วยวัสดุต่างๆ เช่น เรซิน พอลิเมอร์ และวัสดุอินทรีย์ (ขี้เถ้าลอย) สามารถช่วยชะลอการปลดปล่อยของธาตุอาหารและสามารถทำให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้น พร้อมทั้งทำให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของธัญพืช (เช่น ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าว และข้าวสาลี) เพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีที่ไม่ได้เคลือบ การเคลือบปุ๋ยสามารถช่วยลดการสูญเสียของธาตุอาหารจากปุ๋ย โดยเฉพาะไนโตรเจน (Nitrogen, N) ที่จะสูญเสียในรูปการระเหยไปเป็น NH_3 (NH_3 volatilization)

คำสำคัญ: การเคลือบปุ๋ย ไนโตรเจนปุ๋ยเคมี และ ธัญพืช

* ผู้เขียนให้ติดต่อ: E-mail: benja_kun13@hotmail.com

Effect of Fertilizer Coating on Growth and Yield of Cereal Crops

Chinalai Pringproh^{1,2} and Benjapon Kunlanit^{2,3*}

¹Buriram Land Development Station, Land Development Regional Office 3, Land Development Department,
Khu Mueang District, Buriram, 31190, Thailand

²Department of Agricultural Technology, Faculty of Technology, Maha Sarakham University,
Kantarawichai District, Maha Sarakham, 44150, Thailand

³Soil Organic Matter Management Research Group, Khon Kaen University, Mueang,
Khon Kaen, 40002, Thailand

Abstract

The objective of this study was to literature reviews relevant to effect of fertilizer coating on growth and yield of cereal crops. There are shown that fertilizer coating with materials such as resin, polymer and organic compound (fly ash) lead to slow release of plant nutrients. This enhances availability of nutrients in plants. Application of coated fertilizer provided high growth and yield of cereal crops (i.e. maize, rice and wheat) than uncoated fertilizer. Coating fertilizer can be reduced nutrients loss in plant especially nitrogen (N), which is lost as NH₃ (NH₃ volatilization).

Keywords: Fertilizer coating, Nitrification, Chemical fertilizer and Cereal crops

*Corresponding author: E-mail: benja_kun13@hotmail.com

ธาตุอาหารในดิน

ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน (Nitrogen, N) ฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) และโพแทสเซียม (Potassium, K) เป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมากเพื่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิต (Vityakon, 2004) ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตพืชออกไปในแต่ละปีนั้น ธาตุอาหารในรูปที่เป็นประโยชน์ในดินจะลดลงไปเรื่อยๆ (Osotsapha *et al.*, 2011) ธาตุอาหารในดินสูญเสียไป 4 ทางด้วยกัน ได้แก่ 1) การเก็บเกี่ยวผลผลิตพืช โดยพืชอาจถูกเก็บเกี่ยวออกไปเฉพาะดอก ผล หัว หรือส่วนเหนือดิน ปริมาณธาตุอาหารที่สูญเสียไปกับการเก็บเกี่ยวแต่ละครั้งจึงขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิต ความเข้มข้นของธาตุอาหารในผลผลิต ตลอดจนการจัดการกับเศษซากพืชที่เหลือกลับมาใส่ในพื้นที่ ธาตุอาหารก็จะหมุนเวียนในดิน 2) การชะล้าง (leaching) น้ำฝนหรือน้ำชลประทานส่วนเกินซึ่งดินไม่อาจดูดซับได้ และไหลผ่านชั้นดินลงไปชั้นล่าง ย่อมชะไอออนและอินทรีย์สารที่แขวนลอยในสารละลายของดินไปด้วย ธาตุอาหารส่วนนี้จึงอาจลงไปสู่ดินในระดับที่ลึกหรือไหลออกนอกพื้นที่ซึ่งไม่เป็นประโยชน์ประโยชน์ต่อพืช โดยสภาพนี้มักเกิดในพื้นที่ที่มีฝนตกชุกหรือใช้น้ำชลประทานมากเกินไป 3) การชะล้างพังทลายของดิน (soil erosion) เกิดขึ้นเมื่อก่อนดินถูกตัวการ คือ น้ำหรือลมทำให้แตกกระจายและพัดพาไปจากบริเวณเดิม ที่เกิดขึ้นมากในประเทศไทย คือ การชะล้างพังทลายของผิวดินโดยน้ำในบริเวณพื้นที่ที่มีความลาดชันสูง พร้อมทั้งดินมีโครงสร้างเลว ผิวดินไม่ค่อยมีพืชหรือวัสดุปกคลุม ไถพรวนตามแนวลาดเทของพื้นที่ และขาดการอนุรักษ์ดินที่เหมาะสมในพื้นที่ และ 4) การสูญเสียในรูปของก๊าซมักเกิดกับสารประกอบแอมโมเนียม (NH_4^+) ในดินต่าง และสารประกอบไนเตรท (NO_3^-) ในดินที่ขาดออกซิเจน เช่น ดินน้ำท่วมขัง กล่าวคือ สารประกอบ NH_4^+ จะทำปฏิกิริยาในดินได้ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) และระเหยออกไป ส่วนสารประกอบไนเตรท ก็ถูกรีดิวซ์โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินได้ออกไซด์ของ N ซึ่งเป็นก๊าซ (Sukhothai Thammathirat Open University, 2005) จากการสูญเสียดังกล่าว นอกจากจะมีผลต่อพืชและธาตุอาหารที่อยู่ในดินแล้ว ยังส่งผลต่อสภาพแวดล้อมด้วย ประเทศในแถบอเมริกาเหนือและทวีปยุโรปมีการใช้ปุ๋ยเคมีอย่างกว้างขวาง ซึ่งได้

ตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการใช้ปุ๋ยเคมีในอัตราสูงโดยเฉพาะปุ๋ย N กล่าวคือ 1) NH_4^+ จากปุ๋ยเคมีหรือจากปุ๋ยอินทรีย์ ที่คงเหลือในดินซึ่งมีการถ่ายเทอากาศดี บางส่วนจะแปรสภาพเป็น NO_3^- การชะล้างของไอออนนี้ไปสะสมในน้ำใต้ดิน ทำให้มี NO_3^- มากจนไม่เหมาะที่จะใช้บริโภค ซึ่งผู้ที่ดื่มน้ำที่มี NO_3^- ปนเปื้อนเป็นระยะเวลานานก็มีความเสี่ยงเป็นโรคมะเร็งได้ และพิษของ NO_3^- ทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า “Blue-baby syndrome หรือ methemoglobinemia” และมักเกิดในเด็กทารกที่อายุต่ำกว่า 4 เดือนที่ดื่มน้ำที่ปนเปื้อน NO_3^- ในปริมาณสูง (Greer *et al.*, 2005) สำหรับปริมาณ NO_3^- ตามปริมาณมาตรฐานน้ำดื่มของสหรัฐอเมริกา คือ NO_3^- ไม่เกิน 10 มก. N /ลิตร ส่วนสหภาพยุโรป ส่วนสหภาพยุโรป กำหนดให้มีได้ไม่เกิน 50 มก. NO_3^- /ลิตร และ 2) ในสภาพที่ดินขาดออกซิเจน NO_3^- จะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นก๊าซ NO_2 , N_2O , NO และ N_2 ซึ่งระเหยไปสะสมในบรรยากาศ นับเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้โลกร้อนขึ้น เนื่องจาก NO_2 , N_2O , NO และ CO_2 ทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ (Osotsapha *et al.*, 2011) จาก การตระหนักถึงผลด้านสิ่งแวดล้อมข้างต้น และความจำเป็นที่ต้องลดการสูญเสียของธาตุอาหารไปจากระบบดิน-พืชจากการใช้ปุ๋ยเคมีในการผลิตพืช โดยการชะล้าง (leaching) และการไหลบ่า (runoff) ไปกับน้ำ (Chen *et al.*, 2017) ทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดผลกระทบดังกล่าว คือการใช้ปุ๋ยเคลือบ ปัจจุบันมีการผลิตปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยหรือปุ๋ยละลายช้า ซึ่งปุ๋ยเคมีที่จะบรรจุอยู่ในสารเคลือบหรือปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizer) เป็นการเคลือบผิวของเม็ดปุ๋ยให้ละลายช้าขึ้นและจะปลดปล่อยออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้น และปลอดภัยต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น การศึกษานี้จึงได้ปริทัศน์บทความวิจัยและวิชาการที่เกี่ยวข้องกับผลของการเคลือบปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของพืช โดยเฉพาะในธัญพืช

ปุ๋ย

ปุ๋ย (Fertilizer) หมายถึง วัสดุหรือสารที่ใส่ลงในดินหรือใส่ในวัสดุปลูกพืช หรือฉีดพ่นบนส่วนเหนือดินของพืช โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะให้พืชได้รับธาตุอาหาร เช่น N, P และ K อย่างเพียงพอ และสมดุลตามที่พืชต้องการ และให้

ได้ผลผลิตสูงขึ้น หรือมีคุณภาพตามที่ต้องการ (Suwanarit, 2010) และปุ๋ยที่สามารถให้ธาตุอาหารแก่พืชได้ในปริมาณสูงตามที่พืชต้องการ ได้แก่ ปุ๋ยเคมี ซึ่งเป็นปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการผลิตหรือสังเคราะห์ทางอุตสาหกรรมจากแร่ต่างๆ ที่ได้จากธรรมชาติ หรือเป็นผลพลอยได้ของโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด โดยทั่วไปแล้วธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อพืชและพืชต้องการในปริมาณมาก โดยพืชจะขาดธาตุใดธาตุหนึ่งไม่ได้ เพราะธาตุอาหารหลักพืชต้องดูดไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตมากกว่าธาตุอื่นๆ โดย N พืชดูดใช้ในรูป NH_4^+ และ NO_3^- สำหรับ P พืชดูดไปใช้ในรูป H_2PO_4^- และ HPO_4^{2-} และ K ในรูป K^+ สำหรับ N ถ้าพืชได้รับในปริมาณที่เหมาะสมจะเป็นธาตุอาหารที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตทางด้านลำต้น และใบของพืช ส่วนธาตุ P ได้จากหินฟอสเฟต (phosphate rock) ซึ่งเป็นหินที่มีแคลเซียมฟอสเฟต และ K ได้จากอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) และในรูปของแร่เฟลสปาร์ (feldspar) ไมก้า (mica) และแร่ดินเหนียว (clay mineral) (Agricultural Editor, 2016) P มีส่วนช่วยส่งเสริมการเจริญของรากฝอย และรากแขนงในระยะแรกของการเจริญเติบโต และช่วยในการสร้างดอก และเมล็ด และ K จำเป็นต่อการสร้างคาร์โบไฮเดรต และช่วยในการเคลื่อนย้ายแป้ง และน้ำตาล และทำให้ผลผลิตมีคุณภาพ (Panchapan, 2002) และเมื่อพืชขาดธาตุอาหารเหล่านี้พืชก็จะแสดงอาการ เช่น ขาด N จะเกิดการชะงักการเจริญเติบโต เมล็ดงอกช้า ต้นอ่อนโตช้า ลำต้นมีความสูงแต่พอมไม่สมบูรณ์ กิ่งก้านมีจำนวนน้อย แตกยอดช้า และลีบเล็ก ใบพืชจะมีสีเหลือง โดยเริ่มจากปลายใบโคนใบ และเกิดกับใบแก่ก่อน นอกจากนี้จะได้ผลผลิตต่ำแล้ว ผลผลิตยังไม่มีคุณภาพอีกด้วย ขาด P รากของพืชจะพอมบาง สั้น และมีปริมาณน้อย ลำต้นแคระแกรน การเจริญเติบโตหยุดชะงัก และออกดอกช้ากว่าปกติ อีกทั้งดอกจะมีขนาดเล็ก และผลผลิตลดลง ส่วนการขาดธาตุ K จะเกิดการชะงักการเจริญเติบโต ลำต้นอ่อน ล้มง่าย และการต้านทานโรคลดลง หากเป็นพืชน้ำมันและพืชหัวจะมีปริมาณน้ำมันและการสะสมแป้งในหัวต่ำ (Vityakon, 2004)

เพื่อลดการขาดธาตุอาหารของพืช การใช้ปุ๋ยทางดินอย่างไรก็ตาม เป็นวิธีปฏิบัติที่นิยมโดยปกติของเกษตรกร ซึ่งพืชสามารถนำธาตุอาหารที่ใส่ทางดินไปใช้ได้เพียง 25-30% ของธาตุอาหารจากปุ๋ยที่ใส่ลงไปในดิน และมีการสูญเสียโดย

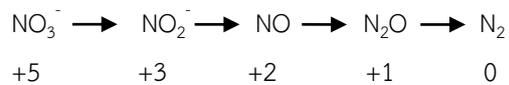
เปล่าประโยชน์ถึง 75% ของปุ๋ยที่ใส่ลงไป การสูญเสียเกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ในดินเปลี่ยนรูปธาตุอาหารพืชเป็นสารประกอบที่พืชนำไปใช้ไม่ได้ หรือรูปที่พืชใช้ได้ยาก เป็นต้น (Haifa Chemical Thailand, 2012)

การสูญเสียธาตุปุ๋ยไปจากดิน

1. การสูญเสียไนโตรเจนจากดิน

การสูญเสีย N ในรูปก๊าซ (gaseous losses of nitrogen) N ในดินสามารถสูญเสียไปในบรรยากาศได้ในรูปของก๊าซหลายชนิด ได้แก่ ก๊าซ N (nitrogen gas, N_2), ก๊าซแอมโมเนีย (ammonia, NH_3) และก๊าซในรูปของออกไซด์ต่างๆ ของ N เช่น ไนตริกออกไซด์ (nitric oxide, NO) และไนตรัสออกไซด์ (nitrous oxide, N_2O) เป็นต้น การสูญเสีย N จากดินในรูปของก๊าซที่พบบ่อย คือ จากกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) การไฮโดรไลซิสของยูเรีย (urea hydrolysis) การระเหยของแอมโมเนีย (ammonia volatilization) และการชะล้างของไนเตรท (nitrate leaching) (Vityakon, 2004)

1) กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) กระบวนการดีไนตริฟิเคชันเกิดขึ้นโดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินต้องการ O_2 ดังนั้น เมื่อดินขาด O_2 หรืออยู่ในสภาพน้ำขัง (anaerobic condition) ไม่มีช่องว่างให้อากาศผ่าน มีจุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งที่สามารถดึงเอาออกซิเจนที่ต้องการจากโมเลกุลของสารประกอบ N ในดินคือ NO_2^- และ NO_3^- เมื่อเกิดการดึงเอาออกซิเจนจากสารประกอบ N ไปใช้ซึ่งก็คือการรีดิวซ์ NO_3^- ให้เป็น NO_2^- และในที่สุดก็จะเกิดก๊าซ N_2O และ N_2 กลับคืนสู่บรรยากาศ เรียกกระบวนการนี้ว่า “ดีไนตริฟิเคชัน” (ตั้งสมการด้านล่าง) ซึ่งในสภาพน้ำขังที่เอื้อต่อการเกิดกระบวนการนี้ต้องมีสารประกอบอินทรีย์เพียงพอเพื่อเป็นแหล่งพลังงานและเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (hydrogen donor) ส่วน NO_3^- ในดินก็ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (electron acceptor) นั้นเอง



สมการแสดงกระบวนการดีไนตริฟิเคชันและตัวเลขแสดงค่าวาเลนซ์ของไนโตรเจน

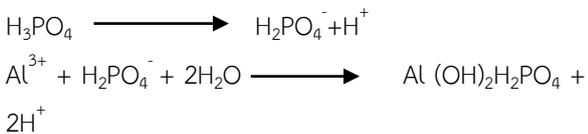
(buffer) 2) รากพืชดูดใช้ NH_4^+ และฟอสเฟตไอออนไปใช้ประโยชน์ และ 3) ฟอสเฟตไอออนถูกตรึง (fixed) ไว้ (Osotsapha *et al.*, 2011)

2) ทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟต เมื่อใส่ปุ๋ยทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตในดินที่มีความชื้นเพียงพอ ปุ๋ยจะดูดความชื้นจากดินแล้วทำปฏิกิริยากับน้ำได้แคลเซียมโมโนไฮโดรเจนฟอสเฟตไดไฮเดรต ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) กับกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ดังสมการ



กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) มีลักษณะเป็นของเหลวข้นและเย็นออกมารอบๆ เม็ดปุ๋ยเมื่อเม็ดปุ๋ยดูดความชื้นจากดินมากขึ้นจะเกิดการตกมากขึ้นด้วย เป็นสาเหตุให้ pH ของดินรอบๆ เม็ดปุ๋ยและบริเวณที่กรดแพร่ไปถึงลดต่ำมาก หรือเป็นกรดรุนแรง สารประกอบหลัก อลูมิเนียม และแมงกานีสที่อยู่ในดินละลายและแตกตัวเป็นไอออน และทำปฏิกิริยากับอนุกรมฟอสเฟต (H_2PO_4^-) จากกรดฟอสฟอริก ได้สารประกอบซึ่งละลายน้ำได้ยาก ดังนั้น ฟอสเฟตส่วนนี้จากปุ๋ยจึงแปรสภาพเป็นรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้ หรือเรียกว่าการถูกตรึง และการตรึงฟอสเฟตในดินกรด ดินเป็นกลาง และดินด่าง ดังนี้

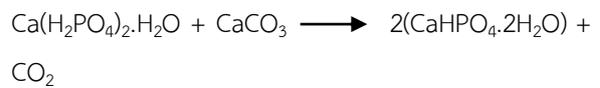
2.1) การตรึง P ในดินกรด สำหรับดินเป็นกรดรุนแรงนั้นจะมีเหล็ก อลูมิเนียมและแมงกานีสไอออนอยู่มาก ในกรณีที่ฟอสเฟตไอออนทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมไอออน (Al^{3+}) จะได้เกลืออลูมิเนียมฟอสเฟต ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$) ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ดังสมการ



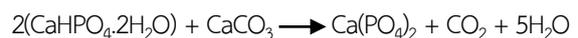
2.2) ในดินกรดถึงเป็นกลาง ฟอสเฟตไอออนทำปฏิกิริยากับอลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ เช่น กิบไซต์ (gibbsite, $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) และโกไทต์ (goethite, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ตลอดจนแร่ดินเหนียวพวก 1:1 การตรึง P ซึ่งเกิดในช่วง pH ของดินกว้าง คือตั้งแต่ 4-7 แต่มีโอกาสเกิดได้มากในดินกรดหากดินที่มีอลูมิเนียมออกไซด์ เหล็กออกไซด์

และแร่ดินเหนียวซิลิเกตพวก 1:1 มาก การตรึง P ของดินก็สูงขึ้นด้วย สำหรับ P ที่ถูกตรึงด้วยอลูมิเนียมออกไซด์และเหล็กออกไซด์แล้วนี้ เมื่อเวลาผ่านไปอาจมีเหล็กหรืออลูมิเนียมไฮดรอกไซด์มาเคลือบโดยรอบอย่างหนาแน่น จึงมีโอกาสละลายได้น้อยที่สุด เรียกฟอสเฟตรูปนี้ว่า ฟอสเฟตถูกห่อหุ้ม (occluded phosphate)

2.3) ในดินด่าง ทริปเปิลซูเปอร์ฟอสเฟตทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนต ได้ไดแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งละลายน้ำได้น้อย แต่สามารถละลายในแอมโมเนียม-ซิเตรต จึงยังเป็นประโยชน์ต่อพืช ดังสมการ



แต่เมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคาร์บอเนตต่อไปจะได้ไตรแคลเซียมฟอสเฟต ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก พืชจึงใช้ประโยชน์ได้ยาก ดังสมการ



จากนั้นไตรแคลเซียมฟอสเฟตอาจเปลี่ยนแปลงต่อไป เป็นสารประกอบที่ละลายยากยิ่งขึ้น เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ ออกซีอะพาไทต์ และฟลูอออะพาไทต์ ซึ่งความเป็นประโยชน์ก็จะคล้ายหินฟอสเฟต (Osotsapha *et al.*, 2011; Johnston, 2000)

ฟอสฟอรัสเป็นธาตุอาหารที่ถูกยึดมาก การดูดยึด P ทำให้ P อยู่ในรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อพืชทันที อย่างไรก็ตาม P ที่ถูกยึดเหล่านี้สามารถถูกปลดปล่อยออกมาสู่สารละลายดินได้อีก และจะกลับเป็นประโยชน์ต่อพืช (Vityakon, 2004)

3. การสูญเสียโพแทสเซียมจากดิน

โพแทสเซียมในดินแบ่งตามความเป็นประโยชน์ของพืชได้ ดังนี้ คือ 1) รูปที่พืชดูดใช้ได้ง่ายคือ K^+ ในสารละลายดินและ K^+ ที่แลกเปลี่ยนได้ 2) รูปที่เป็นประโยชน์แก่พืชได้อย่างช้าๆ (slowly available K) คือ K^+ ที่ถูกตรึง (fixed K) อยู่ในหลีบของแร่ดินเหนียวพวก 2:1 หรือเป็นรูปที่แลกเปลี่ยนไม่ได้ (non-exchangeable K) เป็นประโยชน์ต่อพืชได้น้อย และ 3) รูปที่ไม่เป็นประโยชน์แก่พืช (unavailable K) คือ K^+ ที่เป็นองค์ประกอบของแร่ต่างๆ ใน

ดิน สำหรับธาตุ K นั้นดินอาจสูญเสียไปได้ 3 ทางคือ 1) พืชดูดไปใช้ (plant uptake) 2) ถูกชะล้าง (leaching) และ 3) ดินไปกับมวลดินที่กร่อน (erosion) (Osotsapha *et al.*, 2011)

1) การตรึงโพแทสเซียมในดิน การตรึง K ในดินเป็นกระบวนการที่แลกเปลี่ยน K ที่พืชใช้ประโยชน์ได้ทันทีหรือรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้ง่ายกว่า คือรูปของไอออนที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายดินและรูปไอออนที่ถูกยึดไว้ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียว ทำให้ไปอยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ไม่ได้โดยตรง K^+ ที่ถูกตรึงอยู่นี้ในสภาพของไอออนที่ถูกยึดไว้ด้วยแรงจำนวนมากระหว่างดินเหนียว 2 อนุภาค ส่วนการที่จะปลดปล่อยกลับคืนให้มาอยู่ในรูปที่พืชใช้ประโยชน์ได้เป็นปริมาณมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับชนิดแร่ดินเหนียวที่ตรึง K^+ นี้เอาไว้ และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของดิน กล่าวคือ ถ้าดินมีแร่ดินเหนียวหรือชนิดของดินเหนียวประเภทอิลไลต์ (illite) เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่มาก ก็จะทำให้การปลดปล่อย K^+ กลับคืนมาได้ยากกว่า เพราะอิลไลต์จะสามารถตรึง K^+ ไว้ได้แน่นหนากว่าแร่ดินเหนียวประเภทอื่น เช่น มอนมอริลโลไนท์ (montmorillonite) สภาพแวดล้อมที่จะส่งเสริมให้ K^+ ที่ถูกตรึงอยู่ปลดปล่อยกลับมาให้พืชได้ใหม่อีกคือ ดินมีความเป็นกรดเพิ่มมากขึ้น หรือดินที่มีน้ำขังอยู่เป็นเวลานานๆ เช่น ดินใช้ทำนา ดังนั้น จึงมักพบเสมอว่าดินนาซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะเป็นดินที่มีความเป็นกรดและมีเนื้อละเอียด ซึ่งมีดินเหนียวเป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณที่สูง และจะมีธาตุ K ให้แก่พืชใช้ในปริมาณที่เพียงพอ (Sukhothai Thammathirat Open University, 2005)

2) โพแทสเซียมในดินที่ถูกกร่อน (erosion) และน้ำไหลบ่า (runoff) การสูญเสีย K จากการกร่อนของดินโดยน้ำกัดเซาะในพื้นที่เพาะปลูกในสหรัฐอเมริกา (เขตร้อนชื้น) มีมากถึง 150 กก./เฮกตาร์/ปี และสูญเสียในดินป่าไม้บนที่สูงชันที่ป่าถูกแผ้วถางไปเพื่อทำการเกษตร ในเขตน้ำพรอม. เกษตรสมบูรณ์ จ. ชัยภูมิ ถึง 233 กก./เฮกตาร์ การศึกษาการกร่อนดิน และการสูญเสีย K ในพื้นที่ลาดเอียง (10%) ในดินทราย อ.ภูเวียง จ.ขอนแก่น แสดงให้เห็นว่า K เป็นธาตุอาหารที่สูญเสียมากที่สุดถึง 34 กก./เฮกตาร์ (Vityakon, 2004) และในการศึกษาในพื้นที่ลูกคลื่นที่มีการปลูกอ้อยในเขต อ.เขาสวนกวาง จ.ขอนแก่น พบว่า มีการสูญเสีย K โดยน้ำไหลบ่าถึง 18 กก./ เฮกตาร์ (Vityakon, 2004)

เนื่องจากความเป็นประโยชน์ของปุ๋ยเคมีขึ้นอยู่กับ การละลาย (dissolution) และสภาพละลายได้ (solubility) ของปุ๋ยในสารละลายดิน แต่ปุ๋ยเคมีที่ละลายง่ายและเป็นประโยชน์แก่พืชเร็ว (Osotsapha *et al.*, 2011) อาจส่งผลให้เกิดการสูญเสียของธาตุอาหารในรูปแบบต่างๆ ดังที่กล่าวมาในข้างต้น การพัฒนาปุ๋ยเคมีให้ละลายช้าน่าจะช่วยเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารแก่พืชได้มากขึ้นและลดการสูญเสียของธาตุอาหารลงได้

ปุ๋ยละลายช้า

ปุ๋ยละลายช้าเป็นที่รู้จักและใช้ปุ๋ยชนิดนี้มานานแล้ว อันที่จริงมีคำที่ใช้ในภาษาอังกฤษ 2 คำ ซึ่งมีความหมายแตกต่างกัน คือ controlled released fertilizer และ slow-release fertilizer แต่คนทั่วไปไม่ทราบว่าปุ๋ยทั้งสองประเภทนี้มีความแตกต่างกัน ทั้งอาจเข้าใจว่าใช้ทั้งสองคำแทนกันได้ หรือมีความหมายเหมือนกัน จึงเรียกเป็นภาษาไทยว่า “ปุ๋ยละลายช้า (slow-release fertilizer)” (Osotsapha *et al.*, 2011; Shviv, 2001)

ในทางวิชาการ ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizer, CRF) และปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer, SRF) มีความหมายแตกต่างกัน ดังนี้

1. ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizer)

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (controlled released fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยซึ่งมีการผลิตให้ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ นอกจากนี้ยังทราบชัดเจนว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตราและช่วงเวลาที่ยุ่่นั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหาร ทั้งมีกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยอยู่แล้วในปุ๋ยที่ผลิต เช่น ปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizer)

2. ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer)

ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (slow-release fertilizer) หมายถึง ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นในดิน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ เป็นต้น ปุ๋ยประเภทนี้ ได้แก่ ยูเรีย

ฟอร์มาดีไฮด์ (urea-formaldehyde) (Osotsapha *et al.*, 2011)

ปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อยได้รับการศึกษาอย่างแพร่หลายมากขึ้น เนื่องจากสามารถลดการสูญเสียธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพและการเคลือบปุ๋ยเป็นวิธีการลดการสูญเสียธาตุอาหารที่สำคัญอย่างหนึ่ง ปุ๋ยเคลือบได้จัดทำขึ้นโดยการเคลือบเม็ดของปุ๋ยธรรมดาด้วยวัสดุต่างๆ ซึ่งการลดอัตราการสลายตัว อัตราการปลดปล่อย และการละลายน้ำของปุ๋ยขึ้นอยู่กับวัสดุเคลือบผิว (Wu *et al.*, 2005)

1) ปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizer) การเคลือบผิวของเม็ดปุ๋ยเพื่อควบคุมการละลาย มีหลักการดังนี้ คือ 1) ผิวเคลือบมีความหนาตามแบบที่กำหนด เพื่อให้ปุ๋ยละลายออกมาในอัตราที่ต้องการ และ 2) มีวิธีการเคลือบที่แน่นอน เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตามมาตรฐาน สำหรับสารที่ใช้เคลือบ ได้แก่ กำมะถัน (sulfur) และสารพอลิเมอร์ (polymer) ชนิดต่างๆ เช่น

1.1) ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน (sulfur-coated urea หรือ SCU) วิธีเคลือบยูเรียชนิดเม็ดด้วยกำมะถันมีขั้นตอนดังนี้ 1) นำเม็ดปุ๋ยมาทำให้ร้อน และ 2) หลอมกำมะถันที่อุณหภูมิ 156°C แล้วพ่นไปเคลือบเม็ดปุ๋ยยูเรีย ได้ผลิตภัณฑ์ที่มี N เท่ากับ 31 และ 38% อย่างไรก็ตาม การเคลือบด้วยกำมะถันเพียงอย่างเดียว ผิวเคลือบจะมีรูพรุนมากเกินไป เป็นเหตุให้การควบคุมการละลายได้ไม่ดีนัก จึงต้องแก้ไขจุดบกพร่องนี้โดยการผสมสารอีก 3 อย่าง คือ 1) ใช้ไขเป็นวัสดุอุดกันรั่ว (wax sealant) เพื่อลดการซึมของน้ำ 2) เพิ่มสารควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์ (microbiocide) เพื่อป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ออกซิไดซ์กำมะถันเร็วเกินไป และ 3) เคลือบชั้นนอกสุดด้วยวัสดุปรับสภาพปุ๋ย (conditioner) เช่น ดินเหนียวแอตตอปูลจ์ไต์ (attapulgitite)

อัตราการปลดปล่อย N ออกจากปุ๋ย ขึ้นอยู่กับคุณภาพของการเคลือบ ซึ่งกำหนดเกณฑ์ไว้ดังนี้ เม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบแล้วแบ่งได้สามส่วนเท่าๆ กัน คือ ส่วนที่ 1 มีรอยร้าวที่ผิวเคลือบ ส่วนที่ 2 สมานรอยร้าวบนผิวเคลือบด้วยไขแล้ว และส่วนที่ 3 เคลือบหนาและผิวเคลือบสมบูรณ์เมื่อใส่ปุ๋ยลงในดิน ปุ๋ยส่วนแรกจะละลายน้ำและยูเรียก็จะละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชทันที สำหรับส่วนที่ 2 และ 3 จะทยอยปลดปล่อยออกมา โดยส่วนที่ 3 ใช้เวลานาน

ที่สุด สำหรับปริมาณยูเรียในเม็ดปุ๋ยที่เคลือบหนาและสมบูรณ์นี้เรียกว่า “locked off” ซึ่งทอดเวลาการปลดปล่อยได้นานกว่าสองส่วนแรก

1.2) ยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (polymer coating of SUD) (Fig. 1) เนื่องจากยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน ควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกจากเม็ดปุ๋ยได้ไม่ค่อยดีนัก จึงได้ปรับปรุงวิธีการโดยการเคลือบพอลิเมอร์อินทรีย์พวกเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) หรือเรซิน (resin) เพิ่มอีกชั้นหนึ่ง ได้ปุ๋ยที่เรียกกันว่า PSCU (polymer coated SCU) สำหรับสมบัติด้านควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารดีกว่า SCU มาก นอกจากนี้ ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบทับ ยังเพิ่มความทนทานต่อการขัดสี (attrition resistance) ระหว่างเม็ดปุ๋ยข้างเคียงด้วย

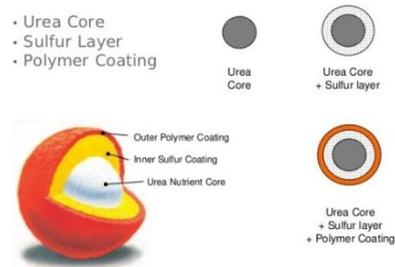


Fig. 1 Fertilizer coating by sulfur and polymer

Source: Camsizer (2011)

1.3) ปุ๋ยเคลือบสารพอลิเมอร์อินทรีย์ (fertilizer coated with organic polymer) ปุ๋ยเคลือบสารพอลิเมอร์อินทรีย์ หมายถึงปุ๋ยที่เคลือบด้วยเรซินและเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ ดังนี้

(1) ปุ๋ยที่เคลือบด้วยเรซิน (resin-coated fertilizer) เรซินสังเคราะห์ หมายถึง พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปของเม็ดหรือผง ยังไม่ได้นำไปผ่านกระบวนการแปรสภาพทำผลิตภัณฑ์ โครงสร้างระหว่างโมเลกุลมีลักษณะของการเชื่อมโยงไขว้ (crosslink) เป็นพอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (hydrophobic polymer) สำหรับเรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยเป็นพวกที่ละลายได้เมื่อมีความร้อนสูง (thermosetting resin) เรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยมี 2 ชนิดคือ 1) อัลกิดเรซิน (alkyd resin) คือ พลาสติกชนิดหนึ่งเตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (condensation polymerization) ระหว่างไดไซโคลเพนทาไดอิน (dicyclopentadiene) กับกลีเซอรอลเอสเตอร์ (glycerol

ester) พลาสติกชนิดนี้เกิดการเชื่อมไขว้ระหว่างโมเลกุล จึงไม่ละลายน้ำในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป และ 2) สารคล้ายพอลิเมอร์ยูรีเทน (polyurethane-like compound) ซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (di-isocyanate) กับแอลกอฮอล์ที่มี -OH หลายหมู่หรือพอลิโออล (polyols) การเคลือบด้วยเรซินชนิดนี้ มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากเรซินชนิดอื่นคือ พอลิไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับเนื้อปุ๋ยที่ผิวเม็ด สารเคลือบจึงติดแน่นช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกร่อนจากการขีดสีระหว่างเม็ดปุ๋ย เทคโนโลยีการเคลือบแบบนี้ช่วยให้สามารถผลิตปุ๋ยเคลือบด้วยเรซินจากปุ๋ยแบบแกรนูลาร์และแบบพริล (prilled fertilizer) ได้อย่างกว้างขวาง ปุ๋ยที่อยู่ภายในผิวเคลือบเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้ง่าย จะเป็นปุ๋ยยูเรีย หรือปุ๋ยเชิงประกอบที่มีจุลธาตุหรือไม่มีจุลธาตุก็ได้

ปัจจัยด้านการเคลือบ ที่ควบคุมให้การปล่อยธาตุอาหารออกจากเม็ดปุ๋ยต่างกัน มี 2 อย่างคือ ใช้เรซินที่มีองค์ประกอบต่างกัน ซึ่งเรซินแต่ละอย่างมีสมบัติในการยอมให้น้ำซึมผ่านไม่เท่ากัน และเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยให้มีความหนาต่างกัน

สำหรับปัจจัยภายนอกที่ควบคุมอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยคือ อุณหภูมิ กล่าวคือในสภาพที่วัสดุปลูกมีอุณหภูมิสูง อัตราการปลดปล่อยจะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้น ช่วงเวลาของการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเคลือบในแถบร้อน จะสั้นกว่าในแถบหนาว ซึ่งผู้ผลิตจะต้องระบุว่าเมื่อใช้ในแถบนี้ ปุ๋ยจะปลดปล่อยธาตุอาหารได้เป็นเวลากี่เดือน ส่วนปัจจัยอื่นๆ เช่น กิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน pH และความชื้นของดิน แทบจะไม่มีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยประเภทนี้ (Osotsapha *et al.*, 2011; Hummel and Waddington, 1981)

(2) ปุ๋ยเคลือบด้วยเทอร์โมพอลิเมอร์ (thermoplastic polymer-coated fertilizers) พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยคือ พอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ส่วนวิธีการเคลือบมี ดังนี้ คือนำพอลิเอทิลีนมาทำละลายในตัวทำละลายพวกคลอริเนเท็ด-ไฮโดรคาร์บอน จากนั้นก็นำสารละลายที่ได้ไปฉีดพ่นบนผิวเม็ดปุ๋ยในเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบเพื่องานนี้โดยเฉพาะ สำหรับการควบคุมอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารออกจากเม็ดปุ๋ย อยู่ที่ส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีน ซึ่งยอมให้น้ำซึม

ผ่านได้ช้า กับเอทิลีนไวนิลเอซิเตต ซึ่งยอมให้น้ำซึมได้เร็ว ส่วนวิธีการลดอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทำได้โดยการเติมฝุ่นของแร่ระหว่างการเคลือบ ซึ่งมีผลในการควบคุม Q_{10} ของการปลดปล่อยให้มีค่าระหว่าง 1.5-2.0 (Q_{10} คือ การเปลี่ยนแปลงของอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหาร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C)

เทคโนโลยีการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วยเทอร์โมพอลิเมอร์นี้ ใช้ได้กับปุ๋ยแบบแกรนูลาร์และแบบพริลทั่วไป ส่วนวิธีการควบคุมอัตราการปลดปล่อยก็คือ ปรับสัดส่วนของพอลิเอทิลีนกับเอทิลีนไวนิลเอซิเตต (ethylene vinyl acetate, EVA) และปรับเปอร์เซ็นต์ของฝุ่นที่เติมระหว่างการเคลือบให้ได้ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารเร็ว ปานกลาง ช้า และช้ามาก แล้วนำปุ๋ยเหล่านั้นมาผสมกันในสัดส่วนที่ต้องการ (Osotsapha *et al.*, 2011)

ปัจจุบันนี้มีการนำแป้ง เซลลูโลส ลิกนิน ไคโตซาน โปรตีนจากถั่วเหลือง ซีอิ๊วถั่วเหลือง แป้งมันสำปะหลัง พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และมอนอเมอริลโพลีไนตนาโนคอมพอสิต ซึ่งสารทั้งหมดที่กล่าวมานี้มีสมบัติเป็นสารพอลิเมอร์สามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการพอง (swelling property) อีกทั้งลดต้นทุนการผลิตและที่สำคัญยังสามารถย่อยสลายตามได้ธรรมชาติ (Farag and Al-Afleq, 2002; Ngamchettanarom, 2002; Shogren *et al.*, 2009; Wiryasuntom and Sripalang, 2015; Zhang and Wang, 2007)

การปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยเคลือบ

การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยที่ถูกเคลือบมีกลไก ดังนี้

1. ยูเรียเคลือบกำมะถัน

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการปลดปล่อยยูเรียสู่ดิน จากปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน กล่าวถึงลักษณะของเม็ดปุ๋ยว่ามีรอยร้าวหรือรูเล็กๆซึ่งมีไขหรือพลาสติกอุดไว้ เมื่อผิวเคลือบถูกจุลินทรีย์ย่อย ก็จะมีรูที่น้ำซึมเข้าไปได้ สารละลายยูเรียจึงแพร่ออกมาจากรูดังกล่าว และอุณหภูมิกับความชื้นของดินก็มีอิทธิพลต่อการแพร่ด้วย

2. ปุ๋ยเคลือบด้วยสารโพลีเอทิลีน มี การปลดปล่อยโดยการแพร่ 3 ระยะ ดังนี้ (Fig. 2)

ผลของปุ๋ยเคลือบในธัญพืช

ระยะที่ 1 ช่วงนี้สิ่งที่เกิดขึ้นคือ ใอน้ำซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ยอย่างช้าๆ แล้วเริ่มละลายปุ๋ยส่วนที่อยู่ใกล้ผิวเคลือบ ในขั้นนี้จะมีพลังขับเคลื่อนอันเกิดจากความแตกต่างของความดัน (vapor pressure) ระหว่างสารเคลือบทั้งสองด้าน เมื่อใอน้ำเข้าไปอยู่ภายในชั้นผิวเคลือบก็จะ 1) ครอบครองเฉพาะที่ว่างในช่องอันจำกัดสองส่วนคือ รูพรุนภายในเนื้อปุ๋ย และช่องระหว่างผิวเคลือบกับปุ๋ยเท่านั้น 2) ทำให้น้ำหนักเม็ดปุ๋ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ 3) แรงดันภายในสูงขึ้นและปริมาตรของเม็ดปุ๋ยก็โตขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเม็ดเป็นทีเคลือบด้วยอัลกิดเรซิน สำหรับเวลาในช่วงนี้ คือเวลาที่ทำให้ช่องว่างทั้งหมดมีของเหลวเต็ม ช่วงนี้จึงสิ้นสุดเมื่อสารละลายปุ๋ยเริ่มต้นผนังด้านในของผิวเคลือบและจุดเริ่มต้นของระยะที่สอง

ระยะที่ 2 ปลดปล่อยคองที่ สำหรับอัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารในช่วงนี้จะคงที่ ทรายเท่าที่สารละลายอิมตัวของปุ๋ยยังคงสมดุลกับปุ๋ยแข็งที่ยังเหลืออยู่ในเม็ด เนื่องจากความเข้มข้นของของสารละลายปุ๋ยซึ่งอิมตัวและคองที่ ทำให้เกรเดียนต์ความเข้มข้น (concentration gradient) และเกรเดียนต์แรงดัน (pressure gradient) คองที่ จึงเป็นปัจจัยกำหนดค่าของแรงที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนให้ปุ๋ยออกมาภายนอกในอัตราคองที่ ในระยะนี้ปริมาตรของเม็ดปุ๋ยคองที่ แสดงว่าปริมาตรซึ่งลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของปุ๋ยออกไป ได้มีน้ำจากภายนอกเข้ามาชดเชยในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

ระยะที่ 3 การปลดปล่อยลดลง เกิดขึ้นนับตั้งแต่เนื้อปุ๋ยภายในเม็ดได้ละลายหมดแล้ว ต่อจากนั้นแรงที่ใช้ขับเคลื่อนการปลดปล่อยปุ๋ยก็เริ่มลดลงเรื่อยๆ ในช่วงท้ายจะมีปุ๋ยออกมาน้อยมากจนกระทั่งหมดไป (Osotsapha *et al.*, 2011)

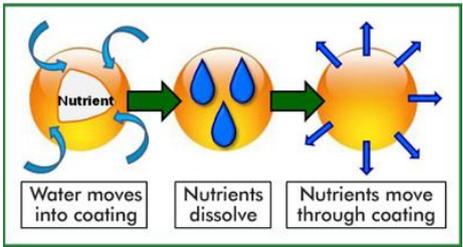


Fig. 2 Release of nutrient from coated fertilizer

Source: Johnston (2000)

จากตัวอย่างการศึกษาผลของสารเคลือบปุ๋ยต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของธัญพืชพืช ในประเทศจีน Dong *et al.* (2016) ศึกษาเกี่ยวกับผลของปุ๋ยเคลือบต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์โดยดำเนินการปลูกข้าวโพดในชุดดิน Alfisol ในปี 2011 ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีชานตง โดยใช้วัสดุเคลือบปุ๋ย คือ ซีเถ้าลอย (fly ash) และ polyvinyl alcohol (สารอินทรีย์ยัดเกาะ) และมี dicyandiamide (DCD) เป็นสารยับยั้งการสูญเสีย N ในรูป NO_3^- จากการชะล้างและการปลดปล่อย N_2O ขึ้นสู่บรรยากาศ โดยมีกรรมวิธีทดลองทั้งหมด 6 กรรมวิธี ได้แก่ 1) CK (ไม่ใส่ปุ๋ย), 2) CCF (NPK: 15-6.55-12.40), 3) CRF (ปุ๋ยเคลือบเรซิน + NPK: 15-6.55-12.40), 4) FCRF1 (วัสดุเคลือบปุ๋ย 24% +ปุ๋ยผสม 75% (NPK: 15-6.55-12.40) +1% DCD), 5) FCRF2 (วัสดุเคลือบปุ๋ย 23%+ปุ๋ยผสม 75% (NPK: 15-6.55-12.40) +2%DCD) และ 6) FCRF3 (วัสดุเคลือบปุ๋ย 21% +ปุ๋ยผสม 75% (NPK: 15-6.55-12.40) +4%DCD) ผลการศึกษา พบว่า กรรมวิธีการเคลือบปุ๋ย (FCRF1) ทำให้ค่าดัชนีของ SPAD (บ่งถึงการสังเคราะห์แสงของพืช) ของข้าวโพดในช่วงระยะเวลาต่างๆ ของการเจริญเติบโตมีแนวโน้มสูงกว่ากรรมวิธีไม่เคลือบปุ๋ย (CCK) (Table 1)

องค์ประกอบของผลผลิตและผลผลิตเมล็ดข้าวโพด พบว่า กรรมวิธีที่มีการเคลือบปุ๋ยมีแนวโน้มให้จำนวนแถวต่อฝัก จำนวนเมล็ดต่อแถว ความยาวฝัก น้ำหนัก 1000 เมล็ด น้ำหนักเมล็ด ผลผลิตทั้งหมด และผลผลิตเมล็ดสูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่เคลือบปุ๋ย (CCK) (Table 2 และ Table 3)

Table 1 Effect of different fertilizer treatments on SPAD index under different growth stages of maize leaves

Treatment	Joining stage	Tasseling stage	Filling stage	Maturity stage
CK: (control)	41.9±2.3 ^c	46.0±0.3 ^a	44.4±2.2 ^d	36.02.8d
CCK: (NPK: 15-6.55-12.40)	48.1±1.8 ^{ab}	49.1±1.8 ^{bc}	51.7±3.0 ^c	42.2±1.6 ^c
CRF: (Resin+ NPK: 15-6.55-12.40)	47.8±1.8 ^{ab}	52.9±3.8 ^{ab}	55.7±0.2 ^{ab}	46.2±1.0 ^b
FCRF1: (Resin 24%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+1% DCD)	49.7±1.3 ^a	53.1±3.0 ^{ab}	58.8±1.5 ^a	54.6±1.6 ^a
FCRF2: (Resin 23%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+2% DCD)	45.2±0.4 ^{bc}	52.0±2.3 ^{ab}	58.4±1.9 ^a	53.9±2.5 ^a
FCRF3: (Resin 21%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+4%DCD)	46.6±4.7 ^{ab}	54.6±3.0 ^a	54.4±0.7 ^{bc}	53.8±1.7 ^a

All data are means of 3 replications. Means values marked with different letters indicate significant differences at P = 0.05 level

Source: Dong *et al.* (2016)

Table 2 Effect of different fertilizer treatments on agronomic characters of maize

Treatment	Row/ear	Kernel/row	Ear length (cm)	Kernel/ear	1000-Kernel weight (g)
CK: (control)	13.0±1.3 ^b	20.3±4.2 ^c	15.2±2.6 ^d	264.5 ^d	251.0 ^c
CCK: (NPK: 15-6.55-12.40)	14.2±0.4 ^{ab}	27.2±2.5 ^b	17.7±0.9 ^{cd}	387.0 ^c	276.9 ^{bc}
CRF: (Resin+ NPK: 15-6.55-12.40)	15.4±1.2 ^a	31.3±1.3 ^b	20.2±0.3 ^{bc}	480.1 ^{bc}	284.4 ^{abc}
FCRF1: (Resin 24%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+1% DCD)	15.3±0.7 ^a	39.1±4.0 ^a	22.5±2.5 ^{ab}	601.3 ^a	335.1 ^a
FCRF2: (Resin 23%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+2% DCD)	14.7±1.5 ^{ab}	39.4±4.1 ^a	23.2±1.0 ^a	576.4 ^{ab}	325.7 ^{ab}
FCRF3: (Resin 21%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+4%DCD)	13.9±1.5 ^{ab}	38.5±1.4 ^a	22.4±0.4 ^{ab}	536.1 ^{ab}	311.9 ^{ab}

All data are means of 3 replications. Means values marked with different letters indicate significant differences at P = 0.05 level

Source: Dong *et al.* (2016)

Table 3 Effect of different fertilizer treatments on yields of maize

Treatment	Grain yield (Kg/ha)			Total yield		
	Yield (kg/ha)	Compare to CK (+%)	Compare to CCK (+%)	Yield (kg/ha)	Compare to CK (+%)	Compare to CCK (+%)
CK: (control)	4685.0 ^d	-	-	16658.3 ^e	-	-
CCK: (NPK: 15-6.55-12.40)	5710.5 ^c	21.9	-	33354.2 ^d	18.3	-
CRF: (Resin+ NPK: 15-6.55-12.40)	7621.7 ^{ab}	62.7	33.5	50725.4 ^c	38.4	17.0
FCRF1: (Resin 24%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+1% DCD)	7078.6 ^b	51.1	24.0	6817.6 ^b	86.0	57.2
FCRF2: (Resin 23%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+2% DCD)	7504.8 ^{ab}	60.2	31.4	71379.4 ^b	94.7	64.6
FCRF3: (Resin 21%+75% (NPK: 15-6.55-12.40)+4%DCD)	7753.9 ^a	65.5	35.8	89938.6 ^a	106.2	74.4

All data are means of 3 replications. Means values marked with different letters indicate significant differences at P = 0.05 level

Source: Dong *et al.* (2016)

นอกจากนี้ Zhao *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาคผลของปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อยต่อประสิทธิภาพการดูดใช้ N ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ปลูกในฤดูร้อนโดยใช้ข้าวโพดพันธุ์ไฮบริด Zhengdan 958 ที่ฟาร์มของมหาวิทยาลัยเกษตรมณฑลชานตงของประเทศจีน ได้ปลูกข้าวโพดในดินร่วนปนทรายแป้ง (silt loam soil) ใน 2 ฤดูกาลปลูก คือ ปี 2005 และ 2006 การศึกษานี้ใช้สารเคลือบปุ๋ย 2 ชนิด คือ 1) เรซิน (resin-coated; CRF) และ 2) กำมะถัน (sulfur-coated; SCF) โดยทำการทดลองแบบ RCBD โดยมีกรรมวิธีการทดลอง 8 กรรมวิธี คือ 1) CK (ไม่ใส่ปุ๋ย) 2) CCF (1250 กก. N/เฮกตาร์) 3) CRFI (1428.57 กก. N/เฮกตาร์) 4) CRFII (1071.43 กก. N/เฮกตาร์) 5) CRFIII (1428.57 กก. N/เฮกตาร์) 6) SCFI (833.33 กก. N/เฮกตาร์) 7) SCFII (1250 กก. N/เฮกตาร์) และ 8) SCFIII (1666.67 กก. N/เฮกตาร์) ผลการศึกษา พบว่า จำนวนแถว/ฝัก จำนวนเมล็ด/แถว และจำนวนเมล็ด/ฝัก ในแต่ละกรรมวิธีไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่น้ำหนัก 1000 เมล็ด พบว่า กรรมวิธีที่ทำให้ น้ำหนักเมล็ดมากที่สุด คือ CRFIII ส่วนผลผลิตเมล็ดในทั้งปี 2005และ2006 กรรมวิธี CRFII และ SCFII ให้ผลผลิตเมล็ดสูงที่สุด (Table 4) นอกจากนี้ กรรมวิธี CRFII, CRFIII, SCFII และ SCFIII ให้ผลผลิตเมล็ดมากกว่ากรรมวิธีอื่นๆ แต่

ประสิทธิภาพการดูดใช้ N ในกรรมวิธี CCF, CRFI, CRFII, SCFII และ SCFIII มีการดูดใช้ N เพื่อมาสร้างผลผลิตเมล็ดได้มากกว่ากรรมวิธี CRFI และ SCFI (Table 5)

ในประเทศจีนเช่นกัน Chen *et al.* (2017) ได้ศึกษาผลของการเคลือบและไม่เคลือบปุ๋ยต่อผลผลิตและประสิทธิภาพการดูดใช้ N ของข้าวพันธุ์ Shengtaiyou 9712 ที่ปลูกในดินเหนียว (clayey soil) ในปี 2014 และ 2015 ประกอบด้วย 3 กรรมวิธีทดลอง คือ 1) ไม่ใส่ปุ๋ย (T1) 2) ใส่ปุ๋ยสูตร 20-5-10 อัตรา 135 กก./เฮกตาร์ ที่ไม่ได้เคลือบตามรูปแบบของเกษตรกร โดยแบ่งใส่ปุ๋ยออกเป็น 2 ครั้งๆ ละ 67.50 กก./เฮกตาร์ คือ ในช่วงก่อนปลูกข้าว และระยะข้าวแตกกอ (T2) และ 3) ใส่ปุ๋ยสูตร 20-5-10 อัตรา 108 กก./เฮกตาร์ ที่เคลือบ โดยใส่เป็นปุ๋ยรองพื้นก่อนที่จะปลูกพืช (T3) พบว่า กรรมวิธี T2 และ T3 มีประสิทธิภาพการดูดใช้ N และให้ผลผลิตสูงกว่า T1 (P<0.05) แต่ให้ผลไม่แตกต่างกันระหว่าง T2 และ T3 (P>0.05) (Table 6) อย่างไรก็ตาม การใส่ปุ๋ยตามกรรมวิธี T2 ทำให้สิ้นเปลืองแรงงาน และค่าปุ๋ยมากกว่า T3 เนื่องจาก T2 มีการแบ่งใส่ ออกเป็น 2 ครั้ง ขณะที่ T 3 ใส่ปุ๋ยก่อนปลูกแค่ครั้งเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเคลือบปุ๋ยทำให้ปุ๋ยละลายได้ช้าขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้นด้วย

Table 4 Effect of controlled-release fertilizer on yield and its component of summer maize

Treatment	Row/ear	Kernel/row	Kernel/ear	1000-kernel weight (g)	Grain yield (kg/ha)	
					2005	2006
CK: (control)	14.44	39.02	563.65	281.17 ^e	-	-
CCF: (1250 kg N/ha)	14.95	40.74	609.02	293.72 ^d	1056 ^e	1349 ^e
CRFI: (1428.57 kg N/ha)	14.53	39.93	580.36	298.20 ^{cd}	2257 ^c	1790 ^d
CRFII: (1071.43 kg N/ha)	15.20	40.83	620.67	300.71 ^c	2882 ^a	3064 ^a
CRFIII: (1428.57 kg N/ha)	14.60	41.70	608.82	316.29 ^a	2571 ^b	2339 ^b
SCFI: (833.33 kg N/ha)	14.67	40.57	595.04	296.58 ^{cd}	1763 ^d	2035 ^c
SCFII: (1250 kg N/ha)	14.80	42.07	622.59	299.77 ^{cd}	3060 ^a	2819 ^a
SCFIII: (1666.67 kg N/ha)	15.07	41.16	620.08	308.53 ^b	2629 ^b	2033 ^c

All data are means of 3 replications. Means values marked with different letters indicate significant differences at P = 0.05 level

Source: Zhao *et al.* (2013)

Table 5 Effect of different controlled-release fertilizer treatments on N use efficiency of maize

Treatment	Grain yield (t/ha)	Total N uptake (kg N/ha)	Physiological N use efficiency (kg _{grain} /kg N)
CK: (control)	9.38 ^d	177.83	-
CCF: (1250 kg N/ha)	11.38 ^c	242.3	30.97 ^{ab}
CRFI: (1428.57 kg N/ha)	11.56 ^{bc}	257.82	27.19 ^b
CRFII: (1071.43 kg N/ha)	12.38 ^{ab}	256.28	31.59 ^{ab}
CRFIII: (1428.57 kg N/ha)	12.72 ^a	276.11	33.92 ^{ab}
SCFI: (833.33 kg N/ha)	11.33 ^c	246.82	28.24 ^b
SCFII: (1250 kg N/ha)	12.52 ^a	263.28	36.74 ^a
SCFIII: (1666.67 kg N/ha)	12.81 ^a	282.48	32.74 ^{ab}

All data are means of 3 replications. Means values marked with different letters indicate significant differences at P = 0.05 level

Source: Zhao *et al.* (2013)

Table 6 Total nitrogen uptake, grain yield and yield component of rice under three fertilizer treatments in 2014 and 2015

Year, season, and treatment	Total N uptake (kg/ha)	Grain yield (t/ha)	Panicles/m ²
2014 Early season			
T1	44.12 ^b	5.65 ^b	172.73 ^b
T2	104.95 ^a	8.84 ^a	315.15 ^a
T3	93.87 ^a	8.47 ^a	313.13 ^a
2014 Late season			
T1	45.91 ^b	5.46 ^b	213.13 ^c
T2	102.78 ^a	8.92 ^a	348.49 ^a
T3	96.67 ^a	8.58 ^a	314.14 ^b
2014 Early season			
T1	70.39 ^b	5.61 ^b	189.90 ^b
T2	153.43 ^a	9.78 ^a	343.44 ^a
T3	142.41 ^a	9.44 ^a	312.12 ^a
2014 Late season			
T1	55.36 ^b	4.58 ^b	203.03 ^b
T2	125.86 ^a	8.71 ^a	358.59 ^a
T3	120.69 ^a	8.59 ^a	334.34 ^a

All data are means of 3 replications. Means values marked with different letters indicate significant differences at P = 0.05 level.

Source: Chen *et al.* (2017)

ในประเทศบราซิล Zavaschi *et al.* (2014) ได้ทำการศึกษาผลของยูเรียที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ต่อการระเหยของ NH₃ และองค์ประกอบของผลผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยได้ทำการทดลองในปี 2009-2010 ในดินเหนียว Geric Ferralsol โดยมีการเปรียบเทียบปุ๋ย N ที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ (PCU) และปุ๋ย N ไม่มีการเคลือบ (CU) มีกรรมวิธีทดลอง 7 กรรมวิธี ดังนี้ 1) control (ไม่ใส่ปุ๋ย) 2) PCU 45 (ยูเรียอัตรา 45 กก. N/เฮกตาร์ เคลือบด้วยพอลิเมอร์) 3) PCU 67.5 (ยูเรียอัตรา 67.5 กก. N/เฮกตาร์ เคลือบด้วยพอลิเมอร์) 4) PCU 90 (ยูเรียอัตรา 90 กก. N/เฮกตาร์ เคลือบด้วยพอลิเมอร์) 5) CU 45 (ยูเรียอัตรา 45 กก. N/เฮกตาร์) 6) CU 67.5 (ยูเรียอัตรา 67.5 กก. N/เฮกตาร์) และ 7) CU 90 (ยูเรียอัตรา 90 กก. N/เฮกตาร์) พบว่า การเคลือบปุ๋ยด้วยพอลิเมอร์มีแนวโน้มช่วยลดการสูญเสีย N ในการระเหยเป็น NH₃ ได้ (P>0.05) ส่วนปริมาณ N ในใบ ปริมาณ N ในเมล็ด ค่า SPAD และผลผลิตเมล็ดเพิ่มขึ้นเมื่อใส่อัตราปุ๋ยยูเรียเพิ่มขึ้น แต่การเคลือบปุ๋ยและไม่เคลือบปุ๋ยไม่ทำให้ค่าเหล่านี้แตกต่างกัน (P>0.05) (Table 7) การศึกษาในประเทศอียิปต์ของ Zeidan and El Kramany (2001) ได้ทำการศึกษาผลของปุ๋ย N ที่ปลดปล่อยช้าที่มีต่อผลผลิตของข้าวสาลี (*Triticum Aestivum* L.) ที่ปลูกในดินทรายในปี 1998/1999 และ 1999/2000 โดยมีกรรมวิธีการทดลอง 4 กรรมวิธี ได้แก่ 1) control (ไม่ใส่ปุ๋ย), 2)

(NH₄)₂SO₄, 26% N, 3) NH₄NO₃, 33.5% N และ 4) ปุ๋ย N ที่ปลดปล่อยช้า (slow-release N, 40% N) พบว่า การใส่ปุ๋ยให้จำนวนต้น/กอ และจำนวนรวง/ต้น สูงกว่าไม่ใส่ปุ๋ย และการใส่ปุ๋ย N ที่ปลดปล่อยช้าให้น้ำหนัก 1000 เมล็ด และน้ำหนักแห้งส่วนที่อยู่เหนือดิน สูงกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีและไม่ใส่ปุ๋ย (Table 8) นอกจากนี้ผลผลิตเมล็ด น้ำหนักแห้ง

ส่วนที่อยู่เหนือดิน ความเข้มข้นของ N ในเมล็ด และโปรตีนในเมล็ด ในกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ย N ที่ปลดปล่อยช้า ให้ค่าสูงกว่าในกรรมวิธีอื่นๆ ส่วนดัชนีการเก็บเกี่ยวและความเข้มข้นของ P ในเมล็ดให้ค่าไม่แตกต่างกันในแต่ละกรรมวิธีการทดลอง (Table 9)

Table 7 Loss of volatilized NH₃-N, nitrogen concentration in maize leaves and grains, SPAD readings and grain yield followed by the significance of the factor

N sources	Rates	Volatilized NH ₃ (kg/ha)	Leaf N content (g/ha)	Grain N content (g/ha)	SPAD	Grain yield (kg/ha)
Control	0	-	26.9	10.6	38.8	6196
Coated urea	PCU 45 kg N/ha	18.1	28.3	10.9	42.6	7258
	PCU 67.5 kg N/ha	17.4	30.7	11.2	43.2	7484
	PCU 90 kg N/ha	22.8	27.8	11.1	42.5	7389
Conventional urea	CU 45 kg N/ha	14.3	26.2	11.2	38.6	6547
	CU 67.5 kg N/ha	25.6	30.7	11.2	42.4	6721
	CU 90 kg N/ha	26.6	29.6	11.8	43.7	7292
N sources		NS	NS	NS	NS	NS
Rates		NS	**	**	*	**
N sources x rates		NS	NS	NS	NS	NS
LSD		5.8	1.1	0.3	1.6	444
CV (%)		32.0	5.0	3.0	5.0	9.0

PCU 45: Polymer-coated urea (45 kg N/ha); PCU 67.5: Coated urea (67.5 kg N/ha); PCU 90: Coated urea (90 kg N/ha); CU 45: Conventional urea (45 kg N/ha); CU 67.5: Conventional urea (67.5 kg N/ha); CU 90: Conventional urea (90 kg N/ha). NS=non-significant, * and ** =significant at 5 and 1% by the F Test

Source: Zavaschi *et al.* (2014)

Table 8 Yield component of wheat plants as affected by N sources

Parameters/N sources	Plant height (cm)	Number of			1000-grain weight (g)	Biological yield (g/plant)
		Tillers /plant	Spikes /plant	Spikelet /spike		
Control	103.3	3.2	3.1	22.3	34.5	11.6
(NH ₄) ₂ SO ₄	106.8	3.6	3.6	23.5	36.5	12.0
NH ₄ NO ₃	105.6	4.0	3.9	33.6	36.5	12.2
Slow-release N fertilizer	107.2	3.5	3.4	22.9	38.6	12.7
LSD _{5%}	NS	0.19	0.23	NS	1.93	0.7

NS =non-significant

Source: Zeidan and El Kramany (2001)

Table 9 Yield component, nitrogen, phosphorus and protein content in wheat grain as affected by N sources

Parameters/ N sources	Grain yield (t/ha)	Biological Yield (t/ha)	Harvest index (%)	Grain N content (g N/kg)	Grain P content (g P/kg)	Grain Protein (%)
Control	4.05	5.60	38.6	20.3	2.4	9.6
(NH ₄) ₂ SO ₄	4.29	6.00	40.5	21.7	2.6	10.0
NH ₄ NO ₃	4.17	5.90	39.5	21.5	2.5	10.5
Slow-release N fertilizer	4.52	6.30	41.2	22.7	2.9	11.8
LSD _{5%}	0.04	0.05	NS	0.33	NS	0.10

NS =non-significant

Source: Zeidan and El Kramany (2001)

สรุป

การเคลือบปุ๋ยด้วยวัสดุต่างๆ เช่น เรซิน พอลิเมอร์ และวัสดุอินทรีย์ (ซีเมนต์) สามารถช่วยลดการปลดปล่อยธาตุอาหารและทำให้ธาตุอาหารเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้นและยังส่งผลให้การเจริญเติบโตและผลผลิตของ

ธัญพืช (เช่นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ข้าว และข้าวสาลี) เพิ่มขึ้นมากกว่าการใส่ปุ๋ยเคมีที่ไม่ได้เคลือบ การเคลือบปุ๋ยสามารถช่วยลดการสูญเสียของธาตุอาหารจากปุ๋ยโดยเฉพาะไนโตรเจน (Nitrogen, N) ที่จะสูญเสียในรูปการระเหยเป็น NH₃ (NH₃ volatilization)

References

- Agricultural Editor. 2016. New Thai Fertilizer Innovation. Panyachon Bangkok. 168 pp. (In Thai).
- Camsizer. 2011. Accurate measurement of fertilizer with the CAMSIZER [online]. [Accessed November 30, 2017]. Available from: URL: <https://www.slidesha-re.net>.
- Chen, J., Cao, F., Xiong, H., Huang, M., Zou, Y. and Xiong, Y. 2017. Effects of single basal application of coated compound fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in double-cropped rice. The Crop Journal. 5: 265-270.
- Dong J.Y., Chen W.F., and Qiu, X K. 2016. Effects of new coated release fertilizer on the growth of maize. Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 16(3): 637-649.
- Farag, S., and AL-Afaleq, E.I. 2002. Preparation and characterization of saponified delignified cellulose polyacrylonitrile-graft copolymer. Carbohydrate Polymers. 48: 1-5.
- Greer, F. R., Shannon, M., Committee on Nutrition and Committee on Environmental Health. 2005. Infant methemoglobinemia: the role of dietary nitrate in food and water. Pediatrics. 116: 784-786.
- Haifa Chemical Thailand. 2012. Multicote Agri [online]. [Accessed November 30, 2017]. Available from: URL: www.haifagroup.com/.
- Hummel, N.W., Jr. and Waddington, D.V. 1981. Evaluation of slow-release nitrogen sources on Baron Kentucky bluegrass. Soil Sci. Soc. Am. J. 45: 966-970.
- Johnston, A.E. 2000. Soil and Plant Phosphate. International fertilizer Industry Association (IFA), Paris. The

- Mosaic Company. 2016. Coated fertilizer [online]. [Accessed November 30, 2017]. Available from: URL: <http://www.cropnutrition.com>.
- Ngamchettanarom, N. 2002. Development of slow release protein-coated chemical fertilizer using soy bean residue. Master thesis, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University. (In Thai).
- Osotsapha, Y., Wongmaneerot, A. and Hongprayoon, C. 2011. Fertilizer for Sustainable Agriculture. 2nd Edition. Faculty of Agriculture at Kamphaeng Sae, Kasetsart University. 519 pp. (In Thai).
- Panchapan, S. 2002. Fertilizer Technology. Land Resources and Environment, Faculty of Agriculture, Khon Kaen University. 326 pp. (In Thai).
- Sanyal, S.K. and De-Datta, S.K. 1991. Chemistry of phosphorus transformation in soil. *Adv Soil Sci.* 16: 1-119.
- Shaviv, A. 2001. Advances in controlled-release fertilizer. *Adv Agron.* 71: 1-49.
- Shogren, R.L., Willett, J.L. and Bilwas, A. 2009. HRP-mediated synthesis of starch-polyacrylamide graft copolymers. *Carbohydr Polym.* 75(1): 189-191.
- Sukhothai Thammathirat Open University. 2005. Handout of Soil, Water and Fertilizer Module. 11st Edition: Sukhothai Thammathirat Open University. 432 pp. (In Thai).
- Suwanarit, A. 2010. Fertilizer, Agriculture and Environment. 3rd Edition. Faculty of, Kasetsart University. 156 pp. (In Thai).
- Vityakon, P. 2004. Advanced Soil Fertilizer. 2nd Edition. Faculty of Agriculture, Khon Kaen University. 423 pp. (In Thai).
- Wiriyasuntorn, S. and Sripalang, S. 2015. Preparation of Cassava Starch/Poly (vinylalcohol)/ Montmorillonite Nanocomposites for Coating Controlled-Release Fertilizer. *KKU Sci. J.* 43(3): 503- 514. (In Thai).
- Wu, S.C. Cao, Z.H. Li, Z.G. Cheung, K.C. and Wong, M.H. 2005. Effects of biofertilizer containing N-fixer, P and K solubilizers and AM fungi on maize growth: a greenhouse trial. *Geoderma.* 125: 155-166.
- Zavaschi, E., de Abreu Faria, L. Vitti, G.C. da Costa Nascimento, C.A. de Moura, T.A. do Vale, D.W. Mendes, F.L. and Kamogawa M.Y. 2014. Ammonia volatilization and yield components after application of polymer-coated urea to maize. *R. Bras. Ci. Solo.* 38: 1200-1206.
- Zeidan, M.S. and El Kramany, M.F. 2001. Effect of organic manure and slow-release N-fertilizers on the productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.) in sandy soil. *Acta Agronomica Hung.* 49(4): 379-385.
- Zhang, J.P. and Wang, A.Q. 2007. Synthesis and characterization of chitosan-g-poly (acrylicacid)/attapulgit superabsorbent composites. *Carbohydr Polym.* 68: 367-374.
- Zhao B., Dong, S., Zhang, J.W. and Liu, P. 2013. Effects of controlled-release fertilizer on nitrogen use efficiency in summer Maize. *Plos One.* 8(8): 7056.