

การพัฒนาปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งท้าวยายม่อม

DEVELOPMENT OF SLOW-RELEASE UREA FERTILIZER FROM  
ARROWROOT-BASED BIOPLASTIC



ณาดา บุญเกียรติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

# การพัฒนาปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งท้าวยายม่อม

ญาดา บุญเกียรติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
ปีการศึกษา 2564  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัย ขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็น  
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้า  
ขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

This thesis consists of research materials conducted at the Faculty of  
Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi and hence the copyright  
owner. I hereby certify that the thesis does not contain any forms of plagiarism.

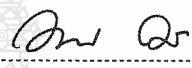
.....  
(นางสาวญาดา บุญเกียรติ)

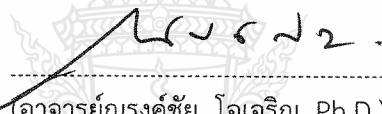


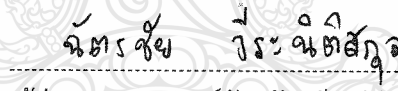
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแบ่งเท้า ayam ม่อม  
Development of Slow-Release Urea Fertilizer from Arrowroot-  
Based Bioplastic

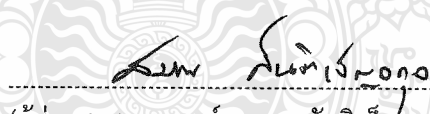
ชื่อ - นามสกุล            นางสาวญาดา บุญเกียรติ  
สาขาวิชา                  วิศวกรรมวัสดุ  
อาจารย์ที่ปรึกษา           ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม      ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมทบ สันติเบ็ญจกุล, ปร.ด.  
ปีการศึกษา                  2564

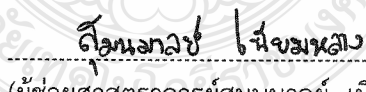
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพวรรณ ปาระดี, วท.ด.)

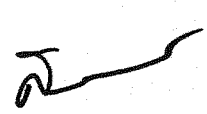
  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ณรงค์ชัย โอเจริญ, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ฉัตรชัย วีระนิติสกุล, Ph.D.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมทบ สันติเบ็ญจกุล, ปร.ด.)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนนมาลย์ เนียมกลาง, ปร.ด.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์สรพงษ์ ภาสุปรีย์, Ph.D.)  
วันที่ 8 เดือน เมษายน พ.ศ. 2565

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม
ชื่อ – นามสกุล	นางสาวญาดา บุญยเกียรติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมณมาลย์ เนียมกลาง, ประ.ด.
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมทบ สันติเบ็ญจกุล, ประ.ด.
ปีการศึกษา	2564

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเตรียมปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม โดยใช้พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมเป็นวัสดุเนื้อ และปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยต้นแบบสำหรับการศึกษา พร้อมทั้งศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยและจลศาสตร์การแพร่ของยูเรียจากปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

เพื่อทำการศึกษาผลของปริมาณปุ๋ยต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยจึงทำการเตรียมปุ๋ยสลายตัวช้าที่ความเข้มข้นปุ๋ยยูเรียต่างๆ (5 - 40 ร้อยละโดยน้ำหนัก) ศึกษาการปลดปล่อยยูเรียในน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และทำการวัดปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาได้ด้วยเครื่อง UV-visible spectrophotometer

ผลการศึกษาพบว่า การบวมตัวของพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมเพิ่มขึ้นตามเวลา และมีค่าสูงสุดถึง 200 เปอร์เซ็นต์ หลังจากผ่านการแช่ในสภาวะน้ำปราศจากไอออน 24 ชั่วโมง เมื่อเพิ่มปริมาณยูเรียในปุ๋ยสลายตัวช้าพบว่าค่า %Transmittance ของกลุ่ม N-H stretching ที่ค่าการดูดกลืน 3350-3310  $\text{cm}^{-1}$  มากขึ้นตามปริมาณยูเรียที่เพิ่มขึ้น จากสัณฐานวิทยาของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า พบการกระจายตัวของยูเรียอย่างสม่ำเสมอ และมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนเมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างยูเรียด้วยพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น จากการศึกษาผลการปลดปล่อยยูเรียพบว่า การปลดปล่อยเพิ่มขึ้นตามเวลา และเริ่มคงที่หลังจากเวลาผ่านไป 1000 นาที เมื่อความเข้มข้นของยูเรียเพิ่มขึ้น การปลดปล่อยของยูเรียจะช้าลง อาจเป็นผลจากการเกาะกลุ่มกันอย่างอัดแน่นของยูเรียตามปริมาณที่เพิ่มขึ้น กลไกการแพร่ของปุ๋ยยูเรียเป็นแบบ Fickian diffusion ซึ่งจากผลการวิจัยนี้ แป้งเท้ายายม่อมนี้สามารถใช้เป็นวัสดุพื้นสำหรับปุ๋ยสลายตัวช้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้

**คำสำคัญ:** ยูเรีย ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า แป้งเท้ายายม่อม พลาสติกชีวภาพ

<b>Thesis Title</b>	Development of Slow-Release Urea Fertilizer from Arrowroot-Based Bioplastic
<b>Name – Surname</b>	Miss Yada Boonyakiat
<b>Program</b>	Materials Engineering
<b>Thesis Advisor</b>	Assistant Professor Sumonman Niamlang, Ph.D. Assistant Professor Somtop Santibenchakul, Ph.D.
<b>Academic Year</b>	2021

## ABSTRACT

This research aimed to study the preparation of slow-release urea fertilizer from arrowroot-based bioplastic (SRAUF) by using bioplastic from arrowroot starch (ARBP) and urea fertilizer as model matrix and model fertilizer, respectively, in the study. In addition, release characteristics and kinetics of urea released from SRAUF were also investigated.

To study the effect of the amounts of urea on release characteristics, SRAUF was prepared at various urea concentrations (5 to 40% w/w). The release characteristics were studied in deionized water at the temperature of 30 °C for 24 hours. The amounts of urea released were measured with a UV-visible spectrophotometer.

The study results showed that the swelling of ARBP increased with time and reached a maximum of 200% after ARBP was submerged in deionized water for 24 hours. When the amount of urea increased, the %Transmittance of the N-H stretching group at 3350-3310  $\text{cm}^{-1}$  increased. The morphology of SRAUF showed a uniform distribution. The agglomeration of urea was observed when the amount of urea increased, due to stronger hydrogen bonds. The amount of urea released gradually increased and reached the equilibrium value after 1000 minutes. When the urea concentration increased, the release of urea was slow. This might be the result of urea agglutination as the amount increased. The diffusion mechanism was Fickian diffusion. Thus, according to the study results, ARBP can be used as an environmentally friendly slow-release fertilizer matrix.

**Keywords:** urea, slow-release urea fertilizer, arrowroot starch, bioplastic

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณา ความเมตตาและความอนุเคราะห์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนนมาลย์ เนียมกลาง อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้ทำการวิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบและผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ดร.นพวรรณ ปาระดี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฉัตรชัย วีระนิติสกุล และดร.ณรงค์ชัย โอเจริญ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ความกรุณาให้คำแนะนำ การแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ของงานวิจัย รวมทั้งเสียสละเวลาในการเป็นกรรมการสอบในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณการสนับสนุนจากบุคลากรและหน่วยงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ อำนวยความสะดวกในเรื่องการใช้วัสดุในการทดลอง การใช้เครื่องมือเครื่องทดสอบและสถานที่จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณครอบครัวและเพื่อนอันเป็นที่รักยิ่ง ผู้ที่คอยให้การสนับสนุนในด้าน การศึกษา กำลังใจ กำลังทรัพย์ จนกระทั่งสำเร็จการศึกษา ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจ หากวิทยานิพนธ์นี้ขาดตกบกพร่อง หรือไม่สมบูรณ์ประการใด ผู้วิจัย ขอกราบขอภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ญาดา บุญยเกียรติ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูป.....	(9)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	(12)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	13
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	14
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	14
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1 ดิน (Soil).....	16
2.2 ธาตุอาหารของพืช (Mineral plant nutrition).....	17
2.3 ปุ๋ย (Fertilizer).....	19
2.4 ปุ๋ยยูเรีย $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2]$ .....	20
2.5 ปุ๋ยสลายตัวช้า (Slow release fertilizer, SRF).....	22
2.6 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).....	22
2.7 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic).....	23
2.8 แป้ง (Starch).....	25
2.9 จลนศาสตร์การแพร่.....	29
2.9 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	40
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	41
3.3 วิธีการทดลอง.....	42



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	46
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	47
4.1 ลักษณะของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม.....	47
4.2 การบวมตัว (Degree of swelling) ของพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม.....	50
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพ แป้งทำยายม่อม.....	51
4.4 สัณฐานวิทยาของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม.....	54
4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า.....	55
4.6 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปุ๋ยยูเรีย (Calibration curve of fertilizer solution).....	59
4.7 พฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกแป้งทำยายม่อม.....	60
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	70
บรรณานุกรม.....	71
ภาคผนวก.....	79
ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์และเผยแพร่.....	80
ประวัติผู้เขียน.....	99

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ขนาดแกรนูล องค์ประกอบ และความเป็นผลึกของสตาร์ชจากพืชปีชีส์ต่างๆ	26
ตารางที่ 2.2 เลขยกกำลังของ Power low กับกลไกการปลดปล่อยปุ๋ยจากระบบควบคุมการนำส่งที่มีรูปร่างเรขาคณิตแตกต่างกัน.....	31
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบของ Thermoplastic starch.....	34
ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ.....	34
ตารางที่ 2.5 ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ของตัวอย่างผสมแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มขานอ้อย (ค่าจะแสดงเป็น %wt โดยเทียบกับปริมาณแป้ง).....	35
ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงานวิจัย.....	46
ตารางที่ 4.1 ผลของพลาสติกไซเซออร์ และปริมาณปุ๋ยต่อการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าที่ใช้พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมเป็นเมทริกซ์.....	49
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยสลายตัวช้า.....	51
ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR Spectroscopy) ของปุ๋ยยูเรีย (Urea), พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบก้อนกลมและแบบแผ่น (S_SRAUF และ F_SRAUF).....	53
ตารางที่ 4.4 แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบก้อนกลม (S_SRAUF) ที่มีปริมาณปุ๋ย 5, 10, 15 และ 20% w/w ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน.....	66
ตารางที่ 4.5 แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น (F_SRAUF) ที่มีปริมาณปุ๋ย 5, 10, 15, 20, 30 และ 40% w/w ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน.....	67
ตารางที่ 4.6 แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ที่มีปริมาณปุ๋ย 10 %w/w (F_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่างๆ .....	67
ตารางที่ 4.7 แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ที่มีปริมาณปุ๋ย 10 %w/w (F_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่างๆ .....	67

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ระดับ pH ของดินกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช.....	17
รูปที่ 2.2 ลักษณะการขาดธาตุไนโตรเจนของพืชและพืชที่ได้ธาตุอาหารเพียงพอ.....	21
รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ของแกรนูลสตาร์ชจากพืชสปีชีส์ต่างๆ (A) มันฝรั่ง (B) ข้าว (C) ข้าวสาลี (D) ถั่วเขียว (E) ข้าวโพด (F) ข้าวโพดข้าวเหนียว (G) มันสำปะหลัง (H) โซติ (I) แป้งในใบพืช.....	26
รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ (A) อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน (B).....	28
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแกรนูลสตาร์ช.....	28
รูปที่ 2.6 การปลดปล่อยปุ๋ยด้วยการแพร่จาก Reservoir system.....	30
รูปที่ 2.7 การปลดปล่อยปุ๋ยด้วยการแพร่จาก Matrix system.....	30
รูปที่ 2.8 หัวแป้งทำายม่อมดิบ (ซ้าย) และเม็ดแป้งทำายม่อม (ขวา).....	32
รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	33
รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบการปลดปล่อยยูเรียในดินของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมด้วย อนุภาคขานอ้อย และถูกทำให้เป็นพลาสติกด้วยยูเรียที่แตกต่างกัน หลังจากผ่านไป 15, 30, 45 วัน.....	36
รูปที่ 2.11 แสดงแผนผังของความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมของการคลายตัวซ้ำ ของ SRFH ที่เคลือบสองชั้นและสมบัติของ SAP จากแป้ง 3 ชนิด.....	37
รูปที่ 2.12 การดูดซึมน้ำของตัวควบคุมและ G-plasticized AS films ที่เวลาต่างๆ.....	38
รูปที่ 2.13 พฤติกรรมปลดปล่อยยูเรียสำหรับปุ๋ยยูเรียทั่วไป ปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยช้าโดยใช้ แป้งข้าวโพดเป็นสารยึดเกาะ (SRUF-1, SRUF-2, SRUF-3, SRUF-4) และปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยช้า โดยใช้ HPMC และสารยึดเกาะ (SRUF-5, SRUF-6, SRUF-7).....	39
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาปุ๋ยสลายตัวช้า จากพลาสติกชีวภาพแป้งทำายม่อมแบบก้อนกลม.....	44
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาปุ๋ยสลายตัวช้า จากพลาสติกชีวภาพแป้งทำายม่อมแบบแผ่น.....	45

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1 ร้อยละการบวมตัว (swelling) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss) ของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม.....	51
รูปที่ 4.2 FT-IR Spectrum ของปุ๋ยยูเรีย, ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า จากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมและแป้งเท้ายายม่อม .....	53
รูปที่ 4.3 โครงสร้างทางจุลภาคของ A) พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม ที่ไม่ได้ผสมยูเรีย (ARBP) B) ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าที่ปริมาณยูเรีย 5 %w/w (F_SRAUF5) C) ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าที่ปริมาณยูเรีย 40 %w/w (F_SRAUF40).....	55
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยูเรีย (Urea), แป้งเท้ายายม่อม (ARS) และพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP).....	56
รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า จากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (F_SRAUF).....	56
รูปที่ 4.6 TGA ของการสลายตัวทางความร้อนของแป้งเท้ายายม่อม (ARS) และพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP).....	57
รูปที่ 4.7 TGA ของการสลายตัวทางความร้อนของยูเรีย พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า (F_SRAUF).....	58
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายปุ๋ยยูเรีย ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 190-440 นาโนเมตร.....	59
รูปที่ 4.9 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียกับค่าการดูดกลืนแสง ที่ $\lambda_{max}$ 200.5 นาเมตร.....	60
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (แบบก้อน) ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน.....	61
รูปที่ 4.11 แสดงค่า Diffusion coefficient (A) และ Log diffusion coefficient (B) ของยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบก้อนกลม ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน.....	61
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม แบบแผ่น ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน.....	62

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 การปลดปล่อยปุ๋ยแบบ Erosion.....	63
รูปที่ 4.14 แสดงค่า Diffusion coefficient (A) และ Log diffusion coefficient (B) ของยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน.....	63
รูปที่ 4.15 แสดงการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแบ่งท้ายยม่อม (F_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์.....	64
รูปที่ 4.16 แสดงการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแบ่งท้ายยม่อม (F_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์.....	65
รูปที่ 4.17 แสดงค่า Diffusion coefficient (A) และ Log diffusion coefficient (B) ของยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ณ อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์.....	65
รูปที่ 4.18 แสดงแผนผังของระบบการนำส่งยาหรือปุ๋ยที่ควบคุมการบวมซึ่งมีปุ๋ยที่ละลาย และกระจายตัว (รูปดาวและวงกลมสีดำ ตามลำดับ) ซึ่งแสดงขอบเขตการเคลื่อนตัวต่อไปนี้: (i) "Erosion front" การแบ่งแยกของเหลวจำนวนมากออกจากระบบการนำส่ง; (ii) " Diffusion front" การแบ่งแยกเมทริกซ์บวมที่มียาละลายเท่านั้น และเมทริกซ์บวมที่ประกอบด้วยยาที่ละลายและกระจายตัวอยู่; (iii) " Swelling front" การแบ่งแยกของเมทริกซ์บวมและไม่บวม.....	66

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ARS	แป้งเท้ายายม่อม
ARBP	พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม
SRF	ปุ๋ยสลายตัวช้า
SRAUF	ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า
S_SRAUF	ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบก้อนกลม
F_SRAUF	ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่น



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเกษตรอัจฉริยะถูกให้ความสนใจเป็นอย่างมาก เพื่อเพิ่มคุณภาพและลดระยะเวลาการผลิตของผลิตภัณฑ์เกษตรกรรม ซึ่งเกษตรอัจฉริยะ (Smart agriculture) เป็นการทำการเกษตรร่วมกับการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาประยุกต์ใช้ ทั้งระบบดิน ระบบโรงเรือน ระบบควบคุม ระบบน้ำ และการให้ปุ๋ย โดยให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อม และการใช้ทรัพยากรให้คุ้มค่า [1] เกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การทำเกษตรแบบดั้งเดิมนั้นมีการสูญเสียของการให้น้ำ หรือปุ๋ยที่เกินความต้องการของพืชเป็นอย่างมาก มีธาตุอาหารเพียง 50 เปอร์เซ็นต์จากปุ๋ยเท่านั้นที่พืชสามารถดูดซึมไปใช้ได้ ส่วนที่เหลือเกิดการสูญเสียจากการระเหยโดยความร้อนหรือแสงแดด ถูกชะล้าง และเกิดการปนเปื้อนทั้งในดินและน้ำ [2,3] จากความกังวลในเรื่องปัญหาสิ่งแวดล้อมเหล่านี้ จึงมีการพัฒนาระบบการให้ปุ๋ยแบบต่างๆ เช่น การสังเคราะห์ปุ๋ยที่มีความสามารถในการละลายน้ำได้ช้าลง การพัฒนาระบบควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย การใช้ปฏิกิริยา Nitrifying Organism ยับยั้งการสูญเสียไนโตรเจน หรือการใช้สารที่ไม่ละลายน้ำเป็นตัวห่อหุ้มเคลือบ เช่น พอลิเมอร์ [4,5,6] การให้ปุ๋ยแบบสลายตัวช้าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับนิยมนามาก เนื่องจากไม่เป็นอันตรายต่อพืช ชะลอการปลดปล่อยปุ๋ย ให้ธาตุอาหารแก่พืชในปริมาณที่สม่ำเสมอ ไม่เกิดการชะล้างธาตุอาหารจากน้ำ [7]

ปุ๋ยสลายตัวช้า (Slow release fertilizer, SRF) คือ ปุ๋ยที่มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยทั่วไป โดยอัตราการปลดปล่อยจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความเป็นกรดต่างของดิน [8] ปุ๋ยสลายตัวช้ามีข้อดี คือ ส่งเสริมและใช้ธาตุอาหารจากปุ๋ยให้เป็นประโยชน์ต่อพืชให้มากที่สุด ปุ๋ยสลายตัวช้าจากวัสดุธรรมชาติไม่เพียงแต่มีราคาถูกเท่านั้น แต่ยังสามารถชะลอการชะสลายอาหารในปุ๋ยได้อีกด้วย [9] ดังนั้นปุ๋ยสลายตัวช้า จึงเป็นระบบปลดปล่อยปุ๋ยที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดระบบหนึ่ง ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมาก ที่มีการใช้วัสดุจากธรรมชาติเป็นวัสดุเนื้อ (Matrix) เช่น อัลจิเนต (Alginate) เซลลูโลส (Cellulose) และแป้ง (Starch) นอกจากวัสดุจากธรรมชาติที่นำมาใช้เป็นวัสดุเนื้อ ยังมีการนำพอลิเมอร์มาประยุกต์ใช้ด้วยเช่นเดียวกัน เช่น Poly(acrylic acid) และ Poly(acrylamide) [10,11] อย่างไรก็ตาม ยังไม่พบงานวิจัยใดๆ ที่ใช้วัสดุธรรมชาติจากเห้ายายม่อม มาใช้เป็นวัสดุเนื้อสำหรับสังเคราะห์ ปุ๋ยสลายตัวช้า

ยูเรีย (Urea) เป็นปุ๋ยสำคัญชนิดหนึ่งที่ถูกดูดไนโตรเจนไปยังพืช ซึ่งไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารที่รากพืชสามารถนำไปใช้ในรูปไนเตรตไอออน ( $\text{NO}_3^-$ -N) และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ -N)

ไนโตรเจนมีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งปุ๋ยยูเรียมีแร่ธาตุไนโตรเจน (N) เป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่สูงมากถึงร้อยละ 46 โดยน้ำหนัก [12] ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีความสนใจในการนำปุ๋ยยูเรีย มาศึกษาเป็นปุ๋ยต้นแบบเพื่อสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้า

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นพลาสติกที่ได้รับความสนใจมากในปัจจุบันในการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบัน พลาสติกย่อยสลายได้จากชีวภาพที่ได้มีการศึกษาสามารถสังเคราะห์ได้จาก เซลลูโลส, คอลลาเจน และ แป้ง เป็นต้น [13] นอกจากนี้ แป้งเท้ายายม่อม (*Tacca leontopetaloides* Ktze) ยังมีการรายงานว่าสามารถนำมาใช้สังเคราะห์เป็นพลาสติกย่อยสลายได้จากชีวภาพ ซึ่งเท้ายายม่อมเป็นพืชที่ปลูกในพื้นที่บริเวณชายทะเลฝั่งตะวันออก (ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ตราด) และภาคใต้ [14,15] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะนำแป้งเท้ายายม่อม ที่มีคุณสมบัติในการสังเคราะห์และขึ้นรูปเป็นพลาสติกชีวภาพ มาพัฒนาประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเนื้อของปุ๋ยสลายตัวช้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมาจากวัตถุดิบจากธรรมชาติ

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นที่จะพัฒนาปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์ได้จากธรรมชาติคือแป้งเท้ายายม่อม และใช้ปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยต้นแบบเพื่อสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้า และศึกษาสมบัติการบวมตัว การสลายตัว พฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ย รวมถึงจลนศาสตร์การแพร่ออกจากเมทริกซ์ของปุ๋ยสลายตัวช้าที่ปริมาณปุ๋ยต่างๆ ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพื่อพัฒนาต้นแบบปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาพลาสติกย่อยสลายที่สังเคราะห์จากแป้งเท้ายายม่อม และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเป็นกรดต่าง และปริมาณยูเรียในปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม ต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยของปุ๋ย

1.2.4 เพื่อศึกษาจลนศาสตร์การแพร่ของปุ๋ยยูเรีย จากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

## 1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ผลของปริมาณกลีเซอรอล 2.5 และ 5 %w/w ต่อสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม



1.3.2 ผลของการปริมาณยูเรียที่ใช้ในการสังเคราะห์ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพ  
แบ่งทำยาย่อม

1.3.3 ผลของอุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส ต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรีย จากปุ๋ย  
ยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแบ่งทำยาย่อม

1.3.4 ผลของความเป็นกรดต่าง ต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรีย จากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า  
จากพลาสติกชีวภาพแบ่งทำยาย่อม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแบ่งทำยาย่อม

1.4.2 ได้ข้อมูลพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรีย จากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพ  
แบ่งทำยาย่อมที่สภาวะต่างๆ



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ดิน (Soil)

ดินเป็นวัสดุที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติจากการผุพังสลายตัวของหินและแร่ ตลอดจนอินทรีย์สาร ดินมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชและการเกษตรกรรม นอกจากนี้ดินยังเป็นที่กักเก็บน้ำหรือความชื้นที่พืชจะนำไปใช้หล่อเลี้ยงลำต้นและเป็นแหล่งให้อากาศแก่พืชในการหายใจอีกด้วย ดินที่มีอากาศถ่ายเทดี รากพืชจะเจริญเติบโตแข็งแรง ดูดน้ำ และธาตุอาหารได้มาก ทำให้ต้นพืชเจริญเติบโตแข็งแรงและให้ผลผลิตสูง [16]

##### 2.1.1 สมบัติของดิน

2.1.1.1 เนื้อดิน บ่งบอกถึงความหยาบและความละเอียดของอนุภาคดิน โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ คือ

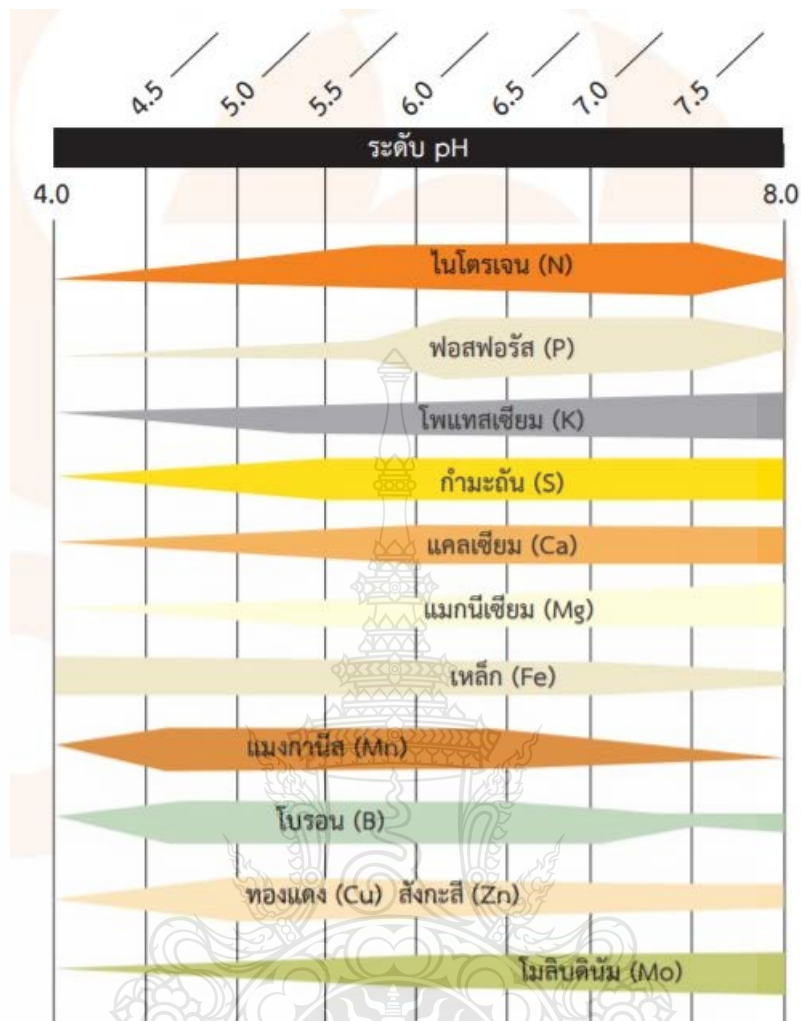
1) ดินทราย ประกอบด้วยอนุภาคทรายตั้งแต่ร้อยละ 85 ขึ้นไป เป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ ต่ำ น้ำ ซึมผ่าน ได้ง่ายมาก

2) ดินร่วน เป็นดินที่ประกอบด้วยอนุภาคของทรายและดินเหนียว ในปริมาณใกล้เคียงกัน เป็นดินที่มีความเหมาะสมต่อการปลูกพืช ไถพรวนได้ง่าย มีการระบายน้ำและถ่ายเทอากาศดีมักเป็นดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง

3) ดินเหนียว เป็นดินที่มีอนุภาคของดินเหนียวร้อยละ 40 ขึ้นไป เนื้อละเอียดแน่น อุ้มน้ำ ได้ดีและไม่ยอมให้น้ำซึมผ่านได้ง่าย ไม่เหมาะสมในการเพาะปลูกพืช

2.1.1.2 สีดิน ขึ้นอยู่กับชนิดของแร่ที่เป็นองค์ประกอบในดิน สภาพแวดล้อม และระยะเวลาการพัฒนา ใช้ประโยชน์ในการจำแนกชนิดดิน

2.1.1.3 ความเป็นกรดเป็นด่างของดิน (pH) เป็นตัวเลขตั้งแต่ 0-14 ถ้าดินมีค่า pH น้อยกว่า 7 แสดงว่าดินนั้นเป็นดินกรด ยิ่งมีค่าน้อยกว่า 7 มาก ก็จะเป็นกรดมาก แต่ถ้าดินมีค่า pH มากกว่า 7 จะเป็นดินด่าง ยิ่งมีค่ามากกว่า 7 มาก ก็จะเป็นด่างมาก สำหรับดินที่มีค่า pH เท่ากับ 7 พอดี แสดงว่าดินเป็นกลาง ค่า pH ของดินที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชจะมีค่าอยู่ในช่วง 5.6 ถึง 7.3 ซึ่งค่า pH ของดินมีความสำคัญต่อการปลูกพืชมาก เนื่องจากเป็นตัวควบคุมการละลายธาตุอาหารในดินออกมาอยู่ในสารละลายหรือน้ำ ในดิน ถ้าดินมีค่า pH ไม่เหมาะสม ธาตุอาหารในดินอาจจะละลายออกมาได้น้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช [17]



รูปที่ 2.1 ระดับ pH ของดินกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารพืช [17]

## 2.2 ธาตุอาหารของพืช (Mineral plant nutrition)

ธาตุอาหารของพืชคือ อนินทรีย์สารซึ่งประกอบด้วยธาตุต่างๆ ซึ่งได้จากอากาศ น้ำ และดิน โดยพืชที่มีใบสีเขียวได้รับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) จากอากาศ ได้น้ำ ( $\text{H}_2$ ) และแร่ธาตุต่างๆ ซึ่งเป็นอนินทรีย์สารจากดิน เมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงจะเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานทางเคมีกลายเป็นสารจำพวกคาร์โบไฮเดรต นอกจากนี้ยังสังเคราะห์อนินทรีย์สารที่จำเป็นอื่นๆ เช่น โปรตีน ลิพิด กรดนิวคลีอิก วิตามิน เป็นต้น โดยพืชจะนำสารที่สังเคราะห์ได้เหล่านี้ไปใช้ในกิจกรรมการเจริญเติบโต และสร้างผลผลิตที่เป็นปัจจัยพื้นฐานในการดำรงชีพของมนุษย์และสัตว์ จึงเรียนที่เป็นอาหารของพืชสีเขียวให้แตกต่างจากสิ่งมีชีวิตอื่นๆว่า “ธาตุอาหารพืช” (Mineral plant nutrition) มีความสำคัญอย่างยิ่งในการผลิตพืชเพื่อเป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ [18]

2.2.1 การเคลื่อนที่ของธาตุอาหารในดิน ปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดไปใช้จะมากหรือน้อยเพียงใดขึ้นกับปัจจัย 2 ประการคือ การเคลื่อนย้ายของไอออนมาสู่ผิวรากและอัตราการดูดไอออนนั้นของรากพืช ธาตุอาหารเข้าสู่รากพืชได้ 3 วิธี

2.2.1.1 การไหลแบบกลุ่มก้อนตามกระแส น้ำ (Mass flow) ปกติรากพืชดูดน้ำจากดินมาใช้อยู่เสมอ โดยน้ำในดินถูกดูดเข้าสู่รากพืช เคลื่อนย้ายไปภายในรากและลำต้น น้ำส่วนหนึ่งถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโต แต่ส่วนมากจะเป็นไอน้ำออกทางปากใบ เรียกว่า การคายน้ำ จากปรากฏการณ์ที่พืชดูดน้ำทางรากและคายน้ำทางใบอย่างต่อเนื่อง สารละลายของดินปริมาณมากจึงเคลื่อนย้ายจากดินมาสู่ผิวราก คุณค่าของสารอาหารต่างๆในสารละลายของดินมาพร้อมกับกระแสน้ำด้วย ต่อจากนั้นรากพืชก็สามารถดูดธาตุอาหารผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ทั้งนี้ปริมาณของธาตุอาหารที่มาสู่ผิวรากโดยการไหลพร้อมกระแสน้ำนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้น้ำของพืชและความเข้มข้นของไอออนในสารละลายของดินนั้น

2.2.1.2 การแพร่ในสารละลายดิน (Diffusion) พืชได้ดูดธาตุอาหารชนิดใดชนิดหนึ่งจากสารละลายดินเข้าไปในรากแล้ว ความเข้มข้นของไอออนชนิดใดในสารละลายดินบริเวณใกล้รากคือลดลงต่ำกว่าบริเวณใกล้เคียงไอออนประเภทเดียวกันจากบริเวณอื่น มีความเข้มข้นสูงกว่าก็สามารถแพร่มาสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าเพื่อรักษาสมดุลไว้

2.2.1.3 รากไซซอนไปสัมผัสคอลลอยด์ดินและไอออนที่อยู่ห่างจากบริเวณเดิม (Root interception) รากพืชซึ่งรวมถึงรากขนอ่อนมีการเจริญเติบโตในการขยายขนาดและเพิ่มความยาวจึงใช้ช้อนออกไปสัมผัสหญิงที่กว้างขวางและทั่วถึงยิ่งขึ้น การแพร่ขยายของรากไปสัมผัสคอลลอยด์ดินและไอออนต่างๆจะเกิดผล 2 ประการคือ

1) เมื่อรากสัมผัสแนบชิดกับผิวคอลลอยด์ จะมีการแลกเปลี่ยนระหว่างไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ที่ผิวรากับมาจกเมตาบอลิซึมของรากเอง กับแคตไอออน ที่ดูดซับอยู่ที่ผิวคอลลอยด์นั้น เช่น โพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) หรือแคลเซียมไอออน ( $Ca^{2+}$ ) เป็นต้น เป็นเหตุให้แคตไอออนดังกล่าวย้ายไปดูดซับที่ผนังเซลล์ของราก แล้ว  $H^+$  ผิวหน้าก็เปลี่ยนมาถูกดูดซับที่ผิวคอลลอยด์แทน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การแลกเปลี่ยนไอออนเมื่อสัมผัส (Contact exchange) ซึ่งทำให้แคตไอออนที่แลกเปลี่ยนได้มาดูดซับอยู่ที่ผนังเซลล์ราก และถูกดูดเข้าไปในเซลล์พืชด้วยเป็นอีกกลไกหนึ่งต่างหาก แต่กลไกนี้มีส่วนสนับสนุนให้รากพืชได้รับธาตุอาหารไม่มากนัก

2) รากพืชมีโอกาสสัมผัสไอออนต่างๆในสารละลายดินจำนวนมากและทั่วถึงมากขึ้นกว่าเดิมเมื่อรากไซซอนขยายอาณาบริเวณออกไป ซึ่งจะช่วยลดระยะทางและเวลาที่ไอออนในส่วนอื่นๆจะต้องเคลื่อนย้ายมาสู่ผิวรากได้เป็นอย่างมาก ผิวรากที่แผ่ขยายออกไปจึงสัมผัสกับไอออนได้โดยตรง ทั่วถึงและรวดเร็วกว่า

## 2.2.2 การสูญเสียธาตุอาหารไปจากดิน

ดินแม้จะมีความอุดมสมบูรณ์ มีธาตุอาหารพืชที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ แต่ธาตุอาหารในดินอาจสูญเสียได้หลายทางดังนี้

2.2.2.1 สูญเสียโดยติดไปกับผลผลิตและส่วนต่างๆของพืช ที่เก็บเกี่ยวออกไปจากเรือกสวนไร่นา

2.2.2.2 สูญเสียไปกับน้ำที่ไหลบ่าไปตามผิวดิน (Run off) หรือน้ำที่ไหลซึมลงสู่เบื้องล่าง (Percolation)

2.2.2.3 สูญเสียไปเนื่องจากการกัดกร่อนของดิน (Soil erosion) เมื่อเกิดการชะล้างพังทลายของหน้าดินไม่ว่าจะโดยการกระทำของน้ำ ลม หรือฝน ซึ่งปกติหน้าดินหรือดินชั้นบน จะเป็นชั้นที่มีความอุดมสมบูรณ์มีปริมาณธาตุอาหารสะสมอยู่มากกว่าชั้นอื่นๆ การสูญเสียหน้าดินไป ความอุดมสมบูรณ์ของดินก็จะลดลงไปด้วย

2.2.2.4 การสูญเสียโดยการเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซสูญหายไปจากดิน อาจเกิดกับธาตุอาหารพืชจำพวกไนโตรเจน โดยเฉพาะในรูปของไนเตรทไอออน ( $\text{NO}_3^-$ ) จะเกิดขึ้นในสภาพที่ดินมีการถ่ายเทอากาศไม่ดี เช่น ในสภาพน้ำขัง เป็นต้น ดังนั้นในนาข้าวต้องเลือกใช้ปุ๋ยไนโตรเจนในรูปปุ๋ยแอมโมเนียม ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือ ปุ๋ยยูเรีย [19]

## 2.3 ปุ๋ย (Fertilizer)

ปุ๋ย เป็นวัสดุที่ให้ธาตุอาหารกับพืช ช่วยปรับปรุงดินให้เหมาะสมกับการเพาะปลูก พืชต้องการธาตุอาหาร 16 ชนิด ได้แก่ ออกซิเจน (O) ไฮโดรเจน (H) คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) โพแทสเซียม (K) กำมะถัน (S) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โบรอน (B) โมลิบดินัม (Mo) และคลอรีน (Cl) ในจำนวนนี้ออกซิเจน ไฮโดรเจน และคาร์บอน พืชได้รับจากน้ำและอากาศ ส่วนไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม จัดเป็นธาตุอาหารหลักที่พืชต้องการในปริมาณมากเมื่อเทียบกับธาตุอาหารชนิดอื่น

ปุ๋ยแบ่งออกเป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ดังนี้

2.3.1 ปุ๋ยอินทรีย์ คือ ปุ๋ยที่ได้มาจากสารประกอบทางธรรมชาติ ธาตุอาหารที่ได้ส่วนใหญ่ต้องเกิดจากการย่อยสลายจากจุลินทรีย์ก่อน เป็นกระบวนการผลิตสารอาหารจากธรรมชาติ ปุ๋ยอินทรีย์ส่วนใหญ่ มักจะใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพดิน

2.3.2 ปุ๋ยชีวภาพ คือ ปุ๋ยที่มีการนำจุลินทรีย์ที่มีชีวิตมาใช้เพื่อเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร หรือเพิ่มความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารในดิน ปุ๋ยชีวภาพอาจมีบทบาทในการปรับปรุงบำรุงดินทางชีวภาพ ทางกายภาพ และทางชีวเคมี และปุ๋ยชีวภาพยังรวมถึงหัวเชื้อจุลินทรีย์อีกด้วย

2.3.3 ปุ๋ยอินทรีย์ชีวภาพ คือ การผสมปุ๋ย 2 ชนิดเข้าด้วยกัน โดยนำปุ๋ยอินทรีย์ที่ผ่านการฆ่าเชื้อที่ใช้จุลินทรีย์สูง ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ที่มีสมบัติเป็นปุ๋ยชีวภาพที่ หมักต่อจนถึงระยะเวลาที่พอเหมาะ จึงสามารถนำไปใช้งานได้ เป็นปุ๋ยที่เหมาะสมแก่การทำเกษตรอินทรีย์

2.3.4 ปุ๋ยเคมี คือ ปุ๋ยที่เป็นอนินทรีย์สาร อาจเป็นปุ๋ยเชิงเดี่ยว ปุ๋ยเชิงผสม หรือปุ๋ยเชิงประกอบ ตัวอย่างปุ๋ยเคมีเช่น ยูเรีย, ปุ๋ยเม็ด 16-20-0 แต่ไม่รวมถึงสารที่ใช้สำหรับปรับปรุงดิน เช่น ซีโอไลต์, ภูไมท์ และ สารต่างๆ ที่มีคุณสมบัติสามารถปรับปรุงโครงสร้างทางฟิสิกส์ของดินให้ดีขึ้น ปุ๋ยเคมีแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1.4.1 ปุ๋ยเดี่ยวหรือแม่ปุ๋ย คือ ปุ๋ยที่มีธาตุอาหารหลักพืช คือไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมเป็นส่วนประกอบ ในปริมาณธาตุอาหารคงที่

2.1.4.2 ปุ๋ยผสม คือปุ๋ยที่ได้จากการเอาแม่ปุ๋ยหลายๆ ชนิดมารวมกันเพื่อให้ได้ปริมาณธาตุอาหารหลักของปุ๋ยตามความต้องการ เพื่อให้เหมาะสมตามสภาพดินในแต่ละพื้นที่ [20]

## 2.4 ปุ๋ยยูเรีย [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ]

ปุ๋ยยูเรีย คือสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีไนโตรเจน (N) เป็นส่วนประกอบในอัตราส่วนที่สูงมากถึงร้อยละ 46 โดยน้ำหนัก ปุ๋ยยูเรียเป็นปุ๋ยเคมีมาตรฐาน ซึ่งสูตรปุ๋ยยูเรีย คือ 46-0-0 เนื่องจากมีสัดส่วนไนโตรเจนสูงที่สุด จึงใช้เป็นแม่ปุ๋ยที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลัก ปุ๋ยยูเรีย 46-0-0 ใช้ประโยชน์เพื่อเป็นธาตุอาหารหลักของพืช โดยเฉพาะในช่วงแรกของการเพาะปลูก ที่ต้องเร่งการเจริญเติบโตของพืชอย่างรวดเร็ว ทำให้พืชมีลำต้นยาว มีใบดก ใบใหญ่ และใบสีเขียวเข้ม

### สมบัติของปุ๋ยยูเรีย

มีผลสีขาว มีกลิ่นเฉพาะตัว ดูดความชื้นได้ดี มีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีมาก ซึ่งค่าการละลายของยูเรียมีค่าประมาณ 1.5 กิโลกรัมต่อน้ำ 1 กิโลกรัม ณ อุณหภูมิห้อง มีจุดหลอมเหลวประมาณ 133 องศาเซลเซียส (สูงกว่าน้ำเดือด) ซึ่งสามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิห้องและไม่ติดไฟ

### 2.4.1 ชนิดของปุ๋ยยูเรีย

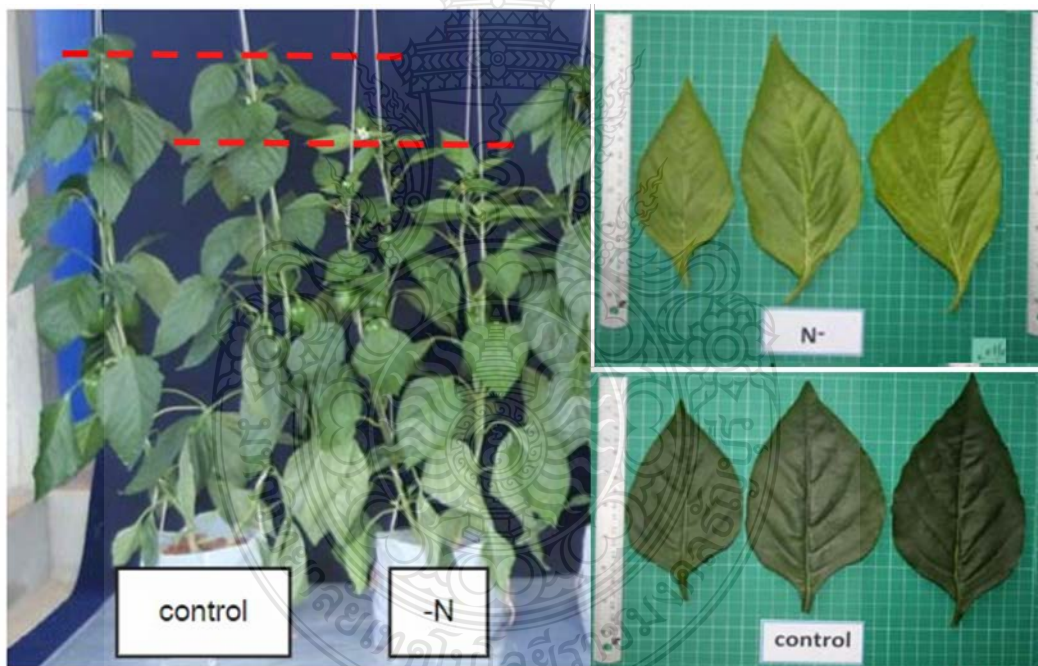
2.4.1.1 ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัม (Granular urea) เป็นปุ๋ยที่มีขนาดใหญ่ 2-4 มิลลิเมตร มีสีขาวเหมือนเม็ดโพลัม นิยมใช้ทางการเกษตร เหมาะกับการหว่าน แล้วใช้กับเครื่องพ่นปุ๋ยทั่วไปได้ ปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัม ใช้เป็นแม่ปุ๋ยที่มีไนโตรเจนเป็นธาตุอาหารหลักสำหรับโรงงานผลิตปุ๋ยผสม โดยนำไปผสมกับแม่ปุ๋ยชนิดอื่น

2.4.1.2 ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็กหรือเม็ดสาคุ (Prilled urea) เป็นปุ๋ยที่มีขนาดเล็ก 1-3 มิลลิเมตร มีสีขาวใสเหมือนเม็ดสาคุ เฉพาะในไทยนิยมใช้ทางการเกษตรน้อยกว่ายูเรียเม็ดโพลัม จะใช้ได้ดี

กับต้นไม้เหมือนปุ๋ยยูเรียเม็ดโพลัม เพียงแต่ไม่เป็นที่คุ้นเคยของเกษตรกร ปุ๋ยยูเรียเม็ดเล็กไม่สามารถนำมาผสมปุ๋ยได้เนื่องจากมีขนาดเล็ก

#### 2.4.2 การให้ธาตุอาหารไนโตรเจนของปุ๋ยยูเรีย

แก๊สไนโตรเจน ( $N_2$ ) เป็นแก๊สที่มีปริมาณมากที่สุดในอากาศ โดยมีมากถึง 78% (มากกว่าแก๊สออกซิเจนที่เราใช้หายใจ) แต่นอกจากไนโตรเจนเป็นแก๊สเฉื่อย มีโครงสร้างโมเลกุลยึดเกาะกันอย่างแข็งแรง ไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง อีกทั้งแก๊สไนโตรเจนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ง่าย ทำให้ในธรรมชาติและในดินมีไนโตรเจนที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมาก ดินทั่วไปโดยเฉพาะดินสำหรับการเพาะปลูกพืชดูดซึมไนโตรเจนไปใช้จนหมด เมื่อทำการเพาะปลูกครั้งถัดไปจึงทำให้ขาดแคลนไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืชดังแสดงในรูปที่ 2.2 คือตัวอย่างของพืชที่คลาดแคลนไนโตรเจน ดังนั้นมีความจำเป็นต้องเติมไนโตรเจนกลับลงสู่ดินในรูปของปุ๋ย เพื่อให้พืชดูดซึมไปใช้ได้ และปุ๋ยที่ให้ธาตุอาหารไนโตรเจนสูงที่สุดคือปุ๋ยยูเรีย [21,22]



รูปที่ 2.2 ลักษณะการขาดธาตุไนโตรเจนของพืชและพืชที่ได้ธาตุอาหารเพียงพอ [22]

แต่การใช้ปุ๋ยที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบนั้นเป็นแหล่งที่มาหลักของการปล่อยแก๊สไดไนโตรเจนมอนอกไซด์ ( $N_2O$ ) ซึ่งอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจกหรือความร้อนของโลกได้

เนื่องจากแก๊ส  $N_2O$  สามารถป้องกันรังสีอินฟราเรดที่ฉายซ้ำจากพื้นผิวโลก เป็นผลให้ชั้นบรรยากาศของโลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น และก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมในระยะยาว [23]

## 2.5 ปุ๋ยสลายตัวช้า (Slow release fertilizer, SRF)

ปุ๋ยสลายตัวช้า มีการปลดปล่อยธาตุอาหารออกมาช้ากว่าปุ๋ยทั่วไป แต่ไม่สามารถควบคุมอัตราและช่วงเวลาในการปลดปล่อยธาตุอาหารได้มากนัก เนื่องจากอัตราการปลดปล่อยขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอก เช่น ความชื้นของดิน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ดิน เป็นต้น ปุ๋ยสลายตัวช้าสามารถแบ่งวิธีการสังเคราะห์เป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีเมทริกซ์ (Matrix) และวิธีเคลือบ (Coated)

2.5.1 ปุ๋ยสลายตัวช้าวิธีเมทริกซ์ (Matrix) ซึ่งมีเทคนิคในการสังเคราะห์ 2 เทคนิค คือ เทคนิค two-step และ In situ

2.5.1.1 เทคนิค two-step ในเทคนิคนี้ จะต้องทำการขึ้นรูปไฮโดรเจลก่อน จากนั้นทำให้แห้ง แล้วนำไปแช่ในปุ๋ยชนิดน้ำ เมื่อไฮโดรเจลที่บวมตัวจากการแช่ในปุ๋ยชนิดน้ำแล้วจะถูกทำให้แห้งอีกครั้ง เทคนิคนี้ช่วยให้ควบคุมการสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้าได้ดีขึ้น แต่ข้อเสียคือต้องใช้สองขั้นตอนการทำให้แห้ง

2.5.1.2 เทคนิค In situ วัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการสังเคราะห์เมทริกซ์รวมทั้งปุ๋ยจะถูกเติมลงในส่วนผสมระหว่างการทำปฏิกิริยาโพลีเมอไรเซชัน โดยที่ปุ๋ยถูกกักอยู่ภายในเมทริกซ์ไฮโดรเจล ข้อเสียของเทคนิค In situ มีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน แต่มีขั้นตอนการทำให้แห้งเพียงขั้นตอนเดียว

ทั้งสองวิธีมีข้อดีและข้อเสียที่ต่างกัน เทคนิค two-step ช่วยในการควบคุมการก่อตัวของ Slow release fertilizer hydrogels (SRFH) ได้ดีกว่าเทคนิค In situ ซึ่งสามารถกำจัดปฏิกิริยาข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นจากการผสมวัสดุทั้งหมดเข้าด้วยกันในการสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้า

2.5.2 ปุ๋ยสลายตัวช้าวิธีเคลือบ (Coated) เตรียมโดยการเคลือบปุ๋ยแข็งด้วยวัสดุที่สามารถลดอัตราการละลายได้ การปลดปล่อยสารอาหารถูกควบคุมโดยการแพร่กระจายผ่านพื้นผิวสารเคลือบ ซึ่งทำหน้าที่เป็นเมมเบรน (Membrane) อัตราการละลายขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเคลือบ เช่น ความไม่ชอบน้ำ/ชอบน้ำ และความพรุน เป็นต้น [11,24]

## 2.6 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตร (Bio-based) หรือจากน้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum-based) โดยพลาสติกชีวภาพเหล่านี้มีลักษณะคล้ายพลาสติกทั่วไป สามารถนำมาหลอมและผลิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปตามปกติด้วยเครื่องจักรทั่วไปที่อาจมีการปรับแต่งบ้างเล็กน้อยเพื่อให้เหมาะสม สำหรับพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรนั้นผลิต



จากกระบวนการหมักเพื่อเปลี่ยนวัตถุดิบทางการเกษตรให้เป็นโมโนเมอร์ (Monomer) แล้วจึงนำไปผลิตเป็นเม็ดพลาสติกต่อไป ปัจจุบันวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกชีวภาพได้แก่ ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง

#### 2.6.1 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ

2.6.1.1 พลาสติกที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพ (Biobased) แต่ไม่สามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Non-compostable) เช่น Polyethylene Terephthalate (PET), Polyamide (PA) บางชนิด, Polyurethane (PUR) และ Polyethylene (PE)

2.6.1.2 พลาสติกที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพ (Biobased) และสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Compostable) เช่น Bio-based polybutylene succinate (BioPBS)

2.6.1.3 พลาสติกจากปิโตรเลียม (Petrobased) แต่สลายตัวได้ทางชีวภาพ (Compostable) เช่น Polybutylate adipate terephthalate (PBAT), Polybutylene succinate (PBS) และ Polycaprolactone (PCL)

#### 2.6.2 ประเภทวัตถุดิบที่ใช้ผลิตพลาสติกชีวภาพ

2.6.2.1 วัตถุดิบจากปิโตรเลียม (Petroleum-based) เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน เป็นต้น

#### 2.6.2.2 วัตถุดิบจากพืชทางการเกษตร (Bio-based)

1) พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) มีโมเลกุลขนาดเล็กจึงเปลี่ยนจากมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ได้ง่าย ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล มี

2) ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulosic) มีเส้นใยมาก ขนาดโมเลกุลใหญ่ทำให้เปลี่ยนมอนอเมอร์เป็นพอลิเมอร์ยาก มีคุณสมบัติเหนียวและทนต่อการขาด เช่น กากมันสำปะหลัง ขานอ้อย ใยสัปปะรด ฟางข้าว และ เปลือกข้าว เป็นต้น

3) ไขมันและโปรตีนจากเมล็ดพืช การย่อยสลายทางชีวภาพยากกว่าพอลิแซ็กคาไรด์และลิกโนเซลลูโลส เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น้ำซึมผ่านยาก [25-28]

### 2.7 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพืชและปิโตรเลียม ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (Biodegradable) จากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีที่สภาวะแวดล้อมที่กำหนดไว้เฉพาะ เมื่อย่อยสลาย จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $C_{20}$ ) และน้ำ ( $H_2O$ ) ในปริมาณที่สมดุลต่อบรรยากาศ

ประเภทของการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ

2.7.1 การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation) โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น เช่น การบีบอัด การบดทับ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

2.7.2 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation) เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ (RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว

2.7.3 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation) มักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความอ่อนไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรงแตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่

2.7.4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์พอลิแอนไฮดราต พอลิคาร์บอนเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาทำให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช่คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (Enzyme) เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์(alkaline metal) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล(Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

2.7.5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ Endo-enzyme (เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ Exo-enzyme (เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะทีละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์) เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย (Ultimate biodegradation) คือ พลังงาน และสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์แก๊สมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่างๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม วัสดุที่มีความสำคัญในการพัฒนาสู่อุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ได้แก่ มันสำปะหลัง อ้อย มันฝรั่ง ข้าวโพด และเท้ายายม่อม เป็นต้น [29-31]

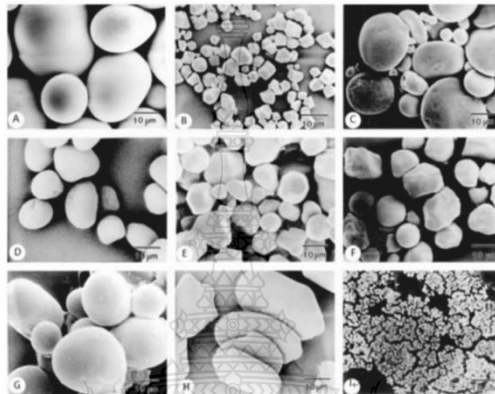
## 2.8 แป้ง (Starch)

แป้ง จัดเป็นคาร์โบไฮเดรตจำพวกพอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) ที่มีปริมาณมากที่สุดเป็นอันดับสอง รองจากเซลลูโลส (Cellulose) ที่มีปริมาณมากที่สุด แป้งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญทั้งมนุษย์และสัตว์ นอกจากจะใช้เพื่อเป็นอาหารโดยตรงแล้ว แป้งยังมีสมบัติเด่นอีกหลายประการที่สามารถนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด ทั้งที่เป็นอาหารและไม่ใช่อาหาร เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต หรือเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้ดีขึ้น ด้วยเหตุนี้ อุตสาหกรรมแป้งจึงจัดเป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างยิ่งของประเทศไทย ที่มีวัตถุดิบทางเกษตรที่มีปริมาณแป้งสูง เช่น อุตสาหกรรมความหวาน อุตสาหกรรมพลาสติกจากแป้ง [32]

แป้งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพประเภทพอลิแซคคาไรด์ซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติและเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตพลาสติกชีวภาพหลายชนิด เช่น เทอร์โมพลาสติกสตาρχ (Starch) และพอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid) นอกจากนี้แป้งยังถูกใช้เป็นสารเติมแต่งสำหรับพลาสติก เพื่อเพิ่มเนื้อพลาสติกหรือลดต้นทุนการผลิตพลาสติก และปรับปรุงสมบัติการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพบางชนิดด้วย [33]

แป้งเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมากในธรรมชาติ พบได้ในธัญพืช (เช่น ข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว) พืชหัว (เช่น มันฝรั่ง) และพืชตระกูลถั่ว (เช่น ถั่วเขียว ถั่วแดง ถั่วลันเตา) โดยทั่วไปแป้งที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปแกรนูล (Granular form) แกรนูลแป้งเป็นแหล่งสะสมพลังงานสำหรับพืชสีเขียว โครงสร้างแกรนูล

ได้ถูกศึกษาด้วยเทคนิคและเครื่องมือที่หลากหลาย เช่น เอ็กซเรย์ (X-ray) กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscopy: AFM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (Transmission electron microscopy: TEM) เป็นต้น แกรนูลสตาร์ชมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสปีชีส์ของพืชดังรูปที่ 2.3 ขนาดของแกรนูลสตาร์ชส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 1-100 ไมโครเมตร [34]



**รูปที่ 2.3** ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,500 เท่า ของแกรนูลสตาร์ชจากพืชสปีชีส์ต่างๆ (A) มันฝรั่ง (B) ข้าว (C) ข้าวสาลี (D) ถั่วเขียว (E) ข้าวโพด (F) ข้าวโพดข้าวเหนียว (G) มันสำปะหลัง (H) โซติ (I) แป้งในใบพืช [34]

แกรนูลสตาร์ชประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้ ยังพบไขมัน โปรตีน ฟอสฟอรัสและน้ำอีกด้วย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 สตาร์ชแต่ละชนิดประกอบด้วยไขมัน โปรตีน และฟอสฟอรัส ในปริมาณที่แตกต่างกัน และมีความชื้นสมดุล (Equilibrium moisture content) อยู่ในช่วง 10-13 เปอร์เซ็นต์ ยกเว้นกรณีของแป้งมันฝรั่ง ประกอบด้วยไขมัน และโปรตีนในปริมาณต่ำ ในขณะที่ฟอสฟอรัสปริมาณสูงเมื่อเทียบกับสตาร์ชจากพืชชนิดอื่น

ตารางที่ 2.1 ขนาดแกรนูล องค์ประกอบ และความเป็นผลึกของสตาร์ชจากพืชสปีชีส์ต่างๆ [34,35]

แป้ง	เส้นผ่านศูนย์กลาง แกรนูล ( $\mu\text{m}$ )	ปริมาณ ไขมัน* (%)	ปริมาณ โปรตีน* (%)	ปริมาณ ฟอสฟอรัส* (%)	ปริมาณ ความชื้น** (%)	ปริมาณ อะไมโลส* (%)	ปริมาณ อะไมโล เพกติน* (%)	ความ เป็น ผลึก (%)
ข้าวสาลี	25	0.63	0.30	0.06	13	26-27	72-73	36
ข้าวโพด	15	0.63	0.30	0.02	12-13	26-28	71-73	39
ข้าวโพดข้าว เหนียว	15	0.23	0.10	0.01	N.d.	<1	99	39
ข้าวโพด อะไมโลสสูง (Amylose maize)	10	0.11	0.50	0.03	N.d.	50-80	20-50	19
มันฝรั่ง	40-100	0.03	0.05	0.08	18-19	20-25	74-79	25

หมายเหตุ: N.d. คือ ไม่ได้วิเคราะห์

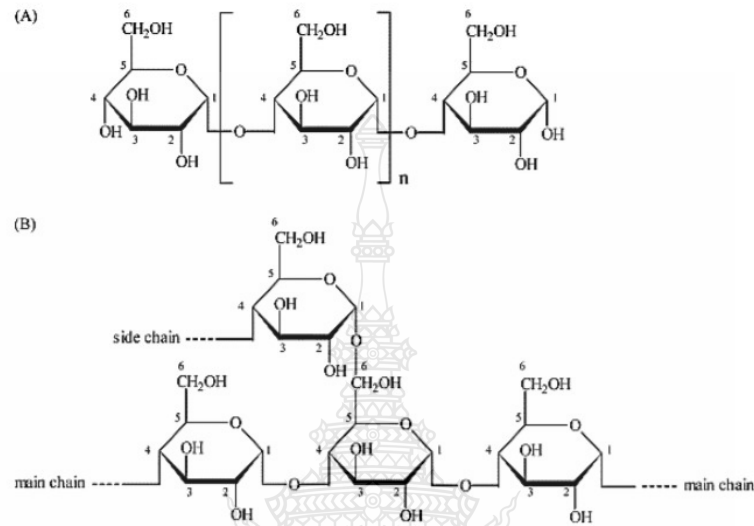
\*คำนวณจากน้ำหนักแห้ง

\*\*คำนวณหลังจากบ่มที่ความชื้นสัมพัทธ์ 65 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

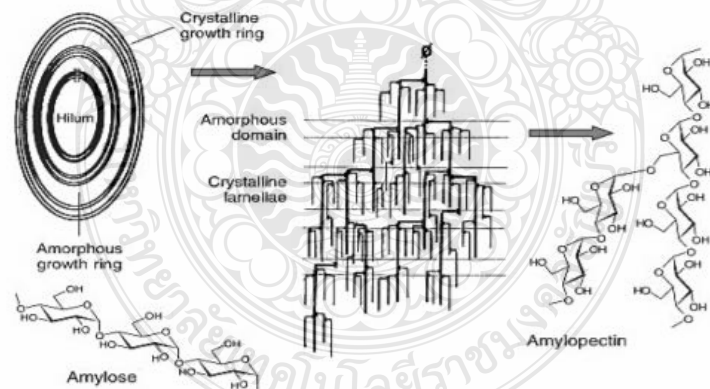
แป้งเป็นโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ (Macromolecule) ประกอบด้วยพอลิเมอร์ซึ่งมีหน่วยซ้ำของแอลฟาดี-กลูโคส ( $\alpha$ -D-glucose units) จำนวน 2 ชนิด คือ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกติน (Amylopectin) อะไมโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นของกลูโคสซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 ( $\alpha$ 1,4-linked D-glucose) มีกิ่งก้านปริมาณน้อย โดยทั่วไปอะไมโลสประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกลูโคสประมาณ 200-20,000 หน่วยและมีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง  $1 \times 10^5 - 2 \times 10^6$  ดาลตัน อะไมโลเพกตินเป็นพอลิเมอร์โซ่กิ่งซึ่งประกอบด้วย โซ่หลักที่มีกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 4 และโซ่กิ่งที่เชื่อมต่อกับโซ่หลัก ด้วยพันธะแอลฟาที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 6 ( $\alpha$ -1,6-linked D-glucose) โดยทั่วไปโซ่กิ่งจะแตกแยกออกมา ทุกๆ หน่วยซ้ำของกลูโคสจำนวน 22-70 หน่วย อะไมโลเพกตินมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง  $4 \times 10^7 - 4 \times 10^8$  ดาลตัน และประกอบด้วยหน่วยซ้ำของกลูโคสมากถึง 200,000 หน่วย

อะไมโลสและอะไมโลเพกติน มีโครงสร้างวงแบบจำเพาะ (Specific ring structure) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 วงอสัณฐาน (Amorphous ring) และวงที่เป็นโครงสร้างผลึกบางส่วน (Partially crystalline ring) เริ่มก่อจากศูนย์กลางของแกรนูลซึ่งเรียกว่าไฮลัม (Hilum) และก่อสลับกันไป โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่เหล่านี้ถูกจัดเรียงในทิศทางรัศมี (Radical direction) อะไมโลสเป็นโมเลกุลที่อยู่ในวง

สัณฐาน (Amorphous ring) ของแกรนูลแป้งในขณะที่ไม่โลแพคตินอยู่ในวงผลึกบางส่วน (Partially crystalline ring) ของแกรนูล ซึ่งประกอบด้วยด้วยอัสัณฐานที่จากโซ่กิ่งของโมเลกุลอะไมโลแพคติน และส่วนผลึกที่เกิดจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของโซ่เกลียวคู่ของอะไมโลแพคติน [33-34]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ (A) อะไมโลส และ อะไมโลแพคติน (B) [36]



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของแกรนูลแป้ง [37]

สัดส่วนของอะไมโลแพคตินต่ออะไมโลสและความเป็นผลึกของสตาร์ชขึ้นอยู่กับสปีชีส์ของพืช ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูป (Processibility) และสมบัติของผลิตภัณฑ์สตาร์ชที่ได้ ตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า สตาร์ชจากพืชส่วนใหญ่มีปริมาณอะไมโลสอยู่ในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ยกเว้น

สตาร์ชข้าวโพดข้าวเหนียวซึ่งมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอะไมโลเพกติน ความเป็นผลึกของสตาร์ชผันแปรในช่วง 15-45 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาและความชุ่มชื้น (Hydration) ของสตาร์ช รวมทั้งเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ สตาร์ชข้าวโพดมีอะไมโลสสูงมีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่ำที่สุด เนื่องจากมีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบปริมาณมาก [38]

แป้งท้าวยายม่อม เป็นพืชวงศ์ (Taccaceae) ที่มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Tacca leontopetaloides* Ktze ชื่ออื่นๆ เช่น บุกรอ, ไม้ท้าวยาย, สิงโตดำ East Indian Arrowroot (มีชื่ออังกฤษของทุกชื่อใหม่ ?) เป็นต้น ท้าวยายม่อมมีถิ่นกำเนิดในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในมาเลเซีย ซึ่งเป็นแหล่งที่มีพืชตระกูล *Tacca* เป็นจำนวนมาก ในประเทศไทยมีการสำรวจพบว่ามีอยู่ค่อนข้างหนาแน่นในป่าบริเวณชายทะเลฝั่งตะวันออก (ชลบุรี ระยอง จันทบุรี ตราด) และภาคใต้ แป้งท้าวยายม่อมมีสมบัติในการทำให้อาหารมีความข้นหนืดสูงแม้ใช้ในปริมาณน้อย ปัจจุบันมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพของแป้งท้าวยายม่อมที่สำคัญ เช่น ลักษณะรูปร่างของเม็ดแป้ง สมบัติการพองตัว การละลาย สมบัติความหนืด การเกิดเจลลาตินในเซชัน รวมถึงการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของแป้งท้าวยายม่อม เช่น ปริมาณอะไมโลส อะไมโลเพกติน เป็นต้น [39]

## 2.9 จลนศาสตร์การแพร่

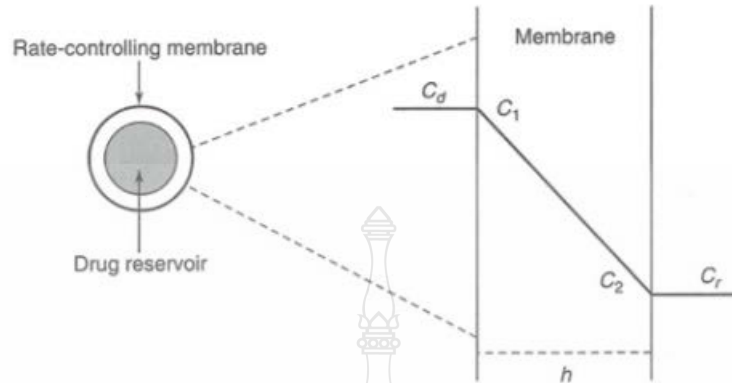
การแพร่ คือ กลไกหรือการขนส่งอะตอมของสารหนึ่งผ่านเข้าไปยังอีกสารหนึ่ง การแพร่ของอะตอมในสถานะแก๊สเป็นการแพร่ที่เร็วที่สุด เมื่อเทียบกับในสถานะของเหลว หรือของแข็ง ในขณะที่การแพร่ของสารในของแข็งด้วยกัน เช่น โลหะ และ โลหะผสมเกิดขึ้นได้ยากกว่า มักจะต้องอาศัยความร้อนหรือการสั่นสะเทือนเพื่อทำให้เกิดการแพร่ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในของแข็งเกิดจากการแพร่ของอะตอม เช่น การเกิด grain หรือการเกิด Nuclei ในการเกิดผลึก เป็นต้น [40]

การปลดปล่อยปุ๋ยโดยการแพร่นั้น เป็นกลไกการปลดปล่อยที่สำคัญในระบบนำส่งปุ๋ยหลายชนิด การปลดปล่อยปุ๋ยด้วยการแพร่จะถูกควบคุมโดยเยื่อแก้วที่ควบคุมอัตราเร็วในการปลดปล่อย (Rate-controlling membrane) การปลดปล่อยปุ๋ยด้วยกลไกนี้แบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ ระบบกักเก็บ (Reservoir system) และ ระบบเมทริกซ์ (Matrix system)

### 2.9.1 ระบบกักเก็บ (Reservoir system)

ระบบนี้ปุ๋ยจะอยู่เป็นแกนกลาง และถูกหุ้มด้วยพอลิเมอร์ ชนิดที่ไม่ละลายน้ำที่ทำหน้าที่ควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ย การปลดปล่อยปุ๋ยจะเป็นแบบ Zero-order ตาม Fick's law ระบบนี้มีข้อดีคืออัตราเร็วในการปลดปล่อยปุ๋ยจะคงที่ และสามารถควบคุมให้มีอัตราเร็วในการปลดปล่อยตามต้องการด้วยการปรับคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่นำมาห่อหุ้ม แต่เนื่องจากระบบนี้จะมีการบรรจุปุ๋ยไว้เป็นจำนวนมาก ถ้าพอลิเมอร์ที่ควบคุมการปลดปล่อยเกิดการฉีกขาด ปุ๋ยเหล่านั้นจะถูกปลดปล่อยออกมาเป็น

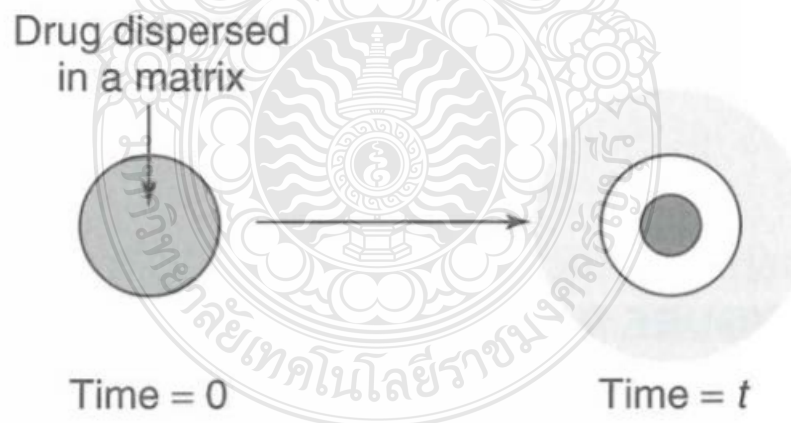
จำนวนมาก ในระยะเวลาอันสั้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Dose dumping ทำให้ปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาจำนวนมาก เกิดการสูญเสียจากการระเหยหรือการชะล้าง ก่อนที่พืชจะดูดซึมน้ำธาตุอาหารนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.6 การปลดปล่อยปุ๋ยด้วยการแพร่จาก Reservoir system[41]

### 2.9.2 ระบบเมทริกซ์ (Matrix system)

ระบบนี้ปุ๋ยจะกระจายตัวอยู่ในโครงสร้าง Matrix ที่อาจจะเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ละลายน้ำหรือสารจำพวกไข (Wax) การแพร่ของปุ๋ยจาก Matrix system จะช้ากว่า Reservoir system เนื่องจากในช่วงแรกของการปลดปล่อยปุ๋ย ปุ๋ยที่อยู่บริเวณผิวจะแพร่ออกมาก่อน หลังจากนั้นปุ๋ยที่อยู่บริเวณแกนกลางถึงจะแพร่ออกมา ทำให้มีระยะทางที่ปุ๋ยจะต้องแพร่ผ่าน Matrix ยาวขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.7 การปลดปล่อยปุ๋ยด้วยการแพร่จาก Matrix system [41]

การปลดปล่อยปุ๋ยจะขึ้นกับแปรผันตามรากที่สองของเวลา ตามสมการของ Higuchi

$$M = [C_s D_m (2C_0 - C_s) t]^{1/2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $C_s$  คือ ค่าการละลายของยาใน Matrix



$C_0$  คือ ความเข้มข้นของยาที่มีใน Matrix

$D_m$  คือ Diffusion coefficient ของยาใน Matrix

ในกรณีที่ Matrix มีลักษณะเป็นรูพรุน จะต้องเพิ่มตัวแปร porosity ( $\sigma$ ) และ tortuosity ( $\epsilon$ )

ในสมการ 2.1

$$M = [C_a D_s (\sigma/\epsilon) (2C_0 - \sigma C_a) t]^{1/2} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $D_s$  = Diffusion coefficient ของยาใน release medium

$C_a$  = ค่าการละลายของยาใน release medium

สมการที่ 20 และ 21 สามารถเขียนให้สั้นลง

$$M = K_H t^{1/2} \quad (2.3)$$

จากสมการที่ 2.3 เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $M$  และ  $t^{1/2}$  จะเป็นเส้นตรง โดยความชันมีค่าเท่ากับ  $K_H$

โมเดลคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้ในการศึกษารูปแบบการปลดปล่อยปุ๋ยจากระบบพอลิเมอร์ตามสมการที่ (2.1) แบบจำลอง Kormeyer และ Peppas เป็นการปลดปล่อยปุ๋ย โดยเศษส่วนปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลา  $t$  ( $Q_t$ ) แปรผันตรงกับเวลา ( $t$ ) ยกกำลัง  $n$  หรือเรียกว่า สมการ Power Law [41-43]

$$Q_t = M_t / M_\infty = K t^n \quad (2.4)$$

เมื่อ  $M_t$  คือ ปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลาใดๆ ( $t$ )

$M_\infty$  คือ ปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลานอนันต์ ( $\infty$ )

$K$  คือ ค่าคงที่

$n$  คือ ค่า Release exponent บอกถึงกลไกการปลดปล่อย

จากสมการที่ (2.1) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปลอการิทึมได้ดังสมการที่ (2.2)

$$\text{Log } Q_t = \text{log } (M_t / M_\infty) = n \text{ log } t + \text{log } K \quad (2.5)$$

เมื่อพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\text{log } (M_t / M_\infty)$  และ  $\text{log } t$  จะได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า  $n$  ได้จากความชันของกราฟ โดยค่า  $n$  ที่ได้จะบอกถึงลักษณะการปลดปล่อยปุ๋ย ดังแสดงตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 เลขยกกำลังของ Power law กับกลไกการปลดปล่อยปุ๋ยจากระบบควบคุมการนำส่งที่มีรูปร่างเรขาคณิตแตกต่างกัน [43]

Thin film	Cylinder	Sphere	Drugs release
Exponent, n			
0.5	0.45	0.43	Fickian diffusion
$0.5 < n < 1.0$	$0.45 < n < 0.89$	$0.43 < n < 0.85$	Non-Fickian
1.0	0.89	0.85	Case-II transport

## 2.10 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

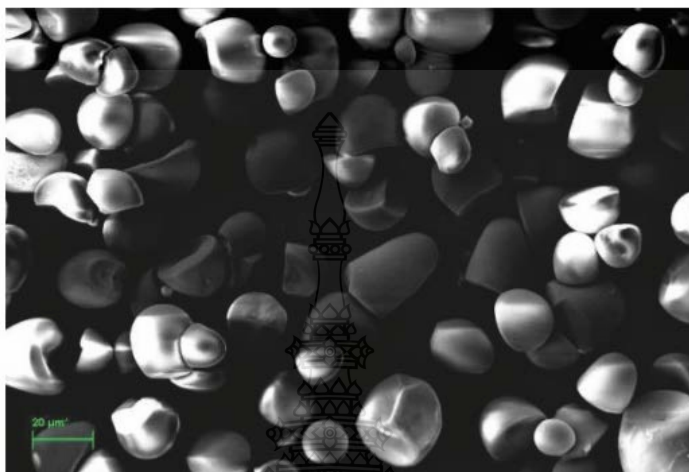
S. Santibenchakul และคณะ [14] ศึกษาสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ ของแป้งเท้ายายม่อมจากท้องถิ่นในจังหวัดชลบุรีทางตะวันออกของประเทศไทย เนื่องจากแป้งเท้ายายม่อมเป็นสารตั้งต้นทางเลือก (Starting precursors) ในการสังเคราะห์พลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastics) ซึ่งใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร และเริ่มมีบทบาทในอุตสาหกรรมอื่นๆ เช่น เครื่องสำอาง พลาสติกชีวภาพ เป็นต้น โดยการกระจายขนาด (Size distribution) ความเป็นผลึก (Crystallinity) และคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal behavior) ของเม็ดแป้งมีบทบาทสำคัญสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ



รูปที่ 2.8 หัวแป้งเท้ายายม่อมดิบ (ซ้าย) และเม็ดแป้งเท้ายายม่อม (ขวา) [14]

การสังเคราะห์แป้งเท้ายายม่อมที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถทำได้โดยการนำหัวแป้งเท้ายายม่อมมาล้าง ปอกเปลือก สับเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปปั่นในเครื่องปั่นโดยผสมกับน้ำกลั่น จากนั้นกรองด้วยผ้าขาวบาง และล้างด้วยน้ำกลั่น 4 ครั้ง ทิ้งไว้จนแป้งเท้ายายม่อมตกตะกอน เทของเหลวออก

แล้วนำส่วนที่เหลือไปตากแดดประมาณ 2-4 วัน หลังจากนั้นจะได้แป้งเท้ายายม่อมที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียว ลักษณะพื้นผิวของเม็ดแป้งถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 และความเป็นผลึกของเม็ดแป้งถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction)



รูปที่ 2.9 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [14]

ลักษณะของเม็ดแป้งมีรูปร่างทรงกลมหรือวงรี โดยมีขนาดอนุภาคประมาณ 10 - 30  $\mu\text{m}$  พิกการเลี้ยวเบนของแป้งเท้ายายม่อมจะปรากฏที่  $2\theta = 15.2^\circ, 17.3^\circ$  และ  $23.1^\circ$  ซึ่งมีลักษณะเฉพาะที่แสดงถึงความเป็นผลึกของแป้งเท้ายายม่อมที่มีรูปแบบแป้งเป็นชนิด A และพฤติกรรมทางความร้อนแสดงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการสลายตัวของแป้งเท้ายายม่อมประมาณ  $290^\circ\text{C}$  จากการทดสอบด้วย Fourier Transform Infrared (FTIR) พบพีคที่  $3295\text{ cm}^{-1}$  และ  $996\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสัมพันธ์กับ O-H stretching ในสารประกอบประเภทกรดคาร์บอกซิลิก และ C-O stretching ในสารประกอบประเภทอีเทอร์ตามลำดับ แป้งเท้ายายม่อมแสดงกลุ่มไฮดรอกซิลและกลุ่มอะซีตัล ซึ่งเป็นกลุ่มฟังก์ชันที่สำคัญในโพลีแซ็กคาไรด์ จากผลลัพธ์เหล่านี้สามารถแยกแป้งเท้ายายม่อมบริสุทธิ์ได้ด้วยวิธีดั้งเดิมโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายที่เป็นพิษ

Nurul Shuhada Mohd Makhtar และคณะ [15] พัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้จากแป้งเท้ายายม่อมและพลาสติกไซเซออร์ 2 ชนิด ได้แก่ กลีเซอรอล และน้ำมันปาล์มดิบ เตรียม Thermoplastic starch (TPE) โดยผสมแป้งเท้ายายม่อมและพลาสติกไซเซออร์แต่ละชนิด กวนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส จนสารแขวนลอยโปร่งใส เทแป้งลงในภาชนะ และอบในเตาอบให้มีน้ำหนักคงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน จึงนำไปทดสอบการย่อยสลายในดินตามมาตรฐาน D7475 ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อน (Thermogravimetric Analysis - TGA) แสดงให้เห็น

ว่า Glycerol TPS ให้พฤติกรรมความคงตัวทางความร้อนที่คล้ายคลึงกันกับพลาสติกชีวภาพทั่วไป อย่างไรก็ตาม Glycerol TPS มีอัตราการย่อยสลายเร็วขึ้น เนื่องจากตัวอย่างเริ่มย่อยสลายที่อุณหภูมิต่ำ 70 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับพลาสติกชีวภาพทั่วไปที่ 110 องศาเซลเซียส CPO TPS จะมีความทนทานต่อความร้อนสูงถึง 430 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าสามารถสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแป้งเท้ายายม่อมร่วมกับกลีเซอรอลได้

**ตารางที่ 2.3** องค์ประกอบของ Thermoplastic starch [15]

องค์ประกอบ/ตัวอย่าง	Glycerol TPS	CPO TPS
แป้งเท้ายายม่อม (กรัม)	10	10
ปริมาตรของพลาสติกไซเซออร์ (มล.)	2	2
ปริมาณน้ำ (มล.)	100	100

Yossathorn Tanetrungroj และ Jutarat Prachayawarakorn [44] ศึกษาผลของแป้งประเภทต่างๆ ต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยใช้แป้งเทอร์โมพลาสติก (TPS) ใช้แป้งประเภทต่างๆ ที่มีปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินต่างกัน ได้แก่ จากแป้งมันสำปะหลัง (TPCS) แป้งถั่วเขียว (TPMS) และแป้งเท้ายายม่อม (TPAS) พอลิเมอร์ TPS ถูกผสมและขึ้นรูปโดยใช้เครื่องผสมภายในและเครื่องฉีดขึ้นรูปตามลำดับ พบว่าปริมาณอะไมโลสและอะไมโลเพกตินในแป้งพื้นเมืองมีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ TPS แป้งอะไมโลสสูงของ TPMS ทำให้มีความแข็งแรง ความแข็งระดับการตกผลึกสูงกว่าแป้งอะไมโลเพกตินสูงของ TPCS

**ตารางที่ 2.4** องค์ประกอบทางเคมีของแป้งชนิดต่างๆ [44]

องค์ประกอบทางเคมี (%)	แป้งมันสำปะหลัง	แป้งเท้ายายม่อม	แป้งถั่วเขียว
คาร์โบไฮเดรต	85.0	94.4	82.3
อะไมโลส	16.4	19.9	37.9
อะไมโลเพกติน	83.6	75.4	62.1

จากตารางที่ 2.4 สังเกตได้ว่าแป้งเท้ายายม่อมมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุดเมื่อเทียบกับแป้งทั้ง 3 ชนิด โดยลักษณะความชอบน้ำ (Hydrophilic) ของคาร์โบไฮเดรตจึงสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่สูงที่สุด นอกจากนี้เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่คำนวณได้ของพอลิเมอร์ TPS ต่างๆ ที่ได้จากดิฟแฟรกโตแกรมมีค่าประมาณ TPCS (36.2%) TPAS (37.4%) และ TPMS (38.7%) พอลิเมอร์

TPMS มีอะไมโลสสูงจึงแสดงระดับการตกผลึกและสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าพอลิเมอร์อะไมโลสต่ำของพอลิเมอร์ TPCS และยังพบการย่อยสลายทางชีวรูปที่เร็วที่สุดในพอลิเมอร์ TPMS พอลิเมอร์ TPAS มีระดับความเป็นผลึกและสมบัติเชิงกลที่สูงกว่า ซึ่งรวมถึงคุณสมบัติที่ย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ TPCS

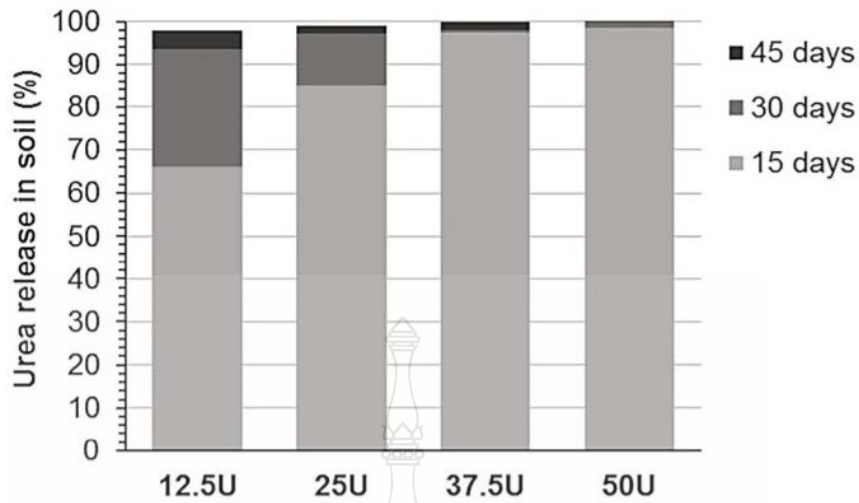
H.A. Saffian และคณะ [45] ศึกษาคุณสมบัติของคอมโพสิต ปุ๋ยสลายตัวช้า (SRF) ที่ทำจากพอลิ(บิวทิลีน ซัคซิเนต) (PBS) เฟอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักของคอมโพสิตปุ๋ยพลาสติกชีวภาพในการทดสอบการฝังดินคือ 54% เป็นเวลา 24 สัปดาห์

ศศิประภา และคณะ [46] ศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้กลีเซอรอล เพื่อเป็นพลาสติกไซเซออร์ร่วมกับแป้งมันสำปะหลัง ธรรมชาติในการเตรียมฟิล์มเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบสารละลาย โดยใช้การเติมกลีเซอรอลที่ระดับต่างๆ (20, 25, 30 และ 35% โดยน้ำหนัก) เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงสมบัติของฟิล์ม พบว่า ที่ระดับการเติมความเข้มข้นกลีเซอรอล 25% แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการยอมให้แสงส่องผ่าน ความแข็งแรงทางด้านแรงดึง และโมดูลัสยืดหยุ่น มีค่าสูงสุด (73%, 17 MPa และ 1577 MPa ตามลำดับ) เมื่อเพิ่มระดับการเติมกลีเซอรอล พบว่าร้อยละการยืดตัวและปริมาณความชื้นของแผ่นฟิล์มมีค่าสูงขึ้นเป็นอย่างมากจาก 1 เป็น 19% และจาก 8.5 เป็น 25.39% ตามลำดับ ที่ระดับความเข้มข้นของกลีเซอรอลสูงขึ้นความเสถียรทางความร้อนของตัวอย่างทดลองต่ำลง

Florencia Versino และคณะ [47] พัฒนาฟิล์มคอมโพสิตที่ควบคุมการปลดปล่อยปุ๋ยเพื่อแก้ไขปัญหาหมลพิษในดินที่เกิดจากการใช้พลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้และการใช้ปุ๋ยมากเกินไป วัสดุผสมแป้งมันสำปะหลังและชานอ้อยที่มียูเรียเป็นสารประกอบออกฤทธิ์และพลาสติกไซเซออร์ถูกเตรียมเพื่อให้บรรลุจุดประสงค์นี้ โดยวิเคราะห์คุณสมบัติและความเสถียรของพวกมันในระหว่างการเก็บรักษาฟิล์มคอมโพสิตชีวภาพและย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับการใช้งานทางการเกษตร

**ตารางที่ 2.5** ปริมาณพลาสติกไซเซออร์ของตัวอย่างผสมแป้งมันสำปะหลังและฟิล์มชานอ้อย (ค่าจะแสดงเป็น %wt โดยเทียบกับปริมาณแป้ง) [47]

Film	Glycerol	Urea
0 U	25	0
12.5 U	12.5	12.5
25 U	0	25
37.5 U	0	37.5
50 U	0	50



**รูปที่ 2.10** เปรอ์เซ็นต์การปลดปล่อยยูเรียในดินของฟิล์มแป้งมันสำปะหลังที่เสริมด้วยอนุภาค  
 ชานอ้อยและถูกทำให้เป็นพลาสติกด้วยยูเรียที่แตกต่างกัน  
 หลังจากผ่านไป 15, 30, 45 วัน [47]

รูปที่ 2.10 แสดงการปลดปล่อยยูเรียในดินของวัสดุที่พัฒนาแล้วที่มียูเรีย พบว่าฟิล์มที่มียูเรีย 50% บันทึกรการปลดปล่อย 95% ของสารประกอบออกฤทธิ์หลังจากผ่านไป 15 วันภายใต้สภาวะเสื่อมโทรมของดินไม่พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญระหว่างตัวอย่างที่มีปริมาณยูเรียสูงกว่า 25% หลังจาก 30 วันภายใต้สภาวะการสลายตัวทางชีวภาพของดิน การปล่อยก็ถือว่าเกือบจะสมบูรณ์แล้วโดยไม่คำนึงถึงสูตรของวัสดุ ผลการวิจัยระบุว่าแนวทางนี้เพียงพอสำหรับการออกแบบวัสดุผสมที่ใช้แป้งที่เข้ากันได้กับสิ่งแวดล้อมสำหรับปริมาณยูเรียในดินจากแป้งมันสำปะหลังและชานอ้อย

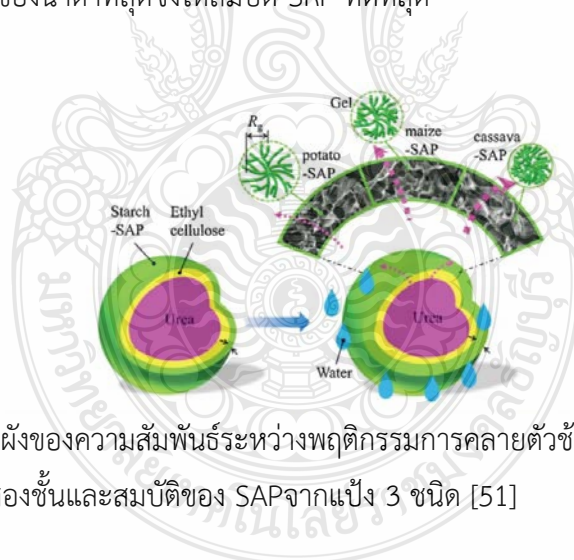
K. Alharbi และคณะ [48] ได้เตรียม Phosphorylated carboxymethyl starch-g-polyacrylamide (P-CMS-g-PAAm) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัส CMS monophosphate ถูกผลิตขึ้นจาก Carboxymethylation และ Phosphorylation ของแป้งข้าวโพด การศึกษาการปลดปล่อยแสดงให้เห็นว่าการปลดปล่อยฟอสฟอรัสสะสมในตัวอย่างที่มี CMS/ฟอสเฟต ในอัตราส่วน 1:0.66 อยู่ที่ประมาณ 87% ในวันที่ 30

K. Zhong และคณะ[49] ได้เตรียม Superabsorbent polymer (SAP) โดยใช้ Corn-starch/poly(acrylic acid)/phosphate rock (SCS/P(AAc)/PHR) สำหรับป้อนควบคุมการปลดปล่อย SCS ผลิตขึ้นจากกระบวนการซัลโฟเนชันเพื่อนำไปทำพอลิเมอร์ไฮดรอกซีกับกรดโพลีอะคริลิก และ Phosphate rock (PHR) ซึ่งเป็นป้อนแบบดั้งเดิม SCS สามารถระงับและกระจาย PHR ได้ดีและช่วยให้

ฟอสฟอรัสที่ละลายในกรดซิตริกใน PHR เปลี่ยนเป็นฟอสฟอรัสที่ละลายน้ำได้ซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสที่ปล่อยออกมาได้อย่างมาก

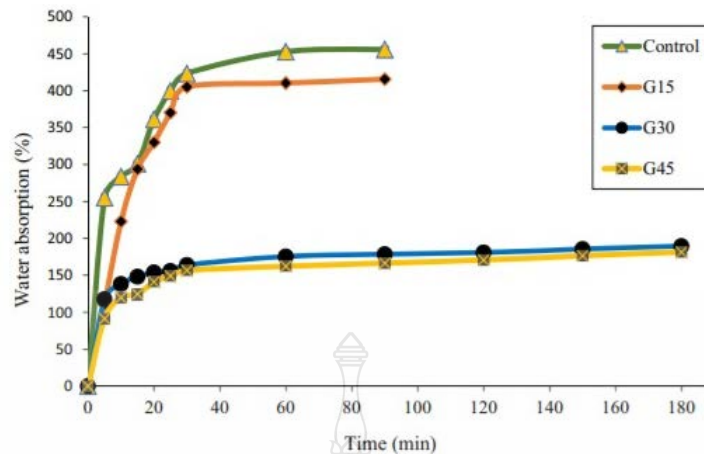
Bai และคณะ [50] ได้ศึกษาการใช้ Cassava starch-g-(acrylic acid-co-methyl methacrylate) [(starch-g-(AAc-co-MMA)] เป็นตัวพา Carbendazim การดูดซึมน้ำ (WA) มีผลต่อรูปแบบการปลดปล่อยอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีอายุการปล่อย ถึง 240 h สำหรับ 800 กรัม/กรัม ของ WA ในน้ำปราศจากไอออน pH ของสารละลายมีผลต่อโปรไฟล์การปลดปล่อยและอัตราการปลดปล่อยต่ำสุดเกิดขึ้นที่ pH ต่ำสุด

Qiao และคณะ [51] พัฒนาปุ๋ยปลดปล่อยช้าแบบเคลือบสองชั้นโดยใช้เอทิลเซลลูโลส (EC) เป็นสารเคลือบด้านในและ Starch-based superabsorbent polymer (Starch-SAP) เป็นสารเคลือบด้านนอก SAP จากข้าวโพด มันฝรั่ง และมันสำปะหลังถูกสังเคราะห์โดยใช้เครื่องผสมแบบมีวนคู่ หลังจากนั้น EC ผลการปลดปล่อยพบว่าสารอาหารถูกปล่อยออกมาจากปุ๋ยเคลือบในสามขั้นตอน: (i) น้ำถูกดูดซึมเข้าไปใน Starch-SAP และซึมผ่านชั้น EC, (ii) สารอาหารในแกนยูเรียละลายด้วยน้ำ, (iii) สารอาหารถูกส่งเข้าไปในดินโดยการเจาะสองชั้น พฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้น Starch-SAP จากแป้งมันฝรั่ง มีขนาดกักริดที่เล็กที่สุดมีความสามารถในการดูดซับน้ำและอัตราการแพร่กระจายของน้ำต่ำที่สุดจึงให้สมบัติ SRF ที่ดีที่สุด



รูปที่ 2.11 แสดงแผนผังของความสัมพันธ์ระหว่างพฤติกรรมการคลายตัวช้าของ SRFH ที่เคลือบสองชั้นและสมบัติของ SAP จากแป้ง 3 ชนิด [51]

J.Tarique และคณะ [52] พัฒนาฟิล์ม (G-plasticized AS films) แป้งทำยายม่อม (AS) โดยใช้กลีเซอรอล (G) เป็นพลาสติกไซเซอร์ในอัตราส่วน 15, 30 และ 45% (w/w ต่อปริมาณแป้ง) โดยใช้เทคนิค Solution casting technique ฟิล์มที่พัฒนาแล้วได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ โครงสร้าง

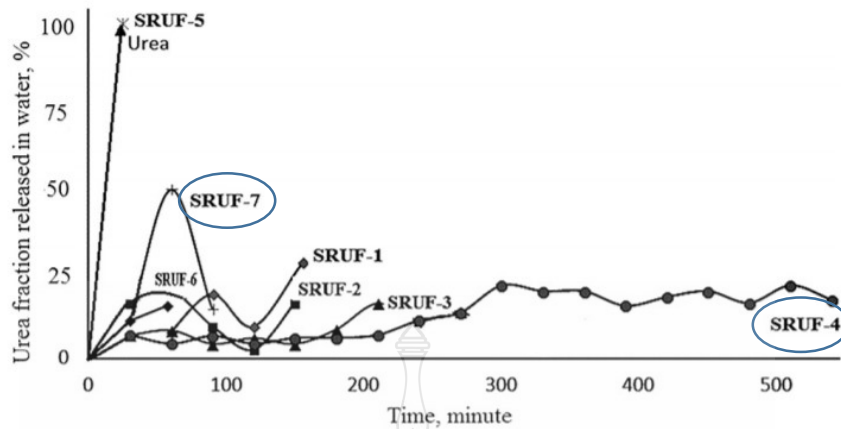


รูปที่ 2.12 การดูดซึมน้ำของตัวควบคุมและ G-plasticized AS films ที่เวลาต่างๆ [52]

ฟิล์มดูดซึมน้ำสูงสุดเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง เมื่อเวลาผ่านไป 90 นาที ฟิล์ม G15% ดูดซึมน้ำได้ประมาณ 455% และ 415% ตามลำดับ ในขณะที่ฟิล์มพลาสติกที่มี 30% และ 45% ดูดซึมน้ำได้ประมาณ 178% และ 166% ตามลำดับ เมื่อเวลาในการแช่ถึง 90 นาที สารควบคุมและฟิล์มทั้งหมดที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลต่างกันเริ่มละลายในน้ำ ยกเว้นฟิล์มที่เคลือบพลาสติกด้วย G30% และ G45% ฟิล์มเคลือบพลาสติกด้วยกลีเซอรอล 30% และ 45% ดูดซึมน้ำได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับสารควบคุมและ G15% จากรูป จะสังเกตเห็นว่าการดูดซึมน้ำของ Plasticized AS ลดลงเมื่อความเข้มข้นของกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นผลกระทบนี้อธิบายได้ด้วยข้อเท็จจริงที่ว่ากลีเซอรอลสร้างพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแกร่งขึ้นด้วยแป้งทำายม่อม ป้องกันไม่ให้โมเลกุลของน้ำรวมกับพลาสติกไซเซออร์หรือแป้งทำายม่อม ในขณะที่การยึดตัวที่จุดขาดเพิ่มขึ้นจาก 2.41 เป็น 57.33% การวิเคราะห์ FTIR เปิดเผยว่าพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดขึ้นระหว่างกลีเซอรอลและ G-plasticized AS films เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่เติมกลีเซอรอล G-plasticized AS films มีความเสถียรทางความร้อนสูงกว่าฟิล์มที่ไม่เติมกลีเซอรอล ภาพตัดขวางไมโครกราฟพบว่าฟิล์มที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอล 45% มีความสม่ำเสมอสูงกว่า 15% และ 30%

Lilis Hermida และคณะ [53] สังเคราะห์ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า(SRUF) โดยหลอมละลายยูเรียกับเบนโทไนต์ และใช้สารยึดเกาะเป็น แป้งข้าวโพดและ Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) ที่ความเข้มข้นต่างๆ จากการทดลองการปลดปล่อยแบบคงที่ SRUFs ปลดปล่อยยูเรียในน้ำช้ากว่าปุ๋ยยูเรียทั่วไป ปุ๋ยยูเรียทั่วไปจะปลดปล่อยยูเรียในน้ำอย่างสมบูรณ์หลังจากผ่านไปไม่ถึง 50 นาที SRUF ที่ใช้ HPMC เป็นสารยึดเกาะมีการปลดปล่อยยูเรียได้เร็วกว่าการใช้แป้งข้าวโพดเป็นสารยึดเกาะเนื่องจาก HPMC มีลักษณะชอบน้ำมากกว่า SRUF-4 โดยใช้แป้งข้าวโพดในสัดส่วนสูงสุด (0.8 กรัม) ทำให้เกิดการปลดปล่อยยูเรียได้ช้าที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.13





รูปที่ 2.13 พฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรียสำหรับปุ๋ยยูเรียทั่วไป ปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยช้าโดยใช้แป้งข้าวโพด เป็นสารยึดเกาะ (SRUF-1, SRUF-2, SRUF-3, SRUF-4) และปุ๋ยยูเรียที่ปล่อยช้าโดยใช้ HPMC และสารยึดเกาะ (SRUF-5, SRUF-6, SRUF-7) [53]

กลไกการปลดปล่อย SRUF โดยใช้แป้งข้าวโพดและ SRUF โดยใช้ HPMC คือการขนส่ง ผิดปกติและการแพร่กระจายของฟิกเกียนตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบแล้ว ยูเรียประมาณ 25% ใน SRUF-4 จะถูกปล่อยออกมาหลังจาก 500 นาที ขณะที่ยูเรีย 50% ถูกปล่อยออกมาหลังจาก 60 นาที สำหรับ SRUF-7 โดยใช้ HPMC เป็นสารยึดเกาะ สรุปได้ว่าการใช้แป้งข้าวโพดในการสังเคราะห์ปุ๋ย สลายตัวช้าดีกว่าการใช้ Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) จลนพลศาสตร์และกลไกการ ปลดปล่อยยูเรียของ SRUF-4 และ SRUF-7 เป็นการแพร่กระจายของ Fickian

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

เพื่อศึกษาการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้สารตั้งต้นพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม เพื่อทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางเคมี และพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังนี้

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1.1 ปุ๋ยยูเรีย สูตร (46:0:0) Analytical reagent grade ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

3.1.1.2 กลีเซอรอล Analytical reagent grade ผลิตโดยบริษัท Ajax Finechem

3.1.1.3 แป้งเท้ายายม่อม จากจังหวัดชลบุรี

##### 3.1.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

3.1.2.1 ขวดสีชา ขนาด 3 มิลลิลิตร

3.1.2.2 จานเพาะเชื้อ ขนาด 5 เซนติเมตร

3.1.2.3 ปีกเกอร์ ขนาด 250 มิลลิลิตร

3.1.2.4 กระจกตวง ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.1.2.5 ขวดปรับปริมาตร ขนาด 1000 มิลลิลิตร

3.1.2.6 เข็มฉีดยาขนาด 1 มิลลิลิตร

3.1.2.7 เครื่องชั่ง ทศนิยม 4 ตำแหน่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo

3.1.2.8 เทอร์โมมิเตอร์

3.1.2.9 เครื่อง UV-Vis spectrophotometer ยี่ห้อ Hitachi รุ่น U-3900

3.1.2.10 Quartz cuvette

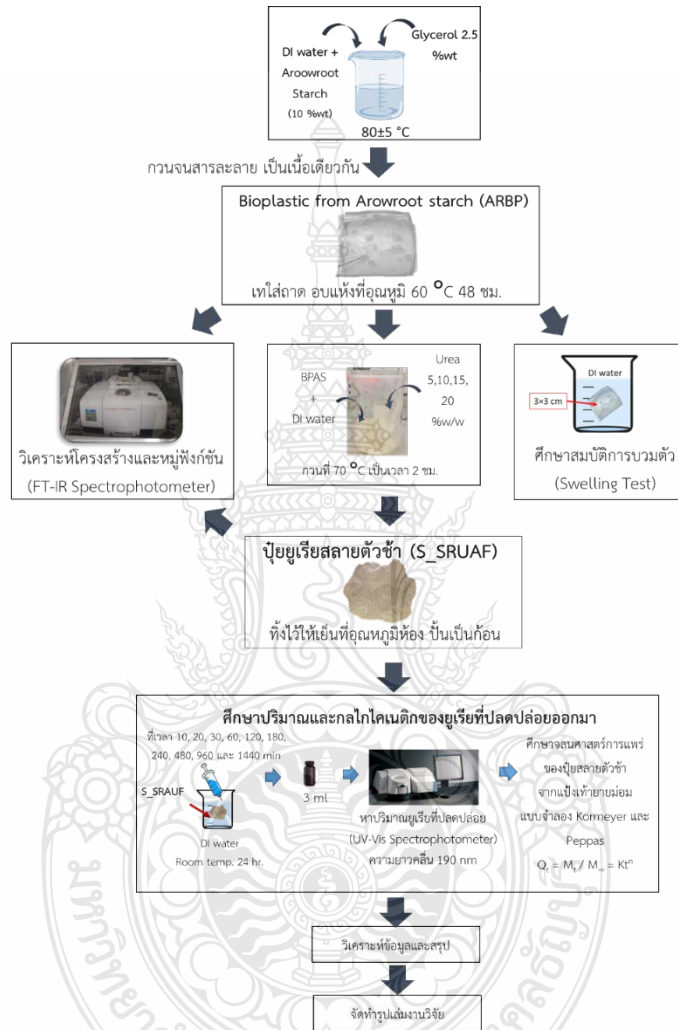
3.1.2.11 ตู้อบไอร้อน (hot air oven) ยี่ห้อ Memmert รุ่น UFE 700

3.1.2.12 เครื่องฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FT-IR Spectrometer) ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น FRONTIGR

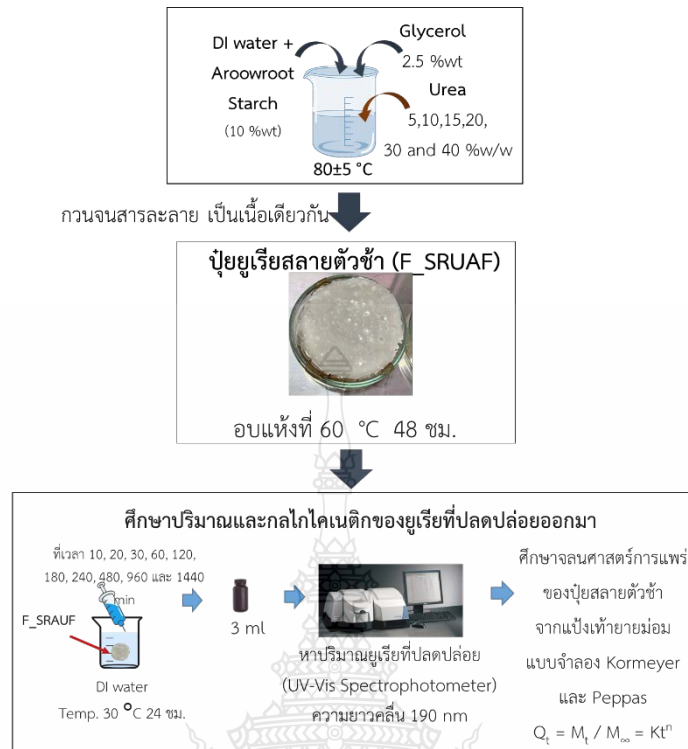
3.1.2.13 เครื่องวัดความเสถียรทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ยี่ห้อ Mettler toledo รุ่น TGA/DSC3+ HT

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยของการศึกษาการพัฒนาปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแบ่งเท้าขยำม่อแบบก้อนกลมและแผ่น แสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแบ่งเท้าขยำม่อแบบก้อนกลม



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยการพัฒนาปุ๋ยละลายตัวซ้ำจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่น

### 3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมและปุ๋ยละลายตัวซ้ำจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

3.3.1.1 การสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม

- 1) ละลายแป้งเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 10 %w/w กับน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส
- 2) นำกลีเซอรอล 2.5 และ 5 %w/w ผสมกับสารละลายที่เตรียมได้
- 3) กวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน
- 4) นำสารละลายที่ได้ เทใส่ถาดที่เตรียมไว้
- 5) นำสารเตรียมได้ ไปอบแห้งในตู้อบไอร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

3.3.1.2 การขึ้นรูปปุ๋ยละลายตัวซ้ำจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบก้อน

- 1) ละลายพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมกับน้ำปราศจากไอออน ที่อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส
- 2) นำยูเรียที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, และ 20 %w/w (ความเข้มข้นของยูเรียต่อสารละลายพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม) ผสมกับสารละลายพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมข้างต้น
- 3) กวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการเทปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้ใส่จานเพาะเชื้อ
- 4) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำมาขึ้นรูปด้วยการปั่น ให้มีลักษณะก้อนกลม

### 3.3.1.3 การขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่น

- 1) ละลายแป้งเท้ายายม่อมที่ความเข้มข้น 10 %w/w กับน้ำปราศจากไอออนที่ อุณหภูมิ 80±5 องศาเซลเซียส จนได้สารละลาย
- 2) นำกลีเซอรอล 2 %w/w ผสมกับสารละลายที่เตรียมได้
- 3) นำยูเรียที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 %w/w (ความเข้มข้นของยูเรียต่อสารละลายพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม) ผสมกับสารละลายพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมข้างต้น
- 4) กวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการเทปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้ใส่จานเพาะเชื้อ โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ให้เท่ากัน
- 5) นำปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้ ไปอบแห้งในตู้อบไอร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

### 3.3.2 ศึกษาคุณลักษณะของพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้

3.3.2.1 ศึกษาอัตราการบวมตัว (Degree of swelling) ของพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม ทำการศึกษาสมบัติการบวมตัวของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม โดยการตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3 × 3 เซนติเมตร จำนวน 3 ชิ้น นำแต่ละชิ้นงานไปชั่งน้ำหนัก เพื่อหาค่าเฉลี่ย หลังจากนั้น นำชิ้นงานไปแช่ในน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้น นำแผ่นพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อมไปชั่งน้ำหนักหลังจากมีการบวมตัว โดยร้อยละการบวมตัว (Degree of swelling) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.1) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Degree of weight loss) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2)

$$\text{Degree of swelling (\%)} = \frac{M_s - M_d}{M_d} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\text{Weight loss (\%)} = \frac{M_i - M_d}{M_d} \times 100 \quad (3.2)$$

โดยที่  $M_s$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานเปียก  
 $M_d$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานแห้ง  
 $M_i$  คือ น้ำหนักของชิ้นงานเริ่มต้น

3.3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานของพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม และศึกษาหมู่สำคัญ (functional group) ที่แตกต่างกัน ของพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม และ ปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้ ด้วยเครื่อง FT-IR (Fourier Transform Infrared -Spectrophotometer) ที่มีช่วงคลื่นระหว่าง 4000 ถึง 515  $\text{cm}^{-1}$  โดยใช้เทคนิค Attenuated Total Reflection - Fourier Transform Infrared (ATR-FTIR) สำหรับวิเคราะห์ชิ้นงาน ประเภทแผ่นฟิล์มหรือเจล

3.3.2.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยเครื่องวัดความเสถียรทางความร้อน (Thermogravimetric analysis, TGA) ในสภาวะแก๊สออกซิเจนที่อัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที ให้อุณหภูมิตั้งแต่ 25 – 900 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิของสารตัวอย่าง 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อหาอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งเท้ายายม่อม

3.3.2.4 วิเคราะห์สมบัติทางความร้อน ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential scanning calorimeter, DSC) เพื่อหาอุณหภูมิแข็งคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ทำการศึกษาในสภาวะออกซิเจนอัตราการไหล 30 มิลลิลิตรต่อนาที ช่วงอุณหภูมิ 25 – 900 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.3.2.5 วิเคราะห์สัณฐานวิทยา ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron Microscope, SEM) นำพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) และปุ๋ยยูเรียสลายตัวได้ (F\_SRAUF) ที่เตรียมได้ไปฉาบเคลือบทองบนผิวของชิ้นงาน ใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเร่งความเร็วของอิเล็กตรอน 5 กิโลโวลต์ โดยใช้กำลังขยาย 500 เท่า เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างที่สังเคราะห์ได้

3.3.3 ศึกษาพฤติกรรมและการปลดปล่อยและจลศาสตร์การแพร่ยูเรียของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้

3.3.3.1 การศึกษาพฤติกรรมและปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

1) เตรียมระบบการศึกษาพฤติกรรมและการปลดปล่อยและจลศาสตร์การแพร่ยูเรียของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้ 2 ระบบ คือ ในน้ำปราศจากไอออน และสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอช 4, 5.5, 7 และ 10

2) นำปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้จากแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้ ใส่ลงในบีกเกอร์ที่มีน้ำปราศจากไอออนหรือสารละลายบัฟเฟอร์ที่มีค่าพีเอช 4, 5.5, 7 และ 10

3) ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายในแต่ละระบบอย่างละ 3 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดเก็บตัวอย่างแล้วปิดฝาให้สนิทที่เวลา 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 480, 960 และ 1440 นาที

4) นำตัวอย่างสารละลายทดสอบด้วยเครื่องอัลตราไวโอเล็ตและวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet and Visible Spectroscopy) ที่ความยาวคลื่น 200.5 nm

5) บันทึกค่า Absorbance นำไปคำนวณหาปริมาณยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาจากกราฟมาตรฐานของปุ๋ยยูเรีย

### 3.3.3.2 ศึกษาจลนศาสตร์การแพร่ของปุ๋ยสลายตัวช้าจากแป้งเท้ายายม่อม

นำข้อมูลที่ได้จากการศึกษาพฤติกรรมและปริมาณการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียมาศึกษาจลนศาสตร์การแพร่ของปุ๋ยสลายตัวช้าจากแป้งเท้ายายม่อม จากแบบจำลอง Kormeyer และ Peppas ซึ่งศึกษาการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม โดยเศษส่วนของปุ๋ยยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลา  $t$  ( $Q_t$ ) แปรผันตรงกับเวลา  $(t)$  ยกกำลัง  $n$  หรือเรียกว่า สมการ Power Law

$$Q_t = M_t / M_\infty = Kt^n \quad (3.1)$$

เมื่อ  $M_t$  คือ ปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลาใดๆ ( $t$ )

$M_\infty$  คือ ปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาที่เวลานันต์ ( $\infty$ )

$K$  คือ ค่าคงที่

$n$  คือ ค่า Release exponent บอกถึงกลไกการปลดปล่อย

วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log (M_t / M_\infty)$  และ  $\log$  ของเวลา  $(t)$  จะได้ลักษณะกราฟเป็นเส้นตรงซึ่งทำให้สามารถหาค่า  $n$  ได้จากค่าความชันของกราฟ (ตามสมการ 3.1) โดยค่า  $n$  ที่ได้จะบอกถึงลักษณะการปลดปล่อย แสดงดังตารางที่ 2.2

### 3.4 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัย	ระยะเวลา									
	ปี 2562			ปี 2563			ปี 2564			ปี 2565
	ม.ค. - มี.ค.	เม.ย. - ก.ค.	ส.ค. - ธ.ค.	ม.ค. - มี.ค.	เม.ย. - ส.ค.	ก.ย. - ธ.ค.	ม.ค. - มี.ค.	เม.ย. - ก.ค.	ส.ค. - ธ.ค.	ม.ค. - เม.ย.
1. ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	←-----→ ←-----→									
2. เตรียมวัสดุ / สารเคมี / อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย		←-----→ ←-----→								
3. เตรียมปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า (SRAUF)			←-----→ ←-----→							
4. ทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น สมบัติทางกายภาพ พฤติกรรมการปลดปล่อย ปุ๋ยยูเรีย				←-----→ ←-----→						
5. วิเคราะห์ข้อมูล						←-----→ ←-----→				
6. สรุปผลและเขียนรายงาน							←-----→ ←-----→			

←-----→ แผนการดำเนินงาน

←-----→ การดำเนินงานจริง



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 4.1 ลักษณะของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม สำหรับประยุกต์ใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับการใช้ในการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในน้ำนั้น การศึกษาผลของพลาสติกไซเซออร์ และปริมาณปุ๋ยต่อการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้า และพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียภายใต้อุณหภูมิและความเป็นกรด ต่าง ในสภาวะต่างๆ นั้นมีผลการดำเนินการดังนี้

##### 4.1.1 ผลการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพ

เพื่อศึกษาผลของพลาสติกไซเซออร์และปริมาณปุ๋ยต่อการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้า จึงได้ทำการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม ที่สัดส่วนความเข้มข้นปุ๋ยยูเรีย 5 ถึง 40 ร้อยละโดยมวล (%w/w) โดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ ที่ความเข้มข้น 2.5 และ 5 %w/w ตารางที่ 4.1 แสดงผลการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของกลีเซอรอลมีผลต่อการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าที่ใช้พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมเป็นเมทริกซ์ ปุ๋ยสลายตัวช้าที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ความเข้มข้น 2.5 %w/w สามารถขึ้นรูปได้โดยที่ความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรียอยู่ในช่วง 5-40 %w/w แต่ในระบบการสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม ที่มีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ที่ความเข้มข้น 5 %w/w นั้น ไม่สามารถขึ้นรูปได้โดยง่าย เนื่องจากกลีเซอรอลประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดีกับโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้แผ่นฟิล์มที่มีความเข้มข้นของกลีเซอรอลในปริมาณสูง จะสามารถอุ้มน้ำได้มากขึ้นภายในเมทริกซ์ของปุ๋ยสลายตัวช้า [53] ทำให้ปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้ มีลักษณะเหนียว ติดมือแห้งยาก ดังนั้นความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่ 2.5 %w/w เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการใช้พลาสติกไซเซออร์สำหรับสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้าที่ใช้พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมเป็นเมทริกซ์

**ตารางที่ 4.1** ผลของพลาสติกไซเซอร์ และปริมาณปุ๋ยยูเรียต่อการขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าที่ใช้พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมเป็นเมทริกซ์

ตัวอย่าง	ยูเรีย (%w/w)	กลีเซอรอล (%w/w)	การขึ้นรูป
F_SRAUF5	5	2.5	○
		5	x
F_SRAUF10	10	2.5	○
		5	x
F_SRAUF20	20	2.5	○
		5	○
F_SRAUF30	30	2.5	○
		5	○
F_SRAUF40	40	2.5	○
		5	○





○ ขึ้นรูปได้

x ขึ้นรูปไม่ได้


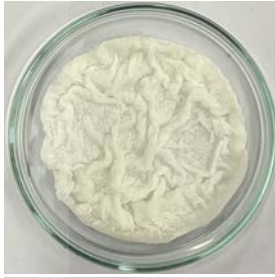

#### 4.1.2 ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

สังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่มีปริมาณปุ๋ยยูเรียที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน โดยความเข้มข้นของกลีเซอรอลคงที่ที่ 2.5 %w/w แสดงลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้ดังตารางที่ 4.2 จากผลการทดลองสรุปได้ว่า สามารถขึ้นรูปปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมได้ โดยปริมาณยูเรียมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยสลายตัวช้า

ตัวอย่าง	ปริมาณ กลีเซอรอล (%w/w)	ปริมาณปุ๋ย (%w/w)	ลักษณะทาง กายภาพ	รูป
F_SRAUF5	2.5	5	นิ่ม เหนียว ไม่มีสี ใส	
F_SRAUF10	2.5	10	นิ่ม เหนียว มีสีขาว ชุ่ม	
F_SRAUF15	2.5	15	เหนียว มีสีขาว ชุ่ม	
F_SRAUF20	2.5	20	แข็ง มีสีขาวชุ่ม	

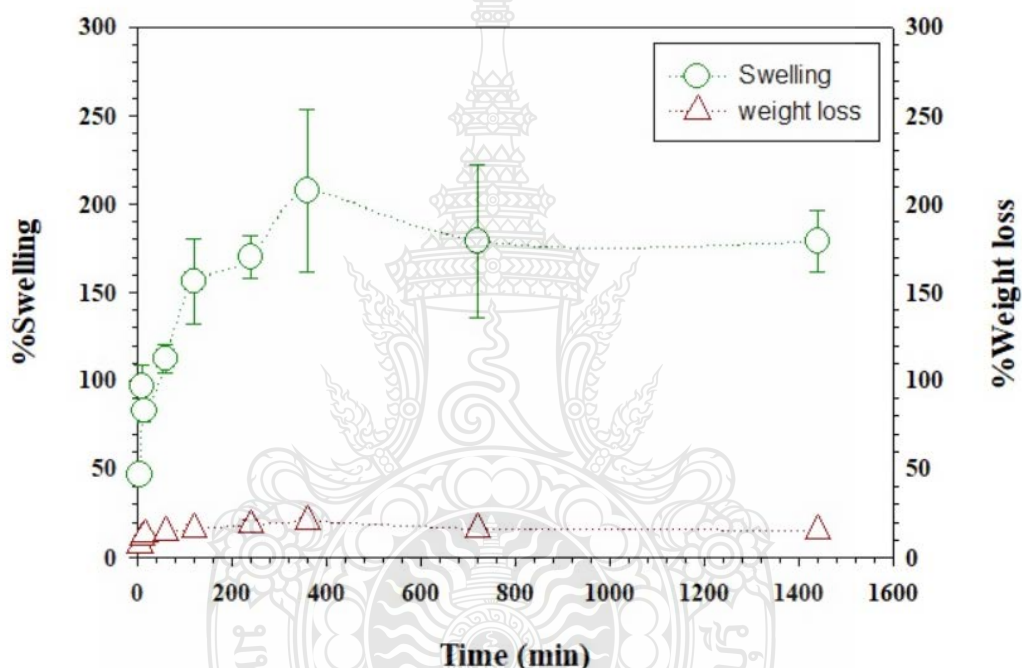
ตารางที่ 4.2 ลักษณะทางกายภาพของปุ๋ยสลายตัวช้า (ต่อ)

ตัวอย่าง	ปริมาณ กลีเซอรอล (%w/w)	ปริมาณปุ๋ย (%w/w)	ลักษณะทาง กายภาพ	รูป
F_SRAUF20	2.5	20	แข็ง มีสีขาวขุ่น	
F_SRAUF30	2.5	30	แข็ง แตกหักง่าย มีสีขาว ขุ่น	
F_SRAUF40	2.5	40	แข็ง แตกหักง่าย มีสีขาว ขุ่น	

#### 4.2 การบวมตัว (Degree of swelling) ของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

ศึกษาการบวมตัว (Swelling) และการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้ โดยนำพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแช่ในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร้อยละการบวมตัวและร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแสดงดังรูปที่ 4.1 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ร้อยละการบวมตัวของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ได้จะเพิ่มขึ้นตามเวลาและมีค่ามากถึง 200% หลังจากแช่ในน้ำปราศจากไอออน 24 ชั่วโมง และร้อยละการสูญเสียน้ำหนักของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 27% เมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมงและจะมีค่าคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการบวมตัวที่ดีของ

พลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม ดังนั้นพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมที่สังเคราะห์ได้นี้ สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการใช้เป็นเมทริกซ์ (matrix) สำหรับระบบส่งยาและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร ที่มีความต้องการในการควบคุม และการปลดปล่อยของยาหรือสารอื่นให้ช้าลง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของยาและผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรนั้น [42, 54] จากศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พลาสติกชีวภาพในการเป็นวัสดุเนื้อสำหรับใช้เป็นปุ๋ยละลายตัวช้าของ Saffian และคณะ [39] พบว่าสมบัติการสูญเสียน้ำหนักของปุ๋ยละลายตัวช้าจาก Poly(butylene succinate (PBS) ในดินนั้นสูงถึง 54% ในเวลา 24 สัปดาห์ ดังนั้นพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมที่สังเคราะห์ได้นี้ เป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการใช้เป็นวัสดุเนื้อสำหรับการสังเคราะห์ปุ๋ยละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม



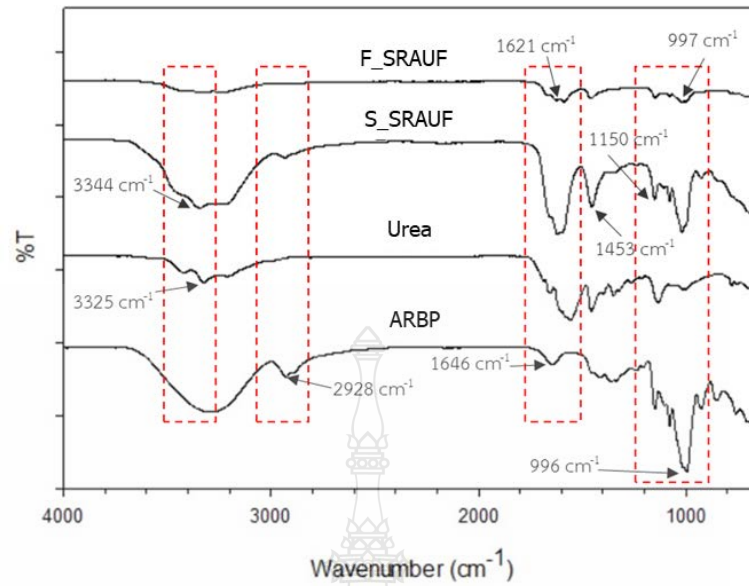
รูปที่ 4.1 ร้อยละการบวมตัว (Swelling) และร้อยละการสูญเสียน้ำหนัก (Weight loss) ของพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม

#### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างของปุ๋ยละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม

4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างที่สำคัญของปุ๋ยละลายตัวช้าที่ขึ้นรูปได้วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์การมีอยู่ การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลระหว่างปุ๋ยยูเรียและเมทริกซ์ แสดงในตารางที่ 4.3 และ รูปที่ 4.2

ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR Spectroscopy) พบว่า ปุ๋ยยูเรียละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมที่ขึ้นรูปแบบก้อน

(S\_SRAUF) และแบบแผ่น (F\_SRAUF) ปรากฏเลขคลื่นสำคัญที่ 3344 และ 3336  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ O-H Stretching เลขคลื่นสำคัญที่ 2932 และ 2929  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C-H Stretching เลขคลื่นสำคัญที่ 1619 และ  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ COO- Asymmetric stretching เลขคลื่นสำคัญที่ 1453  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ  $\text{CH}_3$  twist และเลขคลื่นสำคัญที่ 1150  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C-O-C Stretching ในขณะที่แป้งเท้ายายม่อม (ARS) ที่ใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับการสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้า ปรากฏเลขคลื่นสำคัญที่ 3288  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ O-H Stretching เลขคลื่นสำคัญที่ 2928  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C-H Stretching เลขคลื่นสำคัญที่ 1649  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C=C stretch (Cis isomer) ปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่นแสดงถึงการสั่นของ N-H stretching ที่เลขคลื่นสำคัญ 1338  $\text{cm}^{-1}$  ชัดเจนกว่าแบบก้อน ที่เลขคลื่นสำคัญ 1336  $\text{cm}^{-1}$  [55] และไม่แสดงถึงการสั่นของ N-H stretching ในพลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยการหาลักษณะพิเศษของเม็ดแป้งที่ได้จาก *Tacca leontopetaloides* โดยการสังเคราะห์เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [14] ปรากฏเลขคลื่นสำคัญที่ 3295  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ O-H Stretching ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก (carboxylic) และปรากฏเลขคลื่นสำคัญที่ 996  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงการสั่นของ C-O Stretching ของหมู่ฟังก์ชันอีเทอร์ (ether) ซึ่งสามารถระบุได้ว่าแป้งเท้ายายม่อมเป็นพอลิเมอร์กลูโคสอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาผลของการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ สำหรับการสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพ โดยใช้แป้งเท้ายายม่อมเป็นเมทริกซ์หลักในการสังเคราะห์ ซึ่งแสดงถึงการสั่นของของ C-O-C ที่เลขคลื่นสำคัญ 1150  $\text{cm}^{-1}$  ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์ด้วย FTIR ทำให้ทราบว่า การใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ สำหรับการสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพด้วยแป้งเท้ายายม่อม ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อโครงสร้างทางเคมีของแป้งเท้ายายม่อม [13,14,52,56]



รูปที่ 4.2 FT-IR Spectrum ของปุ๋ยยูเรีย (Urea), พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบก้อนกลม (S\_SRAUF) และแบบแผ่น (F\_SRAUF)

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR Spectroscopy) ของปุ๋ยยูเรีย (Urea), พลาสติกชีวภาพจากแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบก้อนกลม และ แบบแผ่น (S\_SRAUF และ F\_SRAUF) [57]

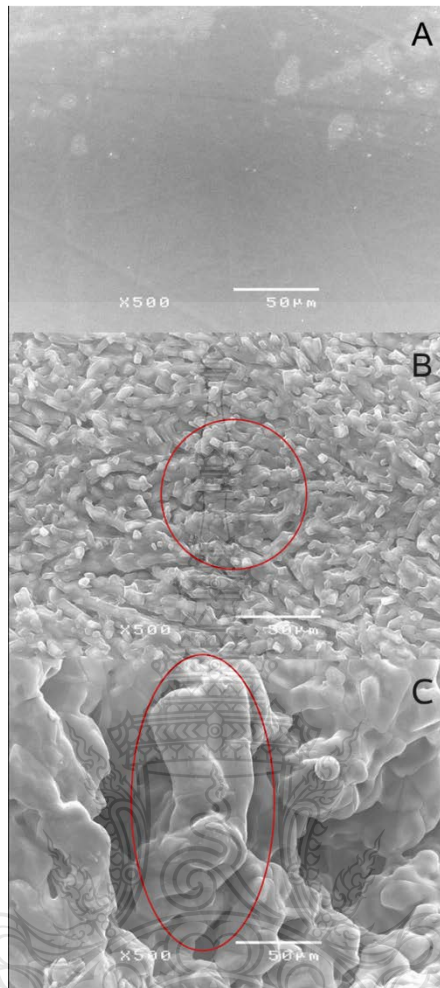
Wave number (cm <sup>-1</sup> )				Characteristic (s)
Urea	ARBP	S_SRAUF	F_SRAUF	
3325	3288	3344	3336	O - H
2870	2928	2932	2929	C - H
1637	1646	1619	1621	C = O
1455	1449	1453	1457	CH <sub>3</sub>
1008	996	1102	997	C - O
-	1150	1150	1149	C - O - C
3421	-	3424	3429	N - H

#### 4.4 สัณฐานวิทยาของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม

จากการศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวอย่างปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า พื้นผิวของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่ไม่ได้ผสมปุ๋ยยูเรียนั้นแสดงให้เห็นพื้นผิวที่เรียบเนียน และไม่มีรูพรุน (รูปที่ 4.3A) ในขณะที่สัณฐานวิทยาของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม มีลักษณะพื้นผิวที่ต่างไปจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด เมื่อมีการผสมกับปุ๋ยยูเรีย จะสังเกตเห็นลักษณะของการเกาะกลุ่มปรากฏบนพื้นผิว และเมื่อปริมาณปุ๋ยยูเรียเพิ่มมากขึ้น การเกาะกลุ่มบนพื้นผิวมีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.3B, C) จากผลการทดลองดังกล่าว อาจสันนิษฐานได้ว่า ยูเรียเกิดการตกผลึกที่พื้นผิวของปุ๋ยสลายตัวช้าและเกิดการเกาะกลุ่มของยูเรียด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่แข็งแรงขึ้นเมื่อปริมาณของยูเรียเพิ่มขึ้น [47] Lilis Hermida และคณะ [55] กล่าวว่าสัณฐานวิทยาของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า (SRUF) ที่สังเคราะห์โดยการหลอมละลายยูเรียกับเบนโทไนต์ และใช้สารยึดเกาะเป็นแป้งข้าวโพดเปรียบเทียบกับ Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) พบว่า SRUF ที่ใช้แป้งข้าวโพดเป็นสารยึดเกาะมีความนุ่มนวลและสม่ำเสมอ เมื่อเปรียบเทียบกับ HPMC ที่แสดงลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและมีอนุภาคหยาบไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจเกิดจากจำนวนโมเลกุลของสารยึดเกาะน้อยกว่าที่เชื่อมขวางกับเบนโทไนต์ ดังนั้นจึงอาจสันนิษฐานได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยูเรียในปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม จำนวนโมเลกุลของแป้งเท้ายายม่อมใน F\_SRAUF40 มีน้อยกว่าที่ F\_SRAUF5 ลักษณะพื้นผิวของปุ๋ยยูเรียของ F\_SRAUF40 จึงขรุขระและแตกหักได้ง่ายกว่า







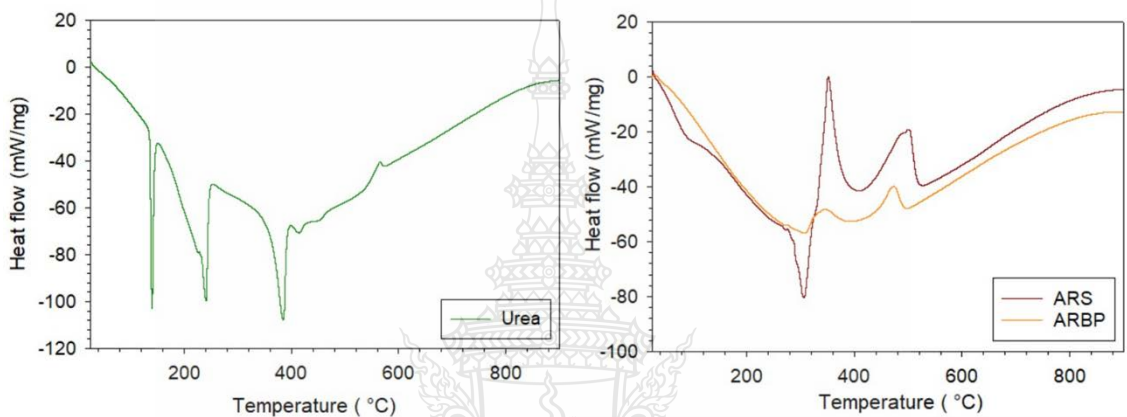
**รูปที่ 4.3** โครงสร้างทางจุลภาคของ A) พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่ไม่ได้ผสมยูเรีย (ARBP)  
 B) ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม F\_SRAUF5  
 C) ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม F\_SRAUF40

#### 4.5 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมและปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า

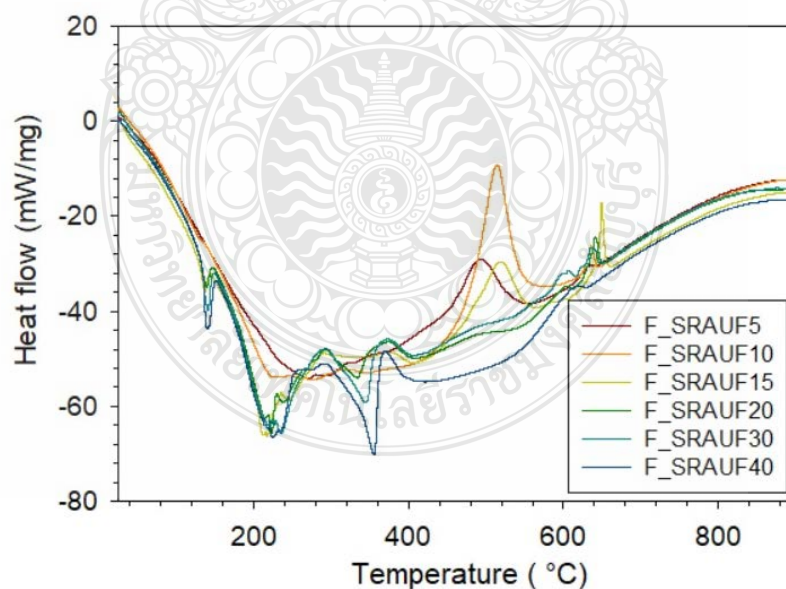
4.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC)

ผลการการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) และปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (F\_SRAUF) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 พบว่าแป้งเท้ายายม่อม (ARS) ปรากฏพีคค่า อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ที่อุณหภูมิ 306.1 องศาเซลเซียส

พลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายวม (ARBP) มีพีค ค่า Tm ที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส ยูเรียมีพีค ค่า Tm ที่อุณหภูมิ 237.8 องศาเซลเซียส และเมื่อมีการเติมยูเรียที่ความเข้มข้นต่างๆในพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายวมปรากฏพีคค่า Tm ของ F\_SRAUF5, F\_SRAUF10, F\_SRAUF15, F\_SRAUF20, F\_SRAUF30 และ F\_SRAUF40 ที่อุณหภูมิ 271.3, 278.5, 218.6, 221.1, 219.8, 221.4 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดสอบอุณหภูมิการหลอมเหลวพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณยูเรีย อาจเป็นผลมาจากการที่ปุ๋ยละลายตัวซ้ำที่ความเข้มข้นยูเรียน้อยมีปริมาณของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายวมมากกว่าอุณหภูมิในการหลอมเหลวของพลาสติกชีวภาพจึงมากกว่า



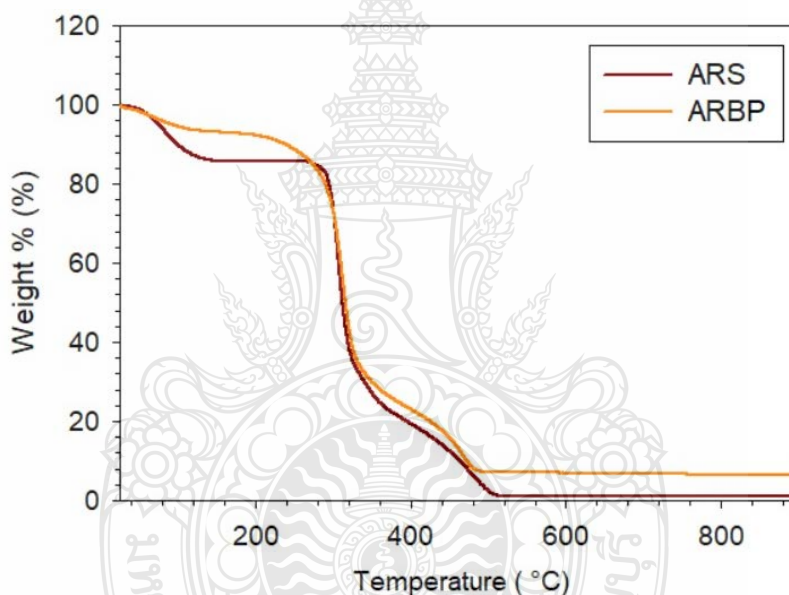
รูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของยูเรีย (Urea), แป้งเท้ายวม (ARS) และพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายวม (ARBP)



รูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของปุ๋ยยูเรียละลายตัวซ้ำจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายวม (F\_SRAUF)

#### 4.5.2 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน ด้วยเทคนิค Thermogravimetric Analysis (TGA)

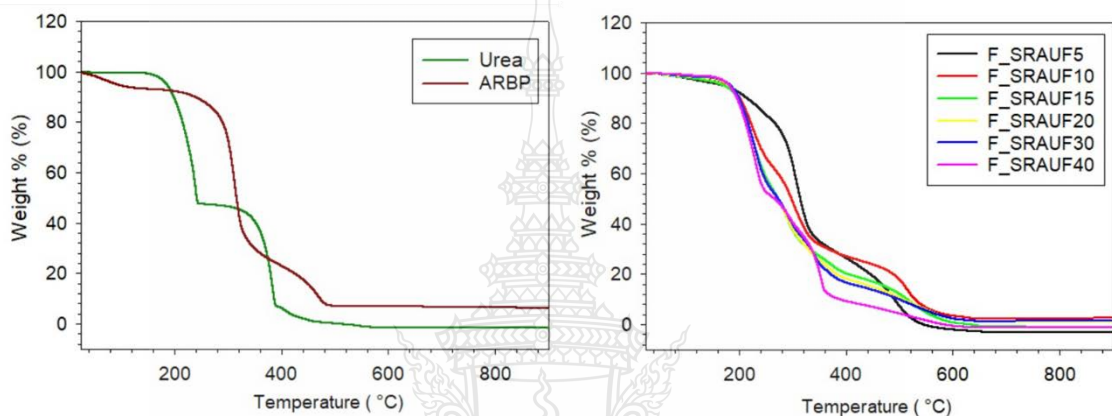
การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำหนักตัวด้วยความร้อน (TGA) ช่วยในการศึกษาการย่อยสลายด้วยความร้อนของสารที่นำมาวิเคราะห์ จากกราฟรูปที่ 4.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของแป้งเท้ายายม่อม (ARS) พบว่ามีขั้นตอนหลักของกระบวนการสูญเสียน้ำหนักทั้งหมดสามขั้นตอน: ขั้นตอนแรกเกิดจากการระเหยโดยทั่วไปของน้ำในแป้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส โดยน้ำหนักได้มีการสูญหายไปประมาณ 10% ของน้ำหนักเริ่มต้น ขั้นตอนที่สอง อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 245 ถึง 320 องศาเซลเซียส เกิดจากการย่อยสลายของโมเลกุลแป้งในส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ประมาณ 80% ของน้ำหนักเริ่มต้น และในขั้นตอนสุดท้ายที่อุณหภูมิสูงกว่า 320 องศาเซลเซียส อาจเกิดจากการสลายตัวของสารตกค้างประมาณ 10% ของน้ำหนักเริ่มต้น [13]



รูปที่ 4.6 TGA ของการสลายตัวทางความร้อนของแป้งเท้ายายม่อม (ARS) และพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP)

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำหนักตัวด้วยความร้อน (TGA) ของพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (ARBP) จากกราฟรูปที่ 4.6 พบว่าพลาสติกชีวภาพมีการสูญเสียน้ำหนักสองขั้นตอนในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25 ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งระยะแรกของการสูญเสียน้ำหนัก สอดคล้องกับการระเหยของน้ำในพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม โดยมีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 7% ของน้ำหนักเริ่มต้น ในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 150.6 องศาเซลเซียส ซึ่งงานวิจัยของ Franklin, M. E. และคณะ กล่าวว่า โดยแป้งทั่วไปมักจะเกิดการระเหยของน้ำขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25 ถึง 200

องศาเซลเซียส [58] ระยะที่สองของการสูญเสียน้ำหนักประมาณมากที่สุด 80% ของน้ำหนักเริ่มต้น เกิดการสลายตัวทางความร้อนของแป้งสูงสุดอยู่ที่ 290 ถึง 320 องศาเซลเซียส ระยะที่สามเป็นการเกิดคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และเถ้าที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส [59] ซึ่งมีงานวิจัยที่ใช้แป้งข้าวโพดเป็นในการสังเคราะห์ปุ๋ยสลายตัวช้าได้ [53] อุณหภูมิการสลายตัวที่ 250 ถึง 360 องศาเซลเซียส [60] ดังนั้นจากผลการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมนี้ สามารถอนุมานได้ว่าพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมมีความเสถียรทางความร้อนและแสดงคุณลักษณะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เป็นพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ [61]

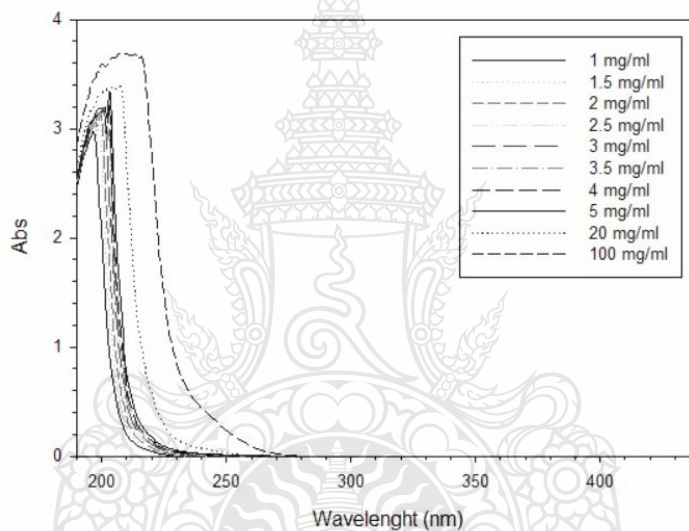


รูปที่ 4.7 TGA ของการสลายตัวทางความร้อนของยูเรีย พลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม (ARBP) ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้า (F\_SRAUF)

ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำหนักตัวด้วยความร้อน (TGA) ของปุ๋ยยูเรียแสดงขั้นตอนหลักของกระบวนการสูญเสียน้ำหนักสองขั้นตอนดังรูปที่ 4.7 ขั้นตอนการสูญเสียเริ่มต้นในช่วงอุณหภูมิ 25 ถึง 250 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 52.7% ของน้ำหนักเริ่มต้น ขั้นตอนที่สองอยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 250 ถึง 390 องศาเซลเซียส มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 48.3% และขั้นตอนที่สามสูงกว่า 390 จากงานวิจัยของ Yaolin Wang และคณะกล่าวว่า ขั้นตอนแรกของการสูญเสียน้ำหนักเกิดจากการสูญเสียแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) ขั้นตอนที่สองและสามเป็นการสูญเสียน้ำหนักของผลผลิตพลอยได้ (Byproducts) [62] ผลจากการเติมยูเรียลงไปพลาสติกชีวภาพ (F\_SRAUF) พบว่าปุ๋ยสลายตัวช้าทุกสูตร มีการสูญเสียน้ำหนักประมาณ 97 ถึง 100 % เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25.17 ถึง 664 °C การสลายขั้นแรก มีแนวโน้มอุณหภูมิลดลง เนื่องจากอุณหภูมิในการสลายตัวของยูเรียต่ำกว่าพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม เมื่อปริมาณยูเรียเพิ่มขึ้น จึงอาจส่งผลให้อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวลดลง แต่การสลายจนหมดยังมีแนวโน้มใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิประมาณ 600 °C

#### 4.6 การสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายปุ๋ยยูเรีย (Calibration curve of fertilizer solution)

สร้างกราฟค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายยูเรียที่มีความเข้มข้น 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 5, 20 และ 100 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร เพื่อหาค่าความยาวคลื่นสูงสุด  $\lambda_{\max}$  โดยการนำปุ๋ยยูเรียมาละลายในน้ำ (standard solution) เพื่อเตรียมเป็นสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างๆ แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 190-440 นาโนเมตร พบว่าค่าความยาวคลื่นสูงสุด  $\lambda_{\max}$  ของสารละลายปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสมอยู่ที่ 200.5 นาโนเมตร แสดงดังรูปที่ 4.8 ( $\lambda_{\max}$  ของสารละลายยูเรียที่มีความเข้มข้นต่างๆ มีค่าไม่เท่ากัน แล้วเหตุใด จึงเลือกที่ 200.5 นาโนเมตร อาจต้องอธิบายเพิ่มเติมหนึ่ง)

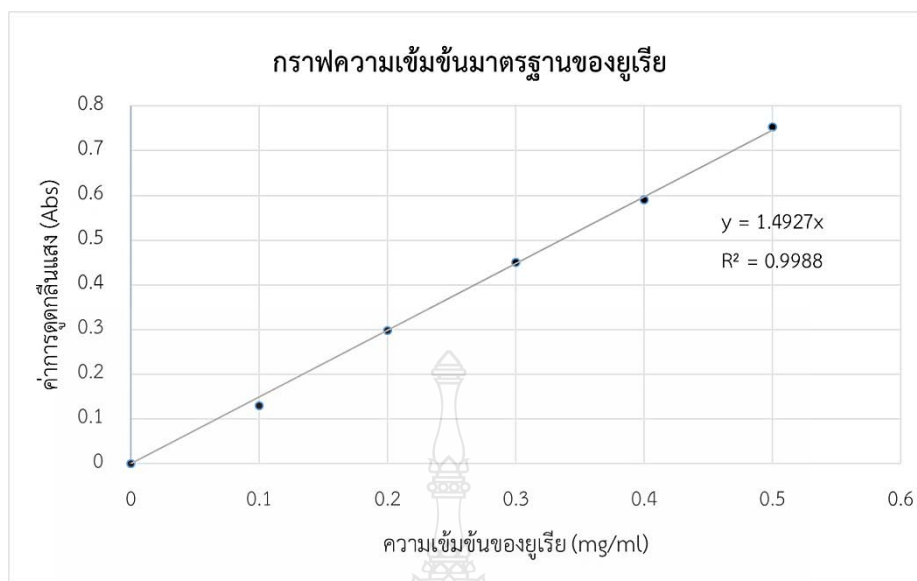


รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายปุ๋ยยูเรีย ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่มีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 190-440 นาโนเมตร

หลังจากนั้นนำค่าดูดกลืนคลื่นแสงแต่ละความเข้มข้นมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Absorbance (Abs) และความเข้มข้นของปุ๋ยที่เตรียมดังแสดงในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 และได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนคลื่นแสง (Abs) และความเข้มข้น (Conc) ของปุ๋ยยูเรียดังแสดงในสมการที่ 4.1

$$\text{Abs} = 1.4927\text{Conc} \quad (4.1)$$

เมื่อ Abs คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของปุ๋ยยูเรียและ  
Conc คือ ความเข้มข้นของปุ๋ยยูเรีย



รูปที่ 4.9 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของยูเรียกับค่าการดูดกลืนแสง  
 ที่  $\lambda_{\max}$  200.5 นาเมตร

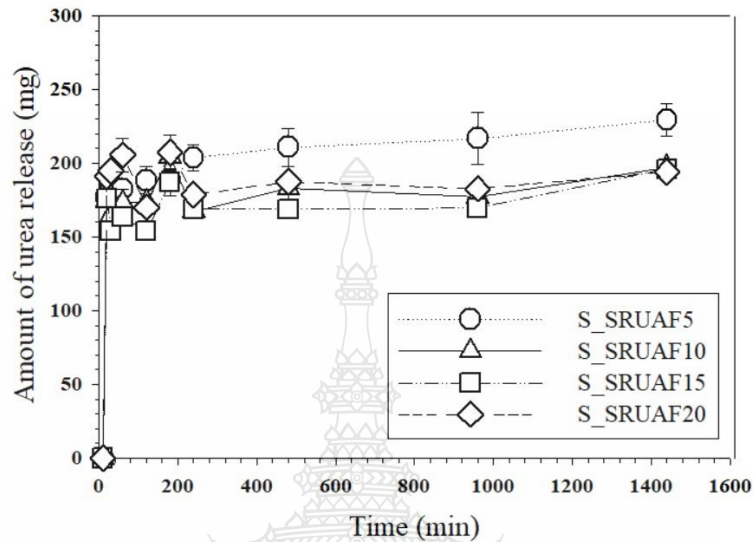
#### 4.7 พฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกแบริ่งทำยายม่อม

จากการศึกษาปริมาณการแพร่ของปุ๋ยต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแบริ่งทำยายม่อม ศึกษาโดยแช่ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบริ่งทำยายม่อมที่ขึ้นรูปได้ ลงในน้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ได้ผลการทดลองดังนี้

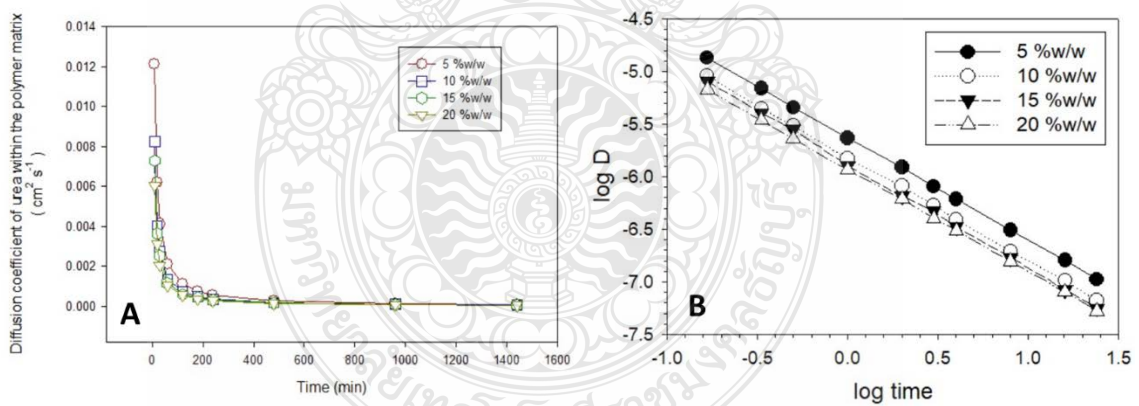
4.7.1 ผลของปริมาณปุ๋ยยูเรียต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบริ่งทำยายม่อมแบบก้อนกลม

ศึกษาผลของปริมาณปุ๋ยในพลาสติกชีวภาพแบริ่งทำยายม่อมแบบก้อนกลมที่สังเคราะห์ได้ ต่อพฤติกรรมการปลดปล่อย พบว่าปุ๋ยในพลาสติกชีวภาพแบริ่งทำยายม่อมที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 %w/w ซึ่งมีชิ้นงานขนาด  $3 \pm 0.5$  เซนติเมตร จะพบปริมาณปุ๋ยยูเรียที่บรรจุในแต่ละชิ้นงานซึ่งมีน้ำหนัก 666.67, 1333.33, 2000 และ 2666.67 มิลลิกรัมตามลำดับ หลังจากนั้น นำชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ ทดสอบการปลดปล่อยในน้ำปราศจากไอออน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่า พฤติกรรมการปลดปล่อยเป็นแบบสลายตัวช้า กล่าวคือปริมาณปุ๋ยที่ถูกปลดปล่อยออกค่อยๆ มีปริมาณที่เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชม. ปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยยูเรียในพลาสติกชีวภาพแบริ่งทำยายม่อมของแต่ละความเข้มข้นมีปริมาณ 186.8, 175.7, 190.2 และ 223.4 มิลลิกรัม ตามลำดับ เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับปริมาณ (ความเข้มข้น) ปุ๋ยเริ่มต้นที่บรรจุอยู่ในปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกแบริ่งทำยายม่อมที่สังเคราะห์ จะมีค่า 28.0, 13.2, 9.5 และ 8.6 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเวลาทดสอบการปลดปล่อยผ่านไป 1000 นาที ปริมาณปุ๋ยที่ปลดปล่อยจะเริ่มคงที่

ดังแสดงตามรูปที่ 4.10 นอกจากนี้ค่า Diffusion coefficient ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบก้อนที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเวลา แสดงให้เห็นอัตราการแพร่ของยูเรียลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงตามรูปที่ 4.11



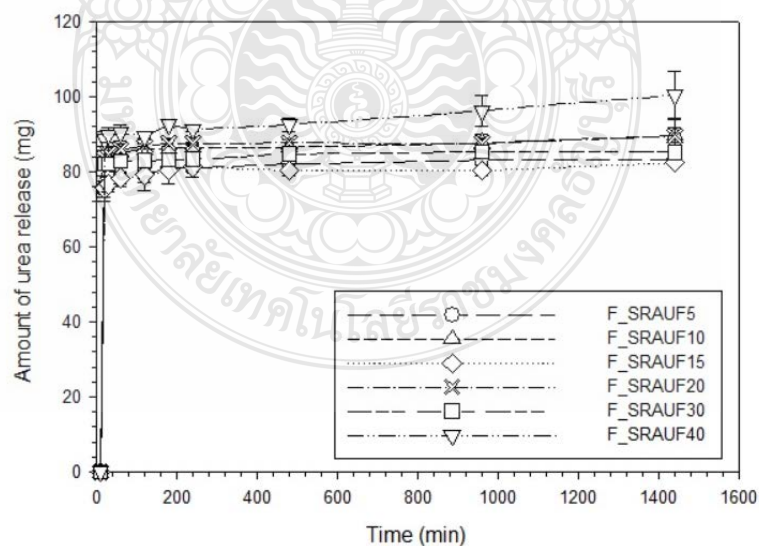
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อม (แบบก้อน) ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน



รูปที่ 4.11 แสดงค่า Diffusion coefficient (A) และ Log diffusion coefficient (B) ของยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบก้อนกลม ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน

4.7.2 ผลของปริมาณปุ๋ยยูเรียต่อพฤติกรรมของการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่น

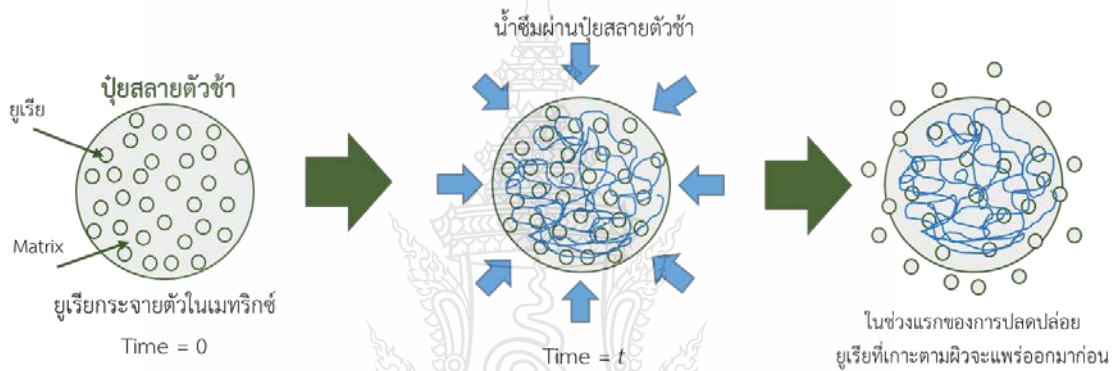
ศึกษาผลของปริมาณปุ๋ยในพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่นที่สังเคราะห์ได้ ต่อพฤติกรรมการปลดปล่อย พบว่าปุ๋ยในพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมที่มีความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 %w/w ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $3 \pm 0.5$  เซนติเมตร หนา 0.15 – 0.6 เซนติเมตร มีปริมาณปุ๋ยที่ใส่ลงไปแต่ละชั้น 1580, 3330, 5290, 7500, 12860 และ 20000 มิลลิกรัม ตามลำดับ นำแต่ละชั้นงานที่สังเคราะห์ได้ ทดสอบการปลดปล่อยในน้ำปราศจากไอออน ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จากการทดสอบพบว่า ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่นทุกชั้นงาน มีพฤติกรรมการปลดปล่อยแบบสลายตัวช้า ปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ถูกปลดปล่อย จะมีปริมาณค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที พบการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียอยู่ที่ 75.28, 82.19, 75.58, 83.63, 82.09 และ 88.78 มิลลิกรัม ตามลำดับ และปริมาณปุ๋ยจะเริ่มคงที่ เมื่อเวลาในการปลดปล่อยผ่านไป 1000 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ปริมาณที่ปลดปล่อยออกมาจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่นแต่ละชั้นงานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน จะมีค่า 84.27, 91.74, 83.35, 90.87, 85.29 และ 103.17 มิลลิกรัม ตามลำดับ เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับปริมาณ (ความเข้มข้น) ปุ๋ยเริ่มต้นที่บรรจุอยู่ในปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกแป้งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ จะมีค่า 16.00, 8.26, 4.73, 3.63, 1.99 และ 1.55 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า Diffusion coefficient ของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่นแต่ละชั้นงานที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน นั้นจะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยชั้นงานที่ความเข้มข้นยูเรียสูงสุด (F\_SRAUF40) จะมีค่า Diffusion coefficient น้อยที่สุด และชั้นงานที่ความเข้มข้นน้อยที่สุด (F\_SRAUF5) จะมีค่า Diffusion coefficient มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.14



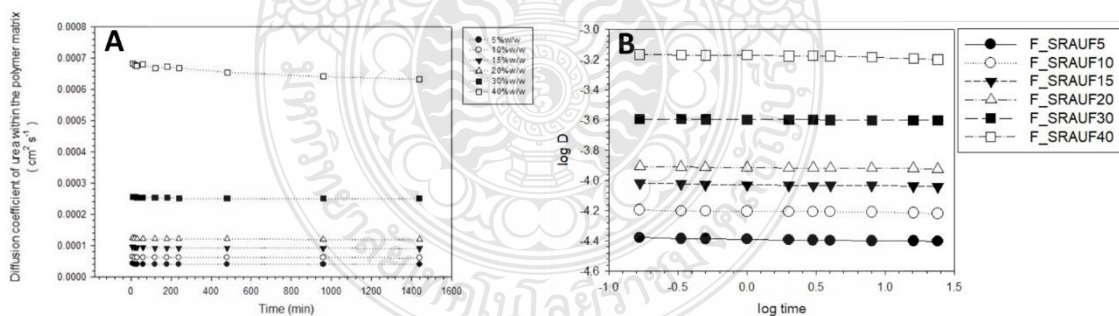
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงปริมาณการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่น ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน



จากผลการทดลองพบว่า การปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่ง  
 ให้อายุที่สังเคราะห์ โดยการผสมปุ๋ยยูเรียไปพร้อมกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกชีวภาพ(แบบแผ่น)  
 ให้การปลดปล่อยที่ช้ากว่า ปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพแบ่ง  
 ให้อายุที่สังเคราะห์ก่อน แล้วจึงบรรจุปุ๋ยยูเรียภายหลัง (แบบก้อน) ซึ่งอาจเป็นผลจากการกระจายตัวของยูเรีย  
 ในปุ๋ยสลายตัวช้าแบบแผ่นนั้น มีการกระจายตัวที่ดีกว่าแบบก้อน โดยกลไกการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย  
 สลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่งให้อายุที่สังเคราะห์ อาจจะปลดปล่อยยูเรียบริเวณพื้นผิวของปุ๋ย  
 สลายตัวช้าก่อน หลังจากนั้นน้ำซึ่งเป็นตัวทำละลาย จะซึมผ่านปุ๋ยสลายตัวช้า พร้อมทั้งละลายยูเรียผ่าน  
 เมทริกซ์ แล้วออกสู่ภายนอก ดังแสดงตามรูปที่ 4.13



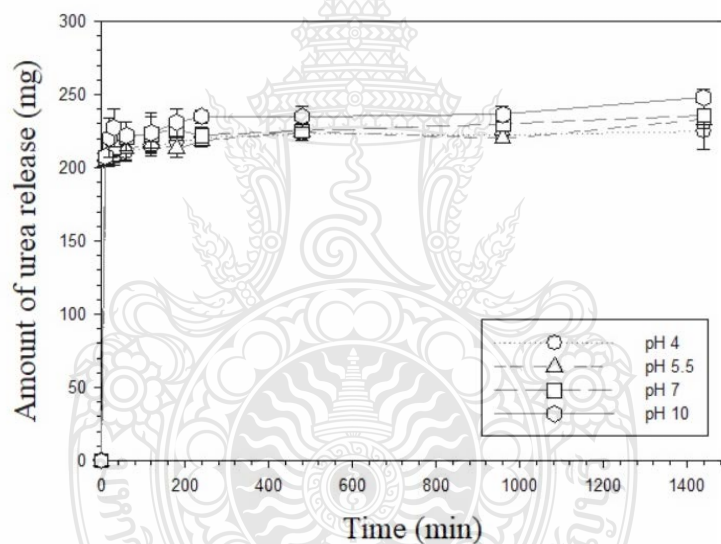
รูปที่ 4.13 การปลดปล่อยปุ๋ยแบบ Erosion[60]



รูปที่ 4.14 แสดงค่า Diffusion coefficient (A) และ Log diffusion coefficient (B)  
 ของยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส  
 ในน้ำปราศจากไอออน

ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่งให้อายุที่สังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของยูเรีย 10 %w/w  
 (F\_SRAUF10) นำมาเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย ที่อุณหภูมิ 30 และ 35

องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH 4, 5.5, 7 และ 10 ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ จากกราฟ พบว่าพฤติกรรมของการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียเป็นแบบสลายตัวช้า ปริมาณปุ๋ยที่ถูกปลดปล่อยออกค่อยๆ เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาผ่านไป 10 นาที ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ pH ต่างๆ มีค่า 203.95, 204.64, 206.83 และ 207.72 มิลลิกรัมตามลำดับ และปริมาณปุ๋ยยูเรียจะเริ่มคงที่ เมื่อเวลาการปลดปล่อยผ่านไป 1000 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และเมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่งเท้ายายม่อม ในสารละลายบัฟเฟอร์ pH ต่างๆ มีค่า 232.91, 224.94, 235.55 และ 247.81 มิลลิกรัม เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับปริมาณ (ความเข้มข้น) ปุ๋ยเริ่มต้นที่บรรจุอยู่ในปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่งเท้ายายม่อมที่สังเคราะห์ จะมีค่า 22.49, 23.29, 23.55 และ 24.78 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ



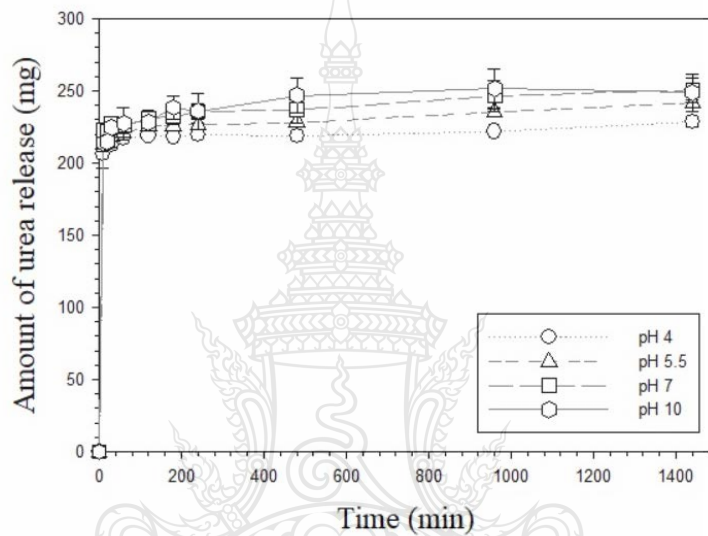
รูปที่ 4.15 แสดงการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแบ่งเท้ายายม่อม (F\_SRAUF10)

ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์

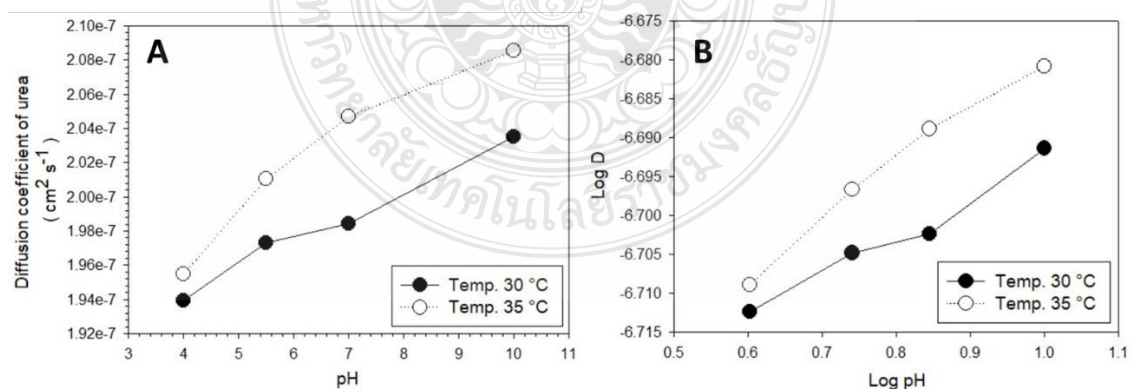
ผลการปลดปล่อยของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่งเท้ายายม่อมที่มีความเข้มข้นของยูเรีย 10 %w/w (F\_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียในสารละลายบัฟเฟอร์ pH ต่างๆ มีค่า 206.34, 213.04, 22.75 และ 214.09 มิลลิกรัม ตามลำดับ และปริมาณปุ๋ยยูเรียจะเริ่มคงที่ เมื่อเวลาการปลดปล่อยผ่านไป 1000 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.16 เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง ปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ปลดปล่อยออกมาปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกแบ่งเท้ายายม่อมในสารละลายบัฟเฟอร์ pH ต่างๆ มีค่า 228.56, 241.84, 250.66 และ 260.18 มิลลิกรัม ตามลำดับ

เมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับปริมาณ (ความเข้มข้น) ปุ๋ยเริ่มต้นที่บรรจุอยู่ในปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติก  
 แบ่งเท้าขยำม่อมที่สังเคราะห์ จะมีค่า 22.86, 24.18, 25.07 และ 26.02 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ค่า Diffusion coefficient ของปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแบ่ง  
 เท้าขยำม่อมแบบแผ่นที่ปริมาณความเข้มข้น 10 %w/w (F\_SRAUF10) ในสารละลายบัฟเฟอร์ ที่  
 อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่า อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะมีค่า Diffusion coefficient  
 สูงกว่าที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังแสดงตามรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิและค่า pH มีผลต่อ  
 อัตราการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย



รูปที่ 4.16 แสดงการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแบ่งเท้าขยำม่อม (F\_SRAUF10)  
 ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์



รูปที่ 4.17 แสดงค่า Diffusion coefficient (A) และ Log diffusion coefficient (B)  
 ของยูเรียจากปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ณ อุณหภูมิ 30 และ 35 องศาเซลเซียส  
 ในสารละลายบัฟเฟอร์

4.7.3 การคำนวณจลนศาสตร์การแพร่ของปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแข็ง  
 ทำยายม่อมแบบก้อนกลมและแบบแผ่น

ค่าคงที่การแพร่ของปุ๋ยยูเรีย (K) ถูกคำนวณเพื่อศึกษาจลนศาสตร์ของการแพร่ของ  
 ปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแข็งทำยายม่อม โดยศึกษาการเคลื่อนที่ของปุ๋ยยูเรียออกจากเมทริกซ์  
 พลาสติกชีวภาพแข็งทำยายม่อม ซึ่งสัดส่วนจำนวนของปุ๋ยที่ถูกปลดปล่อย ( $M_t$ ) ต่อปริมาณของปุ๋ย  
 เริ่มต้น ( $M_\infty$ ) จะแปรผันโดยตรงกับเวลา (t) ที่ปุ๋ยเคลื่อนที่ออกจากพลาสติกชีวภาพแข็งทำยายม่อม ยก  
 กำลัง n ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4.1

$$M_t / M_\infty = Kt^n \quad (4.1)$$

ค่า n บ่งบอกถึงกลไกการเคลื่อนที่ กรณี  $n < 0.5$  กลไกการเคลื่อนที่เป็นแบบ Fickian  
 กรณี  $n = 0.5 < n < 1$  กลไกการเคลื่อนที่เป็นแบบ non - Fickian และกรณี  $n > 1$  กลไกการเคลื่อนที่เป็น  
 แบบ linear ซึ่งกลไกการแพร่แบบพื้นฐานแบบ Fickian diffusion สามารถนำมาคำนวณหา n จาก  
 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่การแพร่ (Diffusion coefficient) และค่า n โดยแสดงดังตารางที่ 4.4

**ตารางที่ 4.4** แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบก้อนกลม (S\_SRAUF)  
 ที่มีปริมาณปุ๋ย 5, 10, 15 และ 20% w/w ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส  
 ในน้ำปราศจากไอออน

ตัวอย่าง	n	k	R <sup>2</sup>
S-SRAUF5	0.0541	-0.633	0.9357
S-SRAUF10	0.0366	-0.9768	0.8638
S-SRAUF15	0.0173	-1.0436	0.9038
S-SRAUF20	0.0541	-1.2351	0.9357

**ตารางที่ 4.5** แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น (F\_SRAUF) ที่มีปริมาณปุ๋ย 5, 10, 15, 20, 30 และ 40% w/w ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน

ตัวอย่าง	n	k	R <sup>2</sup>
F-SRAUF5	0.0207	-0.8591	0.9487
F-SRAUF10	0.0175	-1.1447	0.912
F-SRAUF15	0.0176	-1.3816	0.9117
F-SRAUF20	0.0140	-1.4869	0.9251
F-SRAUF30	0.0088	-1.7276	0.9007
F-SRAUF40	0.0281	-1.9128	0.819

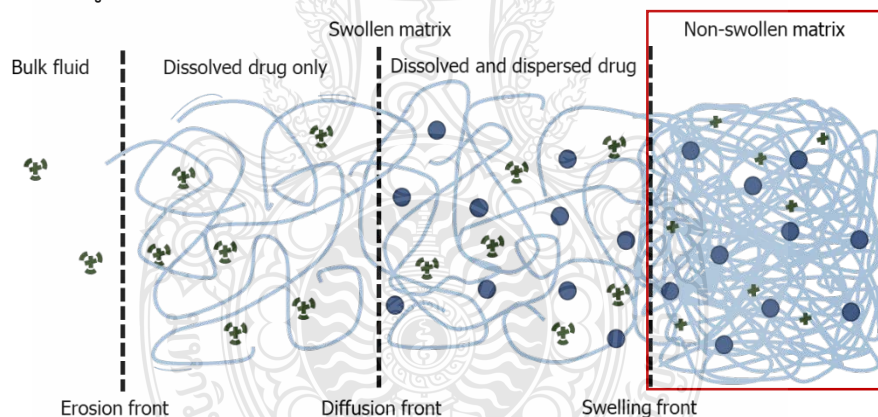
**ตารางที่ 4.6** แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ที่มีปริมาณปุ๋ย 10 %w/w (F\_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่างๆ

pH	n	k	R <sup>2</sup>
4	0.0227	-0.7144	0.8825
5.5	0.0196	-0.7077	0.9663
7	0.0228	-0.703	0.9355
10	0.0268	-0.6978	0.8407

**ตารางที่ 4.7** แสดงค่า n และค่าคงที่การแพร่ (k) ของปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าแบบแผ่น ที่มีปริมาณปุ๋ย 10 w/w (F\_SRAUF10) ณ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH ต่างๆ

pH	n	k	R <sup>2</sup>
4	0.0145	-0.6927	0.8122
5.5	0.0233	-0.6972	0.9476
7	0.0236	-0.6826	0.9194
10	0.0385	-0.7124	0.9605

จากตารางที่ 4.4 ถึง 4.7 พบว่าค่า  $n$  ของการแพร่ของปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพ แป้งเท้ายายม่อมปริมาณปุ๋ยแบบแผ่นที่มีปริมาณยูเรีย 5, 10, 15, 20, 30 และ 40% w/w ณ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ในน้ำปราศจากไอออน นั้นคือ 0.0207, 0.0175, 0.0176, 0.014, 0.0088 และ 0.0281 ตามลำดับ และยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมปริมาณปุ๋ยแบบก้อนกลม ที่มี ปริมาณยูเรีย 5, 10, 15 และ 20% w/w มีค่า  $n$  เท่ากับ 0.0541, 0.0366, 0.0173 และ 0.0541 ตามลำดับ ปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้งเท้ายายม่อมแบบแผ่นที่มีปริมาณยูเรีย 10 %w/w (F\_SRAUF10) ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 4, 5.5, 7 และ 10 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่า  $n$  เท่ากับ 0.0227, 0.0196, 0.0228 และ 0.0268 ตามลำดับ ปุ๋ยยูเรียจากพลาสติกชีวภาพแป้ง เท้ายายม่อมแบบแผ่นที่มีปริมาณยูเรีย 10 %w/w (F\_SRAUF10) ในสารละลายบัฟเฟอร์ที่ค่า pH 4, 5.5, 7 และ 10 อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีค่า  $n$  เท่ากับ 0.0145, 0.0233, 0.0236 และ 0.0385 ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปุ๋ยสลายตัวช้าที่สังเคราะห์ได้ทั้งหมดนี้มีค่า  $n$  น้อยกว่า 0.5 เป็นการแพร่ แบบ Fickian diffusion release from slab (non swellable matrix) โดยของเหลวสัมผัสกับเมทริกซ์ และจะกระจายตัวเข้าสู่ระบบ ซึ่งแกนเม็ด(ปุ๋ย)ด้านในยังแห้งและอยู่ในสภาพเหมือนแก้ว ไม่เกิดการ บวมตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.18 [42,55,63,64]



**รูปที่ 4.18** แสดงแผนผังของระบบการนำส่งยาหรือปุ๋ยที่ควบคุมการบวมซึ่งมีปุ๋ยที่ละลายและ กระจายตัว (รูปดาวและวงกลมสีดำ ตามลำดับ) ซึ่งแสดงขอบเขตการเคลื่อนตัวต่อไปนี้:  
 (i) "Erosion front" การแบ่งแยกของเหลวจำนวนมากออกจากระบบการนำส่ง;  
 (ii) " Diffusion front" การแบ่งแยกเมทริกซ์บวมที่มียาละลายเท่านั้น และเมทริกซ์บวม ที่ประกอบด้วยยาที่ละลายและกระจายตัวอยู่;  
 (iii) " Swelling front" การแบ่งแยกของเมทริกซ์บวมและไม่บวม [42]

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

การสังเคราะห์พลาสติกย่อยสลายได้ที่สังเคราะห์จากแป้งทำยายม่อม มีลักษณะเหนียวใส แสงสามารถทะลุผ่านได้ สามารถขึ้นรูปได้ด้วยการละลายแป้งทำยายม่อมด้วยน้ำปราศจากไอออนและเติม กลีเซอรอลพลาสติกไฮดรอกซี เนื่องจากกลีเซอรอลที่เติมลงไปในการแปรรูปสามารถแก้ไขเรื่องความเปราะของพลาสติกได้ เป็นการปรับปรุงให้พลาสติกมีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์มากขึ้น แต่หมู่ไฮดรอกซิลของกลีเซอรอล เกิดปฏิกิริยาได้ดีกับโมเลกุลของน้ำ จึงทำให้พลาสติกที่ใส่กลีเซอรอลอุม่น้ำได้ดีภายในเมทริกซ์ สอดคล้องกับผลการศึกษ้อัตราการบวมตัว (Degree of swelling) ในน้ำปราศจากไอออน ของพลาสติกชีวภาพจากแป้งทำยายม่อม เป็นเวลา 24 ชม. พบว่าพลาสติกชีวภาพนี้มีระดับการบวมตัวที่ดี การบวมตัวเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น พบระดับการบวมตัวสูงที่สุด 200 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากการที่แป้งทำยายม่อมนี้มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง โดยลักษณะการชอบน้ำ (Hydrophilic) ของคาร์โบไฮเดรตนี้ส่งผลให้พลาสติกชีวภาพจากแป้งทำยายม่อมที่สังเคราะห์ได้มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำได้ดี ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำหนักตัวด้วยความร้อน (TGA) ของพลาสติกชีวภาพพบการย่อยสลายของโมเลกุลแป้งประมาณ 80% ที่อุณหภูมิ 245 องศาเซลเซียส สามารถใช้เป็นวัสดุทางเลือกสำหรับการทำปุ๋ยสลายตัวช้าแบบเมทริกซ์ สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ชะลอการชะล้างของไนโตรเจนจากปุ๋ยยูเรีย ช่วยลดการปนเปื้อนในดินและน้ำ ลดมลพิษที่เกิดขึ้นจากการใช้ปุ๋ยเคมี และยังเพิ่มประสิทธิภาพในการให้ธาตุอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการของพืชอีกด้วย

ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวรูปที่ขึ้นรูปจากการนำพลาสติกชีวภาพละลายกับน้ำปราศจากไอออนแล้วเติมปุ๋ยยูเรีย และการผสมปุ๋ยยูเรียไปพร้อมกับการสังเคราะห์พลาสติกชีวภาพนั้นพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณปุ๋ยยูเรียที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 %w/w ปุ๋ยสลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมที่ได้จะมีลักษณะค่อยข้างนิ่ม เหนียว ไม่มีสีและใส เมื่อใส่ปุ๋ยยูเรียในปริมาณน้อยที่ความเข้มข้น 5 และ 10 %w/w ที่ความเข้มข้นปุ๋ยยูเรีย 15 ถึง 20 %w/w ปุ๋ยสลายตัวช้าที่ได้เริ่มมีความเหนียวลดลง มีสีขาว และขุ่น ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้าที่ความเข้มข้นยูเรีย 30 ถึง 40 %w/w จะมีลักษณะแข็ง แตกหักง่าย มีสีขาวขุ่น เนื่องจากปุ๋ยยูเรียมีผลสีขาว สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กับพอลิเมอร์ ไม่ให้เกิดการกลับคืนตัวของพอลิเมอร์ เนื่องจากยูเรียสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งได้ดี ทำให้ปุ๋ยยูเรียสลายตัวช้ามีสีขาว ขุ่น แข็ง และเปราะขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณยูเรีย เมื่อ

เพิ่มปริมาณยูเรียลงในพลาสติกชีวภาพพบการเกาะกลุ่มบนพื้นผิวขนาดใหญ่ขึ้นตามปริมาณยูเรียที่เพิ่มขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรียจากปุ๋ยยูเรียละลายตัวช้าจากแป้งทำยายม่อม (SRAUF) ในน้ำปราศจากไอออนทั้งแบบก้อนกลม (S\_SRUF) ยูเรียความเข้มข้น 5, 10, 15 และ 20 %w/w ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และแบบแผ่น (F\_SRUF) ยูเรียความเข้มข้น 5, 10, 15, 20, 30 และ 40 %w/w ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส หลังจากผ่านไป 24 ชม. พบการปลดปล่อยยูเรียของ F\_SRUF อยู่ที่ 84.3, 91.7, 83.4, 90.9, 85.3 และ 103.2 มิลลิกรัม ตามลำดับ S\_SRUF อยู่ที่ 223.4, 175.7, 190.2 และ 223.4 มิลลิกรัม ตามลำดับ จากผลการวิจัยจะสังเกตได้ว่าปุ๋ยละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมแบบก้อนกลมจะมีการปลดปล่อยยูเรียออกมามากกว่าปุ๋ยละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อมแบบแผ่น สันนิษฐานว่าอาจเกิดจากการกระจายตัวของยูเรียในเมทริกซ์พลาสติกชีวภาพได้ดีกว่าของแบบแผ่น นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อการปลดปล่อยยูเรีย การศึกษาโคเนติกการแพร่ของปุ๋ยยูเรียละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพทั้งแบบก้อนและแบบแผ่น มีค่า  $n$  น้อยกว่า 0.5 ทั้งหมด เป็นการแพร่แบบ Fickian diffusion release from slab (non swellable matrix) เป็นการแพร่ที่แกนเม็ด(ปุ๋ย)ด้านในยังแห้งและอยู่ในสภาพเหมือนแก้ว สรุปได้ว่าปุ๋ยละลายตัวช้าจากพลาสติกชีวภาพแป้งทำยายม่อม (SRAUF) นี้ให้ผลการปลดปล่อยยูเรียที่ดี สามารถลดการสูญเสียไนโตรเจน ชะลอการชะล้าง และเพิ่มประสิทธิภาพการให้ธาตุอาหารที่พืชควรได้รับในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นสามารถใช้แป้งทำยายม่อมมาเป็นเมทริกซ์สำหรับปุ๋ยละลายตัวช้า ด้วยกระบวนการผลิตที่ง่าย และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรศึกษาพฤติกรรมการปลดปล่อยยูเรียที่หลายสภาวะ เช่น อุณหภูมิ ทดสอบในดิน เป็นต้น การเพิ่มระยะเวลาในการทดสอบเป็นสิ่งสมควรศึกษาเพิ่มเติม เพื่อทดสอบว่าปุ๋ยยูเรียปลดปล่อยปริมาณมากน้อยเพียงใดในระยะเวลาที่สอดคล้องกับการเพาะปลูก เพื่อให้สามารถนำไปปรับใช้กับภาคการเกษตรได้ นอกจากนี้ยังควรขึ้นรูปปุ๋ยละลายตัวช้าด้วยวิธีอื่น เช่น วิธีการเคลือบปุ๋ย และควรนำวัสดุชนิดอื่นมาใช้เป็นเมทริกซ์ เพื่อเปรียบเทียบผลการของปลดปล่อยยูเรีย



## บรรณานุกรม

- [1] กระทรวงอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, *การเกษตรอัจฉริยะ (online)*, 2563, Available: <https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/2020/20200313-smart-farming.pdf> (15 ตุลาคม 2563)
- [2] จำเป็น อ่อนทอง และ ศิวัช พงษ์เพ็ญจันทร์, *ปุ๋ยอินทรีย์-ปุ๋ยเคมี เข้าใจสักนิดก่อนจะคิดใช้ หรือ เลิกใช้ (online)*, 2561, Available: <https://m.mgronline.com/daily/detail/96100000921> 55 (15 มกราคม 2564)
- [3] โชคชัย วนภู และ สิริมา พิณเพ็ญจันทร์, *การควบคุมการสูญเสียไนโตรเจน (online)*, 2558, Available: <http://sutir.sut.ac.th:8080/jspui/bitstream/123456789/5688/2/fulltext.pdf> (15 มกราคม 2564)
- [4] J. He, J. Wang, D. He, J. Dong, and Y. Wang. "The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system," *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 54, no. 3-4, pp. 1167-1174, 2011.
- [5] Z. Tian, J. J. Wang, S. Liu, Z. Zhang, S. K. Dodla, and G. Myers, "Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region," *Science of the Total Environment*, vol. 533, pp. 329-338, 2015.
- [6] W. Jarrell and L. Boersma, "Release of urea by granules of sulfur-coated urea," *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 418-422, 1980.
- [7] E. Guertal, "Slow-release nitrogen fertilizers in vegetable production: a review," *HortTechnology*, vol. 19, no. 1, pp. 16-19, 2009.
- [8] M. E. Trenkel, "Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture", International Fertilizer Industry Association, Paris, France, 1997.
- [9] R. Rose, "Slow-release fertilizers 101," In: Dumroese, RK; Riley, LE; Landis, TD, technical coordinators. National proceedings: forest and conservation nursery associations-1999, 2000, and 2001. Proceedings RMRS-P-24. Ogden, UT: US Department of Agriculture Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 304-308, vol. 24, 2002.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [10] M. Likhitha, R. Sailaja, V. Priyambika, and M. Ravibabu, "Microwave assisted synthesis of guar gum grafted sodium acrylate/cloisite superabsorbent nanocomposites: Reaction parameters and swelling characteristics," *International journal of biological macromolecules*, vol. 65, pp. 500-508, 2014.
- [11] R. A. Ramli, "Slow release fertilizer hydrogels: a review," *Polymer Chemistry*, vol. 10, no. 45, pp. 6073-6090, 2019.
- [12] ยงยุทธ โอสภสกา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ขวลิศ ฮงประยูร, "ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน" 2551, กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [13] R. Ciriminna and M. Pagliaro, "Biodegradable and compostable plastics: A critical perspective on the dawn of their global adoption," *ChemistryOpen*, vol. 9, no. 1, p. 8, 2020.
- [14] S. Santibenchakul and P. Sudprasert, "Characterization of starch granules derived from *Tacca leontopetaloides* by green synthesis," in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2010, no. 1: AIP Publishing LLC, p. 020006.
- [15] N. S. M. Makhtar, M. F. M. Rais, M. N. M. Rodhi, N. Bujang, M. Musa, and K. H. K. Hamid, "Tacca Leontopetaloides starch: new sources starch for biodegradable plastic," *Procedia Engineering*, vol. 68, pp. 385-391, 2013.
- [16] กรมพัฒนาที่ดิน กองสำรวจดินและวิจัยทรัพยากรดิน กลุ่มมาตรฐานการสำรวจจำแนกดิน, "ความรู้เรื่องดินสำหรับเยาวชน," กรุงเทพฯ, 2561.
- [17] กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, "การจัดการดินและปุ๋ยอย่างมีประสิทธิภาพ," กรุงเทพฯ: กลุ่มโรงพิมพ์ สำนักพัฒนาการถ่ายทอด เทคโนโลยี, พิมพ์ครั้งที่ 2, 2563.
- [18] ยงยุทธ โอสภสกา, "ธาตุอาหารพืช," กรุงเทพฯ. : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [19] วิจิตร วังไฉ. "ธาตุอาหารกับการผลิตพืชผล = Nutrients and crop production," กรุงเทพฯ: วี.บี. บุ๊คเซ็นเตอร์, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2552.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [20] สำนักสำรวจดินและวางแผนการใช้ที่ดิน กรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. *ปุ๋ยและการใช้ปุ๋ย* (online), 2553, Available: [http://oss101.ldd.go.th/web\\_soils\\_for\\_youth/](http://oss101.ldd.go.th/web_soils_for_youth/) (2 กุมภาพันธ์ 2564)
- [21] กองส่งเสริมการอารักขาพืชและจัดการดินปุ๋ย กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงการเกษตรและสหกรณ์, *ดินและปุ๋ย* (online), 2558, Available: <http://www.ppsf.doae.go.th/> (2 กุมภาพันธ์ 2564)
- [22] United States Environmental Protection Agency, *Nitrogen*(online), 2021, Available: <https://web.archive.org/web/20030419211624/http://www.epa.gov:80/maia/html/nitrogen.html> (12 October 2020)
- [23] ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม, *การบรรเทาการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากภาคเกษตรด้วยสารยับยั้งไนตริฟิเคชัน กรณีศึกษา การผลิตอ้อย* (online), 2021, Available: [https://www.researchgate.net/publication/328161733\\_Mitigation\\_of\\_greenhouse\\_gas\\_emissions\\_from\\_agricultural\\_sector\\_by\\_nitrification\\_inhibitors\\_A\\_case\\_study\\_of\\_sugarcane\\_Phase\\_I](https://www.researchgate.net/publication/328161733_Mitigation_of_greenhouse_gas_emissions_from_agricultural_sector_by_nitrification_inhibitors_A_case_study_of_sugarcane_Phase_I). (2 ธันวาคม 2563)
- [24] ยงยุทธ โอสดสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และ ชวลิต ฮงประยูร, “ปุ๋ยละลายช้า,” กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2554.
- [25] บริษัท ไบโอบีโอดี จำกัด, *พลาสติกชีวภาพ* (online), 2020, Available: <https://www.bioeco.co.th/bioplastics>. (30 มกราคม 2564).
- [26] บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน), *ประเภทของพลาสติกชีวภาพ* (online), 2020, Available: <https://productsandsolutions.pttgcgroup.com/labels/bioplastics>. (30 มกราคม 2564)
- [27] สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน). (2553). *แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ระยะที่ 2* (พ.ศ.2554-2558). กรุงเทพฯ: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- [28] ศรีสักดิ์ สุนทรไชย, สุดาว เลิศวิสุทธิไพบูลย์ และ ภัทรมมา ส โตสิงห์. (2016). พลาสติก ชีวภาพ จาก พืช ทาง การเกษตร ต่อ สุขภาพ และ สิ่งแวดล้อม. *Journal of health and health management*, 3(1), 24-36.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [29] พิฑูร ตีร์วิจิตรเกษม. (2553) มารู้อัจฉกพลาสติกชีวภาพกันเถอะ. วารสาร *Plastics Foresight*, 2(2), น. 1-6.
- [30] สมาคมอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพไทย. (2557). *Bioplastics: Plastics for a Sustainable Choice* ในเอกสารประกอบคำบรรยายการสัมมนาเรื่องพลาสติกชีวภาพ: ทางเลือกที่ยั่งยืน. กรุงเทพฯ: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ.
- [31] สลิตรัตน์ รอดอารี, *บทความพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (online)*, 2013, Available: <http://dspace.bru.ac.th/xmlui/handle/123456789/5650>. (30 มกราคม 2564).
- [32] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, "เทคโนโลยีของแป้ง," กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2546.
- [33] รังรอง ยกถ่าน, "พลาสติกชีวฐาน : โครงสร้าง สมบัติ การแปรรูป และการใช้ประโยชน์," กรุงเทพฯ บริษัท Asia Digital การพิมพ์ จำกัด, 2557.
- [34] A. Buleon, P. Colonna, V. Planchot, and S. Ball, "Starch granules: structure and biosynthesis," *International journal of biological macromolecules*, vol. 23, no. 2, pp. 85-112, 1998.
- [35] R. L. Shogren, G. F. Fanta, and W. M. Doane, "Development of Starch Based Plastics- A Reexamination of Selected Polymer Systems in Historical Perspective," *Starch-Stärke*, vol. 45, no. 8, pp. 276-280, 1993.
- [36] J. M. Herrero-Martinez, P. J. Schoenmakers, and W. T. Kok, "Determination of the amylose-amylopectin ratio of starches by iodine-affinity capillary electrophoresis," *Journal of Chromatography A*, vol. 1053, no. 1-2, pp. 227-234, 2004.
- [37] P. Mischnick and D. Momcilovic, "Chemical structure analysis of starch and cellulose derivatives," *Advances in carbohydrate chemistry and biochemistry*, vol. 64, pp. 117-210, 2010.
- [38] พัชรภรณ์ แสงโยจารย์, จันทรฉัตรฉาย สังเกตกิจ, ภูวิพัฒน์ เกียรติสาครเศศ, ธนภัทรนมส์ไธสง, ณิชภา สารธิยากุล และ จักรินทร์ สนุกแสน, *สมบัติทางเคมี กายภาพ ของแป้ง ทำายายม่อม และสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ (online)*, 2558, Available: [http://ird.rmuti.ac.th/2015/files/2562/File/งานวิจัยเด่น/\(2\).pdf](http://ird.rmuti.ac.th/2015/files/2562/File/งานวิจัยเด่น/(2).pdf)

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [39] ปิติพร ฤทธิเรืองเดช, “คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของแป้งทำยา ยาม่อมและการนำไปใช้ประโยชน์ในขนมชั้น,” กรุงเทพมหานคร: ฐานข้อมูลวิทยานิพนธ์ไทย, 2545.
- [40] S. K. Savale, *Drug release kinetics and mathematical models. Department of Pharmaceutics (online)*, 2016, Available: <https://www.slideshare.net/sagarsavale1/drug-release-kinetics>.
- [41] กริพล แม่นวิวัฒน์กุล, *การขนส่งสาร (Mass transport)* (online), 2012, Available: <https://www.slideshare.net/adriamycin/mass-transport-14037167>
- [42] R. W. Korsmeyer and N. A. Peppas, "Solute and penetrant diffusion in swellable polymers. III. Drug release from glassy poly (HEMA-co-NVP) copolymers," *Journal of Controlled Release*, vol. 1, no. 2, pp. 89-98, 1984.
- [43] J. Siepmann and F. Siepmann, "Mathematical modeling of drug delivery," *International journal of pharmaceutics*, vol. 364, no. 2, pp. 328-343, 2008.
- [44] Y. Tanetrungroj and J. Prachayawarakorn, "Effect of starch types on properties of biodegradable polymer based on thermoplastic starch process by injection molding technique," *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, vol. 37, no. 2, pp. 193-199, 2015.
- [45] H. A. Saffian, K. Abdan, M. A. Hassan, N. A. Ibrahim, S. H. Lee, and M. F. A. Rahman, "Properties of Slow Release Fertilizer Composites Made from Electron Beam-irradiated Poly (Butylene Succinate) Compounded with Oil Palm Biomass and Fertilizer," *BioResources*, vol. 13, no. 4, pp. 8677-8689, 2018.
- [46] S. Pitiphatharaworachot and B. Puangsin, "Effect of glycerol on physical and thermal properties of tapioca starch films," in 55. *Kasetsart University Annual Conference, Bangkok (Thailand)*, 31 Jan-3 Feb 2017, 2017.
- [47] F. Versino, M. Urriza, and M. A. García, "Eco-compatible cassava starch films for fertilizer controlled-release," *International journal of biological macromolecules*, vol. 134, pp. 302-307, 2019.

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [48] K. Alharbi, A. Ghoneim, A. Ebid, H. El-Hamshary, and M. H. El-Newehy, "Controlled release of phosphorous fertilizer bound to carboxymethyl starch-g-polyacrylamide and maintaining a hydration level for the plant," *International journal of biological macromolecules*, vol. 116, pp. 224-231, 2018.
- [49] K. Zhong et al., "Starch derivative-based superabsorbent with integration of water-retaining and controlled-release fertilizers," *Carbohydrate polymers*, vol. 92, no.2, pp. 1367-1376, 2013.
- [50] C. Bai, S. Zhang, L. Huang, H. Wang, W. Wang, and Q. Ye, "Starch-based hydrogel loading with carbendazim for controlled-release and water absorption," *Carbohydrate polymers*, vol. 125, pp. 376-383, 2015.
- [51] D. Qiao et al., "Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer," *Carbohydrate polymers*, vol. 147, pp. 146-154, 2016.
- [52] J. Tarique, S. Sapuan, and A. Khalina, "Effect of glycerol plasticizer loading on the physical, mechanical, thermal, and barrier properties of arrowroot (*Maranta arundinacea*) starch biopolymers," *Scientific reports*, vol. 11, no. 1, pp. 1-17, 2021.
- [53] M. L., Sanyang, S. M. Sapuan, , M. Jawaid, M. R.Ishak and J. Sahari. "Effect of plasticizer type and concentration on physical properties of biodegradable films based on sugar palm (*Arenga pinnata*) starch for food packaging". *Journal of food science and technology*, 53(1), 326-336. 2016.
- [54] P. Boonruam and P. Wattanachai, "EFFECTS OF CHEMICAL COMPOSITIONS OF CHITOSAN-BASED HYDROGEL ON PROPERTIES AND COLLAGEN RELEASE," *ASEAN Engineering Journal*, vol. 11, no. 2, pp. 85-100, 2021..
- [55] L. Hermida and J. Agustian, "Slow release urea fertilizer synthesized through recrystallization of urea incorporating natural bentonite using various binders," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 13, pp. 113-121, 2019

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [56] B. Ni, M. Liu, and S. Lü, "Multifunctional slow-release urea fertilizer from ethylcellulose and superabsorbent coated formulations," *Chemical Engineering Journal*, vol. 155, no. 3, pp. 892-898, 2009.
- [57] M. M. Iftime, G. L. Ailiesei, E. Ungureanu, and L. Marin, "Designing chitosan based eco-friendly multifunctional soil conditioner systems with urea controlled release and water retention," *Carbohydrate polymers*, vol. 223, p. 115040, 2019.
- [58] Franklin, M. E. E., Pushpadass, H. A., Kumar, B., Kulkarni, S., Muthurayappa, M., Kandasamy, R., ... & Vellingiri, P. (2017). Physicochemical, thermal, pasting and microstructural characterization of commercial *Curcuma angustifolia* starch. *Food Hydrocolloids*, 67, 27-36.
- [59] Yu-Wu, Q. M., Weiss-Hortala, E., Barna, R., Boucard, H., & Bulza, S. (2012). Glycerol and bioglycerol conversion in supercritical water for hydrogen production. *Environmental technology*, 33(19), 2245-2255.
- [60] Liu, X., Yu, L., Xie, F., Li, M., Chen, L., & Li, X. (2010). Kinetics and mechanism of thermal decomposition of cornstarches with different amylose/amylopectin ratios. *Starch-Stärke*, 62(3-4), 139-146.
- [61] Nogueira, G. F., Fakhouri, F. M., & de Oliveira, R. A. (2018). Extraction and characterization of arrowroot (*Maranta arundinaceae* L.) starch and its application in edible films. *Carbohydrate Polymers*, 186, 64-72.
- [62] Wang, Y., Zhu, X., Huang, Y., Zheng, C., & Gao, X. (2016). New insights into catalytic pyrolysis mechanisms and reaction pathways of urea pyrolysis on V-Ti catalyst surfaces. *RSC advances*, 6(109), 108000-108009.
- [63] Juha, M. (2012). Novel Materials for Controlled Peptide Delivery: Mesoporous Silicon and Photocrosslinked Poly(ester anhydride)s. *Health Sciences*, 113, 1-125. doi: 10.13140/RG.2.1.1928.3923

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [64] P. L. Ritger and N. A. Peppas, "A simple equation for description of solute release I. Fickian and non-fickian release from non-swellable devices in the form of slabs, spheres, cylinders or discs," *Journal of controlled release*, vol. 5, no. 1, pp. 23-36, 1987.





ภาคผนวก







2021



การประชุมวิชาการราชภัฏเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 6

RMTTC

The 6<sup>th</sup> Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference 2021

# Proceedings

Conference 2021

1-3 กันยายน 2564

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

## Conference Topics

- Production and Operations Management
- Manufacturing Engineering
- Materials Science and Applications
- Supply Chain and Logistics
- Industrial Education
- Technology and Innovation
- Technology and Innovation (International Session)

ดำเนินการจัดงาน (Organizer)

โดย



อำนวยการจัดงาน (Hosts)

โดย



ร่วมจัดงาน (Co-Hosts)

โดย



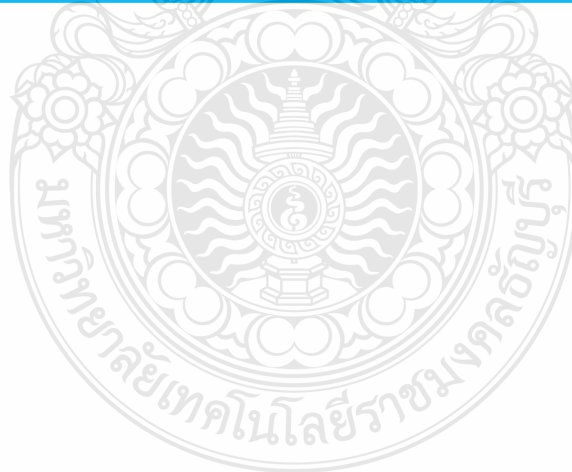
สนับสนุน

โดย



๑-๓ กันยายน ๒๕๖๔

ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



## คำนำ

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ (Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference) หรือ RMTC เป็นงานประชุมวิชาการระดับชาติ ที่เกิดจากการทำงานร่วมกันของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง ๔ แห่ง ที่มีวัตถุประสงค์ร่วมกันเพื่อสร้างเวทีแลกเปลี่ยนข้อมูลด้านวิชาการและการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการอันจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาวิชาการเพื่อต่อยอดงานวิจัย และถ่ายทอดข้อมูลให้แก่ภาคอุตสาหกรรมโดยมีสาขาที่เกี่ยวข้อง ๖ สาขา คือ การจัดการการผลิตและการดำเนินงาน (Production and Operations Management) วิศวกรรมการผลิต (Manufacturing Engineering) วัสดุศาสตร์ และการประยุกต์ใช้งาน (Materials Science and Application) โซ่อุปทานและโลจิสติกส์ (Supply Chain and Logistics) ครุศาสตร์อุตสาหกรรม (Industrial Education) และ เทคโนโลยี และนวัตกรรม (Technology and Innovation) และ เทคโนโลยี และนวัตกรรมระดับนานาชาติ (Technology and Innovation: International Session) ในปี พ.ศ. ๒๕๖๔ นี้ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ได้รับเกียรติให้เป็นเจ้าภาพหลักในการจัดประชุมวิชาการและเครือข่ายจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลทั้ง ๘ แห่ง และองค์กรที่เกี่ยวข้องกับวิชาชีพ ๓ องค์กร คือ สถาบันไทย-เยอรมัน (TGI) สมาคมอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ไทย (TDIA) และสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (NIMT) โดยใช้ชื่อว่า “RMTC 2021” ซึ่งจัดการประชุมวิชาการ ระหว่างวันที่ ๑ ถึง ๓ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๔ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ ในครั้งนี้ คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTC 2021 ได้รวบรวมบทความที่ผ่านการตรวจสอบจากผู้ทรงคุณวุฒิและ ได้นำเสนอในที่ประชุมวิชาการขึ้นเป็นหนังสือรวบรวมบทความวิชาการและบทความวิจัย การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTC 2021 เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยผลงานทางด้านวิชาการ ผลงานสร้างสรรค์ในระดับชาติ ด้านวิศวกรรมเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ หรือสาขาที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งสร้างภาพลักษณ์ที่ดีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลต่อสาธารณชน และเป็นข้อมูลให้แก่นักวิชาการ นักวิจัย และผู้ที่สนใจ ได้ใช้อ้างอิงเพื่อประโยชน์ในการพัฒนาอุตสาหกรรมและประเทศต่อไป

คณะกรรมการดำเนินงานการประชุมวิชาการ  
ราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ RMTC 2021



**ประธานคณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2021**

อาจารย์ ดร.สันติ ไทยยืนวงษ์ (มทร.รัตนโกสินทร์)

**คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2021 ประจำเครือข่าย**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนินท์	มีมนต์	(มทร.ธัญบุรี)	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสพิรุฬห์	วัชรศรีสำเร็จ	(มทร.สุวรรณภูมิ)	รองประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย	ต่อสกุล	(มทร.ธัญบุรี)	กรรมการ
รองศาสตราจารย์สุรสิทธิ์	ระวีวงศ์	(มทร.ศรีวิชัย)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พัชระ	กัญจนกาญจน์	(มทร.สุวรรณภูมิ)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทโชติ	อุดมศรี	(มทร.สุวรรณภูมิ)	กรรมการ
อาจารย์สัญญา	คำจริง	(มทร.สุวรรณภูมิ)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลลิตา	หมอรักษา	(มทร.ตะวันออก)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนรัญชลา	กำไลทอง	(มทร.รัตนโกสินทร์)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นทีชัย	ผัสดี	(มทร.ล้านนา)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมน	ต๋วยแพร่	(มทร.ล้านนา)	กรรมการ
อาจารย์สุทธิพงษ์	จำรูญรัตน์	(มทร.พระนคร)	กรรมการ
อาจารย์ธวัชชัย	ชาติตานาญ	(มทร.พระนคร)	กรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย	จันทร์มณี	(มทร.กรุงเทพ)	กรรมการ
อาจารย์ ดร.ฤทธิชัย	เกาเนียม	(มทร.กรุงเทพ)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัตน์	วรรณศรี	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตติวัฒน์	นิธิกาญจนธาร	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์	ธรรมแสง	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิสิษฐ์	ศรีน้อย	(มทร.อีสาน)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พันธุ์เดช	นนท์แสงโรจน์	(มทร.ตะวันออก)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิรวัดน์	ณ พัทลุง	(มทร.ตะวันออก)	กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูไธดี	สนิ	(มทร.ศรีวิชัย)	กรรมการและเลขานุการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณน	สุจारी	(มทร.รัตนโกสินทร์)	กรรมการและผู้ช่วยเลขานุการ

**คณะกรรมการดำเนินงานประชุมวิชาการ RMTC 2021 ด้านบทความ**

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณน	สุจारी	ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เนรัญชลา	กำไลทอง	รองประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์	มุแก้ม	กรรมการ



### สาขาวิชาในการประชุม

- Production and Operations Management (POM)
- Manufacturing Engineering (MFE)
- Material Science and Application (MSA)
- Supply Chain and Logistic (SCL)
- Industrial Education (IED)
- Technology and Innovation (TAI)
- Technology and Innovation: International Session (TIS)





ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (Reviewer)

ศาสตราจารย์ ดร.อรุณกร	แก่งพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.มณิศรา	พิริยวิรุฒม์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ เดช	เหมือนขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.กัณวีรัช	พลูปราชญ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.กวิณ	สนธิเพิ่มพูน	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ สุรสิทธิ์	ระวีวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	สิทธิเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ชมพูนุท	เกษเศรษฐ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ จันทรรตา	นาควชิตรระกุล	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.ชนนภา	กฤตวราภรณ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์	แก้วพลอย	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา	ศรีสัตยกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทำนอง	ชิดชอบ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิษณุ	ทองขาว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดมพงษ์	เกศศรีพงษ์ศา	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วุฒิชัย	สง่างาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประหยัด	กองสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ขวกร	มุกसान	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทพงศ์	นันทสำเร็จ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาติรี	หอมเขียว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์	ศิริรักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปิยณัฐ	โค่ออน	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรอุมา	ลาสุนนท์	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมเสียง	จันทาสี	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พงษ์พันธ์	ราชภัคดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระชัย	แสงฉาย	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชนะชัย	จุมผา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุรพจน์	วัชรโรภากุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พีรวัตร	ลือสีก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เชียงราย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์	มุแกม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กสิณ	รังสิกรรพุม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิดา	สุนาร์ักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนภฤต	โชติภาวริศ	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัสวรรณ	โกยวานิช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กุลยัทธ	บุญแข่ง	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา	ประสพชัยชนะ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทัศน์	รัตนพันธ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ไวรุจน์	อิมโพ	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต	มณีศรี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กัม	พรประเสริฐ	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรวรรณ	คล้อยภยันต์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุปัทธรา	ศรีญาณลักษณ์	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วุฒิ	หมอรักษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณน	สุจาร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชูไฮติ	สนิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาณุเดช	แสงสีดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ โอริส	มณีสาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม	ศิวาฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรีสิทธิ์	เจียรบุตร	มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อุษาวดี	อินทร์คล้าย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
อาจารย์ ดร.ชำนาญ	พลุสวัสดี	มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา
อาจารย์ ดร.กิตติ	วีโรจรัตน์ภาพิศาล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
อาจารย์ ดร.เศรษฐภูมิ	เถาชารี	มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร
อาจารย์ ดร.วิเรชา	คำจันทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร
อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์	เถื่อนแก้วสิงห์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น
อาจารย์ ดร.อาจารย์	แสงเสถียร	มหาวิทยาลัยราชภัฏกาฬสินธุ์
อาจารย์ ดร.สุริยา	จิรสถิตสิน	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อาจารย์ ดร.ธัชชัย	พุ่มพวง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ ดร.ทศพร	จูนิม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อาจารย์ ดร.พิชานันท์	วงศ์ศิริธร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.นรงค์	วิชาผา	มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์
อาจารย์ ดร.สาลินี	สันติธีรากุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
อาจารย์ ดร.วิทวัส	สิงห์สังข์	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

อาจารย์ ดร.สิทธิชัย	แช่เหล็ม	มหาวิทยาลัยศิลปากร
อาจารย์ ดร.สุนิสา	คำสุข	มหาวิทยาลัยบูรพา
อาจารย์ ดร.อุกฤษฏ์	ธนทรัพย์ทวี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
อาจารย์ ดร.ศักดิ์ดา	คำจันทร์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ สกลนคร
อาจารย์ ดร.นรา	สมัตถภาพงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
อาจารย์ ดร.ประชุม	คำฟูผ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อาจารย์ ดร.ธีรวุฒิ	เชื่อนแก้ว	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี
อาจารย์ ดร.วิทยา	ดาวดอน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ ดร.สุสิทธิ์	ป่าไร่	มหาวิทยาลัยนเรศวร
อาจารย์ ดร.รุ่งสันท	ไกรกลาง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา
อาจารย์ ดร.โรสมารินทร์	สุขเกษม	มหาวิทยาลัยบูรพา
อาจารย์ ดร.กัญญารัตน์	นิมิตระกูล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจักรพงษ์ภูวนารถ
อาจารย์ ดร.นิชาณัช	เกษมุกดา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
อาจารย์ ดร.ปิยะพงษ์	คำคุณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
อาจารย์ ดร.กฤษฎา	เหล็กดี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
อาจารย์ ดร.วรญา	เนื่องมัจฉา	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์



## กำหนดการประชุมวิชาการ

การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ครั้งที่ 6

(Rajamangala Manufacturing and Management Technology Conference : RMTTC 2021)

ระหว่างวันที่ 1-3 กันยายน 2564 ณ โรงแรมหัวหินแกรนด์ แอนด์ พลาซ่า อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

วันที่ 2 กันยายน 2564

เวลา	รายละเอียด
08.30 - 09.00 น.	ลงทะเบียน ณ ห้องสมอเรียง ชั้น 2
09.00 - 09.20 น.	- พิธีเปิด - พิธีกรกล่าวทักทาย และนำชมวีดิทัศน์แนะนำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชชมงคลรัตนโกสินทร์ - กล่าวต้อนรับผู้เข้าร่วมการประชุมวิชาการ โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิวะ วสุนธราภิวัฒก์ อธิการบดี - กล่าวรายงานการจัดประชุมวิชาการ โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภร ภิญโญฉัตรจินดา รองอธิการบดี
09.20 - 09.35 น.	- กล่าวเปิดการประชุมวิชาการ โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงฤทธิ เบ็ญจาทิกุล ชัยรุ่งเรือง เลขาธิการรัฐมนตรีว่าการกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
09.35 - 10.00 น.	- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิวะ วสุนธราภิวัฒก์ อธิการบดี มอบของที่ระลึกแก่ ประธาน (ถ่ายภาพหมู่ชุดที่ 1) มอบของที่ระลึกแก่ ผู้บรรยายพิเศษ ผู้ร่วมเสวนา และมอบโล่ขอบคุณเจ้าภาพร่วม (ถ่ายภาพหมู่ชุดที่ 2)
10.00 - 10.30 น.	- บรรยายพิเศษ เรื่อง บทบาทของกระทรวง อว. เพื่อขับเคลื่อนมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชชมงคล โดย ศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ปทุมนากุล รองปลัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม
10.45 - 12.00 น.	- เสวนา เรื่อง ระบบ SMART LOGISTICS กับมาตรฐานเพื่อการขับเคลื่อนภาคอุตสาหกรรมของประเทศ โดย ศาสตราจารย์ ดร.ระพีพันธ์ ปิตาคะโส มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา เศรษฐนันท์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ นางอัจฉรา เจริญสุข ผู้อำนวยการสถาบันมาตรฐานแห่งชาติ
12.00 - 13.00 น.	- รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 17.00 น.	- การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ประจำปี 2564 ช่วงที่ 1
18.00 - 18.30 น.	- พิธีมอบรางวัลบทความวิจัยดีเด่น โดย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิวะ วสุนธราภิวัฒก์ อธิการบดี ณ ห้องบอลรูม 1 ชั้น 2
18.30 - 20.00 น.	- รับประทานอาหารเย็น ณ ห้องบอลรูม 1 ชั้น 2

วันที่ 3 กันยายน 2564

เวลา	รายละเอียด
09.00 - 12.00 น.	- การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ประจำปี 2564 ช่วงที่ 2
12.00 - 13.00 น.	- รับประทานอาหารกลางวัน
13.00 - 17.00 น.	- การประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ประจำปี 2564 ช่วงที่ 3
18.00 - 20.00 น.	- ประชุมเครือข่ายคณะกรรมการ RMTC

หมายเหตุ : รับประทานอาหารว่าง ช่วงเช้าเวลา 10.30 - 10.45 น. และช่วงบ่ายเวลา 14.30 - 14.45 น.

กำหนดการอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม



ตารางการนำเสนอบทความ

ประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิตและการจัดการ ประจำปี 2564 (RMTC 2021)

วันที่ 2 กันยายน 2564

ประชุมวิชาการราชชมงคลด้านเทคโนโลยีการผลิต และการจัดการ ประจำปี 2564 ช่วงที่ 1						
Room	1	2	3	4	5	6
Session Chair	ผศ.ดร.อนันท์ มีมนต์	ผศ.ดร.จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร	ดร.พิชานันท์ วงศ์ศิริธร	ผศ.ดร.สุวิทย์ ธรรมแสง	ผศ.ดร.วรพจน์ ศิริลักษณ์	รศ.ดร.สมศักดิ์ แก้วพลอย
Session Co-Chair	ผศ.ดร.กัม พรประเสริฐ	ผศ.ชูไธสี สนิ	ผศ.ดร.คณน สุจारी	ผศ.ดร.สุภัค เผียงสูงเนิน	ผศ.จตุพร ใจดำรงค์	ผศ.เนรัญชลา กำไลทอง
13.00-13.15 น.	POM-101	MFE-201	IED-501	TAI-601	MSA-301	SCL-401
13.15-13.30 น.	POM-102	MFE-202	IED-502	TAI-602	MSA-302	SCL-402
13.30-13.45 น.	POM-103	MFE-203	IED-503	TAI-603	MSA-306	SCL-403
13.45-14.00 น.	POM-104	MFE-204	TIS-702	TAI-607	MSA-307	SCL-405
14.00-14.15 น.	POM-105	MFE-205	TIS-704	TAI-608	MSA-308	SCL-406
14.15-14.30 น.	POM-106	MFE-206	TIS-705	TAI-609	MSA-309	SCL-407
14.30-14.45 น.	พัก					
14.45-15.00 น.	POM-107	MFE-207		TAI-610	MSA-310	SCL-408
15.00-15.15 น.	POM-108	MFE-208		TAI-613	MSA-312	SCL-409
15.15-15.30 น.	POM-110	MFE-209		TAI-614	MSA-313	
15.30-15.45 น.	POM-111	MFE-210		TAI-616	MSA-314	
15.45-16.00 น.	POM-112	MFE-211			MSA-315	
16.00-16.15 น.					MSA-316	
16.15-16.30 น.					MSA-317	
16.30-16.45 น.					MSA-318	
16.45-17.00 น.						

## สารบัญ

		หน้า
MFE-245	การแก้ปัญหาหารอบเวลากระบวนการป้อนสัญญาณด้วยเทคนิคการตรวจสอบแนวเชื่อม เครื่องเคลือบกระจกของเครื่องเคลือบกระจกโทรทรรศน์ วุฒิพงษ์ นิลปะนันท์ สกลทวี ปราบูรณ์ล้อม จิตติวัฒน์ นิธิกาญจนธาร สุรัชย์ ผ่องอำไพ สำเริง ดั่งวงนิล และ เต็มชาย ป่ารุ่งเกาะ	398
MFE-246	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการชุบผิวแข็งระหว่างสารเพิ่มคาร์บอนชนิดผงและชนิดเม็ดที่ผสมสาร กระตุ้นผงเปลือกหอยแครงในกระบวนการแพ็คคาร์เบอร์โรซิง อภิสิทธิ์ คบทองกลาง ณรงค์ศักดิ์ ธรรมโชติ สมบัติ น้อยมิ่ง อมรศักดิ์ มาใหญ่ วรณา ทอมจะบก	404
MFE-247	พัฒนากระบวนการผลิตรถเข็นขนสินค้า กรณีศึกษา ปรกช สิริสุวรรณ พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์ ศิริชัย ต่อสกุล และวิเชียร เกื้อนเครือวัลย์	411
MFE-248	การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคนสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมและการพยากรณ์ ค่าความขรุขระผิวในการกลึงคว้านรูในเหล็กกล้าคาร์บอน จรัญ ธรรมใจ จุฬาลักษณ์ โจนานุกูล และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	418
MFE-249	อิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนต่อการเชื่อมเหล็กกล้าความแข็งแรงสูงที่ผ่านการชุบแข็ง และอบคืนตัว 690 เมกะปาสคาล ด้วยกระบวนการเชื่อมมิก ณัฐ แก้วสกุล เรืองศักดิ์ ภูธรราช และชัยรัตน์ หงส์ทอง	429
MFE-252	การหาค่าที่เหมาะสมของกระบวนการย้าหางปลา A-2435 กับสายไฟขนาด 0.5 sq.mm <sup>2</sup> โดยประยุกต์วิธีพื้นผิวตอบสนอง ก้าวหน้า จงวัฒนารักษ์ เฉลิมศักดิ์ อารวรรค์ และฤทธิชัย สังขทิพย์	436
MFE-253	อิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการขึ้นรูปแบบต่อเนื่องโดยการสัมผัสเป็นจุด ธงชัย เพ็งจันทร์ตี สมควร แววดี และศิริชัย ต่อสกุล	446
MFE-254	อิทธิพลของกระบวนการครีดยึดผิวแข็งที่มีผลต่อความหยาบผิวของวัสดุเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง เกรด AISI 1045 สุทธิวิส แววดี พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์ และศิริชัย ต่อสกุล	453
MFE-256	พฤติกรรมการติดตัวของวัสดุเหล็กกล้าไร้สนิม เกรด SUS 304 ในกระบวนการพับแบบไวบิงตายน นพวิชัย คงคาทะนะ และพันธุ์พงษ์ คงพันธุ์	460
MFE-257	การศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการสึกหรอของคมตัดมีดกัดที่ผ่านการลับคมในการกัดชิ้นงาน เหล็กกล้าคาร์บอน S50C บุญส่ง จงกลณี จิรวุฒน์ ใจอู๋ ชูไฮดี สนิ และ อนันท์ มีมนต์	466
<b>Material Science and Application (MSA) จำนวน 28 บทความวิจัย</b>		
MSA-301	การศึกษาอิทธิพลของปริมาณธาตุสังกะสีจากเหล็กหล่อใช้ซ้ำที่มีผลต่อความกลมของอนุภาคแกรไฟต์ ในงานหล่อเหล็กหล่อเหนียว ศักดิ์สิทธิ์ โจรณ์ฤทธากร สุรพงศ์ บางพาน	477
MSA-302	Preparation and Release Characteristic of Slow Release Urea from Arrowroot-based Bioplastic Yada Boonyakiat, Somtop Santibenchakul, Sumonman Niamlang	484



รหัสบทความ MSA-302

## Preparation and Release Characteristic of Slow Release Urea from Arrowroot-based Bioplastic

Yada Boonyakiat<sup>1</sup> Somtop Santibenchakul<sup>2</sup> Sumonman Niamlang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Material and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering,  
Rajamangala University of Technology Thunyaburi

<sup>2</sup> Department of Science and Mathematics, Faculty of Science and Technology,  
Rajamangala University of Technology Tawan-ok

E-mail: sumonman.n@en.rmutt.ac.th \*

### Abstract

A novelty of slow release fertilizer (SRF) based on bioplastic precursor from arrowroot starch (BPAs) was synthesized by a simple method. Granular urea release fertilizer was created by applying arrowroot starch as biodegradable coating substance and glycerol as a binder. Firstly, the bioplastic fertilizer composites based on arrowroot starch was synthesized and characterized. The results showed that the degree of swelling and the percentage of weight loss increase with time. Therefore, BPAs can be a candidate used as SRF matrix. Finally, spherical shape of urea loaded BPAs with different concentration was synthesized by sol gel technique. FT-IR spectrophotometer was used to identify functional groups of urea, BPAs and urea loaded BPAs. There is no emerging peak can be observed for urea loaded BPAs. The release behavior of BPAs with various concentrations was investigated by applying ultraviolet spectroscopy analysis. The release profile of BPAs can be described by Fickian diffusion model. Therefore, SRF with BPAs composites was a new class of cost-saving, environment-friendly and ease production process of slow release urea fertilizer.

**Keywords:** Arrowroot starch, urea, slow release fertilizer, bioplastic

### 1. Introduction

Recently, the pollutant from farms which can contaminate the environment was concerned. The exceed nutrient from fertilizer polluted soil and water. The environment friendly and effective fertilizer delivery system was focused. There are many methods to increase the delivery efficiency such as

development control system for fertilizer and improving fertilizer components [1].

Slow release fertilizer (SRF) system is the system that released chemical material into a nutrient to the plant. The rate of fertilizer release of SRF is lower than the conventional method [2]. The advantages of SRF are nutrient enhancement and





utilization. SRF from a natural material is not only inexpensive but also can significantly delay the leaching of nutrients in fertilizers [3]. Thus, SRF was focused as the effective fertilizer delivery system. Recently, SRF matrix was made from natural fibers, alginate, cellulose and starch. Many SRF was already in market such as, clay minerals (attapulgit, montmorillonite, bentonite and kaolin), sulfur, polymer (superabsorbent polymer, poly(acrylic acid), poly(acrylamide) and copolymer) [4],[5]. Urea is one of important fertilizer which can deliver nitrogen to plants. Urea was selected as model fertilizer in this research work.

Bioplastics are plastics that use as environmentally friendly packaging which are getting a lot of attention today. Biobased polymer is a polymer derived from natural sources in addition of some additives and accelerator. It can be degraded at certain time and temperature [6]. Arrowroot starch can be extracted from *Tacca leontopetaloides* L. Kuntze (green stem *Tacca*) [7]. Arrowroot starch can be raw material for bioplastic [8]. The SRF which made from environmentally friendly bioplastic will be studied in this research work. Bioplastic precursor from ARS (BPAs) was prepared as SRF matrix. The percentage of swelling and weight loss of BPAs was investigated. The release characteristic and kinetic of urea loaded BPAs was study at 25 °C, pH of 7 for 24 hr. To study the release kinetic model, difference amounts of urea are loaded into BPAs. The SRF matrix from ARS will be alternative material from natural resource and ease process.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Materials

Urea was selected as model fertilizer (AR grade, Sigma Aldrich). Bioplastic precursor from ARS (BPAs) was synthesized from arrowroot starch (ARS). ARS was purchased from Chonburi province, Thailand. Glycerol (AR grade, Ajax-Finechem (Univar)) was used as received.

### 2.2 Preparation of bioplastic precursor from ARS (BPAs) from Arrowroot starch

Bioplastic precursor from ARS (BPAs) was synthesized by the sol gel technique [9]. Firstly, amount of the ARS was dissolved with deionized water (100 ml) to form a clear solution at room temperature. To increase the processability, the glycerol was dropped into the obtained starch solution at concentration of 2 %wt. The starch solution was then stirred until the homogeneous solution was obtained. Finally, the solution was rinsed on the tray that covered with aluminium foil. Then, the BPAs was dried at 60 °C for 48 hr.

### 2.3 Urea loaded BPAs preparation

The BPAs (10 g) were dissolved in distilled water at 70 °C for 2 hr. To study the release kinetic model, difference amount of urea was loaded into BPAs, urea was added into the BPAs solution at concentration of 5, 10, 15 and 20%wt for BPAsU5, BPAsU10, BPAsU15 and BPAsU20, respectively. The mixture was then stirred at 70 °C for 2 hr. The mixture was cooled down at room temperature and cast into spherical shape mold (diameter of 3±0.5 cm). The urea loaded BPAs was dried at room temperature for 24 hr.

### 2.4. BPAs and Urea loaded BPAs Characterizations

The degrees of swelling and the weight losses of prepared BPAs were firstly calculated from the following equation [10] :



$$\text{Degree of swelling (\%)} = \frac{M - M_d}{M_d} \times 100 \quad (1)$$

where M is the sample weight after submersion in the solution for 24 h,  $M_d$  is the sample weight after submersion in the water for 24 h and after removal of the water in its dry state.

To study the chemical bonding between urea and matrix, the functional group of urea, BPAs and urea loaded BPAs was characterized by FT-IR spectrophotometer.

To study the release kinetic model, the release characteristic of BPAsU5, BPAsU10, BPAsU15 and BPAsU20 was then characterized. The release characteristic was studied at room temperature for 24 hr. The release media used in this study were deionization water (100 mL). The urea loaded BPAs was placed in release media. The 3 mL of the solution was collected to determine the amount of urea released at 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 480, 960 and 1440 minutes. The UV-visible spectrophotometer determined the amount of urea released at the wavelength of 190 nm.[11]

The release kinetic of urea from urea loaded BPAs was studied by Peppas equation[12]:

$$Q_t = kt^n \quad (2)$$

where  $Q_t$  is a fraction of urea released in water at time  $t$ ,  $k$  is the kinetic constant, ( $m^{-1}$ ),  $t$  is time of urea release (m) and  $n$  is the diffusion exponent. The exponent  $n$  for Fickian diffusion release from from slab (non swellable matrix).

### 3. Results

#### 3.1 Bioplastic precursor from ARS (BPAs) characterization

To study the swelling and weight loss of BPAs, BPAs was submersed in the DI water for 24 h. The degree of swelling of BPAs was shown in Fig. 1. The degree of swelling of BPAs increase with time and reach 200% after submerging in DI water 24 hr. This result shows a good swelling behaviour which suggest BPAs as smart materials for controlled and slow delivery of drugs and agricultural products. [13, 14] The percentage of weight loss of BPAs increased up to 57% for 12 hr and remained constant until 24 hr. Saffian et al. [15] studied the properties of SRF composites made from poly(butylene succinate) (PBS). The percentage of weight loss of the bioplastic fertilizer composites in soil burial test is 54% for 24 week. Thus, these BPAs can be used as alternative SRF matrix.

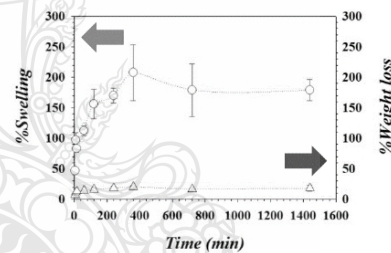


Figure 1 Degree of swelling and weight loss of BPAs.

The functional group of urea, BPAs and urea loaded BPAs was characterized by performing FT-IR spectrophotometer as shown in Fig 2. In the FT-IR spectrum for urea loaded BPAs, it was detected peaks at around 3344, 2932 and 1150  $cm^{-1}$  is corresponding to OH group of BPAs and urea, C-H stretching of BPAs and C-O-C of BPAs, respectively. The new emerging peak can not be observed, thus interaction between urea and BPAs might not be occurred.

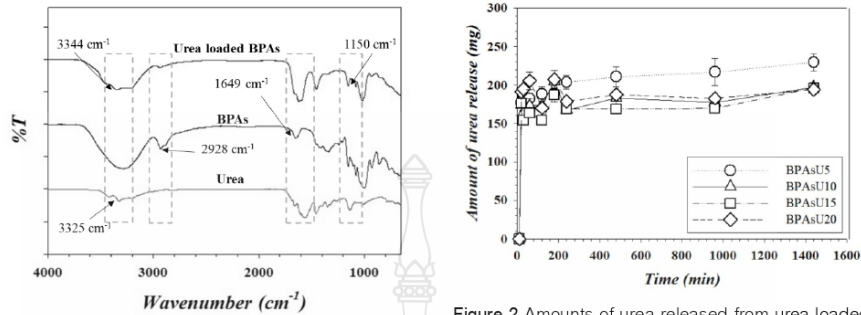


Figure 2 FT-IR spectrum of urea loaded BPAs, BPAs and Urea

Figure 2 Amounts of urea released from urea loaded BPAs at 25 °C

### 3.2 Release characteristic

The release characteristic of samples were determined by UV-visible spectrophotometer. This results showed the amount of urea released gradually increases with increasing time and reach the equilibrium value at 1000 min. To study the release kinetic model, difference amount of urea was loaded into BPAs. The release kinetic was studied by Peppas equation  $Q_t = Kt^n$  non-Fickian release (anomalous) meaning that release follow both diffusion and erosion controlled mechanisms and zero order release are  $n \leq 0.5$ ,  $0.5 < n < 1.0$  and  $n = 1$ , respectively [16]. The exponent  $n$  is 0.05, 0.04, 0.05 and 0.04 for BPAsU5, BPAsU10, BPAsU15 and BPAsU20, respectively. Thus the release mechanism of urea from urea loaded BPAs can be described by Fickian diffusion release from slab (non swellable matrix) model.

### 4. Conclusion

The urea loaded BPAs were successfully prepared. The degree of swelling and weight loss of BPAs was studied. The degree of swelling of BPAs increase with time and reach the maximum at 200%. The amount of urea released gradually increases with increasing time controlling by Fickian diffusion. Thus these BPAs can be candidate for SRF matrix which was prepared from environmental friendly resource.

### 5. References

- [1] He, J., Wang, J., He, D., Dong, J. and Wang, Y. "The design and implementation of an integrated optimal fertilization decision support system", *Mathematical and Computer Modelling*, 54: (2011), pp 1167–1174.
- [2] Trenkel, M.E. "Controlled-Release and Stabilized Fertilizers in Agriculture", International Fertilizer Industry Association, Paris, France, 1997.
- [3] Rose, R. "Slow Release Fertilizers 101", National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-1 999, 2000, and 2001,



- Proceedings RMRS-P-24, Oregon, (2002), pp 304–308.
- [4] Likhitha, M., Sailaja, R.R.N., Priyambika, V.S. and Ravibabu, M.V. "Microwave Assisted Synthesis of Guar Gum Grafted Sodium Acrylate/Cloisite Superabsorbent Nanocomposites: Reaction Parameters and Swelling Characteristics", *International Journal of Biological Macromolecules*, 65, (2014), pp 500-508.
- [5] Ramli, R.A. "Slow release fertilizer hydrogels: a review", *Polymer Chemistry*, 10(45), (2019), pp 6073–6090.
- [6] Ciriminna, R and Pagliaro, M. " Biodegradable and Compostable Plastics: A Critical Perspective on the Dawn of their Global Adoption" , *ChemistryOpen* (2020), Vol.9, pp 8–13.
- [7] Santibenchakul, S. and Sudprasert, P. "Characterization of starch granules derived from *Tacca leontopetaloides* by green synthesis", *AIP conference Proceedings*, (2010), 020006
- [8] Makhtar, N.S.M., Rais, M.F.M., Rodhi, M.N.M., Bujang, N., Musa, M., Hamid, K.H.K. "Tacca leontopetaloides starch: new sources starch for biodegradable plastic", *Procedia Eng* 68 (2013), pp 385–391.
- [9] Wright, J.D., Sommerdijk N.A.J.M., "Sol-gel Materials Chemistry and Applications", *Advanced Chemistry Text*, CRC Press, London, 2001.
- [10] Taepaiboon, P., Rungsardthong, U. and Supaphol P. "Drug Loaded Electrospun Mats of Poly(Vinyl Alcohol) Fibres and Their Release Characteristics of Four Model Drugs", *Nanotechnology* (2006), Vol. 17, No. 9, pp. 2317–2329.
- [11] Filuyowicz, Z., Lukaszewski, K. and Pieszynski, K. "Remarks o spectra-photometric monitoring of urea in dislysate", *Journal of medical informatics amd technologies*, 8(2004), pp 1642–6037.
- [12] Li, X.Y., Yang, Q., Ouyang, J., Yang, H. M. and Chang, S. "Chitosan modified halloysite nanotubes as emerging porous microspheres for drug carrier", *Applied Clay Science*, 126(2016), pp 306–312
- [13] Piyachat Wattanachai, "Development of Chitosan Film Containing Collagen", (2017) Available from: [http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/bitstream/handle/1234567890/3770/2563\\_266.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://dspace.lib.buu.ac.th/xmlui/bitstream/handle/1234567890/3770/2563_266.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- [14] Siepmann, J and S. "Mathematical modeling of drug delivery", *Int. J. Pharm*, 364, (2008), 328–343
- [15] Saffian, H.A., Abdan, K., Hassan, M.A., Ibrahim, N.A., Lee, S.H. and Rahman, M.F.A. "Properties of slow release fertilizer composites made from electron beam-irradiated poly(Butylene Succinate) compounded with oil palm biomass and fertilizer", *Bioresource technology*, 13(2018), pp 8677–8689
- [16] Korsmeyer, R.W., and Peppas, N. A. "Solute and penetrant diffusion in swellable polymers. III. Drug release from glassy poly(HEMA-co-NVP) copolymers", *Journal of Controlled Release*, 1(1984), pp 89–98

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล นางสาวญาดา บุญเกียรติ  
วัน เดือน ปีเกิด 14 กุมภาพันธ์ 2540  
ที่อยู่ 10 ม. 1 ต. สามแยก อ. วิเชียรบุรี จ. เพชรบูรณ์ 67130  
การศึกษา ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและวัสดุ  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี  
เบอร์โทรศัพท์ 09-4743-9816  
อีเมล yada\_b@mail.rmutt.ac.th

