

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยูเรียเพื่อประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม Urea Controlled Released Fertilizers for Agricultural Applications

นิษฐา คุหะธรรมคุณ และ สายันต์ แสงสุวรรณ*

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ต.เมืองศรีโค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

*Email: sayants181@gmail.com

บทคัดย่อ

เกษตรกรรมในปัจจุบันมีการใช้ปุ๋ยเคมีกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยไนโตรเจนหรือปุ๋ยยูเรียซึ่งเป็นแม่ปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารหลักไนโตรเจน เนื่องจากพืชทุกชนิดมีความต้องการไนโตรเจนในปริมาณที่สูงมาก โดยทั่วไปธาตุอาหารไนโตรเจนในดินมักมีไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงมีความจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยเพิ่มเติมเพื่อให้พืชเจริญเติบโตงอกงามและได้ผลผลิตที่ดี โดยปุ๋ยยูเรียช่วยให้พืชมีใบสีเขียว มีส่วนในการสังเคราะห์แสง ทำให้พืชเจริญเติบโต มีความสูง ใบเจริญงอกงามมีขนาดใหญ่ ใบดกหนา ใบสีเขียวเข้ม และช่วยเพิ่มโปรตีนในผลผลิตเนื่องจากปุ๋ยเคมีสามารถให้ธาตุอาหารแก่พืชได้เพียงพอต่อความต้องการของพืชและยังสามารถปรับแต่งปริมาณอาหารในปุ๋ยเคมีให้เหมาะสมกับดินและพืชได้ แต่อย่างไรก็ตาม ปุ๋ยเคมีก็มีข้อเสียคือ จะไปเร่งการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในดิน ทำให้จุลินทรีย์บางชนิดที่อาศัยอยู่ในดินลดลง และยังทำให้เกิดการสูญเสียธาตุอาหารโดยการชะล้างหรือเปลี่ยนเป็นรูปที่พืชใช้ไม่ได้หรือระเหยหายไปสู่อากาศ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นก่อนที่พืชจะได้รับธาตุอาหารจากปุ๋ย จึงทำให้พืชได้รับธาตุอาหารไม่เพียงพอและเป็นเหตุให้เกษตรกรต้องใช้ปุ๋ยเคมีมากขึ้นและเกิดการเพิ่มต้นทุนในการผลิต นอกจากนี้ การใช้ปุ๋ยเคมีในปริมาณมากเกินไปก็ส่งผลเสียต่อทั้งรากพืชและดิน ซึ่งอาจทำให้พืชตายลงได้และดินขาดความอุดมสมบูรณ์ด้วยเหตุนี้จึงมีกลุ่มนักวิจัยบางส่วนได้คิดค้น วิจัยและพัฒนาปุ๋ยที่สามารถควบคุมการปลดปล่อยได้ โดยทำให้ปุ๋ยค่อยๆ ละลายออกมาอย่างช้าๆ ในปริมาณที่พืชต้องการ เพื่อลดการสูญเสียดังกล่าว โดยทั่วไปจะใช้วัตถุอื่นที่ละลายช้าเป็นตัวห่อหุ้มอยู่ภายนอกหรือใช้สารอินทรีย์ที่มีสมบัติสลายตัวช้าเป็นปุ๋ย ทำให้สามารถใช้ปุ๋ยได้เกิดประโยชน์และมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนี้ยังช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างต่อเนื่องจนถึงช่วงเก็บเกี่ยว ดังนั้นปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยนี้จึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีของเกษตรกร ที่จะช่วยลดต้นทุนและยังส่งผลดีต่อธรรมชาติ ไม่ทำให้ดินขาดความอุดมสมบูรณ์ตลอดจนทำให้เกษตรกรได้ผลผลิตที่ดีและสูงมากขึ้น

คำสำคัญ: ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ปุ๋ยไนโตรเจน ปุ๋ยยูเรีย เกษตรกรรม จุลินทรีย์ อินทรีย์วัตถุ

Abstract

Fertilizers have been widely used in the modern agriculture especially nitrogen and urea fertilizer which are provide essential nutrients required in large amounts by all plants. In general, nitrogen in the soil is insufficient for the requirements of the plant. It is necessary to enrich the soil with the fertilizers for healthy plants growth and high yields. The urea fertilizer makes green leaves of plants and involves in photosynthesis processes, making plants grow in height, larger thick leaves and dark green leaves. In addition, it improves protein yield because fertilizers provide nutrients to plants that meet the needs of the plants and can also be customized to suit the quantity of chemical fertilizers in the soil and plants. However, chemical fertilizers have drawbacks. Fertilizers will accelerate the decomposition of organic matter in the soil and some microorganisms living in the soil decrease. Moreover, they even cause in losing of nutrients through leaching or change into unused forms or evaporate into the air. This usually occurs before the plants get nutrients from fertilizer. As a

result, the plant is never obtain enough nutrients. The farmers have to use more chemical fertilizers leading to high production costs. In addition, excessive amounts of chemical fertilizers can show a negative effect on both plants and soil. This could lead to plant death and lack of soil fertility. To encounter with this problem, research, development and invention of controlled release fertilizers have been done many researcher groups by making fertilizers which dissolve slowly in the amount as the need of plants and to reduce such losses. Typically, a slowly dissolve materials were coated externally on fertilizer or organic materials that slow decomposition will be used as fertilizer resulting in useful and effective fertilizers. It also helps plants to uptake nutrients continuously until harvest. The controlled release fertilizer is therefore a good choice of farmers in reducing costs and saving nature, improving soil fertility as well as improving the better productions of farmer.

Keywords: Controlled Release Fertilizer (CRF); Nitrogen Fertilizer; Urea Fertilizer; Agriculture; Microorganism; Organic Matter

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

เกษตรกรรมเป็นรากฐานของมนุษยชาติ และเป็นพื้นฐานของการกินดีอยู่ดีของมนุษย์มาตั้งแต่ในอดีต ประเทศไทยเป็นประเทศที่ทำการเกษตรมาอย่างยาวนาน ในอดีตประเทศไทยใช้รูปแบบการทำเกษตรแบบดั้งเดิมซึ่งเป็นระบบการผลิตที่มุ่งผลิตเพื่อการยังชีพเป็นหลัก และหากมีผลผลิตเหลือจากการบริโภคจึงนำไปแลกเปลี่ยนซื้อขายกัน ต่อมาได้เปลี่ยนจากการผลิตเพื่อการยังชีพมาเป็นการผลิตเพื่อการค้ามากขึ้น และมีการใช้เครื่องจักรกลทางการเกษตรแทนแรงงานคนและสัตว์มากขึ้นพร้อมทั้งมีการค้นพบและการใช้ปุ๋ยเคมีและสารเคมีทางการเกษตรชนิดต่างๆมากมาย [1]

ไนโตรเจนเป็นแร่ธาตุอาหารหลักสำคัญที่จำเป็นอย่างมากสำหรับการปลูกพืชและเป็นตัวจำกัดของเกษตรกรโดยทั่วไป ธาตุไนโตรเจนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดอะมิโน โปรตีน กรดนิวคลีอิก หรือนิวคลีโอไทด์ คลอโรฟิลล์ และเอนไซม์หรือน้ำย่อยต่างๆ ในพืชก็มีความสำคัญมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของพืช ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของส่วนอ่อนในพืช เช่น ยอดอ่อน ใบอ่อน กิ่ง ก้านอ่อน รากอ่อน ปมอ่อน ซึ่งเป็นส่วนที่กำลังเจริญเติบโตทั้งหลาย ก็คือ การเจริญเติบโตของเซลล์พืชหรือการเพิ่มเซลล์ ในเซลล์มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ซึ่งโปรตีนจำเป็นที่จะต้องมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบและเป็นส่วนสำคัญในการแบ่งเซลล์ หรือเพิ่มการเจริญเติบโตของเซลล์ [2]

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสำคัญของกรดอะมิโนในโปรตีนทุกชนิดในสิ่งมีชีวิต พืชใช้ไนโตรเจนได้ใน 2 รูปแบบ คือ แอมโมเนียม (NH_4^+) และไนเตรต (NO_3^-) และแม้ว่าในบรรยากาศจะประกอบด้วยไนโตรเจนถึง 80% แต่อยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจน (N_2) ซึ่งพืชไม่สามารถนำมาใช้ได้ ไนโตรเจนสามารถเข้าสู่วัฏจักรไนโตรเจนของระบบนิเวศวิทยาได้ 2 ทาง คือ

1. ผ่นชะล้างไนโตรเจนให้กลายเป็นแอมโมเนียมและ ไนเตรตไหลลงสู่ดินและพืชใช้เป็นธาตุอาหารเพื่อการเจริญเติบโตโดยปฏิกิริยาแอสซิมิลชัน (assimilation)

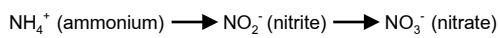
2. การตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixation) ซึ่งมีเพียงแบคทีเรียบางชนิดเท่านั้นที่สามารถใช้แก๊สไนโตรเจนในบรรยากาศเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนในรูปที่พืชสามารถนำมาใช้ได้แบคทีเรียพวกนี้มีทั้งที่อยู่ในดินและที่อยู่ในสิ่งมีชีวิต [3] เช่น ไรโซเบียมในปมรากถั่วและแบคทีเรียในเฟิร์นน้ำพวกแห่นางแว่น (Azolla) เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียสีเขียวแกมน้ำเงินในน้ำบางชนิด ในปัจจุบันการผลิตปุ๋ยไนโตรเจนเพื่อใช้ในเกษตรกรรมก็เป็นแหล่งไนโตรเจนสำคัญที่เติมไนโตรเจนสู่ระบบนิเวศเช่นเดียวกัน

ไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารสำคัญที่พืชใช้ในโครงสร้างและเมแทบอลิซึม สัตว์กินพืชและผู้บริโภคลำดับถัดมาได้ใช้ไนโตรเจนจากพืชนี้เองเป็นแหล่งสร้างโปรตีนและสารพันธุกรรม เมื่อพืชและสัตว์ตายลง ผู้ย่อยสลายพวกกราดและแบคทีเรียสามารถย่อยสลายไนโตรเจน

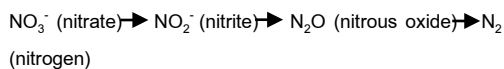
ในสิ่งมีชีวิตให้กลับเป็นแอมโมเนียมซึ่งพืชสามารถนำมาใช้ได้ผ่านกระบวนการที่เรียกว่า แอมโมนิฟิเคชัน (ammonification) [4]

ไนโตรเจนในสารอินทรีย์สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นแก๊สไนโตรเจนโดยผ่าน 2 กระบวนการ คือ

1. ไนตริฟิเคชัน (nitrification) แบคทีเรียบางชนิดใช้แอมโมเนียมในดินเป็นแหล่งพลังงานและทำให้เกิดไนเตรต (NO_2^-) ซึ่งเปลี่ยนเป็นไนเตรต ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ด้วย



2. ดีไนตริฟิเคชัน (denitrification) ในสภาพไร้ออกซิเจน แบคทีเรียบางชนิดสามารถสร้างออกซิเจนได้เองจาก ไนเตรตและได้ผลผลิตเป็นแก๊สไนโตรเจนกลับคืนสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปริมาณไนโตรเจนที่หมุนเวียนในระบบนิเวศที่กล่าวถึงทั้งหมดนี้จะมีปริมาณน้อยมาก แต่วัฏจักรไนโตรเจนในธรรมชาติก็สมดุลด้วยปฏิกิริยาซึ่งเกิดโดยพืชและการย่อยสลายของแบคทีเรีย



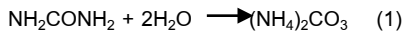
เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก แต่ดินที่ใช้เพื่อการเพาะปลูกโดยทั่วไปมักมีไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช นอกจากนี้พืชสามารถใช้ประโยชน์โดยตรงได้เฉพาะกรณีที่ไนโตรเจนอยู่ในรูปแอมโมเนียม (NH_4^+) หรือไนเตรต (NO_3^-) เท่านั้น [3] ในขณะที่ไนโตรเจนในดินส่วนใหญ่อยู่ในรูปสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งจะต้องรอให้จุลินทรีย์ย่อยสลายก่อน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ต้องใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร จึงทำให้ปุ๋ยไนโตรเจนหรือปุ๋ยยูเรียนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [5]

ปุ๋ยยูเรีย (Urea) มีสูตรทางเคมี $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ เป็นผลึกสีขาว มีความถ่วงจำเพาะ 1.335 g/cm^3 ดูดความชื้นได้ง่าย มีธาตุไนโตรเจนร้อยละ 45 – 46.6% มีมวลโมเลกุล 60.06 กรัม / โมล เมื่อเก็บทิ้งไว้จะมีกลิ่นแอมโมเนีย ซึ่งมีรสเค็ม มีจุดหลอมเหลวที่ 132.7°C ยูเรียละลายน้ำได้มาก คือ ที่ 0°C ละลายได้ 66.7 กรัมในน้ำ 100 กรัม, ที่ 25°C ละลายได้ 119.0 กรัมในน้ำ 100 กรัม และ ที่ 100°C ละลายได้ 733.3 กรัมในน้ำ 100 กรัม สารละลายมีฤทธิ์เป็นกลาง

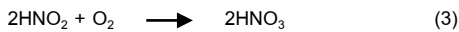
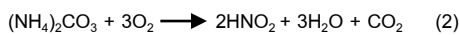
นอกจากนี้ ยังสามารถละลายได้ในแอลกอฮอล์ และในแอมโมเนีย แต่ไม่ละลายในไฮโดรคาร์บอน [6] เนื่องจากประโยชน์ของปุ๋ยยูเรียหรือปุ๋ยไนโตรเจนนั้นขึ้นอยู่กับกระบวนการละลาย (Dissolution) และสภาพการละลายได้ (Solubility) ของปุ๋ยในสารละลายดิน แต่ปุ๋ยที่ละลายได้ง่าย และให้ประโยชน์แก่พืชเร็ว ทำให้ประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหารของพืชจากปุ๋ย (Nutrient use efficiency) ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ด้วยสาเหตุเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา [7] จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนเป็นจำนวนมากและใช้ติดต่อกันเป็นระยะเวลาอันยาวนาน ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาความเสื่อมโทรมของโครงสร้างและขาดความอุดมสมบูรณ์ของดิน เนื่องจากการใช้ปุ๋ยไม่ใช่ว่าการบำรุงดิน แต่เป็นการอัดแร่ธาตุอาหารให้แก่พืช โดยไม่มีการเติมอินทรีย์วัตถุเพิ่มเติมลงในดิน และการใช้ปุ๋ยเคมียังเร่งอัตราการสลายตัวของอินทรีย์วัตถุในดิน ทำให้โครงสร้างของดินเสื่อมลง ดินจะกระด้าง มีการอัดตัวแน่น ไม่อุ้มน้ำในฤดูแล้ง [8] เมื่อใส่ปุ๋ยเคมีลงในดินจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเคลื่อนย้ายของปุ๋ยทันที สำหรับปุ๋ยไนโตรเจนจะเคลื่อนที่ได้เร็วมากเพราะละลายน้ำได้ง่าย โดยไนโตรเจนในรูปของไนเตรตที่รากพืชดูดไม่ทันจะถูกน้ำพาออกไปจากชั้นของดินอย่างรวดเร็วและจะไม่เกิดประโยชน์ต่อพืชแต่อย่างใด ส่วนไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียมจะถูกดูดยึดอยู่ที่ผิวของอนุภาคดินเหนียวถูกชะล้างโดยน้ำได้ยาก แต่ถ้าดินมีการถ่ายเทอากาศดี แอมโมเนียมจะถูกแปรรูปด้วยจุลินทรีย์ในดินเกิดปฏิกิริยาเพิ่มออกซิเจนให้กลายเป็นไนเตรตได้ง่าย ดังนั้นการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนลงสู่ดินจะสูญเสีย โดยการชะล้างประมาณครึ่งหนึ่งของจำนวนที่ใส่ลงไป นอกจากนี้ปุ๋ยไนโตรเจนที่ใส่ลงไปดินยัง เป็นสาเหตุให้เกิดแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และไนตริกออกไซด์ (NO) โดยปุ๋ยไนโตรเจนที่ตกค้างมากที่สุด คือ ปุ๋ยยูเรียและปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 ตามกฎหมาย เรียกว่า "ปุ๋ยเคมียูเรีย" โดยต้องมีปริมาณไนโตรเจนไม่ต่ำกว่าร้อยละ 44 ของน้ำหนัก มีปริมาณไบยูเรตต่ำกว่าร้อยละ 1 ของน้ำหนัก และมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 3 ของน้ำหนัก [9]

นอกจากนี้ ปุ๋ยยูเรีย ซึ่งมีชื่อเรียกอีกหลายชื่อ เช่น แม่ปุ๋ยยูเรีย ปุ๋ยไนโตรเจน คาร์บาไมด์ (carbamide) คาร์บอนิลไดเอไมด์ (carbonyl diamide) เป็นต้น เป็นปุ๋ย

ไนโตรเจนที่ไม่มีไอออนเป็นองค์ประกอบ สามารถละลายน้ำได้ง่าย มีไนโตรเจนประมาณร้อยละ 46 ปล่อยเร็ว สามารถดูดความชื้นได้ดี แต่เมื่อเคลือบผิวด้วยวัสดุเหนียวแล้ว ทำให้ยูเรียไม่จับกันเป็นก้อน ไม่ชื้นง่ายและมีคุณภาพเหมาะสำหรับการเก็บรักษาและการนำไปใช้ประโยชน์ ดังสมการ



ยูเรียเป็นสารที่พืชไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง แต่เมื่อใส่ยูเรียลงในดิน ยูเรียจะถูกไฮโดรไลซ์โดยมีเอนไซม์ Urease ช่วยเร่งปฏิกิริยาและถ้าอยู่ในภาวะที่มีออกซิเจนเพียงพอ NH_4^+ ที่เกิดขึ้นจะถูกจุลินทรีย์ออกซิไดซ์ต่อไปเป็น NO_2^- และเปลี่ยนเป็น NO_3^- ในที่สุด ดังสมการ



อิทธิพลของยูเรียเมื่อใส่ลงดินระยะแรก จะมีผลทำให้ดินเป็นด่าง ต่อมาเมื่อแอมโมเนียมไอออนถูกออกซิไดซ์ก็จะก่อให้เกิดผลตกค้างเป็นกรด [5] และการหว่านยูเรียในช่วงฤดูฝน ก็จะทำให้ยูเรียชะล้างได้ง่ายขึ้นและเกิดการตกค้างมากตามไปด้วย ส่งผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินมีมากขึ้น ก่อให้เกิดแก๊สมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มากขึ้น ซึ่งเป็นแก๊สที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน [10] จากปัญหาที่ได้อธิบายมาข้างต้นนี้

จึงได้มีการค้นคว้าและพัฒนาปุ๋ยที่มีคุณสมบัติในการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้ ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบจากการตกค้างของปุ๋ยเคมีในสิ่งแวดล้อม และเป็นวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ปุ๋ยเคมีพร้อมทั้งลดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม คือ การควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารในเม็ดปุ๋ย เพื่อให้ธาตุอาหารปลดปล่อยออกมาอย่างสม่ำเสมอ

ในบทความนี้จะกล่าวถึง (1) ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ความหมายและลักษณะพิเศษ (2) ประเภทของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย กลไกการปลดปล่อย (3) วิธีการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยตลอดจน (4) ข้อดีข้อเสียและโอกาสในการพัฒนาในอนาคต

2. ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (Controlled Released Fertilizers, CRF)

2.1 ความหมายและคุณลักษณะพิเศษ

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย คือ ปุ๋ยที่ผลิตขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ และทำให้พืชได้รับธาตุอาหารตรงตามต้องการโดยการควบคุมปริมาณการปลดปล่อยธาตุอาหารลงสู่ดิน ในทางวิชาการมีการใช้คำภาษาอังกฤษ 2 คำ ซึ่งมีความหมายต่างกัน คือ controlled released fertilizers (CRF) (ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย) และ slow-release fertilizers (SRF) (ปุ๋ยปลดปล่อยช้า) ซึ่งมีความหมายแตกต่างกันดังนี้

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (CRF) หมายถึง ปุ๋ยที่มีการผลิตให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ และยังทราบแน่ชัดว่ามีปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่ออัตราและช่วงเวลาที่ปุ๋ยนั้นจะปลดปล่อยธาตุอาหารรวมทั้งมีกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยอยู่แล้วในปุ๋ยที่ผลิต เช่น ปุ๋ยเคลือบ (coated fertilizer)

ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF) หมายถึง ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นของดินและกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น ปุ๋ยประเภทนี้ ได้แก่ ยูเรียฟลอร์มาลดีไฮด์ (urea – formaldehyde) [11]

นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยเนื้อปุ๋ยภายในจะเป็นปุ๋ยที่ละลายน้ำได้สูง (high solubility) แต่เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยไว้เพื่อควบคุม (control) การปลดปล่อย (release) จึงถูกเรียกว่า “ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย (CRF)” ส่วนปุ๋ยปลดปล่อยช้า เช่น ยูเรียฟลอร์มาลดีไฮด์เป็นปุ๋ยเคมีที่สังเคราะห์ขึ้นใหม่จากยูเรียที่มีสภาพละลายน้ำได้สูงแต่เมื่อผ่านกระบวนการผลิตแล้ว เป็นปุ๋ยมีสภาพละลายน้ำได้ต่ำ (low solubility) และปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาช้าตามสภาพการละลายน้ำได้ จึงเรียกว่า “ปุ๋ยปลดปล่อยช้า (SRF)” เมื่อต้องการเรียกปุ๋ย 2 ชนิดนี้รวมกัน เรียกว่า “SRF/CRFs” ส่วนปุ๋ยแอมโมเนียมหรือยูเรียที่ผสมสารยับยั้ง (inhibitors) เพื่อทำให้ปุ๋ยเป็นประโยชน์

ต่อพืชได้มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินที่มีประจุในการแลกเปลี่ยนแคตไอออนปานกลางถึงสูง จึงอาจจำแนกว่าเป็นปุ๋ยไนโตรเจนออกฤทธิ์ช้า (slow – acting nitrogen)

2.2 ประเภทของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยจะมีลักษณะเป็นปุ๋ยเม็ดที่มีสารเคลือบอยู่ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ

- 1) เคลือบผิวเม็ดด้วยอินทรีย์สาร เช่น กำมะถัน (sulfur-coated urea หรือ SCU)
- 2) เคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (polymer coating of SCU) และ
- 3) เคลือบผิวเม็ดด้วยพอลิเมอร์อินทรีย์ (fertilizers coated with organic polymers)

2.3 ลักษณะการทำงานและกลไกการปลดปล่อย

ปุ๋ยยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถันมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายการปลดปล่อยยูเรียสู่ดินจากปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันดังนี้คือ เม็ดปุ๋ยจะมีลักษณะเป็นรอยร้าวหรือรูเล็ก ๆ ซึ่งมีไซหรือพลาสติกอุดไว้ เมื่อผิวเคลือบถูกจุลินทรีย์ย่อย ก็จะมีรูและน้ำซึมเข้าไปได้ สารละลายยูเรียจึงแพร่ออกมาทางรูดังกล่าว และอุณหภูมิกับความชื้นของดินก็มีอิทธิพลต่อการแพร่ โดยสามารถอธิบายการแพร่ของยูเรียผ่านการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยได้ดังสมการที่ 4

$$Dm_r/dt = - DS_k (dC_k / dX_k) \quad (4)$$

เมื่อ m_r คือ มวลของยูเรียที่แพร่ออกไปจากเม็ดปุ๋ย

D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของยูเรียในน้ำ

S_k คือ พื้นที่หน้าตัดซึ่งยูเรียแพร่ผ่าน

C_k คือ ความเข้มข้นของยูเรีย

t คือ เวลาใดๆ

และ X_k คือ ระยะทาง ส่วน $k = \{l, p, o\}$ นั้น หมายถึงค่าจากส่วนภายใน (Inside) รูในผิวเคลือบ (pore) หรือส่วนภายนอก (outside)

ต่อมาได้มีผู้เสนอว่าการแพร่ของยูเรียมีสองขั้นตอน คือ

1) ช่วงที่มีการปลดปล่อยไนโตรเจนระดับคงตัว (steady N release phase) อันเป็นช่วงที่ยังมียูเรียสภาพของแข็งอยู่ และยูเรียละลายออกมา และ

2) ช่วงที่มีการปลดปล่อยไนโตรเจนลดลง (reduced – rate phase) อัตราการปลดปล่อยลดลงเนื่องจากยูเรียภายในสารเคลือบใกล้จะหมด สมการที่ใช้สำหรับกรณีทั้งสอง แสดงดังสมการที่ 5 และ 6

$$dm_r/dt = (D/M_o) (S_p/I) C_{sat} \text{ เมื่อ } t < t_1 \quad (5)$$

$$dm_r/dt = (DS_p/M_o I) (1 - M_r) p \text{ เมื่อ } t < t_1 \quad (6)$$

เมื่อ $M_r = m/M_o$ (M_o คือ มวลของยูเรียเริ่มต้น)

C_{sat} คือ ความเข้มข้นของยูเรียเมื่อสารละลายอิ่มตัว

I คือ ความหนืดของสารเคลือบ

p คือ ความหนาแน่นของเม็ดยูเรีย

t_1 คือ ช่วงเวลาที่มีการปลดปล่อยไนโตรเจนลดลงเนื่องจากสารละลายภายในเม็ดปุ๋ยไม่มีแล้ว

S_p คือ พื้นที่หน้าตัดของรูสารเคลือบ

สำหรับปุ๋ยที่มีพอลิเมอร์เป็นตัวเคลือบนั้น ผิวเคลือบจะสามารถควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารได้ดี และอัตราการปลดปล่อยจะได้รับอิทธิพลจากสมบัติของดินเพียงเล็กน้อย สำหรับรูปแบบของการปลดปล่อยมีทั้งเป็นแบบพาราโบลา แบบเชิงเส้น และแบบซิกมอยด์ อาจกล่าวได้ว่าการปลดปล่อยลักษณะเชิงเส้นและแบบซิกมอยด์สอดคล้องกับพฤติกรรมการดูดธาตุอาหารของพืชมากกว่าแบบพาราโบลา อย่างไรก็ตามการปลดปล่อยแบบซิกมอยด์จะมีช่วงชะลอการปลดปล่อย (lag period) [12]

ปุ๋ยที่เคลือบด้วยสารพอลิเมอร์อินทรีย์ จะมีการปลดปล่อยโดยการแพร่ดังนี้ ในหลักการทั่วไปการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยเม็ดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์อินทรีย์มีหลายระยะดังนี้ (ดูภาพที่ 1 ประกอบ) ระยะแรกมีการซึมของน้ำ(ส่วนมากเป็นไอน้ำ) ผ่านวัสดุเคลือบผิว หากความดันภายในเม็ดปุ๋ยสูงกว่าความดันภายนอกของวัสดุที่หุ้มเม็ดปุ๋ยอยู่ ผิวเคลือบก็จะแตก ต่อจากนั้นเนื้อปุ๋ยจะทะลักออกมาทั้งหมดในทันที ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “กลไกล้มเหลว (failure mechanism) หรือการปลดปล่อยแบบล้มละลาย” แต่ถ้าหากผิวหุ้มเม็ดปุ๋ยยังคงทนต่อแรงดันภายในได้ ปุ๋ยก็ถูกปลดปล่อยโดย [13] (1)

การแพร่เนื่องจากความเข้มข้นภายในสูงกว่าภายนอก และ (2) การเคลื่อนมวล (mass flow) เนื่องจากแรงดันภายในสูงกว่า

สำหรับกลไกล้มเหลวหรือการปลดปล่อยแบบล้มละลาย มักเกิดกับเม็ดปุ๋ยซึ่งเคลือบด้วยสารที่เปราะและไม่ค่อยยืดหยุ่น เช่น กำมะถัน หรือสารอินทรีย์อื่นๆ ส่วนการปลดปล่อยจากปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ เช่น อัลกิดเรซิน (alkyd resin, พอลิเอส-เทอร์เรซิน) และพอลิโอเลฟิน (polyolefin) (โอเลฟินคือไฮโดรเจนคาร์บอนที่ไม่มีอิมิตัวและมีพันธะคู่ในโมเลกุลอย่างน้อยหนึ่งคู่) มักจะไม่มีปัญหาการล้มเหลวหรือการปลดปล่อยแบบล้มเหลว [14]

จากที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่าปุ๋ยเม็ดหนึ่งจะปลดปล่อยธาตุอาหารแบบกลไกล้มเหลวได้เพียงครั้งเดียว เมื่อพิจารณาถึงขณะการปลดปล่อยจากปุ๋ยหลายๆเม็ด จะเห็นภาพแตกต่างจากปรากฏการณ์ที่เกิดกับปุ๋ยเม็ดเดี่ยว เนื่องจากปุ๋ยแต่ละเม็ดจะมีความแตกต่างในด้านการเคลือบ ซึ่งจะได้กล่าวถึงกลไกการแพร่ต่อไป

การปลดปล่อยด้วยกลไกการแพร่ สำหรับการปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยเม็ดที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ มี 3 ระยะ [15] คือ

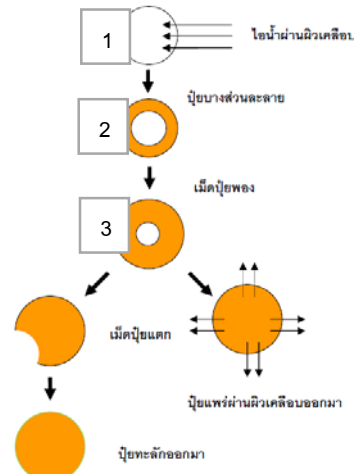
1) ระยะเกือบจะไม่มี การปลดปล่อยธาตุอาหาร (lag period) สิ่งที่เกิดขึ้นคือไอน้ำจะซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ยอย่างช้าๆแล้วเริ่มละลายส่วนของปุ๋ยที่อยู่ใกล้ผิวเคลือบ ในช่วงนี้จะมีพลังขับเคลื่อนจากความแตกต่างของความดันไอระหว่างสารเคลือบสองด้าน เมื่อไอน้ำเข้าไปอยู่ภายในชั้นผิวเคลือบก็จะ

(1) ครอบครองเฉพาะที่ว่างในช่องอันจำกัด 2 ส่วน คือ รูพรุนภายในเนื้อปุ๋ยและช่องระหว่างผิวเคลือบกับปุ๋ยเท่านั้น

(2) ทำให้หน้าหน้าเม็ดปุ๋ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และ

(3) แรงดันภายในสูงขึ้นและปริมาตรเม็ดปุ๋ยก็

โตขึ้นด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยอัลกิดเรซิน สำหรับเวลาที่ใช้ในช่วงนี้ คือ เวลาที่ทำให้ช่องว่างทั้งหมดมีของเหลวเต็ม ช่วงนี้จึงจะสิ้นสุดเมื่อสารละลายปุ๋ยเริ่มต้นผั่งด้านในของผิวเคลือบ และเป็นจุดเริ่มต้นของระยะที่สอง



ภาพที่ 1 การปลดปล่อยธาตุอาหารจากเม็ดปุ๋ยที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ 1) น้ำซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ย 2) น้ำละลายปุ๋ย 3) เกิดแรงดันภายในเม็ดปุ๋ยและเม็ดปุ๋ยพองตัว (เฉพาะสารเคลือบประเภทอัลกิด ในระยะสุดท้ายมีโอกาสเกิดได้สองทาง คือ ผิวเคลือบเม็ดปุ๋ยแตก ปุ๋ยจึงทะลักออกมา เรียกว่า กลไกล้มเหลว แต่ถ้าผิวเคลือบยังปกติ การปลดปล่อยเกิดจากการแพร่) [13]

2) ระยะการปลดปล่อยคงที่

อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารในช่วงนี้จะคงที่ ทรายใดที่สารละลายอิมิตัวของปุ๋ยยังคงอยู่ในสมดุลกับปุ๋ยแข็ง (ส่วนที่ยังไม่ละลาย) ที่ยังอยู่ในเม็ด เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายปุ๋ยซึ่งอิมิตัวและคงที่จะทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นคงที่ จึงเป็นปัจจัยกำหนดค่าของแรงที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนให้ปุ๋ยออกมาภายนอกในอัตราคงที่ ในระยะนี้ปริมาตรของเม็ดปุ๋ยคงที่ แสดงว่า ปริมาตรซึ่งลดลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของปุ๋ยออกไป ได้มีน้ำจากภายนอกเข้ามาชดเชยในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน และ

3) ระยะการปลดปล่อยลดลงทีละน้อย

เป็นระยะสุดท้าย เกิดขึ้นหลังจากเนื้อปุ๋ยภายในเม็ดได้ละลายหมดแล้ว จากนั้นแรงที่ขับเคลื่อนการปลดปล่อยปุ๋ยก็เริ่มลดลงเรื่อยๆ ในช่วงท้ายจะมีปุ๋ยออกมาน้อยมากจนกระทั่งหมดไป

วัตถุดิบและวิธีการเตรียมปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

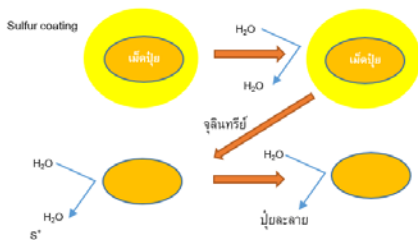
1. ปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยกำมะถัน (Sulfur-coated urea หรือ SCU)

ในระยะเริ่มแรกนั้น กำมะถันถูกนำมาใช้เคลือบปุ๋ยยูเรียเนื่องจากมีข้อดีหลายด้าน เช่น ต้นทุนต่ำ สามารถฆ่าเชื้อโรคได้และสามารถยึดเกาะกับเม็ดปุ๋ยได้ดี แต่ก็มีข้อเสีย คือ อากาศยังสามารถแทรกซึมผ่านเข้าไปในเม็ดปุ๋ยได้ โดยที่ปุ๋ยไนโตรเจนชนิดนี้มีธาตุไนโตรเจนจากเม็ดปุ๋ยที่จะเป็นประโยชน์ต่อพืชได้นั้นขึ้นอยู่กับชั้นเคลือบซัลเฟอร์ที่อยู่บนเม็ดปุ๋ยจะต้องถูกทำลายเสียก่อนจึงจะทำให้ยูเรียละลายและปลดปล่อยไนโตรเจนที่เป็นประโยชน์ต่อพืชออกมา การสลายตัวของสารกำมะถันที่เคลือบอยู่บนเม็ดปุ๋ยยูเรีย จะเกิดจากกิจกรรมของสิ่งมีชีวิต (biological oxidation) และผลการแตกตัวทางกายภาพ (physical breaking) ดังภาพที่ 2

วิธีเคลือบยูเรียชนิดเม็ดด้วยกำมะถัน มีขั้นตอนดังนี้

- 1.) นำเม็ดปุ๋ยมาทำให้ร้อน
- 2.) หลอมซัลเฟอร์ที่อุณหภูมิ 156°C แล้วนำไปพ่นไปเคลือบเม็ดปุ๋ยยูเรีย

วิธีการเคลือบนี้จะทำให้ได้ผิวเคลือบมีรูพรุนมากเกินไป เป็นเหตุให้ควบคุมการละลายได้ไม่ดีนัก จึงต้องแก้ไขจุดบกพร่องนี้โดยใช้ไขเป็นวัสดุอุดกันรั่วซึม (wax sealant) เพื่อลดการซึมน้ำ และเพิ่มสารควบคุมกิจกรรมของจุลินทรีย์เพื่อป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์ย่อยออกซิไดส์ซัลเฟอร์เร็วเกินไปและเคลือบชั้นนอกสุดอีกครั้งด้วยวัสดุปรับสภาพปุ๋ย (conditioner) เช่น ดินเหนียว แอตตาปุลไกต์ (Attapulgite) [17]

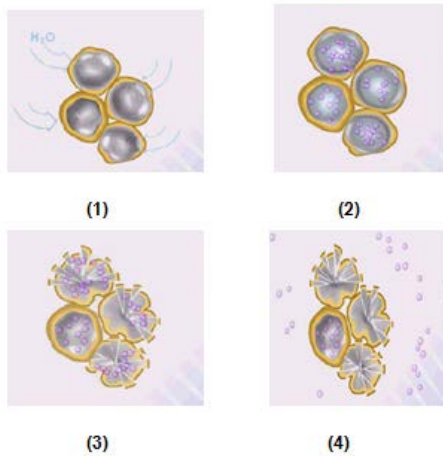


ภาพที่ 2 การสลายตัวของชั้นกำมะถันที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยยูเรียก่อนที่จะมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมา [13]

อัตราการปลดปล่อยไนโตรเจนออกจากปุ๋ยขึ้นอยู่กับคุณภาพของการเคลือบ ซึ่งมีเกณฑ์ดังนี้ คือ แบ่งเม็ดปุ๋ยที่ผ่านการเคลือบแล้วเป็น 3 ส่วนเท่าๆ กัน คือ ส่วนที่ 1 มีรอยร้าวที่ผิวเคลือบ ส่วนที่ 2 สมานรอยร้าวบนผิวเคลือบด้วยไขแล้ว และส่วนที่ 3 เคลือบหนาและผิวเคลือบสมบูรณ์ เมื่อใส่ปุ๋ยลงไปในดิน ปุ๋ยส่วนแรกจะละลายน้ำและยูเรียก็ละลายออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชทันที สำหรับส่วนที่ 2 และ 3 จะทยอยปลดปล่อยออกมา โดยส่วนที่ 3 ใช้เวลานานที่สุด สำหรับปริมาณของยูเรียในเม็ดปุ๋ยที่เคลือบหนาและสมบูรณ์นี้เรียกว่า "Lock off" ซึ่งทอดเวลาการปลดปล่อยได้นานกว่าสองส่วนแรก [17]

2. ปุ๋ยยูเรียเคลือบด้วยกำมะถันและเคลือบทับด้วยพอลิเมอร์ (Polymer coating of SCU)

เนื่องจากยูเรียที่เคลือบด้วยกำมะถันนั้นควบคุมการปลดปล่อยยูเรียออกจากเม็ดปุ๋ยได้ไม่ค่อยดีนัก จึงได้มีการปรับปรุงวิธีการโดยการเคลือบพอลิเมอร์อินทรีย์พวกเทอร์โมพลาสติกหรือเรซินเพิ่มอีกหนึ่งชั้นและเรียกปุ๋ยชนิดนี้ว่า PSCU (polymer-coated SCU) ซึ่งมีสมบัติด้านควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารดีกว่า SCU มาก นอกจากนี้ชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบทับนั้น นิยมใช้เป็นพอลิเอทิลีน (Polyethylene) และ พอลิไวนิลอะซิเตท Poly(Vinyl acetate) เพื่อให้กำมะถันยึดเกาะเม็ดปุ๋ยได้ดียิ่งขึ้นและลดการแตกของเม็ดปุ๋ยได้ ทั้งยังเพิ่มความทนทานต่อการขัดสี (Attrition resistance) ระหว่างเม็ดปุ๋ยข้างเคียงด้วย (แสดงดังภาพที่ 3) [18]



ภาพที่ 3 การสลายตัวของชั้นกัมมะถันและพอลิเมอร์ที่เคลือบบนเม็ดปุ๋ยยูเรียก่อนที่จะมีการปลดปล่อยไนโตรเจนออกมาเป็นประโยชน์ต่อพืชต่อไป [12] โดยการปลดปล่อยธาตุอาหารจากเม็ดปุ๋ยที่เคลือบตัวชั้นกัมมะถันและพอลิเมอร์มีขั้นตอนได้แก่ (1) น้ำซึมเข้าไปในเม็ดปุ๋ย (2) น้ำจะละลายปุ๋ย (3) เกิดแรงดันภายในเม็ดปุ๋ย และ (4) ไนโตรเจนถูกปลดปล่อยออกมาจากวัสดุที่เคลือบและวัสดุเคลือบเกิดการสลายตัว [13]

3. ปุ๋ยเคลือบด้วยสารพอลิเมอร์อินทรีย์ (Fertilizers coated with organic polymers)

เม็ดปุ๋ยไนโตรเจนบางชนิดอาจจะถูกเคลือบด้วยสาร พอลิเมอร์ โดยธาตุอาหารจากเม็ดปุ๋ยจะละลายผ่านสารพอลิเมอร์ที่เคลือบเม็ดปุ๋ยออกมาซึ่งอัตราการซึมแพร่ออกมานั้นขึ้นอยู่กับ ความหนาของชั้นพอลิเมอร์ที่เคลือบไว้ ชนิดของพอลิเมอร์ กระบวนการในการเคลือบ และอุณหภูมิดิน ผลิตภัณฑ์ปุ๋ยไนโตรเจนจำพวก Osmocote Trikoite, Polyon, Duration, ESN หมายถึง ปุ๋ยที่เคลือบด้วยเรซินและเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ดังนี้ [19]

3.1 ปุ๋ยเคลือบด้วยเรซิน (Resin – coated fertilizers) เรซินสังเคราะห์ หมายถึง พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นในรูปของเม็ดหรือผง ยังไม่ได้นำไปผ่านกระบวนการแปรรูปทำเป็นผลิตภัณฑ์ โครงสร้างระหว่างโมเลกุลมีลักษณะของการเชื่อมโยง (Crosslink) และเป็น

พอลิเมอร์ที่มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic polymer) สำหรับเรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยเป็นพวกที่สลายได้เมื่อได้รับความร้อนสูง เรซินที่ใช้เคลือบผิวเม็ดปุ๋ยมี 2 ชนิดคือ

1) อัลคิเดเรซิน (Alkyd resin) คือ พลาสติคชนิดหนึ่งเตรียมได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่นระหว่าง ไดไซโคลเพนทาไดเอิน (dicyclopentadiene) กับกลีเซอรอลเอสเทอร์ (glycerol ester) พลาสติคชนิดนี้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลจึงไม่ละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป และ

2) สารประกอบคล้าย พอลิยูรีเทน (polyurethane-like compound) ซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างไดไอโซไซยาเนต (di - Isocyanate) กับแอลกอฮอล์ที่มี -OH หลายหมู่หรือพอลิออล (polyols) การเคลือบด้วยเรซินชนิดนี้ มีลักษณะพิเศษแตกต่างจากเรซินชนิดอื่น คือ พอลิไอโซไซยาเนตทำปฏิกิริยากับเนื้อปุ๋ยที่ผิวเม็ด สารเคลือบจึงติดแน่นและช่วยเพิ่มความต้านทานต่อการกร่อนจากการขัดสีระหว่างเม็ดปุ๋ย เทคโนโลยีการเคลือบแบบนี้ช่วยให้สามารถผลิตปุ๋ยเคลือบด้วย เรซินจากปุ๋ยแบบแกรนูลาร์ (granular) คือ เป็นปุ๋ยยูเรียเม็ดโฟม เป็นปุ๋ยที่มีเม็ดขนาดใหญ่ 2-4 มิลลิเมตร มีสีขาวเหมือนเม็ดโฟม นิยมใช้ทางการเกษตรเหมาะกับการหว่าน และใช้กับเครื่องพ่นปุ๋ยทั่วไปได้ และแบบพริล (prilled fertilizers) คือปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็ก หรือเม็ดสาकु เป็นปุ๋ยที่มีเม็ดขนาดเล็ก 1-3 มิลลิเมตร [20] มีสีขาวใสเหมือนเม็ดสาकु เฉพาะในประเทศไทยนิยมใช้ทางการเกษตรน้อยกว่าปุ๋ยยูเรียเม็ดโฟม แต่ใช้ได้กับต้นไม้เหมือนปุ๋ยยูเรียเม็ดโฟม เพียงแต่ไม่เป็นที่คุ้นเคยของเกษตรกร ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็ก ไม่สามารถใช้บังคับปุ๋ยได้เนื่องจากเม็ดมีขนาดเล็ก โดยปุ๋ยที่อยู่ภายในผิวเคลือบจะเป็นปุ๋ยที่ละลายได้ง่าย เช่น ปุ๋ยยูเรียหรือปุ๋ยเชิงประกอบที่มีจุลธาตุหรือไม่มีจุลธาตุก็ได้ [16]

3.2 ปุ๋ยเคลือบด้วยเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic polymer – coated fertilizers)

พอลิเมอร์ที่ใช้ในการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ย คือ พอลิเอทิลีน (PE) โดยมีวิธีการเคลือบเริ่มจาก นำพอลิเอทิลีนมาละลายในตัวทำละลายพวกคลอริเนเท็ดไฮโดรคาร์บอน จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปฉีดพ่นบนผิวเม็ดปุ๋ยในเครื่องปฏิกรณ์ที่ออกแบบเพื่องานนี้

โดยเฉพาะ สำหรับการควบคุมอัตราการปลดปล่อยของธาตุอาหารออกจากเม็ดปุ๋ยขึ้นอยู่กับส่วนผสมระหว่างพอลิเอทิลีนซึ่งยอมให้น้ำซึมผ่านได้ช้า กับเอทิลีนไวนิลแอซิเตทซึ่งยอมให้น้ำซึมผ่านได้เร็ว ส่วนการลดอิทธิพลของอุณหภูมิต่ออัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารทำได้โดยการเติมฝุ่นของแร่ระหว่างการเคลือบ ซึ่งมีผลในการควบคุม Q_{10} ของการปลดปล่อยให้มีค่าระหว่าง 1.5 – 2.0 (Q_{10} คือการเปลี่ยนแปลงของอัตราการปลดปล่อยธาตุ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C) เทคโนโลยีการเคลือบผิวเม็ดปุ๋ยด้วย เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์นี้ใช้ได้กับปุ๋ยแบบแกรนูลาร์และแบบ พริลทั่วไป ส่วนวิธีการควบคุมอัตราการปลดปล่อยก็คือ การปรับสัดส่วนของพอลิเอทิลีนกับเอทิลีนไวนิลแอซิเตท (ethylene vinyl acetate, EVA) และปรับเปอร์เซ็นต์ของฝุ่นแร่ที่เติมระหว่างการเคลือบเพื่อให้ได้ปุ๋ยที่ปลดปล่อยธาตุอาหารเร็ว ปานกลาง ช้าและช้ามาก แล้วนำปุ๋ยเหล่านั้นมาผสมกันในสัดส่วนที่ต้องการ [21]

4. ข้อดี – ข้อเสียของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหาร คือ ปุ๋ยที่ควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาเพื่อไม่ให้ปุ๋ยเป็นอันตรายต่อรากพืชและลดการชะล้างจากการให้น้ำมากเกินไป ทำให้ใช้ปุ๋ยได้มีประสิทธิภาพสูงและช่วยให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อน้ำแทรกซึมเข้าไปภายในเม็ดปุ๋ยจะทำให้เนื้อปุ๋ยภายในเม็ดกลายเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงและอาศัยการซึมผ่านพอลิเมอร์ออกมาตามหลักการแพร่ของสารเคมีที่จะแพร่จากที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่ที่มีความเข้มข้นต่ำเสมอ โดยจะแทรกซึมผ่านรูเล็กๆของพอลิเมอร์ที่ได้รับความชื้นและเกิดช่องว่างขึ้น ธาตุอาหารจะค่อยละลายออกมาจากเม็ดปุ๋ย

ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้โดยไม่ต้องแบ่งใส่บ่อยครั้งและต้องให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากต้องนำปุ๋ยเคมีมาเข้าสู่กระบวนการผลิตปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยและมีการเพิ่มเสริมธาตุอื่นๆที่ไม่ใช่ธาตุอาหารลงไปในปุ๋ย ทำให้ธาตุอาหารลดลง ราคาต่อหน่วยน้ำหนักธาตุอาหารจึงแพงกว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป ปุ๋ยชนิดนี้จึงยังถูกใช้ในวงจำกัด ส่วนใหญ่

จะเป็นประเทศที่เกษตรกรผลิตปุ๋ยเอง และมักจะใช้กับพืชที่ให้ผลตอบแทนสูงและต้องบำรุงเป็นอย่างดีและมีค่าจ้างแรงงานแพง ซึ่งพบว่าประมาณร้อยละ 65 [23] ของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยทั้งหมดถูกนำไปใช้ในเรือนเพาะชำและไม้กระถาง ในพืชที่ปลูกในกระถางและในถุงนั้น มีมวลของดินในปริมาณที่จำกัด เช่น ไม้ดอกไม้ประดับ พืชตระกูลส้ม กล้าปาล์มน้ำมันและกล้าไม้โตเร็ว ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยสามารถปลดปล่อยธาตุอาหารให้แก่พืชได้สม่ำเสมอและต่อเนื่องมากกว่าปุ๋ยเคมีทั่วไป นอกจากนี้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยังไม่มีปัญหาเรื่องการสะสมเกลือ [24] และยังสามารถออกแบบรูปแบบการควบคุมการปลดปล่อยธาตุอาหารของพืชให้มีความเหมาะสม ป้องกันพืชได้รับธาตุอาหารในปริมาณที่มากเกินไป การใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยังลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี ประหยัดค่าจ้างแรงงาน และค่าเชื้อเพลิงในการขนส่ง สิ่งเหล่านี้คือ ความสามารถของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยที่สามารถทำให้พืชได้รับธาตุอาหารอย่างเหมาะสม และจะนำไปสู่การเพิ่มการใช้งานให้เกิดประโยชน์สูงสุดอย่างแท้จริง

5. ปัจจัยที่มีผลต่อการปลดปล่อยธาตุอาหาร

อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยธรรมดาทั่วไปจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ คือ ความเป็นกรดต่างของดิน (pH), ระดับความชื้นในดิน, ชนิดของดิน, จุลินทรีย์ในดิน, ความเข้มข้นของธาตุอาหารในดิน ยกตัวอย่างเช่น อัตราการปลดปล่อยธาตุอาหารของปุ๋ยละลายช้าในดินที่มีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส จะปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาได้เป็นระยะเวลาประมาณ 4 เดือน ถ้าอุณหภูมิในดินประมาณ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้การปลดปล่อยเร็วขึ้น ระยะเวลาการปลดปล่อยธาตุอาหารจะสั้นลง ทำให้ปุ๋ยละลายช้าปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาได้เป็นระยะเวลาประมาณ 2-2.5 เดือน [22]

6. การประเมินประสิทธิภาพการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนของพืช

จากการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นทั้งในประเทศไทยและภูมิภาคต่างๆ ทั่วโลก จึงมีการถกถึงประสิทธิภาพที่ใช้ให้กับพืชต่างๆ ในการผลิตพืชนั้น และ

สิ่งหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือการคุ้มค่าทาง เศรษฐศาสตร์และการส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการประเมินประสิทธิภาพของการใช้ปุ๋ยในโตรเจน [35] ประสิทธิภาพ หมายถึง ความสามารถที่ทำให้เกิดผล ในการทำงาน หากพิจารณาในแง่การผลิตประสิทธิภาพ ในการผลิต คือผลผลิต (Product) ที่ได้ต่อหน่วยของ ทรัพยากร หรือวัตถุดิบที่ใช้ สำหรับการใส่ปุ๋ยเพื่อบำรุง ให้พืชเจริญเติบโตนั้น เนื่องจากปุ๋ยมีธาตุอาหารเป็น องค์ประกอบจึงถือว่าปุ๋ยเป็นวัตถุดิบอย่างหนึ่งซึ่งพืชดูด ไปใช้แล้วก่อให้เกิดผลผลิต [16]

ประสิทธิภาพการดูดธาตุอาหารจากปุ๋ย (Recovery Efficiency, RE)

ประสิทธิภาพการดูดธาตุอาหารจากปุ๋ย คือ อัตราส่วนของ ปริมาณธาตุอาหารจากปุ๋ยที่พืชดูดมาได้ กับปริมาณ ธาตุอาหารที่ใส่หากคูณด้วยร้อยละจะได้อัตราร้อยละ ซึ่ง หมายความว่าน้ำหนักของธาตุอาหารที่พืชดูดได้จากปุ๋ย เมื่อมีธาตุอาหารในปุ๋ยที่ใส่หนึ่งร้อยหน่วย จากการ ทดลองใช้ปุ๋ยในโตรเจน (N) จะสามารถคำนวณได้ตั้ง สมการ (7) ดังนี้ [24]

ประสิทธิภาพการดูดธาตุอาหารจากปุ๋ย

$$(\%) = (U_f - U_0) \times 100 / F_n \quad (7)$$

เมื่อ U_f = ไนโตรเจนทั้งหมดในพืชที่ใส่ปุ๋ย (กก.N/ไร่)

U_0 = ไนโตรเจนทั้งหมดในพืชที่ไม่ใส่ปุ๋ย (กก.N/ไร่)

F_n = อัตราปุ๋ยในโตรเจนที่ใส่ (กก.N/ไร่)

ดังนั้น $(U_f - U_0) =$ ไนโตรเจนทั้งหมดในพืชที่ เพิ่มขึ้นเมื่อใส่ปุ๋ยอัตรา F_n กก.N/ไร่

การนำปุ๋ยไปประยุกต์ใช้งานและ ความก้าวหน้าในปัจจุบัน

ในการใช้งานปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยนั้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ธาตุอาหาร ประหยัด แรงงานหรือค่าใช้จ่ายในการใส่ปุ๋ย เพิ่มผลผลิตและ คุณภาพของผลผลิต ในกรณีการใช้นอกฟาร์ม จากผล การประเมินทั้งผลเชิงปริมาณและคุณภาพและความพึง พอใจ มักได้ผลตามความคาดหมาย [25] แต่ในการใช้กับ พืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ในสภาพไร่นา พบว่าการใช้ปุ๋ย ควบคุมการปลดปล่อยยังไม่เพียงพอ จึงควรมีการ ประเมินและนำเสนอข้อมูลที่ก้าวหน้า เช่น การ เปรียบเทียบข้อมูลของการใส่ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

ในอัตราที่ต่ำกว่าแต่กลับให้ผลดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี ตามปกติ การศึกษาเหล่านี้เป็นพื้นฐานของการ ประเมินผลกำไรจากการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย เนื่องจากปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยมีราคาแพงกว่า ปุ๋ยเคมีหลายเท่าตนเอง ยิ่งไปกว่านั้น สิ่งที่ยังบอกถึง ประสิทธิภาพของปุ๋ยควรพิจารณา ดังนี้ [26]

- อิทธิพลของปัจจัยที่สำคัญในระดับวิกฤต (critical factors) ซึ่งมีผลต่อกลไกการปลดปล่อยและรูปแบบของ การปลดปล่อยธาตุอาหารจากปุ๋ยละลายช้าแต่ละชนิด
- ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ปุ๋ยแต่ละแห่ง ใช้วิธีการ ทดสอบแตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบสาร เคลือบผิว ใช้ตั้งแต่ 20-60 องศาเซลเซียสและความถี่ใน การเก็บข้อมูลก็ต่างกันด้วย

นอกจากนี้อัตราการปลดปล่อยออกไปในน้ำ ซึ่งขึ้นกับอัตราความแตกต่างของปุ๋ยอยู่ในดินหรือวัสดุ ปลูก มีสาเหตุ 3 ประการ คือ อัตราการปลดปล่อยโดย การแพร่ได้รับผลกระทบเนื่องจากความแปรปรวนของ อุณหภูมิและความชื้นในดิน ค่า pH ของดินที่ เปลี่ยนแปลงการขับสารอินทรีย์ออกจากรากพืช (root exudation) และสุดท้าย คือ กิจกรรมของจุลินทรีย์ ในการย่อยสลายสาร เช่น กำมะถันที่เคลือบปุ๋ย SCU (Sulfur coated urea) และยูเรียฟอรัม มีผลต่อการ ปลดปล่อยธาตุอาหารค่อนข้างมาก

ผลกระทบในการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย

1.) ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

แม้ว่าการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยจะมี ประโยชน์ทั้งในด้านลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่ม ประสิทธิภาพในเรื่องผลผลิตทางการเกษตร แต่ในด้าน สิ่งแวดล้อม การใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยอาจ ก่อให้เกิดปัญหาการตกค้างในดิน การย่อยสลายของ จุลินทรีย์ในดินและเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น ปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการตกตะกอน (precipitate) [27] ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย โดยในขณะที่เกิดการระเหย ของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยและเมตาบอลิซึมของ จุลินทรีย์ก็มีการปล่อยแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N₂O) ออกมาในปริมาณมาก ในประเทศทวีปอเมริกาเหนือและ ยุโรปมีการใช้ปุ๋ยเคมีกันอย่างแพร่หลายและมีการ ตระหนักถึงผลจากการใช้ปุ๋ยที่กระทบในด้านสิ่งแวดล้อม

เนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีในอัตราที่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยไนโตรเจน [29] เมื่อแอมโมเนียมจากปุ๋ยเคมีหรือจากปุ๋ยอินทรีย์ที่เหลือในดินซึ่งมีอากาศถ่ายเทดี บางส่วนจะแปรสภาพเป็นไนเตรต การชะล้างของไอออนนี้สะสมในน้ำใต้ดิน ทำให้มีไนเตรตจากจนไม่เหมาะที่จะนำมาบริโภค เช่น ในอเมริกามีมากกว่า 10 มิลลิกรัม/ลิตร และในยุโรปมีมากกว่า 50 มิลลิกรัม/ลิตร ในสภาพที่ดินขาดออกซิเจน ไนเตรตจะถูกรีดิวซ์ให้กลายเป็นแก๊สไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ซึ่งระเหยไปสะสมในอากาศจึงเกิดช่องโหว่ รังสีอัลตราไวโอเลตจะสามารถผ่านเข้ามาได้มากกว่าเดิมจึงเป็นสาเหตุให้โลกร้อนกว่าเดิม

2.) ผลกระทบด้านการคงอยู่ของธาตุอาหาร

ธาตุอาหารหลักที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ N (ไนโตรเจน), P (ฟอสฟอรัส) และ K (โพแทสเซียม) โดยธาตุอาหารเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในรูปเกลือ ซึ่งถูกทำลายได้ง่าย จากหลายกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นการถูกชะล้าง (leaching), การย่อยสลาย (degradation), การระเหย (volatilization), การดูดซับ (absorption) และการตรึงอยู่ในดิน (soil immobilization) [29] การป้องกันการสูญเสียของธาตุอาหารในปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยกำลังอยู่ในช่วงกำลังพัฒนาและเป็นที่น่าสนใจอย่างมากในปัจจุบัน

3.) ผลกระทบด้านการป้องกันการเกิดเกลือ

เนื่องจากดินที่ใช้ในการเพาะปลูกพืชก็มีหลายชนิดและมีส่วนประกอบที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะภูมิศาสตร์ของแต่ละพื้นที่ การใช้ปุ๋ยเคมีก็เป็นสาเหตุหลักในการเกิดเกลือเพิ่มขึ้นในดิน ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืชและทำให้ผลผลิตที่ได้น้อยลง ในส่วนผสมของปุ๋ยเคมีจะประกอบไปด้วยไอออนบางชนิดที่อยู่ในหิน เช่น ในปุ๋ยฟอสเฟตจะประกอบไปด้วยธาตุ thorium, uranium, aluminium, iron และ ไอออนอื่นๆในปริมาณเล็กน้อย [30] โดยไอออนเหล่านี้จะมีส่วนที่ทำให้พืชเจริญเติบโตได้ช้าลง ซึ่งการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยก็ส่งผลให้เกิดเกลือในดินน้อยลง ช่วยป้องกันการสลายตัวของดิน ทำให้การใช้ปุ๋ยควบคุมการ

ปลดปล่อยนี้สามารถเข้าถึงการเพาะปลูกเพื่อให้ธาตุอาหารยังคงเหลืออยู่ในดินได้ดีกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี [31]

บทสรุปและแนวทางในอนาคต

วัตถุประสงค์หลักในการผลิตปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย ก็เพื่อที่จะนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการเกษตร และให้พืชได้รับธาตุอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งเทคโนโลยีนี้มีประโยชน์ต่อเกษตรกรอย่างมากในการลดปริมาณการใช้ปุ๋ย ทำให้ช่วยลดต้นทุนในการใช้ปุ๋ย ซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายหลักที่มีมูลค่าสูงมากในภาคการเกษตร และยังเป็นทางเลือกใหม่ที่จะใช้แทนที่ปุ๋ยเคมี เนื่องจากปุ๋ยเคมีที่ใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ มีผลกระทบอย่างมากทั้งต่อสิ่งแวดล้อม โดยส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกมากขึ้น ทำให้เกิดการตกค้างของสารเคมีในดินและยังทำให้เกิดเกลือเพิ่มขึ้นในดินจากสาเหตุเหล่านี้จึงทำให้พืชเจริญเติบโตไม่ดีพอและทำให้ได้ผลผลิตลดลง ไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยรวมไปถึงค่าแรงและค่าขนส่งต่างๆ ดังนั้นการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยจึงมีแนวโน้มที่จะถูกใช้กันอย่างกว้างขวางในอนาคต โดยแนวโน้มในอนาคตการพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อย อาจมีดังนี้

(1) การเตรียมวัสดุเคลือบ เช่น พอลิเมอร์หรือไฮโดรเจลให้มีราคาที่ลดลง ในขณะที่เดียวกันก็ต้องมีสมบัติทางเชิงกล (mechanical properties) และมีอัตรา การบวมน้ำ (swelling ratio) ที่ดีด้วยเช่นกัน โดยอาจจะนำเอาวัสดุสารอนินทรีย์ ได้แก่ kaolin, montmorillonite และ attapulgite [32] ซึ่งวัสดุเหล่านี้จะสามารถปรับปรุงสมบัติการบวมน้ำ (swelling ratio) และสมบัติทางเชิงกลได้ ซึ่งเป็นความท้าทายของนักวิจัยรุ่นใหม่ในการค้นคว้าและวิจัยกันต่อไป

(2) การพัฒนากระบวนการเตรียมวัสดุเคลือบ เช่น พอลิเมอร์หรือไฮโดรเจลให้มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไม่มีความเป็นพิษต่อดินและพืช รวมไปถึงมีความสามารถในการย่อยสลายตัวได้ดีในธรรมชาติ (biodegradability) และความสามารถในการบรรจุธาตุอาหารลงในวัสดุที่เคลือบ

ในปัจจุบันนี้มีการใช้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยกับพืชบางชนิดเท่านั้น ได้แก่ ข้าวสาลี, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง, มะเขือเทศ และมันฝรั่ง [28] หรือในพืชที่ต้องการ

ปุ๋ยและดินเป็นจำนวนมากในการเจริญเติบโต สำหรับวัสดุติบที่นิยมใช้ในการผลิตปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยนั้นก็จำเป็นต้องมีคุณสมบัติในการเก็บกักน้ำได้เป็นอย่างดีซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากต่อพืชที่มีความต้านทานต่ำและมีระบบรากที่ไม่ลึก [33] เช่น ข้าว [34] ซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ซึ่งคาดว่าในไม่ช้านี้จะมีการพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยนี้ให้นำมาใช้กับพืชท้องถิ่นและพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยให้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้น

ในการผลักดันภาคการเกษตรของประเทศไทยให้มีความเข้มแข็งทัดเทียมกับนานาประเทศ นักวิจัยก็ได้พยายามพัฒนาปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยให้มีประสิทธิภาพดี ทั้งในด้านเศรษฐกิจที่จะช่วยลดปัญหาค่าใช้จ่ายของเกษตรกร ด้านผลผลิตที่จะได้ผลผลิตออกมาในปริมาณที่เพียงพอกับความต้องการของตลาด และด้านสิ่งแวดล้อมที่เป็นสิ่งสำคัญและยังเป็นเรื่องท้าทายของนักวิจัยในปัจจุบันนี้ที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยนี้ไม่ให้เกิด มลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม, ไม่มีการตกค้างของสารเคมีในดิน, เพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับธาตุอาหาร, เพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำของดินสำหรับพื้นที่ที่ต้องเผชิญกับปัญหาความแห้งแล้ง และที่สำคัญคือ มีราคาที่ลดต่ำลงด้วย ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยนี้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] อานัฐ ตันโซม. 2554. *เกษตรธรรมชาติประยุกต์*. ปทุมธานี. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช).

[2] สรสิทธิ์ วัชรโรทยาน. 2553. *ปุ๋ยกับการพัฒนาการเกษตร*. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[3] Hou, A.; H. Akiyama.; Y. Nakajima.; S. Sudo.; H. Tsuruta. *CHEMOSPHERE*. **2000**, 2, 327.

[4] L. Robert Mikkelsen. *Fert. Res*. **1994**, 38, 58.

[5] H. Akiyama.; X.Y. Yan.; K. Yagi. *Glob. Change Biol*. **2010**, 16, 1844.

[6] D. Davidson.; F.X. Gu, J. Agr. Food Chem. **2012**, 60, 873.

[7] A. Shaviv.; R. Mikkelsen. *Nutr. Cycl. Agroecosyst*. **1993**, 35, 11.

[8] Y. Zhang.; F. Wu.; L. Liu.; J. Yao. *Carb. Polym*. **2013**, 91, 279.

[9] N. Teramoto.; A. Hayashi.; K. Yamanak.; A. Sakiyama.; A. Nakano.; M. Shibata.; *nanofibers composite hydrogel, Mat*. **2012**, 5, 2582.

[10] Larney F.J.; Hao X. *Bioresour Techno*. **2007**, 98, 3224.

[11] Rains, G. C.; Olson, D. M.; Lewis, W. J. *Agric. Syst*. **2011**,104, 369.

[12] Zhao, C.; Shen, Y. Z.; Du, C. W.; Zhou, J. M.; Wang, H. Y. ;Chen, X. Y. *Ind. Eng. Chem. Res*. **2010**, 49, 9645.

[13] Hummel. N.W. *Agronomy Journal*. **1989**, 81: 292.

[14] Zaang, W. J.; Zhang, X. Y. A. *Environ. Monit. Assess*. **2007**, 133, 434.

[15] Hakeem, K. R.; Ahmad, A.; Iqbal, M.; Gucel, S.; Ozturk, M. *Environ.Sci. Pollut. Res. Int*. **2011**, 18, 1189.

[16] ยงยุทธ โอสถสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มีโรจน์ และชวลิต สงประยูร. 2551. *ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน*. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

[17] R. Liang.; M. Liu.; L. Wu. *React. Funct. Polym*. **2007**, 67, 769.

[18] Tian, X. H.; Saigusa, M. *Pedosphere*. **2005**, 15, 494.

[19] Drost, D.; Koenig, R.; Tindall, T. *HortScience*. **2002**, 37, 342.

[20] Chen, D.; Suter, H.; Islam, A.; Edis, R.; Freney, J. R.; Walker, C. N. *Aust. J. Soil Res*. **2008**, 46, 289.

[21] Mastrocicco, M.; Colombani, N.; Palpacelli, S.; Castaldelli, G. *Environ. Earth Sci*. **2011**, 63, 909.

- [22] D. Davidson, F.X. Gu, *J. Agric. Food Chem.* **2012**, 60, 876.
- [23] Al-Hurban, A. *Environ. Qual.* **2003**, 17, 259.
- [24] Yaduvanshi, N. P. S.; Swarup, A. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* **2005**, 73, 116.
- [25] Kamel, N. H. M.; Hegazy, W. S.; Navratil, J. D. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **2010**, 284, 658.
- [26] J. Wu.; Y. Wei.; J. Lin.; S. Lin. *Polymer.* **2003**, 44, 6519.
- [27] W.-F. Lee, L.-G. Yang. *Appl. Polym.* **2004**, 92, 3426.
- [28] J. Zhang.; R. Liu.; A. Li.; A. Wang. *Polym. Adv. Techno.* **2006**, 17, 15.
- [29] Mullins, G. L.; Sikora, F. *J. Fert. Res.* **1995**, 40, 214.
- [30] Tonitto, C.; David, M. B.; Drinkwater, L. E. *Agr. Ecosyst. Environ.* **2006**, 112, 62.
- [31] Padilla, F. M.; Pugnaire, F. I. *Funct. Ecol.* **2007**, 21, 492.
- [32] D.I. De Urzedo, M.P. Franco, L.M. Pitombo, J.B. Do Carmo. *Forest Ecol. Manage.* **2013**, 310, 42.
- [33] X. H. Chu, X. L. Shi, Z. Q. Feng, Z. Z. Gu, and Y. T. Ding, *J. Biomed. Eng.* **2010**, 29, 2.
- [34] L. Li, *Carbohydr. Res.* **2006**, 34, 374.
- [35] Zebarth, B.J., P. Rochette, and D.L. Burton, *CAN J SOIL SCI.* **2008**, 88,197.